



COPPE/UFRJ

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE PASTAS DE
CIMENTAÇÃO FIBROSAS**

Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego
Fairbairn

Rio de Janeiro
Agosto de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE PASTAS DE
CIMENTO LEVES E FIBROSAS PARA POÇOS DE PETRÓLEO

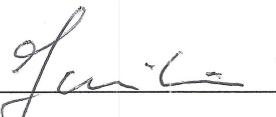
Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

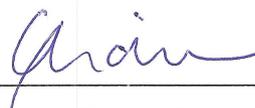
Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.



Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr. Ing.



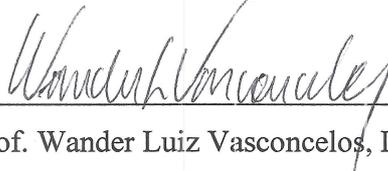
Prof. Guilherme Chagas Cordeiro, D. Sc.



Dr.ª. Cristiane Richard de Miranda, D. Sc.



Prof. Luis Marcelo Marques Tavares, Ph. D.



Prof. Wander Luiz Vasconcelos, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2010

Balthar, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado

Caracterização físico-química e mecânica de pastas de cimentação fibrosas/ Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XXXIV, 346 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 286-296.

1. Pastas leves para cimentação. 2. Fibras. 3. Caracterização Mecânica. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus pais, Nilton e Graça,
ao meu esposo Jadir e aos meus filhos Jadir e Luísa.*

Agradecimentos

Mais uma etapa de minha vida profissional está se finalizando. Certamente eu não teria conseguido realizar um trabalho tão extenso sem a colaboração de pessoas tão especiais, que me ajudaram de maneiras distintas.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde, pelo conforto durante os momentos difíceis e pelos amigos que me proporcionou.

Aos professores e orientadores Romildo e Eduardo, que acreditaram em mim e investiram seu escasso tempo na orientação deste trabalho. Muito obrigada pelos ensinamentos, pela compreensão, pela paciência e pela dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do CENPES/Petrobras, que me ajudaram em tudo que precisei com muita disposição: Cláudio, Ronaldo, Thiago, Silvio, William e Cristina. De forma singular, agradeço à Cristiane, ao Gabriel e à Aline.

Às secretárias do Labest, Luzidelle e Sandra, pela presteza na solução de diversas questões para facilitar o desenvolvimento do trabalho.

Aos técnicos, Clodoaldo, Flávio e Eduardo, pelas moldagens e realização de alguns ensaios. Ao Sr. Júlio e Alessandro, pela preparação dos corpos-de-prova para os ensaios mecânicos e de estabilidade, mesmo em momentos que a marcação não foi realizada.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ: Anísio, Arnaldo, Flávio, Santiago, José Maria, Manoel, Rosângela. Aqueles que trabalharam no Labest e não estão mais conosco: Ailton e Hostiano. De forma singular, agradeço a Bruna, que trabalhou arduamente durante um período neste trabalho.

Às ex-alunas de iniciação científica, Helena, Mônica e Patrícia, pela dedicação e interesse.

Às minhas amigas, das quais sempre me lembrarei com carinho e gratidão, Cíntia e Maria Rita, pois foram grandes companheiros em todas as etapas deste trabalho.

De forma singular agradeço aos amigos Ederli, João, Margareth, Guilherme, Reila, Silvano, Rosana e Camila pelo apoio.

Aos meus amados pais e minhas queridas irmãs, pelo carinho, amizade e incentivo. Papai e mamãe, muito obrigada por tudo que abriram mão em suas vidas em prol da minha educação.

Ao meu amado marido Jadir, eu agradeço em especial porque nos momentos mais difíceis estava comigo me orientando e me acalmando. Meu amor, em suas atitudes você sempre me ensinou a buscar o conhecimento.

À minha filhinha Luísa, que mesmo insatisfeita com minha ausência sempre se mostrou amorosa. Ao meu filho Jadir, que sempre se mostrou carinhoso.

À D. Dulce e à Ana Maria, que dedicaram seu tempo aos meus filhos, cuidando deles com amor e zelo para que eu pudesse me ausentar com tranquilidade.

À Holcim e à Cimesa pela doação de todo cimento utilizado durante a realização dos estudos experimentais.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE PASTAS DE CIMENTAÇÃO FIBROSAS

Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar

Agosto/2010

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho foram desenvolvidas e caracterizadas pastas leves de alto desempenho e pastas fibrosas para a aplicação em cimentação de poços de petróleo. A dosagem dos materiais granulares das pastas foi realizada visando sua máxima compacidade, por meio do modelo de empacotamento compressível (MEC). As pastas leves de alto desempenho foram avaliadas quanto às propriedades mecânicas, físicas, térmicas e de variação dimensional. A pasta que apresentou melhor comportamento foi escolhida para o recebimento do reforço fibroso, que foi realizado com as fibras de volastonita, PVA e polipropileno. O reforço fibroso com fibras de PVA e polipropileno foi efetuado almejando benefícios na capacidade de deformação da matriz frágil. Além disso, o reforço fibroso de microfibras de volastonita foi feito com o objetivo de se aumentar a resistência mecânica da matriz. Todas as pastas do trabalho foram avaliadas quanto à reologia, água livre, estabilidade, massa específica e filtrado. As pastas fibrosas também foram caracterizadas quanto às suas propriedades mecânicas, por meio de ensaios de compressão uniaxial e triaxial, de tração na flexão e de tração por compressão diametral. A ampla caracterização realizada representa uma contribuição à indústria do petróleo em relação ao comportamento das pastas. Além disso, os resultados alcançados mostram os benefícios que uma pasta de cimentação pode sofrer com o acréscimo de fibras em sua dosagem.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PHYSICAL-CHEMICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF FIBER
REINFORCED OILWELL SLURRIES

Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar

August/2010

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Department: Civil Engineering

In this thesis, we developed and characterized high performance lightweight and fiber reinforced oilwell cement slurries. The proportion of the granular materials was established within the framework of the Compressive Packing Model (CPM) with the aim of maximizing the compacity of the granular mix. The physical, thermal and dimensional properties of the high performance lightweight slurries were evaluated. Then, the slurry that presented the best properties was reinforced with wollastonite, PVA and polypropylene fibers. All slurries were characterized for rheology, free water, stability, density and fluid loss. Besides the fresh state behavior the mechanical properties through uniaxial and triaxial compression tests, flexural and splitting tension tests were also evaluated. PVA and polypropylene fibers were used to improve the ductility of the brittle matrix, while wollastonite was used to increase its mechanical strength. The comprehensive study here presented is a contribution to the oil industry indicating the benefits of the use of fibers in oilwell cement slurries.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
CAPÍTULO 2	CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	8
2.1	INTRODUÇÃO	8
2.2	MATÉRIAS PRIMAS PARA PASTAS DE CIMENTAÇÃO	12
2.2.1	<i>Materiais Cimentícios.....</i>	<i>13</i>
2.2.1.1	Cimentos	13
2.2.1.2	Outros Materiais Cimentícios.....	15
2.2.2	<i>Adições</i>	<i>17</i>
2.2.2.1	Materiais Adensantes	18
2.2.2.2	Materiais Estendedores	18
2.2.3	<i>Aditivos Químicos.....</i>	<i>21</i>
2.2.3.1	Aditivos Aceleradores e Retardadores de Pega	22
2.2.3.2	Aditivos Antiespumantes	22
2.2.3.3	Aditivos Superplastificantes.....	23
2.2.4	<i>Controladores de Filtrado.....</i>	<i>30</i>
2.2.5	<i>Reforço Fibroso.....</i>	<i>30</i>
CAPÍTULO 3	PASTAS LEVES PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	TÉCNICAS DE DOSAGENS DE PASTAS LEVES	35
3.3	MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC) DE PARTÍCULAS	40
3.3.1	<i>Modelo de Empacotamento Virtual.....</i>	<i>40</i>
3.3.1.1	Mistura Binária sem Interação	41
3.3.1.2	Mistura Binária com Interação Parcial.....	43
3.3.2	<i>Modelo de Empacotamento Real.....</i>	<i>45</i>
CAPÍTULO 4	PASTAS FIBROSAS PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO...47	

4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	FIBRAS DE AÇO, CARBONO, BASALTO, VIDRO E POLIPROPILENO	49
4.3	MICROFIBRA DE VOLASTONITA	53
4.4	FIBRA A BASE DE SÍLICA.....	56
4.4.1	<i>Poços no México</i>	57
4.4.1.1	Poço Copano 32	57
4.4.1.2	Poço Cantarell 1087-D.....	58
4.4.1.3	Poços SY-36 e SB-356.....	60
4.4.2	<i>Poços no Nordeste dos E. U. A.</i>	62
CAPÍTULO 5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....		64
5.1	INTRODUÇÃO	64
5.2	DOSAGEM DAS PASTAS LEVES DE ALTO DESEMPENHO.....	67
5.2.1	<i>Compatibilidade e Ponto de Saturação entre os Materiais Cimentícios e os Aditivos Químicos das Pastas P1, P2 e P3</i>	71
5.3	DOSAGEM DAS PASTAS FIBROSAS DE ALTO DESEMPENHO	74
5.3.1	<i>Pasta de Referência</i>	74
5.3.2	<i>Pastas Reforçadas com Microfibra de Volastonita</i>	76
5.3.3	<i>Pastas Reforçadas com Fibras de PVA</i>	77
5.3.4	<i>Pastas Reforçadas com Fibras de Polipropileno</i>	80
5.4	PREPARO, HOMOGENEIZAÇÃO E CURA DAS PASTAS	85
5.4.1	<i>Pastas Leves de Alto Desempenho</i>	85
5.4.2	<i>Pastas Leves Fibrosas de Alto Desempenho</i>	88
CAPÍTULO 6 METODOLOGIAS DE ENSAIO		92
6.1	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	92
6.1.1	<i>Composição Química</i>	92
6.1.2	<i>Distribuição Granulométrica</i>	93
6.1.3	<i>Massa Específica</i>	94
6.1.4	<i>Superfície Específica</i>	95
6.1.5	<i>Compacidade Experimental</i>	96
6.1.6	<i>Compatibilidade e Ponto de Saturação</i>	98
6.2	PROPRIEDADES DAS PASTAS NO ESTADO FRESCO	100

6.2.1	<i>Água Livre</i>	100
6.2.2	<i>Filtrado</i>	101
6.2.3	<i>Massa Específica Aparente</i>	103
6.2.4	<i>Reologia</i>	104
6.2.5	<i>Evolução da Resistência à Compressão</i>	108
6.3	PROPRIEDADES DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO	109
6.3.1	<i>Propriedades Mecânicas</i>	109
6.3.1.1	Comportamento sob Compressão Uniaxial	109
6.3.1.2	Comportamento sob Compressão Triaxial	112
6.3.1.3	Comportamento sob Tração por Compressão Diametral.....	118
6.3.1.4	Comportamento sob Tração na Flexão.....	120
6.3.2	<i>Propriedades Físicas e de Durabilidade</i>	124
6.3.2.1	Estabilidade.....	124
6.3.2.2	Absorção Total, Índice de Vazios e Massa Específica	126
6.3.2.3	Absorção de Água por Capilaridade.....	127
6.3.2.4	Ataque por Ácido	129
6.3.3	<i>Propriedades Térmicas</i>	131
6.3.3.1	Calor Específico.....	131
6.3.3.2	Difusividade Térmica.....	134
6.3.3.3	Coefficiente de Dilatação Térmica	136
6.3.4	<i>Varição Dimensional – Retração Autógena e Fluência</i>	138
6.3.4.1	Retração Autógena.....	139
6.3.4.2	Fluência na Compressão.....	146
6.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	151
CAPÍTULO 7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PASTAS LEVES DE ALTO DESEMPENHO		152
7.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	152
7.1.1	<i>Cimentos</i>	152
7.1.2	<i>Sílica Ativa</i>	155
7.1.3	<i>Materiais Estendedores</i>	156
7.1.4	<i>Sílica 120#</i>	159

7.1.5	<i>Aditivos Químicos</i>	161
7.1.6	<i>Fibras</i>	162
7.1.6.1	Microfibra de Volastonita	162
7.1.6.2	Fibras de PVA e de Polipropileno.....	163
7.1.7	<i>Água</i>	163
7.1.8	<i>Sumário das Propriedades dos Materiais</i>	164
7.2	PROPRIEDADES DAS PASTAS NO ESTADO FRESCO	167
7.2.1	<i>Reologia</i>	167
7.2.2	<i>Água Livre</i>	169
7.2.3	<i>Perda de Fluido</i>	170
7.2.4	<i>Massa Específica Aparente</i>	171
7.2.5	<i>Evolução da Resistência à Compressão</i>	171
7.3	PROPRIEDADES DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO	176
7.3.1	<i>Comportamento Mecânico</i>	176
7.3.1.1	Comportamento sob Compressão Uniaxial	176
7.3.1.2	Comportamento sob Compressão Triaxial	185
7.3.1.3	Comportamento sob Tração por Compressão Diametral.....	189
7.3.1.4	Comportamento sob Tração na Flexão.....	192
7.3.2	<i>Comportamento Físico</i>	195
7.3.2.1	Estabilidade.....	195
7.3.2.2	Absorção Total, Índice de Vazios e Massa Específica	196
7.3.2.3	Absorção de Água por Capilaridade.....	198
7.3.2.4	Ataque por Ácido	200
7.3.3	<i>Comportamento Térmico</i>	203
7.3.3.1	Calor Específico.....	203
7.3.3.2	Difusividade Térmica.....	205
7.3.3.3	Condutividade Térmica	205
7.3.3.4	Coefficiente de Dilatação Térmica	206
7.3.4	<i>Variação Dimensional</i>	208
7.3.4.1	Retração Autógena	208
7.3.4.2	Fluência na Compressão.....	211

CAPÍTULO 8	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PASTAS LEVES FIBROSAS DE ALTO DESEMPENHO	216
8.1	ESTABILIDADE, REOLOGIA E ÁGUA LIVRE	216
8.1.1	<i>Pasta de Referência com Diferentes Teores de Superplastificante</i>	<i>216</i>
8.1.2	<i>Pastas Reforçadas com 2,5% de Volastonita</i>	<i>220</i>
8.1.3	<i>Pastas Reforçadas com 5,0% de Volastonita</i>	<i>223</i>
8.1.4	<i>Pastas Reforçadas com 7,5% de Volastonita</i>	<i>225</i>
8.1.5	<i>Pasta Reforçada com 10,0% de Volastonita.....</i>	<i>228</i>
8.1.6	<i>Pastas Reforçadas com Fibras de PVA.....</i>	<i>230</i>
8.1.7	<i>Pastas Reforçadas com Fibra de Polipropileno.....</i>	<i>233</i>
8.2	SUMÁRIO: REOLOGIA E ESTABILIDADE DAS PASTAS OTIMIZADAS.....	236
8.3	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	239
8.4	PERDA DE FLUIDO	240
8.5	PROPRIEDADES DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO	244
8.5.1	<i>Comportamento sob Compressão Uniaxial.....</i>	<i>244</i>
8.5.1.1	<i>Pastas Reforçadas com Volastonita.....</i>	<i>244</i>
8.5.1.2	<i>Pastas Reforçadas com PVA.....</i>	<i>249</i>
8.5.1.3	<i>Pastas Reforçadas com Polipropileno.....</i>	<i>252</i>
8.5.2	<i>Comportamento sob Compressão Triaxial.....</i>	<i>256</i>
8.5.3	<i>Comportamento sob Tração por Compressão Diametral.....</i>	<i>264</i>
8.5.3.1	<i>Pastas Reforçadas com Volastonita.....</i>	<i>264</i>
8.5.3.2	<i>Pastas Reforçadas com PVA.....</i>	<i>265</i>
8.5.3.3	<i>Pastas Reforçadas com Polipropileno.....</i>	<i>267</i>
8.5.4	<i>Comportamento sob Tração na Flexão.....</i>	<i>269</i>
8.5.4.1	<i>Pastas Reforçadas com Volastonita.....</i>	<i>269</i>
8.5.4.2	<i>Pastas Reforçadas com PVA.....</i>	<i>273</i>
8.5.4.3	<i>Pastas Reforçadas com Polipropileno.....</i>	<i>276</i>
8.5.4.4	<i>Índices de Tenacidade.....</i>	<i>277</i>
CAPÍTULO 9	CONCLUSÕES	282
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	286
	ANEXOS	297

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Ilustração de uma sonda marítima (ROCHA e AZEVEDO, 2007); (b) Ilustração de revestimentos (THOMAS <i>et al.</i> , 2001).....	10
Figura 2 – (a) Esquema de poço com falha na cimentação primária (THOMAS <i>et al.</i> , 2001); (b) Ilustração da cimentação por compressão (Adaptado de NELSON e GUILLOT, 2006).	12
Figura 3 – Micrografias da microesferas SG, obtida por microscopia eletrônica de varredura: (a) Aumento de 30 vezes; (b) Aumento de 250 vezes (MIRANDA, 2008)..	21
Figura 4 – Microscopia ótica de uma microesfera oca de vidro (MIRANDA, 2008)....	21
Figura 5 – Esquematisação da floculação.	23
Figura 6 – Causas de aglomeração de partículas: (a) Força de <i>Van der Waals</i> ; (b) Força eletrostática; (c) Ação da gravidade; (d) Força mecânica; (e) Ponte líquida; (f) Ponte sólida.....	25
Figura 7 – Esquematisação da dupla camada elétrica ao redor de uma partícula (MIRANDA, 2008).	26
Figura 8 – Mecanismos de estabilização de partículas: (a) Estabilização estérica; (b) Estabilização eletroestérica. Adaptado de FORMAGINI (2005).....	27
Figura 9 – Ilustração de uma formação fraca (ABBAS <i>et al.</i> , 2001).	35
Figura 10 – Ilustração do empacotamento de partículas (AL-SUWAIDI <i>et al.</i> , 2001)..	36
Figura 11 – Compacidade virtual de uma mistura binária.	43
Figura 12 – (a) Esquema da solução do problema; (b) Esquema da disposição final (SIMBALA <i>et al.</i> , 2005).	48
Figura 13 – (a) Ilustração do sistema de distribuição do tamanho de partículas com fibras ; (b) Cubo da pasta de referência após ensaio de resistência ao impacto; (c) Cubo da pasta fibrosa após ensaio de resistência ao impacto (EL HASSAN <i>et al.</i> , 2006).....	52
Figura 14 – Geometria do corpo-de-prova de tração direta (HEINOLD <i>et al.</i> , 2002)...	54
Figura 15 – Geometria dos corpos-de-prova: (a) Tração por compressão diametral; (b) Tração direta (HEINOLD <i>et al.</i> , 2003).	56

Figura 16 – (a) Fibras a base de sílica (ROMERO <i>et al.</i> , 2004); (b) Ilustração do preenchimento de uma fratura por uma pasta leve empacotada fibrosa (EL-HASSAN <i>et al.</i> , 2003).....	57
Figura 17 – Programa experimental das pastas leves de alto desempenho.	65
Figura 18 – Programa experimental das pastas leves fibrosas de alto desempenho.....	66
Figura 19 – Entrada de dados no MEC_COPPE 1.0.	67
Figura 20 – Análise das misturas no MEC_COPPE 1.0.	68
Figura 21 – Gráficos da compacidade granular obtidos utilizando-se o MEC_COPPE 1.0.	68
Figura 22 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 1.	72
Figura 23 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 2.	72
Figura 24 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 3.	73
Figura 25 – Aspectos da pasta P2G0,25PVA0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	78
Figura 26 – Aspectos da pasta P2G0,30PVA0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	79
Figura 27 – Aspectos da pasta P2G0,30PVA1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	80
Figura 28 – Aspectos da pasta P2G0,35PVA1,00: (a) Vista superior; (b) Detalhe da segregação.	80
Figura 29 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	81
Figura 30 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	82
Figura 31 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	82
Figura 32 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	83

Figura 33 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	83
Figura 34 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	84
Figura 35 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	84
Figura 36 – Misturadores de palhetas Chandler: capacidade de 1 litro (à esquerda) e capacidade de 4 litros (à direita).....	87
Figura 37 – (a) Consistômetro atmosférico; (b) Cura dos corpos-de-prova durante as primeiras 24 horas.	88
Figura 38 – (a) Banho de aquecimento e resfriamento; (c) Banho de armazenamento..	91
Figura 39 – Equipamento <i>Shimadzu Modelo EDX 800</i> utilizado para determinação das composições químicas dos materiais.....	92
Figura 40 – Granulômetro a laser <i>Malvern Mastersizer</i>	93
Figura 41 – Equipamento <i>Sedigraph 5100</i> (VELASCO, 2008).....	94
Figura 42 – Equipamento Picnômetro a gás <i>AccuPyc 1330</i>	95
Figura 43 – Equipamentos Blaine automático <i>BSAI</i>	96
Figura 44 – Equipamentos necessários para a realização do ensaio de demanda d’água: (a) Balança; (b) Misturador.	97
Figura 45 – Ponto de demanda d’água: (a) Estado pendular; (b) Estado capilar.	98
Figura 46 – Misturador (à esquerda) e Funil de Marsh com proveta graduada (à direita).	99
Figura 47 – Ensaio de água livre em proveta graduada.....	101
Figura 48 – Ensaio de filtrado: (a) Filtro-prensa; (b) Partes da célula do filtro-prensa; (c) Sistema de aquecimento da célula.	102
Figura 49 – Ensaio de filtrado: (a) Mangueira de entrada do N ₂ acoplada na válvula da célula; (b) Medição da fase líquida perdida durante o ensaio; (c) Aspecto da pasta após o ensaio.....	102

Figura 50 – Balança de lama utilizada na determinação da massa específica aparente.	104
Figura 51 – Ensaio de reologia: (a) Viscosímetro Chandler; (b) Conjunto rotor-bob R1-B1.	105
Figura 52 – Contribuição das fases sólida e líquida à resistência ao cisalhamento (Adaptado de DE LARRARD, 1999).....	108
Figura 53 – UCA do LABEST/PEC/COPPE/UFRJ.....	109
Figura 54 – Ensaio de compressão axial: (a) Prensa de ensaios <i>Wykeham Farrance</i> ; (b) Corpo-de-prova com transdutores elétricos.....	110
Figura 55 – Ensaio de compressão axial: (a) Prensa de ensaios <i>Shimadzu UH-F</i> ; (b) Corpo-de-prova com transdutores elétricos e extensômetros.....	111
Figura 56 – Ensaio de compressão triaxial: (a) Posicionamento do corpo-de-prova na célula de confinamento; (b) Fechamento da célula de confinamento; (c) Célula de confinamento na prensa; (d) Detalhe da fixação do transdutor elétrico.....	113
Figura 57 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.	115
Figura 58 – Esquema de um ensaio de compressão triaxial. Adaptado de ROCHA e AZEVEDO (2007).....	116
Figura 59 – Esquema de um ensaio de compressão triaxial: Adaptado de ROCHA e AZEVEDO (2007).....	116
Figura 60 – Esquema para o Critério de Mohr-Coulomb: (a) No espaço $\tau \times \sigma$; (b) No espaço $\sigma_1 \times \sigma_3$	118
Figura 61 – Prensa de ensaios <i>Shimadzu UH-F</i> com ensaio de tração por compressão diametral.	119
Figura 62 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) Corpo-de-prova posicionado na prensa; (b) Corte de disco.	120
Figura 63 – Ensaio de tração na flexão: (a) Prensa de ensaios <i>Shimadzu UH-F</i> ; (b) Corpo-de-prova posicionado na prensa.	121
Figura 64 – Curva carga <i>versus</i> deflexão de um ensaio de flexão (Segundo a ASTM C1018).	122

Figura 65 – Curva carga <i>versus</i> deflexão de um ensaio de flexão (Segundo a NBN B15-238).....	124
Figura 66 – Ensaio de estabilidade: (a) Inserção da pasta no molde; (b) Moldes no banho térmico.	125
Figura 67 – Ensaio de estabilidade: (a) Desforma dos corpos-de-prova; (b) Preparo para o corte; (c) Medição de massa.	126
Figura 68 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) Corpo-de-prova após secagem e selagem; (b) Ensaio em curso com diferentes corpos-de-prova.	128
Figura 69 – Gráfico típico da absorção de água por capilaridade <i>versus</i> a raiz quadrada do tempo. Adaptado de FONTES (2008).	129
Figura 70 – Ensaio de ataque por ácido.....	131
Figura 71 – Ensaio de calor específico: (a) Moldagem dos corpos-de-prova da pasta P2; (b) Corpo-de-prova da pasta P2.....	133
Figura 72 – Ensaio de calor específico: (a) Calorímetro isotérmico; (b) Ensaio em andamento.....	133
Figura 73 – Ensaio de calor específico: (a) Pesagem da água destilada; (b) Corpo-de-prova inserido no calorímetro; (c) Inserção do aquecedor no centro do corpo-de-prova.	134
Figura 74 – Ensaio de calor específico: (a) Inserção da tampa interna; (b) Inserção da paina; (c) Inserção da tampa externa.	134
Figura 75 – Ensaio de difusividade térmica: (a) Moldagem de corpo-de-prova da pasta P3; (b) Corpos-de-prova da pasta P3.....	135
Figura 76 – Ensaio de difusividade térmica: (a) Tanque de aquecimento do corpo-de-prova; (b) Tanque de resfriamento do corpo-de-prova.....	136
Figura 77 – Moldagem: (a) Detalhe do extensômetro <i>Carlson</i> inserido no interior do molde; (b) Preenchimento do molde; (c) Colocação do disco.....	138
Figura 78 – Ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear: (a) Salas climatizadas; (b) Medição de deformação.....	138

Figura 79 – Detalhes da moldagem das amostras de retração autógena: (a) Molde com teflon; (b) Detalhe do pino para posicionamento na base para leitura; (c) Preenchimento com pasta até a metade da altura do molde.	140
Figura 80 – Detalhes da moldagem das amostras de retração autógena: (a) Posicionamento do termopar; (b) Preenchimento final do molde; (c) Vedação do molde com filme plástico.	140
Figura 81 – Medição da variação de temperatura.....	141
Figura 82 – Preparo dos moldes para colocação dos relógios: (a) Retirada de parafuso de fixação; (b) Detalhe da placa do molde sem os parafusos de fixação.	141
Figura 83 – Preparo dos moldes para colocação dos relógios: (a) Retirada do parafuso; (b) Posicionamento do relógio comparador.....	142
Figura 84 – Configuração da primeira etapa do ensaio de retração autógena.....	142
Figura 85 – Configuração da segunda etapa do ensaio de retração.....	143
Figura 86 – Terceira etapa do ensaio de retração: (a) Detalhe do relógio digital; (b) Barra de referência; (c) Corpo-de-prova posicionado para leitura.	144
Figura 87 – Esquema da distância interna livre entre os pinos.	145
Figura 88 – Preparo do molde: (a) Molde cilíndrico; (b) Fixação do termômetro e do extensômetro no molde (VELASCO, 2008).....	147
Figura 89 – Preparo do corpo-de-prova: (a) Selagem após a moldagem; (b) Selagem do corpo-de-prova com filme plástico; (c) Selagem do corpo-de-prova com fita de alumínio; (d) Corpo-de-prova com abraçadeiras (Fonte: VELASCO, 2008).	148
Figura 90 – Aparelhos para medição de deformação e de temperatura (Fonte: VELASCO, 2008).	148
Figura 91 – Preparo dos corpos-de-prova para o carregamento: (a) Colocação no pórtico; (b) Bomba e linhas de pressão.	149
Figura 92 – Ensaio de fluência das pastas leves de alto desempenho.	151
Figura 93 – Distribuição granulométrica das partículas dos cimentos CPP - classe G e CPP – classe especial.....	155
Figura 94 – Distribuição granulométrica das partículas da sílica ativa.....	156

Figura 95 – Microesferas: (a) Cerâmica; (b) De vidro.....	157
Figura 96 – Distribuições granulométricas das microesferas.....	159
Figura 97 – Sílica 120#.....	159
Figura 98 – Distribuição granulométrica da sílica 120#.....	160
Figura 99 – Microfibra de volastonita.....	162
Figura 100 – Fibras: (a) PVA; (b) Polipropileno.....	163
Figura 101 – Distribuições granulométricas dos materiais granulares.....	165
Figura 102 – Gráficos tensão de cisalhamento x taxa de deformação das pastas P1, P2 e P3.....	168
Figura 103 – Exemplo de pasta gelificada.....	169
Figura 104 – Ensaio de água livre das pastas: (a) P1; (b) P2; (c) P3.....	170
Figura 105 – Resistência à compressão da pasta P1.....	172
Figura 106 – Resistência à compressão da pasta P2.....	173
Figura 107 – Resistência à compressão da pasta P3.....	173
Figura 108 – Gráficos de resistência à compressão no tempo das pastas P1, P2 e P3.....	174
Figura 109 – Curvas típicas tensão x deformação da pasta P1.....	176
Figura 110 – Curvas típicas tensão x deformação da pasta P2.....	177
Figura 111 – Curvas típicas tensão x deformação da pasta P3.....	177
Figura 112 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P1.....	179
Figura 113 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P2.....	179
Figura 114 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P3.....	180
Figura 115 – Resultados da pasta P1 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.....	181
Figura 116 – Resultados da pasta P2 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.....	182

Figura 117 – Resultados da pasta P3 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.	183
Figura 118 – Modos de ruptura das pastas leves após 1 dia de cura: (a) Pasta P1;.....	184
Figura 119 – Modos de ruptura das pastas leves após 28 dias de cura: (a) Pasta P1; ..	184
Figura 120 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P1.....	186
Figura 121 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P2.....	186
Figura 122 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P3.....	187
Figura 123 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P1: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$	189
Figura 124 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$	189
Figura 125 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P3: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$	189
Figura 126 – Relações entre os resultados de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial aos 28 dias das pastas leves de alto desempenho.....	191
Figura 127 – Modos de ruptura da pasta P1 após o ensaio de tração por compressão diametral.	191
Figura 128 – Modos de ruptura da pasta P2 após o ensaio de tração por compressão diametral.	192
Figura 129 – Modos de ruptura da pasta P3 após o ensaio de tração por compressão diametral.	192
Figura 130 – Relações entre os resultados de tração na flexão e de compressão uniaxial aos 28 dias das pastas leves de alto desempenho.	194
Figura 131 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas ensaiados para a determinação da resistência à tração na flexão: (a) Pasta P1; (b) Pasta P2; (c) Pasta P3.	194
Figura 132 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias x índice de vazios das pastas leves de alto desempenho.	197

Figura 133 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias x massa específica das pastas leves de alto desempenho.	198
Figura 134 – Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade <i>versus</i> raiz quadrada do tempo das pastas leves.	199
Figura 135 – Corpo-de-prova da pasta P3: (a) Antes do ataque; (b) Após o ataque....	201
Figura 136 – Variação do calor específico com a temperatura das pastas P1, P2 e P3.	204
Figura 137 – Coeficientes médios das pastas P1, P2 e P3.....	207
Figura 138 – Curvas médias da retração autógena nos primeiros 35 dias.....	208
Figura 139 – Curvas médias de variação de temperatura.....	210
Figura 140 – Fluência básica das pastas com fase elástica.....	212
Figura 141 – Fluência básica das pastas sem fase elástica.....	212
Figura 142 – Fluência específica máxima <i>versus</i> 1/E.	214
Figura 143 – Modelo da Cadeia de Maxwell Generalizada.	214
Figura 144 – Coeficientes de fluência das pastas leves.....	215
Figura 145 – Propriedades reológicas x teor de superplastificante das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.	218
Figura 146 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25.	219
Figura 147 – Comparação entre as propriedades reológicas das pastas P2 e P2G0,25: (a) Limite de escoamento, gel inicial e gel final; (b) Viscosidade Plástica.	220
Figura 148 – Propriedades reológicas x teor de superplastificante das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5.	221
Figura 149 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25V2,5.	222
Figura 150 – Propriedades reológicas x teor de superplastificante das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.	224
Figura 151 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30V5,0:	225
Figura 152 – Resultados de ΔME das pastas com 7,5% volastonita e diferentes teores de superplastificante.	228
Figura 153 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,40V7,5.	228

Figura 154 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,40V10,0.	230
Figura 155 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25PVA0,50: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.	232
Figura 156 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PVA1,00: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.	233
Figura 157 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PP0,50: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.	235
Figura 158 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PP0,75: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.	236
Figura 159 – Curvas de fluxo das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.	237
Figura 160 – Valores médios de limite de escoamento, gel inicial e gel final das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.	237
Figura 161 – Valores médios de viscosidade plástica das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.	238
Figura 162 – Resultados de ΔME das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.	238
Figura 163 – Comparação entre as massas específicas das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.	240
Figura 164 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.	241
Figura 165 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de PVA e a pasta de referência.	242
Figura 166 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de polipropileno e a pasta de referência.	243
Figura 167 – Curvas típicas tensão \times deformação das pastas reforçadas com volastonita.	244
Figura 168 – Comparação entre os módulos de elasticidade das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.	246

Figura 169 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25.....	247
Figura 170 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25V2,5.....	247
Figura 171 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30V5,0.....	248
Figura 172 – Modo de ruptura da pasta P2G0,40V7,5.....	248
Figura 173 – Modo de ruptura da pasta P2G0,40V10,0.....	248
Figura 174 – Curvas típicas tensão x deformação das pastas reforçadas com PVA....	249
Figura 175 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25PVA0,50.....	251
Figura 176 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PVA1,00.....	251
Figura 177 – Curvas típicas tensão x deformação das pastas reforçadas com polipropileno.....	252
Figura 178 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PP0,50.	255
Figura 179 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PP0,75.	255
Figura 180 – Critério de ruptura de <i>Mohr-Coulomb</i> da pasta P2G0,25.	257
Figura 181 – Critério de ruptura de <i>Mohr-Coulomb</i> da pasta P2G0,30V5,0.	258
Figura 182 – Critério de ruptura de <i>Mohr-Coulomb</i> da pasta P2G0,25PVA0,50.	259
Figura 183 – Critério de ruptura de <i>Mohr-Coulomb</i> da pasta P2G0,30PP0,50.....	260
Figura 184 – Comparação entre propriedades das pastas fibrosas obtidas no ensaio triaxial com a pasta de referência: (a) Coesão; (b) Ângulo de atrito.....	261
Figura 185 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,25:.....	261
Figura 186 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,30V5,0:.....	262
Figura 187 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,25PVA0,50: (a) $\sigma_3 = 4\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 8\text{MPa}$	263
Figura 188 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,30PP0,50: .	263
Figura 189 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com volastonita com a pasta de referência.	265
Figura 190 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com PVA.	267

Figura 191 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral: (a) Pastas reforçadas com polipropileno em relação à pasta de referência; (b) Valores das resistências das pastas fibrosas relativas à primeira fissura e pós-fissuração.	268
Figura 192 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25 e das pastas reforçadas com microfibras de volastonita.	269
Figura 193 – Comparação entre as propriedades relativas à ruptura: (a) Resistência à tração na flexão; (b) Deslocamentos das pastas.	271
Figura 194 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas da pasta P2G0,25: (a) corpos-de-prova CP1, CP2 e CP3; (b) corpos-de-prova CP4, CP5, CP6 e CP7.	272
Figura 195 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,25V2,5; (b) Pasta P2G0,30V5,0.	272
Figura 196 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,40V7,5; (b) Pasta P2G0,40V10,0.	273
Figura 197 – Curvas força x deslocamento das pastas reforçadas com fibra de PVA.	274
Figura 198 – Comparação entre as propriedades relativas à primeira fissura: (a) Resistência à tração na flexão; (b) Deslocamentos.	275
Figura 199 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,25PVA0,50; (b) Pasta P2G0,30PVA1,00.	275
Figura 200 – Curvas carga x deslocamento das pastas reforçadas com fibra de polipropileno.	276
Figura 201 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,30PP0,50; (b) Pasta P2G0,30PP0,75.	277
Figura 202 – Índices de tenacidade segundo a norma japonesa: (a) Pastas reforçadas com PVA; (b) Pastas reforçadas com polipropileno.	279
Figura 203 – Índices de tenacidade segundo a norma ASTM C1018 das pastas reforçadas com fibras de PVA e de polipropileno.	281
Figura 204 – Aspectos da pasta P2G0,35PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	313

Figura 205 – Aspectos da pasta P2G0,40PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	313
Figura 206 – Aspectos da pasta P2G0,45PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	313
Figura 207 – Aspectos da pasta P2G0,50PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	314
Figura 208 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	315
Figura 209 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	315
Figura 210 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	315
Figura 211 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	316
Figura 212 – Aspectos da pasta P2G0,45PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	316
Figura 213 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	317
Figura 214 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	317
Figura 215 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	317
Figura 216 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.	318
Figura 217 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 1 dia.....	319
Figura 218 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 3 dias.	320
Figura 219 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 28 dias.	320
Figura 220 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 na idade de 1 dia.....	321
Figura 221 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 na idade de 3 dias.	321

Figura 222 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 na idade de 28 dias.....	322
Figura 223 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 na idade de 1 dia.....	322
Figura 224 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 na idade de 3 dias.....	323
Figura 225 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 na idade de 28 dias.....	323
Figura 226 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25.....	324
Figura 227 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25V2,5.....	325
Figura 228 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30V5,0.....	325
Figura 229 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,40V7,5.....	326
Figura 230 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,40V10,0...	326
Figura 231 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25PVA0,50.	327
Figura 232 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PVA1,00.	327
Figura 233 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PP0,50.	328
Figura 234 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PP0,75.	328
Figura 235 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 com tensão confinante igual a 2MPa.....	329
Figura 236 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 com tensão confinante igual a 6MPa.....	330
Figura 237 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 com tensão confinante igual a 2MPa.....	330
Figura 238 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 com tensão confinante igual a 6MPa.....	331
Figura 239 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 com tensão confinante igual a 2MPa.....	331
Figura 240 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 com tensão confinante igual a 6MPa.....	332

Figura 241 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25 com tensão confinante igual a 4 MPa.....	332
Figura 242 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25 com tensão confinante igual a 8 MPa.....	333
Figura 243 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 2 MPa.....	333
Figura 244 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 4 MPa.....	334
Figura 245 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 8 MPa.....	334
Figura 246 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25PVA0,50 com tensão confinante igual a 4 MPa.....	335
Figura 247 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25PVA0,50 com tensão confinante igual a 8 MPa.....	335
Figura 248 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 2 MPa.....	336
Figura 249 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 4 MPa.....	336
Figura 250 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 8 MPa.....	337
Figura 251 – Curvas carga x deslocamento da pasta P1 na idade de 28 dias.	338
Figura 252 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2 na idade de 28 dias.	338
Figura 253 – Curvas carga x deslocamento da pasta P3 na idade de 28 dias.	339
Figura 254 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25.	339
Figura 255 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25V2,5.	340
Figura 256 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30V5,0.	340
Figura 257 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,40V7,5.	341
Figura 258 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,40V10,0.	341

Figura 259 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25PVA0,50.	342
Figura 260 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PVA1,00.	342
Figura 261 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PP0,50.....	343
Figura 262 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PP0,75.....	343
Figura 263 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P1.....	344
Figura 264 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P2.....	344
Figura 265 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P3.....	345
Figura 266 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P1.....	345
Figura 267 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P2.....	346
Figura 268 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P3.....	346

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos químicos do CPP – classe G e CPP – classe especial segundo a ABNT (ABNT NBR 9831, 2006).....	14
Tabela 2 – Requisitos físicos do CPP – classe G e CPP – classe especial segundo a ABNT (ABNT NBR 9831, 2006).....	15
Tabela 3 – Tipos de dispersantes adotados na confecção de misturas cimentícias.	29
Tabela 4 – Índices de compactação.	46
Tabela 5 – Composição granular das pastas P1, P2 e P3.	69
Tabela 6 – Teores dos aditivos químicos.....	73
Tabela 7 – Proporcionamento dos materiais das pastas P1, P2 e P3 (kg/m ³)......	74
Tabela 8 – Composição da Pasta P2G0,25.	75
Tabela 9 – Fator da tensão de cisalhamento do viscosímetro para o “BOB” B1 e fator da constante elástica da mola F1.	107
Tabela 10 – Composições químicas dos cimentos.	153
Tabela 11 – Propriedades físicas dos cimentos.	154
Tabela 12 – Composição química da sílica ativa.	155
Tabela 13 – Composições químicas das microesferas.	158
Tabela 14 – Composição química da sílica 120#.	160
Tabela 15 – Características dos aditivos químicos.....	161
Tabela 16 – Composição química da microfibras de volastonita.	162
Tabela 17 – Compacidades experimentais dos materiais granulares.	166
Tabela 18 – Propriedades reológicas das pastas P1, P2 e P3.	169
Tabela 19 – Filtrados das pastas leves de alto desempenho.....	171
Tabela 20 – Resultados de resistência à compressão das pastas leves de alto desempenho.	174
Tabela 21 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial.	178

Tabela 22 – Tensões desviatórias das pastas P1, P2 e P3.....	185
Tabela 23 – Coesão e ângulo de atrito interno das pastas leves de alto desempenho. .	188
Tabela 24 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas leves de alto desempenho.	190
Tabela 25 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas leves de alto desempenho.	193
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de estabilidade das pastas leves de alto desempenho.	195
Tabela 27 – Resultados de absorção de água, índice de vazios, massa específica e relação a/mc das pastas leves de alto desempenho.....	196
Tabela 28 – Resultados de ponto de transição, absorvidade e relação a/mc das pastas leves de alto desempenho.	199
Tabela 29 – Resultados de perda de massa das pastas leves de alto desempenho.	201
Tabela 30 – Calor específico de cada pasta.....	204
Tabela 31 – Difusividade térmica das pastas leves de alto desempenho.....	205
Tabela 32 - Condutividades térmicas das pastas leves.....	206
Tabela 33 – Coeficientes de dilatação térmica linear das pastas.....	207
Tabela 34 – Retrações autógenas das pastas em algumas idades.....	209
Tabela 35 – Consumos de materiais cimentícios, de água e relação a/mc das pastas..	209
Tabela 36 – Resistência à compressão e fluências (específica e irreversível) das pastas.	213
Tabela 37 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.....	217
Tabela 38 – Estabilidades das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.....	219
Tabela 39 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5.	221
Tabela 40 – Estabilidades das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5...	222
Tabela 41 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.	223
Tabela 42 – Estabilidades das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.	225

Tabela 43 – Propriedades reológicas da pasta P2G0,40V7,5.....	226
Tabela 44 – Estabilidades das pastas P2G0,35V7,5, P2G0,40V7,5, P2G0,45V7,5, P2G0,50V7,5, P2G0,60V7,5 e P2G0,65V7,5.	227
Tabela 45 – Deflexões medidas durante os ensaios de reologia da pasta P2G0,40V10,0.	229
Tabela 46 – Estabilidades das pastas P2G0,40V10,0, P2G0,45V10,0 e P2G0,50V10,0.	230
Tabela 47 – Estabilidades das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA0,50.....	231
Tabela 48 – Estabilidades das pastas P2G0,30PVA1,00 e P2G0,35PVA1,00.....	233
Tabela 49 – Estabilidades das pastas P2G0,25PP0,50 e P2G0,30PP0,50.....	234
Tabela 50 – Estabilidade da pasta P2G0,30PP0,75.....	235
Tabela 51 – Massas específicas das pastas fibrosas.	239
Tabela 52 – Filtrados das pastas fibrosas.	240
Tabela 53 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com volastonita.	245
Tabela 54 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com PVA.....	250
Tabela 55 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com polipropileno.	253
Tabela 56 – Tensões desviatórias das pastas fibrosas a da referência.....	256
Tabela 57 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência e das pastas reforçadas com volastonita.	264
Tabela 58 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com PVA.....	266
Tabela 59 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com polipropileno.	267
Tabela 60 – Resultados de resistência à tração na flexão da pasta de referência e das pastas reforçadas com volastonita.	270

Tabela 61 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas reforçadas com PVA.....	274
Tabela 62 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas reforçadas com polipropileno.....	276
Tabela 63 – Valores médios de tenacidade de acordo com a norma japonesa.....	278
Tabela 64 – Valores médios de tenacidade de acordo com a norma ASTM C1018 e de seus respectivos coeficientes de variação.....	280
Tabela 65 – Composição inicial da pasta P1A para a produção de 600 ml.....	299
Tabela 66 – Composição inicial da pasta P1B para a produção de 600 ml.....	299
Tabela 67 – Composição inicial da pasta P1C para a produção de 600 ml.....	300
Tabela 68 – Composição inicial da pasta P1D para a produção de 600 ml.....	301
Tabela 69 – Composição inicial da pasta P1E para a produção de 600 ml.....	301
Tabela 70 – Composição inicial da pasta P1F para a produção de 600 ml.....	302
Tabela 71 – Resultados de estabilidade a 80°F (27°C) da pasta P1F.....	302
Tabela 72 – Composição inicial da pasta P1G para a produção de 600 ml.....	303
Tabela 73 – Composição inicial da pasta P1H para a produção de 600 ml.....	303
Tabela 74 – Composição inicial da pasta P2A para a produção de 600 ml.....	304
Tabela 75 – Composição inicial da pasta P2B para a produção de 600 ml.....	305
Tabela 76 – Composição inicial da pasta P2C para a produção de 600 ml.....	305
Tabela 77 – Composição inicial da pasta P3A para a produção de 600 ml.....	306
Tabela 78 – Composição inicial da pasta P3B para a produção de 600 ml.....	307
Tabela 79 – Composição inicial da pasta P3C para a produção de 600 ml.....	307
Tabela 80 – Composição inicial da pasta P3D para a produção de 600 ml.....	308
Tabela 81 – Composição inicial da pasta P3E para a produção de 600 ml.....	308
Tabela 82 – Composição inicial da pasta P3F para a produção de 600 ml.....	309
Tabela 83 – Composição inicial da pasta P3G para a produção de 600 ml.....	309
Tabela 84 – Composição inicial da pasta P3H para a produção de 600 ml.....	310

Tabela 85 – Composição inicial da pasta P3I para a produção de 600 ml.	311
Tabela 86 – Composição inicial da pasta P3J para a produção de 600 ml.	311

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A pasta adotada na cimentação primária de um poço de petróleo deve ser dosada adequadamente para que sejam evitados problemas durante seu bombeamento e, também, para que o anular existente entre a coluna de revestimento e a formação seja completamente preenchido. Além disso, após seu endurecimento é necessário que esta pasta atinja resistência mecânica suficiente para suportar os esforços aos quais será submetida e, também, baixa permeabilidade para que não ocorra intercomunicação das zonas produtoras e contaminação dos lençóis freáticos.

Atualmente, a diversidade dos materiais empregados na confecção de pastas de cimentação tem permitido a produção de misturas que atendem as características descritas anteriormente e permitindo combater os problemas encontrados em campo. Por exemplo, ao se perfurar um poço em uma formação fraca, existe um limite para a pressão hidrostática exercida durante a cimentação para que não haja o colapso desta formação. Com o objetivo de se realizar a cimentação de um poço cuja formação é fraca ou inconsolidada são empregadas as pastas leves. Neste caso, o uso de materiais com diferentes granulometrias, tais como cimento classe G, microesferas e adições minerais, associado ao emprego do modelo de empacotamento de partículas durante a dosagem da pasta, que viabiliza a otimização da compactação de sua mistura granular, tem permitido a confecção de pastas leves de alto desempenho. Em relação a uma pasta leve convencional, as pastas leves empacotadas apresentam maiores teores de sólidos e menores quantidades de água de mistura e, conseqüentemente, altas resistências à compressão e a tração e menores porosidades e permeabilidades. Adicionalmente, as pastas leves de alto desempenho de ruptura frágil podem se tornar pastas com alta capacidade de deformação a partir da inserção de reforço fibroso em sua composição.

Materiais leves ou estendedores, tais como microesferas, são adotados na dosagem de pastas de cimentação quando as pressões dos poros e de fratura da formação exigem que a cimentação do anular seja realizada com uma pasta leve. Apesar do alto custo das microesferas e de sua limitação em relação às altas pressões, estes materiais têm sido usados em dosagens de pastas leves devido à possibilidade de produção de misturas de altas resistências e baixas permeabilidades. Além das microesferas apresentarem massas específicas inferiores à do cimento, as mesmas apresentam o formato esférico e, de acordo com DASGUPTA *et al.* (2006), a perfeita esfericidade de suas partículas possui um efeito de lubrificação da pasta e, conseqüentemente, promove benefícios em suas propriedades reológicas. Além das microesferas, a sílica ativa também é considerada como estendedor em pastas de cimentação por apresentar massa específica inferior à do cimento.

O reforço fibroso tem sido adicionado por alguns pesquisadores em pastas leves com granulometria otimizada. Neste caso, o objetivo da adição do material na pasta é o combate às perdas de circulação durante a cimentação de poços de petróleo. No entanto, a aplicação deste material como reforço em pastas de cimentação devido aos benefícios que pode propiciar à sua resistência à tração e a capacidade de deformação é pouco difundido na indústria do petróleo. Os tipos de fibras que têm sido adotados como reforços em pastas de cimentação abrangem fibras flexíveis à base de sílica (EL-HASSAN *et al.*, 2003; LOW *et al.*, 2003; ROMERO *et al.*, 2004; GARDUÑO *et al.*, 2006), fibras de aço, carbono, basalto, vidro (BERNDT e PHILIPPACOPOULOS, 2002) e a microfibras de volastonita (HEINOLD *et al.*, 2002; HEINOLD *et al.*, 2003).

Adições minerais, tais como a sílica ativa, têm sido empregadas na confecção de pastas de cimentação, conferindo-lhes melhorias em suas propriedades mecânicas e térmicas. A sílica ativa age numa pasta de cimento de duas formas, fisicamente e quimicamente. A ação física se dá pelo efeito fíler, enquanto a ação química é pela produção de silicato de cálcio hidratado, oriundo de suas reações químicas com o hidróxido de cálcio gerado nas reações de hidratação do cimento. Outra adição mineral adotada em pastas de cimentação devido a sua alta atividade pozolânica é a metacaolinita. De acordo com HEINOLD *et al.* (2002), a metacaolinita promove benefícios nas propriedades das pastas de cimentação, tais como, permeabilidade, desenvolvimento de resistência à compressão, resistências à tração e a flexão, controle de gás e resistência a sulfato.

A partir dos materiais descritos e considerando o quadro teórico do modelo de empacotamento de partículas granulares secas é possível produzir no estudo pastas leves de alto desempenho flexíveis e a determinação das propriedades físico-químicas e mecânicas se torna indispensável para certificação de sua qualidade. Durante muitos anos, a resistência à compressão era a única propriedade considerada necessária para a avaliação da qualidade de uma pasta de cimentação para poços de petróleo (BOSMA *et al.*, 2000). Ainda hoje, a norma do *American Petroleum Institute* (API) em vigor para a caracterização de pastas de cimentação (API RP10B-2, 2005) e as normas vigentes para caracterização de cimentos para cimentação de poços (API *Specification* 10a, 2002; ABNT NBR 9831, 2006) especificam que a única propriedade mecânica que deve ser avaliada em uma pasta de cimentação é sua resistência à compressão. No entanto, para se garantir que uma determinada pasta apresente desempenho satisfatório para o emprego na cimentação de um poço, alguns pesquisadores já têm se preocupado em realizar caracterizações mais abrangentes neste material. Além disso, modelos matemáticos baseados na mecânica do contínuo têm sido aplicados para estimar a habilidade da pasta em resistir às tensões do poço (BOSMA *et al.*, 2000). Assim, para que os modelos estimem de forma mais realística o desempenho de uma pasta quando submetida a determinadas condições, o conhecimento de outras propriedades desta pasta se torna importante. Neste sentido, alguns ensaios empregados pela indústria da construção civil para a caracterização de concretos têm sido adotados e/ou adaptados pela indústria do petróleo para a caracterização de pastas. Desta forma, outras características mecânicas de uma pasta de cimentação além da resistência à compressão passaram a ser conhecidas, tais como, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência à tração direta, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral.

No presente trabalho, pastas leves de alto desempenho foram produzidas utilizando-se sílica ativa e microesferas de vidro ou cerâmica. Com o objetivo de se atingir o alto desempenho das misturas, empregou-se o modelo de empacotamento compressível de partículas (MEC) desenvolvido por DE LARRARD (1999) no *Laboratoire Central et Ponts et Chaussées* (França) durante suas dosagens. Além das pastas leves de alto desempenho também foram confeccionadas pastas reforçadas com fibras de volastonita, PVA ou polipropileno. Durante o desenvolvimento do presente trabalho optou-se por

uma ampla caracterização físico-química e mecânica com o objetivo de se conhecer o comportamento dessas misturas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho está dividido em duas fases, a caracterização de pastas leves de alto desempenho e o desenvolvimento de pastas leves fibrosas de alto desempenho. Com o principal objetivo de se atingir o alto desempenho das pastas leves, adotou-se um quadro teórico e experimental de empacotamento máximo dos materiais granulares durante o procedimento de dosagem destas pastas. Além disso, a fim de promover baixas massas específicas às pastas visando também seu alto desempenho, os materiais estendedores adotados em sua confecção foram as microesferas e a sílica ativa. Assim, três pastas leves foram dosadas inicialmente com a seguinte composição:

- Pasta P1: cimento CPP classe especial, sílica ativa, microesfera cerâmica SG, sílica 120 #, superplastificante, antiesumante e água;
- Pasta P2: cimento CPP classe especial, sílica ativa e microesfera cerâmica SG, superplastificante, antiesumante e água;
- Pasta P3: cimento CPP classe G, sílica ativa e microesfera de vidro HGS18000, superplastificante, antiesumante e água.

As pastas P1, P2 e P3 foram caracterizadas em seu estado fresco através de ensaios de reologia, massa específica, água livre, filtrado e evolução de resistência à compressão. No estado endurecido, as pastas foram caracterizadas quanto ao comportamento mecânico, térmico, físico e de variação dimensional. A caracterização mecânica foi realizada por meio de ensaios de resistência à compressão uniaxial e triaxial, tração na flexão e tração por compressão diametral. A caracterização térmica foi feita através de ensaios de calor específico, difusividade térmica e coeficiente de dilatação térmica. Para a realização da caracterização física foram realizados ensaios de estabilidade, absorção total (índice de vazios e massa específica), absorção de água por capilaridade e resistência ao ataque por ácido. A variação dimensional foi verificada por meio de ensaios de retração autógena e fluência.

A segunda fase do trabalho consistiu na escolha de umas das pastas caracterizadas na primeira fase para o recebimento de reforço fibroso, com o principal objetivo de

beneficiar a capacidade de deformação da pasta após a inclusão da fibra. A pasta P2 foi escolhida devido ao seu melhor desempenho mecânico em relação às demais pastas. Entretanto, uma alteração foi realizada na composição da matriz escolhida para o recebimento de reforço fibroso: a troca do superplastificante de segunda geração por um superplastificante de terceira geração. Esta medida foi adotada visando uma melhoria nas propriedades reológicas da pasta.

A primeira fibra escolhida para reforçar a matriz foi a microfibrilha mineral de volastonita. Esta fibra tem sido empregada como reforço fibroso em concretos visando os benefícios que podem propiciar as suas propriedades reológicas (VELASCO, 2008). Contudo, em pastas, a presença da microfibrilha de volastonita não beneficia sua reologia, provavelmente devido à similaridade de sua granulometria com aquelas dos materiais que compõem a pasta. Entretanto, a microfibrilha de volastonita foi adotada como reforço fibroso com o principal objetivo de incrementar as propriedades mecânicas. As fibras que PVA e polipropileno também foram escolhidas como reforços fibrosos devido a duas características intrínsecas a estes materiais que os tornam compatíveis com uma pasta leve para cimentação de poços de petróleo: baixas massas específicas e seu pequeno comprimento, que poderia tornar viável o bombeamento dos compósitos dosados.

Assim, a segunda fase do trabalho foi composta pela caracterização das seguintes pastas leves fibrosas:

- Pasta P2G0,25: matriz com composição igual à da pasta P2, exceto pela troca do superplastificante;
- Pastas com reforço de microfibrilha de volastonita em teores deste material, em relação ao volume de pasta, iguais a 2,5% (P2G0,25V2,5), 5,0% (P2G0,30V5,0), 7,5% (P2G0,40V7,5) e 10,0% (P2G0,40V10,0);
- Pastas com reforço de fibra de PVA em teores, em relação ao volume de pasta, iguais a 0,50% (P2G0,25PVA0,50) e 1,00% (P2G0,30PVA1,00);
- Pastas com reforço de fibra de polipropileno em teores, em relação ao volume de pasta, iguais a 0,50% (P2G0,30PP0,50) e 0,75 % (P2G0,30PP0,75).

As pastas pertencentes à segunda fase do trabalho foram caracterizadas no estado fresco, por ensaios de reologia (pastas reforçada com microfibrilha de volastonita e

referência), água livre, massa específica e filtrado. A caracterização no estado endurecido se deu por meio de ensaios de compressão uniaxial e triaxial (referência e pastas reforçadas com 5,0% de volastonita e 0,50% de PVA e polipropileno), tração por compressão diametral e tração na flexão.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em dez capítulos. O capítulo 1 é a presente introdução. Nesta parte são destacadas as motivações para o desenvolvimento deste trabalho, sendo apresentado o estado da arte dos assuntos estudados nesta tese. Além, disso também são apresentados os objetivos do trabalho e como o mesmo está estruturado.

O capítulo 2 apresenta os materiais empregados na atualidade pela indústria do petróleo para a confecção de pastas de cimentação com características diversas.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica de pastas leves para cimentação de poços de petróleo, desde estudos em laboratório até a aplicação destas misturas em cimentação de poços. Também é descrito de forma sucinta o método de dosagem dos materiais granulares adotado neste trabalho.

O capítulo 4 apresenta uma revisão da literatura sobre os tipos de fibras empregados na confecção de pastas para cimentação de poços de petróleo. Além disso, alguns resultados de estudos em laboratório e da aplicação de pastas fibrosas em poços no México e nos Estados Unidos da América também são mostrados.

O capítulo 5 apresenta os métodos empregados para a dosagem tanto das pastas leves quanto das pastas leves fibrosas. Neste capítulo também são descritos os procedimentos de preparo das pastas, que se diferenciam do procedimento padrão. Além disso, também é apresentado o método de homogeneização utilizado antes da realização de alguns ensaios e os tipos de cura empregados para as pastas leves e para as pastas leves fibrosas.

No capítulo 6 são descritas todas as metodologias empregadas para a caracterização dos materiais e das pastas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O capítulo 7 mostra os resultados dos ensaios realizados nas pastas leves de alto desempenho, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. As pastas leves foram avaliadas no estado fresco em relação à água livre, filtrado, massa específica,

propriedades reológicas e resistência à compressão pelo método ultrassônico. No estado endurecido, as pastas fibrosas foram avaliadas quanto ao seu comportamento mecânico, térmico, físico e de variação dimensional. A avaliação mecânica das pastas leves compreendeu ensaios de compressão uniaxial e triaxial e, também ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão. A caracterização térmica foi realizada por meio de ensaios de calor específico, difusividade térmica e coeficiente de dilatação térmica. Para a caracterização física e de durabilidade das pastas leves foram realizados os seguintes ensaios: absorção total, absorção de água por capilaridade, ataque por ácido e estabilidade. As pastas leves também foram avaliadas em relação à variação dimensional quanto à retração autógena e fluência.

O capítulo 8 apresenta a análise do comportamento das pastas leves fibrosas sob esforços de compressão uniaxial e triaxial, tração na flexão e tração por compressão diametral. Além disso, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios feitos nas pastas fibrosas em seu estado fresco (reologia, água livre, filtrado e massa específica). Também foi avaliada sua estabilidade.

Por fim, o capítulo 9 apresenta as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

2.1 Introdução

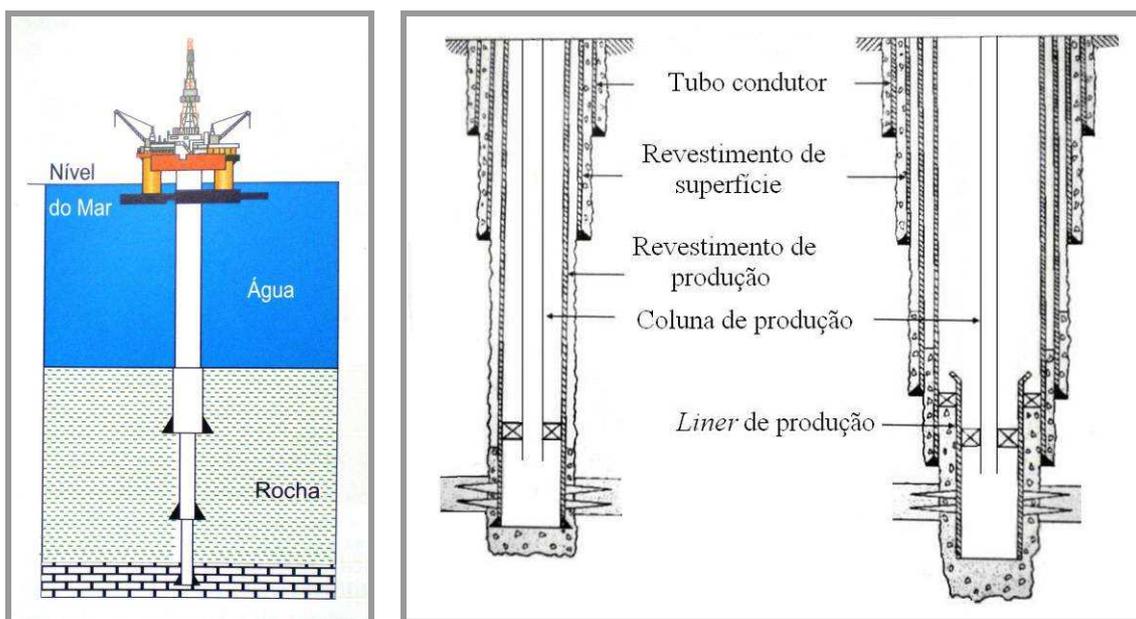
A perfuração de um poço de petróleo é feita por uma sonda composta de vários equipamentos, entre os quais estão a coluna de perfuração e a broca (posicionada na extremidade da coluna). A seguir, será descrito de forma resumida um processo de perfuração, desde a perfuração em si, até a cimentação do anular.

Geralmente, um poço é perfurado em três ou quatro fases (Figura 1a). A quantidade de fases da perfuração depende das características das zonas que serão perfuradas e da profundidade final prevista (THOMAS *et al.*, 2001).

Em uma perfuração rotativa, a rocha onde existe uma zona de interesse é perfurada por uma broca submetida à rotação e carga. À medida que se perfura a formação rochosa, os fragmentos formados são removidos de forma contínua por um fluido de perfuração, que também proporciona o resfriamento e a lubrificação da coluna de perfuração e da broca. Os fluidos de perfuração podem ser à base de água, óleo, ar ou gás. Quando se perfura uma formação permeável, se a pressão dos poros se tornar maior do que a pressão dentro do poço, poderá ocorrer influxo de fluidos da formação para o poço perfurado (*kick*). Se o *kick* atingir a superfície, resulta em explosão (*blowout*), que pode ter como consequência danos ao meio ambiente e destruição total da plataforma. Por isso, uma das funções dos fluidos de perfuração é exercer pressão hidrostática sobre a formação e estabilizar as paredes do poço. O fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração e volta à superfície com os cascalhos pelo espaço anular formado entre a coluna de perfuração e as paredes do poço perfurado (formação). Quando se alcança a profundidade pré-estabelecida, a coluna de perfuração é retirada e a primeira coluna de revestimento é inserida no poço. Em seguida, o espaço anular formado entre a coluna de revestimento e a formação é cimentado. O processo de

perfuração, inserção de coluna de revestimento e cimentação é repetido até que se alcance a profundidade final do poço.

A composição das colunas de revestimento depende das solicitações previstas durante sua descida no poço e ao longo de sua vida útil (THOMAS *et al.*, 2001). Os revestimentos são classificados como: condutor, revestimento de superfície, revestimento intermediário, revestimento de produção e *liner* (Figura 1b). O condutor é o revestimento assentado a pequenas profundidades para sustentar a formação inconsolidada, entre 3 – 20 metros para poços terrestres e 10 e 50 metros (abaixo do fundo do mar) para poços marítimos. O revestimento de superfície é assentado para proteger os bolsões superficiais de água, sustentar formações inconsolidadas e os equipamentos de segurança de cabeça de poço. Seu comprimento varia entre 100 e 600 metros. O revestimento intermediário tem a finalidade de proteger formações desmoronáveis portadoras de fluidos corrosivos ou contaminantes de fluidos, zonas de perda de circulação e de alta ou baixa pressão. A profundidade de assentamento deste tipo de revestimento pode variar de 1000 a 4000 metros. O revestimento de produção tem o objetivo de permitir a produção do poço, através do isolamento entre os intervalos produtores e do suporte das paredes do poço. O *liner* é uma coluna curta de revestimento que é posicionada na parte inferior do poço e que pode substituir o revestimento intermediário e o de produção.



(a)

(b)

Figura 1 – (a) Ilustração de uma sonda marítima (ROCHA e AZEVEDO, 2007); (b) Ilustração de revestimentos (THOMAS *et al.*, 2001).

A cimentação primária é principal tipo de cimentação, que consiste no preenchimento do anular existente entre a coluna de revestimento e a formação por uma pasta cimentícia. Este tipo de cimentação ocorre após a descida de cada coluna de revestimento e tem por objetivos principais, após o endurecimento da pasta: a selagem hidráulica do anular preenchido, e também, a fixação da coluna de revestimento à formação (suporte mecânico da coluna de revestimento). A selagem hidráulica do anular restringe a migração de fluidos da formação e, conseqüentemente, evita a corrosão da coluna de revestimento e a contaminação de fluidos de formações atravessadas. Além disso, a ocorrência de uma vedação hidráulica efetiva garante o perfeito controle da origem dos fluidos produzidos e/ou destino dos fluidos injetados. O prosseguimento das operações no poço sem sua vedação pode gerar diversos problemas, tais como: produção de fluidos indesejáveis, devido à proximidade dos contatos óleo/água ou gás/óleo, testes incorretos de avaliação de formações, prejuízo no controle de reservatórios e operações de estimulação mal sucedidas, com possibilidade até de perda do poço (THOMAS *et al.*, 2001). Portanto, o planejamento e execução da cimentação primária são de fundamental importância técnica e econômica para que se obtenha sucesso na exploração de um poço de petróleo. Entretanto, alguns problemas que

ocorrem durante a cimentação primária podem ser corrigidos através da cimentação secundária (recimentação, tampões de pasta e compressão de pasta ou *squeeze*).

A recimentação pode ser adotada quando o topo da pasta de cimento não atingir a altura prevista no espaço anular, por meio de circulação da pasta por trás do revestimento através de canhoneios (perfurações realizadas no revestimento). Os tampões de pasta cimentícia são realizados quando há perda de circulação, como base para desvio do poço, isolamento de zonas inferiores e abandono do poço (THOMAS *et al.*, 2001). Quando não é possível realizar a circulação da pasta (recimentação), adota-se a cimentação por compressão de pasta (*squeeze*), que ocorre através da inserção da pasta de cimento sobre pressão em uma região do anular, por meio de canhoneios (Figura 2a), que visam a correção de defeitos na cimentação primária e a finalização de vazamentos na coluna de revestimento. Durante este processo de compressão da pasta, esta fica sujeita a um diferencial de pressão ao encontrar com a formação. O fenômeno físico resultante é a filtração da pasta pela formação permeável e, em alguns casos, ocorre a fratura da formação. Como resultado da filtragem, há o acúmulo de partículas de cimento na formação (Figura 2b). Conseqüentemente, a taxa de filtração da formação é reduzida, isto é, esta se torna menos permeável. Assim, para que haja a desidratação de qualquer pasta de cimentação que venha a entrar em contato com a região corrigida será necessário um aumento na pressão exercida pela formação (NELSON e GUILLOT, 2006).

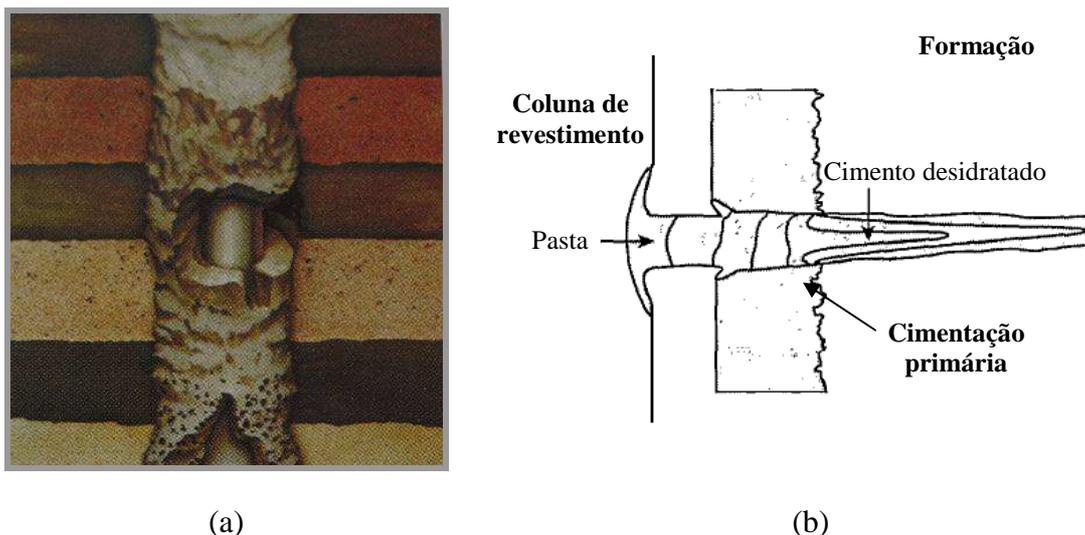


Figura 2 – (a) Esquema de poço com falha na cimentação primária (THOMAS *et al.*, 2001); (b) Ilustração da cimentação por compressão (Adaptado de NELSON e GUILLOT, 2006).

2.2 Matérias Primas para Pastas de Cimentação

Nas operações de cimentação de poços de petróleo, a pasta pode estar sujeita a condições severas de temperatura e pressão e, também, à presença de fluidos corrosivos. De acordo com NELSON e GUILLOT (2006), um poço pode estar sujeito desde as temperaturas abaixo de 0°C até a 350 °C (700 °F). Em relação à pressão, a pasta estará sujeita a valores que variam desde próximo a pressão atmosférica (poços rasos), até mais que 200 MPa (30000 psi) em poços profundos. Além disso, a pasta pode estar em contato com uma formação rochosa frágil e porosa, que pode afetar seu desempenho.

De acordo com BOSMA *et al.* (1999), a pasta de cimentação deve ser projetada para que, no estado fresco apresente densidade, trabalhabilidade, tempo de espessamento, perda de fluido e desenvolvimento de resistência em acordo com às necessidades do poço. Ainda no estado fresco, a pasta não pode sofrer pega durante seu bombeamento e apresentar água livre. Além disso, a pasta deve preencher todo o espaço anular e precisa apresentar resistência ao influxo de fluido. No estado endurecido, a pasta deve resistente aos ataques químicos do ambiente e apresentar propriedades mecânicas que suportem as tensões geradas ao longo de todas as operações executadas e proporcione o isolamento do revestimento.

Os componentes de uma pasta de cimentação devem ser escolhidos de acordo com as condições do poço às quais esta pasta estará sujeita, tais como, pressão, temperatura, tipo de formação rochosa e o tempo previsto de operação. Com o objetivo de minimizar e até extinguir os danos causados à pasta de cimentação pelo ambiente, atualmente, na dosagem das pastas são adotados outros tipos de materiais, denominados pela indústria do petróleo como aditivos. Atualmente, mais de 100 aditivos para pastas de cimentação estão disponíveis no mercado (NELSON e GUILLOT, 2006). Os aditivos que são empregados na confecção de pastas de cimentação podem ser classificados da seguinte forma: aceleradores, retardadores, materiais cimentícios, estendedores, adensantes, dispersantes e controladores de filtrado.

Além dos aditivos e adições citados anteriormente, alguns tipos de fibras podem ser utilizados em pastas de cimentação, tais como: fibras orgânicas (nylon, polipropileno e polietileno), fibras inorgânicas (vidro e asbestos), minerais (volastonita) e metálicas (aço e carbono) (CAMPOS *et al.*, 2002). O uso de fibras tem sido adotado por alguns pesquisadores em poços situados no Golfo do México e na Arábia Saudita para o combate às perdas de circulação devido às formações naturalmente fraturadas destas regiões (ROMERO *et al.*, 2004; EL-HASSAN *et al.*, 2003). Além disso, a adição de fibras em pastas frágeis proporciona o aumento de sua capacidade de deformação.

Nos próximos itens serão descritos alguns dos materiais adotados na indústria do petróleo para a confecção de pastas de cimentação. A fim de padronizar as nomenclaturas das classes de materiais, neste trabalho os materiais empregados para a confecção de pastas de cimentação serão divididos da seguinte forma: cimentos, outros materiais cimentícios (pozolanas), adições (materiais estendedores e adensantes), aditivos químicos (aceleradores, retardadores, antiespumantes e dispersantes), controladores de filtrado e fibras.

2.2.1 Materiais Cimentícios

2.2.1.1 Cimentos

O principal material cimentício empregado na confecção de pastas de cimentação é o cimento Portland, que para aplicação em poços de petróleo, apresenta uma única adição ao clínquer durante seu processo de fabricação, o gesso.

No Brasil são adotados dois tipos de cimento para a confecção de pastas de cimentação de poços de petróleo: o cimento CPP – classe G e o CPP – classe especial, que são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da ABNT NBR 9831 (2006). A Tabela 1 mostra os requisitos químicos e a Tabela 2 os requisitos físicos para que um determinado cimento seja classificado pela ABNT como CPP – classe G ou CPP – classe especial.

Tabela 1 – Requisitos químicos do CPP – classe G e CPP – classe especial segundo a ABNT (ABNT NBR 9831, 2006).

Requisitos Químicos (%)				
Denominação	Fórmula química	Símbolo	CPP - Classe G ARS (alta resistência a sulfato)	CPP - Classe especial MRS (moderada resistência a sulfato)
Óxido de magnésio (máximo)	MgO	-	6,0	6,0
Trióxido de enxofre (máximo)	SO ₃	-	3,0	3,0
Perda ao fogo (máximo)	-	PF	3,0	2,0
Resíduo insolúvel (máximo)	-	RI	0,75	0,75
Cal livre (máximo)	CaO	CaO	2,0	1,6
Silicato tricálcico (máximo)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	65	60
Silicato tricálcico (mínimo)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	48	50
Aluminato tricálcico (máximo)	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	3,0	7,0
Ferro aluminato tetracálcico mais o dobro do aluminato tricálcico (máximo)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ + 2(3CaO.Al ₂ O ₃)	C ₄ AF + 2C ₃ A	24	24
Equivalente alcalino total expresso como Na ₂ O equivalente (máximo)	-	Na ₂ O _{eq}	0,75	0,85

Tabela 2 – Requisitos físicos do CPP – classe G e CPP – classe especial segundo a ABNT (ABNT NBR 9831, 2006).

Requisitos Físicos		CPP - classe G	CPP - classe especial
Relação água/cimento (em massa)		0,44	0,46
Água livre (máximo)		5,90 %	
Resistência à compressão* (mínima)	Cura a 38°C	2,1 MPa (300 psi)	
	Cura a 60°C	10,3 MPa (1500 psi)	
Tempo de espessamento 52°C (125°F)	Limite inferior	90 minutos	
	Limite superior	120 minutos	
Consistência no período de 15 - 30 min de ensaio** (máximo)		30 Uc	
Propriedades Reológicas	Viscosidade plástica***	0,055 Pa.s (55 lbf/100ft ²)	
	Limite de escoamento à temperatura de 27°C	14,4 Pa a 33,5 Pa (30 lbf/100ft ² a 70 lbf/100ft ²)	
	Limite de escoamento à temperatura de 52°C	14,4 Pa a 38,3 Pa (30 lbf/100ft ² a 70 lbf/100ft ²)	
	Gel inicial **	12 Pa (25 lbf/100ft ²)	
	Gel final **	16,8 Pa (35 lbf/100ft ²)	

* Resistência à compressão determinada após 8 horas em função da temperatura de cura realizada à pressão atmosférica.

** Uc – Unidade de Consistência.

*** Os valores obtidos nas temperaturas de 27°C e 52°C devem ser maiores do que os estabelecidos na Tabela 2.

2.2.1.2 Outros Materiais Cimentícios

Além do cimento, existem outros materiais cimentícios que podem ser empregados em substituição a uma parcela de cimento na pasta de cimentação devido a sua atividade pozolânica. Quando as massas específicas destes materiais são inferiores à do cimento, os mesmos são denominados materiais estendedores. As pozolanas são materiais silicosos ou aluminossilicosos que possuem pouco ou nenhum valor cimentante, mas que moídos finamente e na presença de umidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio gerado durante a reação de hidratação do cimento, formando um silicato de cálcio hidratado adicional (ASTM C219-01a, 2002). Os materiais pozolânicos têm sido empregados em cimentação de poços de petróleo para o combate a retrogressão da resistência à compressão da pasta de cimento, que ocorre devido à deterioração da

matriz cimentícia quando a mesma está submetida a altas temperaturas. Dentre os materiais pozolânicos empregados para o combate à retrogressão têm-se a sílica ativa e a cinza volante.

A reação química entre o cimento e a água é exotérmica e termicamente ativada. Os principais produtos da hidratação do cimento consistem em: silicato de cálcio hidratado (*C-S-H*) e o hidróxido de cálcio (*CH*). De acordo com AL-YAMI *et al.* (2008), se as reações de hidratação do cimento são submetidas a temperaturas acima de 110°C (230°F), o gel de *C-S-H* se transforma em α -C₂SH que, segundo este autor, promove uma redução da resistência à compressão do material endurecido. Com o objetivo de impedir a formação do α -C₂SH, a relação Ca/Si do *C-S-H* pode ser reduzida pela adição de sílica na mistura. A inclusão de sílica ao cimento pode formar a fase conhecida como tobermorita (C₅S₆H) ao invés de α -C₂SH, que resulta em benefício na resistência do material (AL-YAMI *et al.*, 2008).

Segundo CAMPOS *et al.* (2002), a **sílica ativa** passou a ser adotada em pastas de cimentação no final de 1970. Este material é subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. Além de apresentar atividade pozolânica, a sílica ativa também age como fíler¹. De acordo com NELSON e GUILLOT (2006), o teor de sílica ativa adotado normalmente em pastas de cimentação é igual a 15% (em relação à massa de cimento), podendo chegar até 28% (em relação à massa de cimento). As partículas esféricas minúsculas apresentam tamanho médio de partículas entre 0,1 – 0,2 µm, cerca de 50 a 100 vezes mais fino que o cimento ou a cinza volante. Conseqüentemente, sua superfície específica é muito alta (15000 – 25000 m²/kg) (NELSON e GUILLOT, 2006). A finura da sílica ativa promove a redução da permeabilidade da pasta, e por isso, esse material é utilizado para a prevenção de migração de gás no anular, sendo também utilizado em sistemas cimentícios térmicos. Além da prevenção de migração de gás no anular, a sílica ativa também promove benefícios na reologia, desenvolvimento da resistência à compressão e controle de filtrado da pasta (BJORDAL *et al.*, 1993).

¹ Efeito físico de preenchimento dos vazios formados pelos grãos maiores.

A **cinza volante** é um rejeito resultante da fusão de impurezas minerais durante a queima do carvão em usinas termoelétricas, tais como, argilas, quartzo e feldspato (MEHTA e MONTEIRO, 2008), que após o resfriamento são solidificadas como partículas esféricas de vidro. As cinzas volantes são basicamente divididas de acordo com o teor de cálcio em sua composição: cinza volante de baixo teor de cálcio (teor inferior a 10%) e cinza volante de alto teor de cálcio (teor de CaO de 15 – 30%). A maior parte das partículas de cinza volante se apresenta como esferas sólidas de vidro. No entanto, podem ocorrer, com menor frequência, como cenosferas (esferas ocas) e plerosferas (esferas preenchidas com muitas esferas menores). A cinza volante é normalmente adicionada à pasta de cimento, em substituição a uma parcela do cimento, porque se trata de um material pozolânico e, além disso, é mais barato que o cimento. Segundo CAMPOS *et al.* (2002), a cinza volante é normalmente utilizada em pastas submetidas a temperaturas inferiores a 93°C (200°F).

Além dos materiais cimentícios citados anteriormente, a **sílica amorfa** também é inserida em pastas de cimentação para a mitigação da retrogressão de resistência. A sílica amorfa é adotada na confecção de pastas de cimentação desde 1952 para a prevenção de retrogressão de resistência de pastas em poços térmicos (CAMPOS *et al.*, 2002). De acordo com NELSON e GUILLOT (2006), dois tipos de sílica são usados rotineiramente em pastas de cimentação: a areia de sílica e o pó de sílica, cujos tamanhos médios de partículas são aproximadamente iguais a 100 µm e 15 µm, respectivamente.

2.2.2 Adições

Neste trabalho são denominadas adições os materiais granulares inseridos em pastas de cimentação com o objetivo de modificar sua massa específica. A massa específica da pasta que será empregada na cimentação de um poço depende da pressão requerida para este poço, que está relacionada diretamente com o tipo de formação rochosa perfurada. Algumas das adições mais empregadas na confecção de pastas de cimentação compreendem os seguintes tipos de materiais: adensantes e estendedores.

2.2.2.1 Materiais Adensantes

Os materiais adensantes ou materiais de alta massa específica são adotados para a confecção de pastas que proporcionem ao poço uma alta pressão hidrostática. A alta pressão hidrostática promovida pela pasta é requerida quando há a necessidade do controle de altas pressões nos poros, perfurações instáveis e formações deformáveis ou plásticas (NELSON e GUILLOT, 2006). Em relação as condições de poço citadas anteriormente é comum o uso de pastas com massas específicas superiores a $2,16 \text{ g/cm}^3$ (18,0 lb/gal) (NELSON e GUILLOT, 2006). Os materiais de alta massa específica devem ser inertes em relação ao cimento e às outras adições da pasta. Segundo NELSON e GUILLOT (2006), os principais materiais pesados são a ilmenita (FeTiO_3), a hematita (Fe_2O_3), a barita (BaSO_4) e o tetraóxido de manganês (Mn_3O_4), cujas massas específicas são iguais a $4,45 \text{ g/cm}^3$ (37,1 lb/gal), $4,95 \text{ g/cm}^3$ (41,3 lb/gal), $4,33 \text{ g/cm}^3$ e $4,84 \text{ g/cm}^3$ (40,4 lb/gal), respectivamente.

2.2.2.2 Materiais Estendedores

Quando a pasta estará em contato com uma formação rochosa inconsolidada, sendo necessária a confecção de uma pasta de cimentação com densidade inferior à de uma pasta normal², na dosagem desta pasta são empregados materiais com massas específicas inferiores à do cimento. O emprego de materiais leves visa à confecção de pastas leves, que de acordo com MIRANDA (2008) apresentam massas específicas inferiores a $1,70 \text{ g/cm}^3$ (14,0 lb/gal). Os materiais leves ou estendedores que são adicionados em pastas de cimentação de poços de petróleo podem agir quimicamente (apresentando atividade pozolânica) e/ou podem agir apenas fisicamente, através do efeito fíler. Além da redução da massa específica de uma determinada pasta de cimentação, os materiais estendedores podem ser adotados para aumentar seu rendimento, através da redução do consumo de cimento. Ao reduzir a massa específica da pasta, conseqüentemente ocorre a diminuição da pressão hidrostática durante a

² A densidade/massa específica de uma pasta normal varia em torno de $1,80 \text{ g/cm}^3$ (15,0 lb/gal) (MIRANDA, 2008).

cimentação. Assim, a possibilidade de causar colapsos em uma formação fraca é reduzida (minimizando a perda por filtrado). O aumento de rendimento é decorrente da redução do teor de cimento na pasta através da substituição de uma parcela de cimento por outro material, podendo resultar em benefícios em suas propriedades mecânicas e de durabilidade. NELSON e GUILLOT (2006) classificam os materiais estendedores da seguinte forma: argila, silicato de sódio, pozolanas (terra diatomácea e sílicas), partículas leves (perlita expandida, gilsonita, cinza volante, cimentos leves, carvão pulverizado e microesferas) e nitrogênio.

2.2.2.2.1 Argilas

As argilas ou minerais argilosos são essencialmente aluminossilicatos. A argila mais usada na confecção de pastas de cimentação é a bentonita (composta por no mínimo 85% de montmorilonita), que se expande ao entrar em contato com a água. A maior vantagem do uso da bentonita como material estendedor para pastas de cimentação é seu baixo custo. Segundo MIRANDA (2008), as pastas leves mais comumente utilizadas no Brasil são confeccionadas com bentonita. Entretanto, as pastas leves produzidas com bentonita apresentam baixas resistências mecânicas. NELSON e GUILLOT (2006) mostram em seu trabalho que o aumento do teor deste material em uma pasta de cimentação proporciona efeitos maléficis à pasta, tais como, a redução da resistência à compressão da pasta e, também, o aumento da permeabilidade da pasta. Conseqüentemente, a pasta apresenta um decréscimo nas resistências às águas sulfatadas e aos fluidos corrosivos.

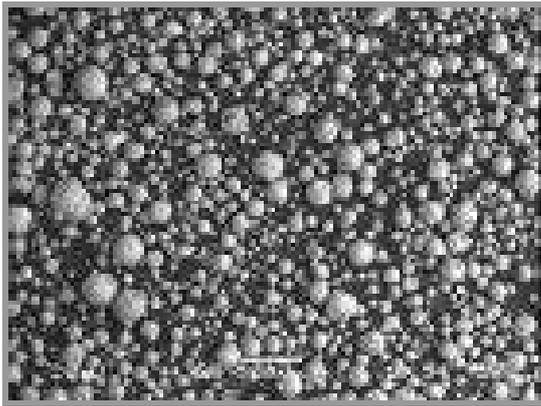
2.2.2.2.2 Partículas Leves

As partículas leves apresentam massas específicas inferiores à do cimento. Os materiais leves adotados pela indústria do petróleo para a confecção de pastas de cimentação são os seguintes: perlita, carvão pulverizado, gilsonita e microesferas. Dentre as partículas leves citadas anteriormente, as microesferas merecem destaque, pois são adotadas nas

pastas caracterizadas neste trabalho. É importante citar que esse tipo de material não suporta altas pressões hidrostáticas. Portanto, as microesferas não podem ser utilizadas na confecção de pastas de cimentação de poços profundos³. As microesferas podem ser de vidro ou cerâmicas. Estes materiais apresentam baixas massas específicas, normalmente em torno de 0,20 e 0,90 g/cm³ (1,7 – 7,5 lb/gal) (NELSON e GUILLOT, 2006). As microesferas têm sido adotadas de pastas dosadas através de modelos de máximos empacotamentos de seus constituintes. Assim, devido ao processo de dosagem onde há o empacotamento dos grãos da pasta, é possível a confecção de pastas leves com altas resistências e baixas permeabilidades.

A **microesfera cerâmica** também é denominada cenosfera e apresenta a sílica e a alumina como seus principais constituintes (Figura 3). De acordo com NELSON e GUILLOT (2006), a massa específica deste material varia entre 0,60 e 0,90 g/cm³ (5,0 – 7,5 lb/gal). Além disso, a distribuição do tamanho dos grãos da microesfera cerâmica varia entre 20 – 500 µm, a espessura de sua parede é cerca de 10% de seu raio e o gás em seu interior é uma mistura de CO₂ e N₂. O uso deste material não é recomendado para poços cuja pressão exceda a 31 MPa (4500 psi).

³ As pressões às quais um poço está submetido variam de 6,9 MPa (1000 psi) em poços rasos até 137,9 MPa (20000 psi) para poços profundos (CAMPOS *et al.*, 2002).



(a)



(b)

Figura 3 – Micrografias da microesferas SG, obtida por microscopia eletrônica de varredura: (a) Aumento de 30 vezes; (b) Aumento de 250 vezes (MIRANDA, 2008).

A **microesfera de vidro**, ilustrada na Figura 4, é oca e possui uma fina parede composta por borossilicato. A maioria das microesferas de vidro suportam pressões de até 34,5 MPa (5000 psi). No entanto, algumas classes especiais podem suportar até 124 MPa (18000 psi).



Figura 4 – Microscopia ótica de uma microesfera oca de vidro (MIRANDA, 2008).

2.2.3 Aditivos Químicos

Os aditivos químicos que são inseridos em pastas de cimentação podem ser dos seguintes tipos: acelerados ou retardadores de pega, dispersantes e antiespumantes.

2.2.3.1 Aditivos Aceleradores e Retardadores de Pega

Os aditivos aceleradores de pega são aditivos químicos que reduzem o tempo de pega da pasta de cimento (tempo de espessamento) e aumentam a resistência à compressão inicial. Segundo THOMAS *et al.* (2001), o agente acelerador mais comum é o cloreto de cálcio (CaCl_2). Adicionalmente, NELSON e GUILLOT (2006) afirmam que o cloreto de cálcio é o agente acelerador mais eficiente e econômico. Entretanto, a ação de aceleração pode ser causada por outros tipos de sal, tais como, carbonatos, silicatos, aluminatos, nitratos, nitritos, sulfatos e bases alcalinas (hidróxidos de sódio, potássio e amônio).

Os aditivos retardadores de pega causam o retardo do início da pega da pasta quando é necessário manter sua fluidez para seu deslocamento em região de temperatura e pressão altas⁴. Os aditivos retardadores são fabricados à base de lignossulfonatos e derivados, derivados de celulose e de glicose e ácidos orgânicos (NELSON e GUILLOT, 2006). Os retardadores agem provavelmente dificultando o crescimento dos cristais ou sua morfologia, sendo absorvidos sobre a camada de cimento hidratado que se forma rapidamente e, conseqüentemente, proporcionando a redução do crescimento dos núcleos de hidróxido de cálcio (FARIAS *et al.*, 2001).

2.2.3.2 Aditivos Antiespumantes

Os aditivos antiespumantes são inseridos em pastas de cimentação para reduzir o ar incorporado durante a confecção da pasta. Em cimentação de poços as duas classes de agentes antiespumantes mais usadas são os éterpoliglicóis e os silicones. Os silicones são os mais eficientes e consistem de suspensões de partículas de sílica finamente divididas e dispersas em polidimetilsiloxano ou silicone similar (NELSON e GUILLOT, 2006).

⁴ HPHT (*High pressure High temperature*): são poços que atravessam zonas anormalmente pressurizadas e com altos gradientes de temperatura (temperatura de fundo superior à 150°C).

2.2.3.3 Aditivos Superplastificantes

As partículas de cimento apresentam uma forte tendência de se aglomerarem na presença de água. Este mecanismo, onde os grãos de cimento formam flocos aprisionando parte da água da mistura, é denominado floculação (Figura 5). A água aprisionada se torna indisponível para a fluidificação da pasta. Assim, em seu estado fresco, a pasta apresenta uma viscosidade maior do que teria se parte da água adicionada na mistura não tivesse sido aprisionada. Além de prejudicar a reologia da pasta, os flocos formados também podem interferir no empacotamento e, por consequência, na microestrutura do material (DE CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). De acordo com MIRANDA (2008), o uso de superplastificantes na dosagem de pastas para cimentação de poços de petróleo é necessário, na maior parte dos casos, para que seja possível seu bombeio para o poço, principalmente em poços de grandes profundidades, altas temperatura, em anulares estreitos e em poços extensos ou inclinados.

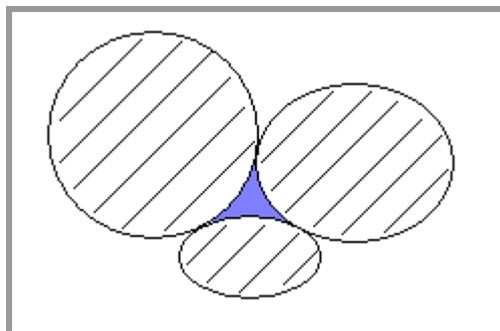


Figura 5 – Esquematização da floculação.

Com o objetivo de se combater a floculação e outras forças de atração que podem ocorrer entre as partículas de uma pasta de cimento, os superplastificantes são inseridos em sua dosagem. O uso de superplastificantes faz com que as forças de repulsão entre as partículas sejam predominantes, permitindo a formação de uma mistura dispersa e homogênea. As forças de atração que podem atuar nas partículas finas são as seguintes (FORMAGINI, 2005):

- **Forças de atração de *Van der Waals*:** correspondem às forças de atração física entre moléculas, que se tornam significativas quando o tamanho das partículas é inferior a 10 µm. Podem ser do tipo dipolo instantâneo, dipolo permanente ou pontes de hidrogênio (Figura 6a);
- **Forças eletrostáticas:** agem entre as partículas devido à presença de cargas elétricas em sua superfície (Figura 6b);
- **Forças gravitacionais:** correspondem à ação do campo gravitacional a que as partículas estão submetidas (Figura 6c);
- **Forças mecânicas:** resultam do intertravamento das partículas devido à sua forma irregular (Figura 6d);
- **Forças devido à presença de pontes líquidas:** ocorrem entre a fase líquida e sólida de uma mistura por tensão superficial (Figura 6e);
- **Forças de pontes sólidas:** ocorrem entre moléculas quando estas se unem por sinterização ou por precipitação de impurezas (Figura 6f).

As interações entre os superplastificantes e as partículas de cimento podem ser químicas ou físicas. As interações químicas proporcionam alterações na composição da solução aquosa e na morfologia dos hidratos formados. Segundo RONCERO (2000), as interações químicas abrangem: a absorção química das moléculas de superplastificante pelas partículas de cimento, a interação do superplastificante com os sítios mais reativos da partícula de cimento, formação de íons complexos com Ca^{2+} e interações com as morfologias dos hidratos formados. As interações físicas, que apresentam o papel mais importante durante o processo de dispersão das partículas de cimento (RONCERO, 2000), ocorrem quando a adsorção das moléculas de superplastificante na superfície das partículas de cimento combate a floculação por meio de forças repulsivas, tanto de origem eletrostática como de origem estérica.

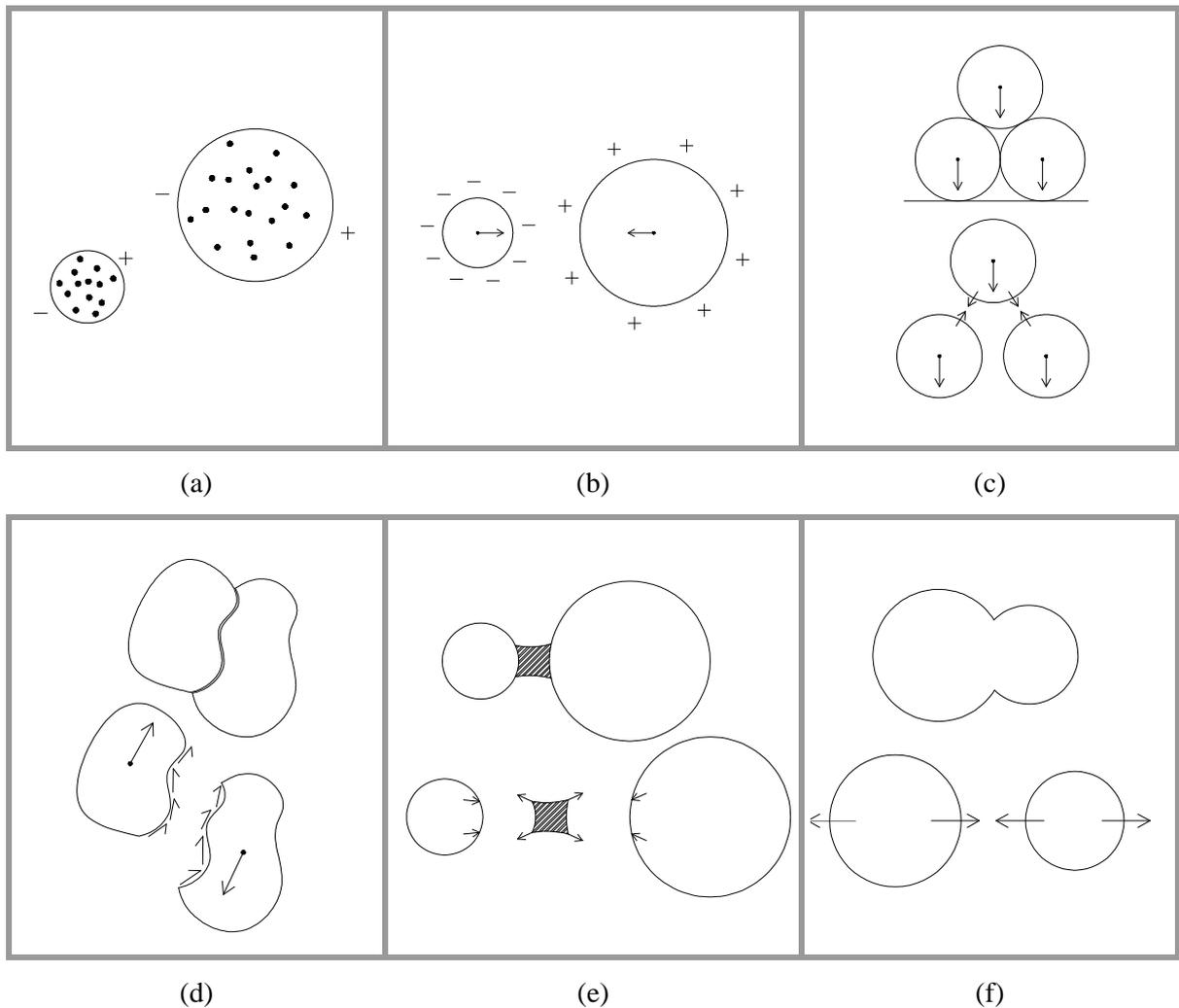


Figura 6 – Causas de aglomeração de partículas: (a) Força de *Van der Waals*; (b) Força eletrostática; (c) Ação da gravidade; (d) Força mecânica; (e) Ponte líquida; (f) Ponte sólida.

O mecanismo físico de estabilização eletrostática é um mecanismo de repulsão ocasionado a partir da adsorção das moléculas do superplastificante na superfície das partículas de cimento, alterando o potencial elétrico dessas partículas pela formação de uma dupla camada elétrica ao seu redor. A primeira camada é formada porque o potencial elétrico gerado na superfície das partículas sólidas atrai íons de carga contrária (contraíons) presentes na solução ao seu redor, formando a camada de *Stern*. Neste caso, a carga da partícula sólida não é totalmente neutralizada devido à limitação pelo tamanho da partícula da quantidade de contraíons adsorvidos em sua superfície (MIRANDA, 2008). O potencial elétrico da superfície sofre uma redução linear ao final da primeira camada para o potencial de *Stern*. O potencial de *Stern* atrai contraíons com mesma carga da primeira camada que são ligados fracamente às partículas, formando a

segunda camada, denominada camada difusa. A força de repulsão entre as partículas numa solução é provocada pela sobreposição dessas duas camadas elétricas: camada de Stern e camada difusa (MIRANDA, 2008). A definição da carga elétrica na superfície da partícula depende do pH do meio, sendo que para um pH básico ocorre a predominância de cargas elétricas negativas e o oposto ocorre para uma solução com pH ácido (FORMAGINI, 2005). Um desenho esquemático mostrando a formação da dupla camada elétrica ao redor de um grão de cimento está apresentado na Figura 7.

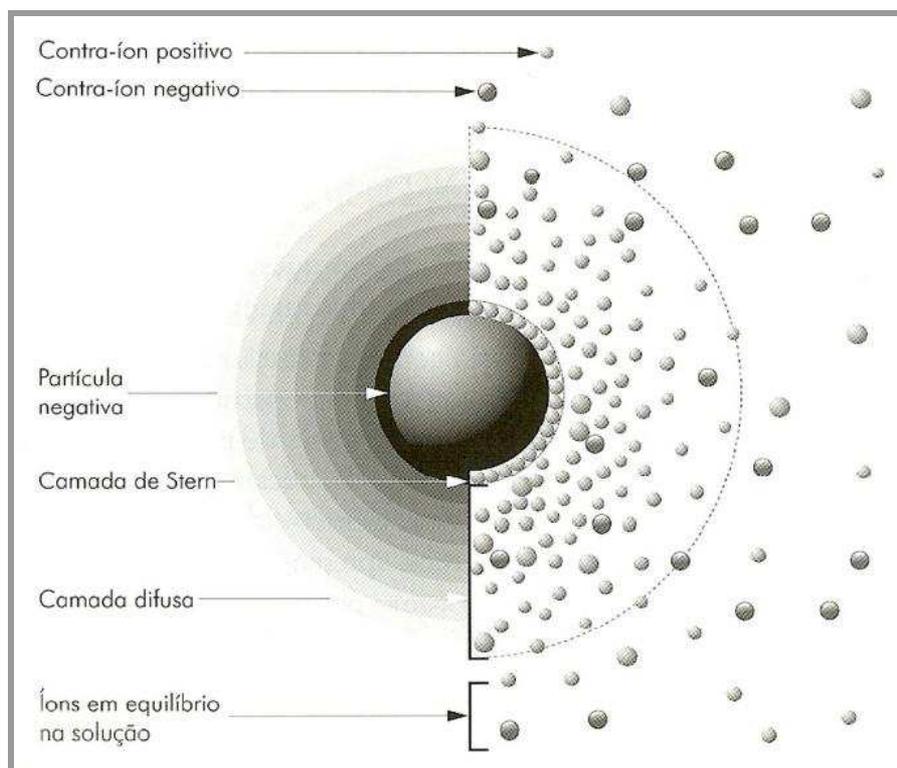


Figura 7 – Esquemática da dupla camada elétrica ao redor de uma partícula (MIRANDA, 2008).

O mecanismo físico de estabilização estérica proporciona a repulsão física entre as partículas, a partir da adsorção em suas superfícies de moléculas de polímeros neutras, de cadeias longas o suficiente para impedir que essas partículas se aproximem devido às forças de *Van der Waals* (Figura 8a). Entretanto, a eficiência da adsorção do polímero nas partículas depende da afinidade entre os dois. Além disso, para que a ação deste mecanismo de estabilização seja eficiente, é necessário que a ligação entre o polímero e a partícula seja forte o suficiente para combater a dessorção durante a movimentação da

partícula (FORMAGINI, 2005). Segundo MIRANDA (2008), o emprego de cadeias poliméricas muito longas pode proporcionar o aparecimento de pontes entre as partículas, causando sua aglomeração (efeito *bridging*). A aglomeração das partículas também pode ocorrer devido à interação entre camadas de polímeros adsorvidas em partículas diferentes.

O mecanismo físico de estabilização eletroestérica, esquematizado na Figura 8b, promove a repulsão das partículas em uma suspensão pela ação simultânea dos mecanismos de estabilização eletrostática e de estabilização estérica. Neste mecanismo de estabilização, cadeias poliméricas portadoras de grupos ionizáveis (como por exemplo, moléculas de poliacrilatos e polimetacrilatos, denominados genericamente de polieletrólitos), adsorvem-se às superfícies das partículas. Os grupos ionizáveis dissociados em fase líquida liberam íons que somam ao efeito estérico uma barreira eletrostática (FORMAGINI, 2005).

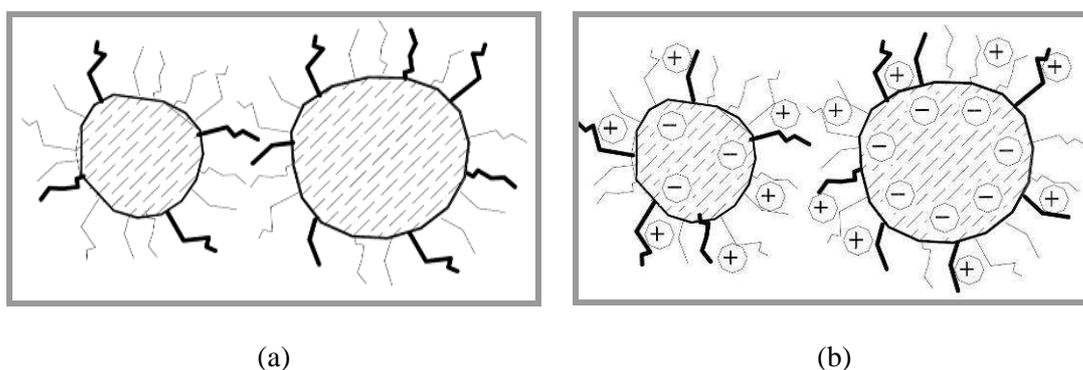


Figura 8 – Mecanismos de estabilização de partículas: (a) Estabilização estérica; (b) Estabilização eletroestérica. Adaptado de FORMAGINI (2005).

2.2.3.3.1 Tipos de Superplastificantes

Os aditivos superplastificantes ou dispersantes, como são conhecidos na indústria do petróleo, são adotados em pastas para cimentação para aumentar sua fluidez mantendo constante o consumo de água da mistura. Os superplastificantes são também conhecidos como redutores de água de alta eficiência. Estes aditivos químicos consistem de tensoativos aniônicos de cadeia longa e massa molecular elevada que conferem uma forte carga negativa às partículas de cimento quando adsorvidos às suas superfícies e,

auxiliam na redução da tensão superficial da água circundante além de aumentarem acentuadamente a fluidez do sistema (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em cimentação de poços de petróleo estes aditivos permitem compatibilizar as propriedades reológicas da pasta de cimento desejáveis na superfície de forma a permitir sua mistura e estas propriedades a outras temperaturas (CAMPOS *et al.*, 2002). A seleção do superplastificante a ser utilizado deve ser feita por meio da verificação da compatibilidade entre este aditivo e os materiais cimentícios da mistura. Além disso, também deve se determinar o teor ótimo de superplastificante para a mistura. O uso deste aditivo químico em excesso pode agravar os fenômenos de exsudação e segregação no concreto fresco (RONCERO, 2000). A compatibilidade entre o superplastificante e os materiais cimentícios e a dosagem deste aditivo químico é determinada neste estudo por meio do ensaio de Compatibilidade e Ponto de Saturação (Funil de *Marsh*), descrito por AİTCIN (2000).

Os tipos de superplastificantes empregados em misturas cimentícias e as nomenclaturas adotadas na indústria do petróleo e da construção civil estão apresentados na Tabela 3. Neste trabalho será adotada a nomenclatura admitida pela indústria da construção civil, em que temos os plastificantes e superplastificantes (de segunda geração e de terceira geração). Segundo FARIAS *et al.* (2001), os plastificantes ou aditivos redutores de água de eficiência normal podem reduzir o teor de água de um concreto em até 15%, mantendo a sua trabalhabilidade. De acordo com HSU *et al.* (1999), os superplastificantes de segunda geração permitem a redução de água da mistura em até 30%, enquanto os superplastificantes de terceira geração proporcionam a redução de água de uma mistura cimentícia em até 40%. Os aditivos a base de lignossulfonatos (plastificantes) atuam sobre as partículas de cimento por meio do mecanismo de estabilização eletrostática (FORMAGINI, 2005).

Os superplastificantes de segunda geração são os aditivos químicos redutores de água que predominam na confecção de pastas de cimentação para poços de petróleo. Neste grupo, a família dos polinaftalenos sulfonatos é adotada com maior frequência na dosagem de pastas de cimentação devido ao seu menor custo em relação aos demais tipos de superplastificantes de segunda geração (MIRANDA, 2008). Entretanto, este tipo de superplastificante não pode mais ser empregado em alguns ambientes marinhos devido a sua toxidez em relação às algas e a sua não biodegradabilidade em água do mar (MIRANDA, 2008).

Os superplastificantes de terceira geração são aditivos à base de policarboxilatos com moléculas de poliéteres pendentes (DE CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Este tipo de superplastificante tem sido empregado por pesquisadores para a confecção de concretos autoadensáveis reforçados com fibras (FORMAGINI, 2005; VELASCO, 2008; MARANGON, 2009) devido a sua alta eficiência na dispersão de partículas. A maior eficiência deste tipo de superplastificante em relação aos demais na dispersão de misturas cimentícias pode ser atribuída ao mecanismo de dispersão das partículas de cimento proporcionado por este aditivo, o mecanismo eletroestérico. PINTO *et al.* (2007) estudaram os efeitos dos três tipos de superplastificantes em pastas confeccionadas com cimento CPP – classe especial e, de acordo com a pesquisa, o aditivo que apresentou melhor desempenho com o cimento foi o superplastificante de terceira geração. Sendo que, os pesquisadores verificaram em seu trabalho que o aumento do teor deste aditivo proporcionou às pastas a redução da viscosidade plástica e do limite de escoamento.

Tabela 3 – Tipos de dispersantes adotados na confecção de misturas cimentícias.

Indústria do Petróleo	Indústria da Construção Civil	Família
Dispersantes de primeira geração	Plastificantes	Lignossulfonatos, lignossulfonatos modificados e ácidos hidrocarboxílicos.
Dispersantes de segunda geração	Superplastificantes de segunda geração	Policondensado de formaldeído e naftaleno sulfonato (ou polinaftaleno sulfonato), policondensado de formaldeído e melanina sulfonato (ou polimelamina sulfonato) e outros polímeros contendo grupos sulfonato.
Dispersantes de terceira geração	Superplastificantes de terceira geração	Polímeros acrílicos ou poliacrilatos.

2.2.4 Controladores de Filtrado

Os aditivos controladores de filtrado são usados para controlar a quantidade de água perdida por filtração pela pasta de cimento para as zonas permeáveis adjacentes. O uso desse agente evita a desidratação prematura da pasta, mudanças nas propriedades da pasta e dano induzido em zonas de produção pelo filtrado do cimento.

Os controladores de filtrado se dividem em duas classes: materiais granulares finos e polímeros solúveis em água. O primeiro agente utilizado para o controle de perda de filtrado foi a bentonita, que devido à pequena granulometria preenche os vazios entre as partículas de cimento (efeito fíler), promovendo a redução da permeabilidade da pasta. Outros materiais particulados que também podem ser usados são: o pó de carbonato, asfaltenos e resinas termoplásticas. Os polímeros solúveis em água também atuam no controle de perda de filtrado, pois estes materiais agem aumentando a viscosidade da fase líquida da pasta e reduzindo sua permeabilidade. Existem dois fenômenos que ocorrem devido à presença destes polímeros em pastas de cimentação proporcionando a redução da permeabilidade da pasta: a formação de agregados coloidais ligados fracamente na solução e a adsorção nas superfícies dos grãos do cimento.

2.2.5 Reforço Fibroso

As fibras têm sido empregadas por vários pesquisadores como reforço em argamassas e concretos devido aos benefícios que estes materiais podem promover em sua capacidade de deformação, transformando estruturas antes frágeis em estruturas deformáveis. Vários trabalhos foram desenvolvidos por pesquisadores do Laboratório de Estruturas e Materiais do PEC/COPPE/UFRJ em que a adição de fibras foi adotada em matrizes cimentícias. Dentre as fibras adotadas estão incluídas: fibras de polipropileno (VELASCO, 2002; RESENDE, 2003), fibras de aço (RESENDE, 2003; LOPES, 2005; VELASCO, 2008; MARANGON, 2009), PVA (MAGALHÃES, 2008), volastonita (VELASCO, 2008; CORREIA, 2009) e sisal (VELASCO, 2002; RESENDE, 2003; LIMA, 2004; SILVA, 2009; MELO FILHO, 2009). Devido aos resultados benéficos obtidos pelo grupo nos estudos realizados, optou-se neste estudo pelo uso de reforço fibroso em uma pasta leve de cimentação. Entretanto, para o emprego eficiente dos diversos tipos de fibras em matrizes cimentícias, características destes materiais, tais

como comprimento, módulo de elasticidade, resistência à tração, devem ser conhecidas e serão sumarizadas neste tópico do trabalho.

As fibras podem ser classificadas de acordo com seu comprimento como longas ou curtas. As fibras longas, ou macrofibras, apresentam comprimentos maiores ou iguais a 30 mm (VELASCO, 2008). As fibras curtas, ou microfibras, são mais finas e menores que as macrofibras.

As fibras podem ser inseridas na matriz cimentícia em diferentes configurações. Por exemplo, fibras longas podem ser alinhadas em uma matriz em uma direção preferencial. Outro exemplo que pode ser citado é o arranjo de fibras curtas nas três direções em uma matriz cimentícia.

As fibras podem ser classificadas de acordo com a magnitude de seu módulo de elasticidade, como fibras de alto módulo ou fibras de baixo módulo. As fibras de alto módulo, tais como as de aço, proporcionam benefícios no compósito tanto na capacidade de deformação quanto na resistência, em relação à matriz. Entretanto, as fibras de baixo módulo, tais como as fibras de polipropileno e de sisal, promovem benefícios mais significativos na capacidade de deformação da matriz.

Uma característica importante das fibras que deve ser ressaltada é sua relação de aspecto. A relação de aspecto se trata da relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro (l/d). De acordo com VELASCO (2008), o desempenho do compósito é diretamente proporcional a esta característica, ou seja, quanto maior a relação de aspecto da fibra, maiores serão os acréscimos nas propriedades do compósito. Entretanto, a mesma autora ressalta que deve se tomar cuidado em relação ao limite desta característica para que não ocorra interferência nas propriedades reológicas do concreto.

Outro parâmetro importante que deve ser considerado ao se reforçar uma matriz cimentícia é o volume de fibras que será empregado. O volume mínimo de fibras é denominado volume crítico. Quando se admite um volume de reforço fibroso superior ao crítico, a presença das fibras incrementará a resistência do compósito. Neste caso, após a abertura da primeira fissura, a carga suportada pela matriz será transferida para as fibras que não sofrerão ruptura devido ao alto volume e o material apresentará ruptura com múltiplas fissurações. Quando o volume de fibras adotado for inferior ao crítico, após a abertura da primeira fissura, a matriz transferirá a carga suportada para as

fibras que a suportará até sua ruptura. Neste caso, ocorre a abertura de uma única fissura. A dosagem de uma mistura cimentícia com uma alta fração volumétrica de fibra nem sempre é possível quando se almeja uma mistura com baixa viscosidade, pois o volume de fibras afeta as propriedades reológicas do compósito.

O reforço fibroso também tem sido empregado na confecção de pastas de cimentação, por meio de fibras de volastonita, aço, carbono, basalto e vidro. Além destas fibras também tem sido adotada uma fibra flexível a base de sílica em pastas leves de compacidade otimizada. Um capítulo deste trabalho será dedicado ao tema, devido à sua relevância no contexto do estudo.

Capítulo 3 PASTAS LEVES PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

3.1 Introdução

A escolha dos materiais que farão parte da composição da pasta de cimentação depende exclusivamente das condições do poço as quais esta pasta estará submetida, tais como, pressão, temperatura e tipo de formação. O projeto e execução de perfuração de um poço devem levar em consideração o estado de tensões atuantes sobre a rocha perfurada, que definirão os limites de pressão que não levarão à falha da rocha. As pressões que levam a rocha à falha são denominadas: pressão de colapso (falha da rocha por cisalhamento decorrente de tensões de compressão) e pressão de fratura (falha da rocha por tração) (ROCHA e AZEVEDO, 2007). A massa específica de uma pasta de cimentação é limitada pela pressão de poros e de fratura da formação rochosa. Desta forma, a massa específica da pasta deve ser superior do que a pressão correspondente à pressão de poros para impedir a invasão de fluidos da formação para o poço e inferior do que a pressão equivalente à pressão de fratura, para evitar a fratura da formação e a conseqüente invasão da pasta para o interior da formação (MIRANDA, 2008).

A perda de circulação de fluido é um perigo familiar quando se perfuram e se cimentam reservatórios altamente permeáveis, zonas depletadas e formações fracas, naturalmente fraturadas ou cavernosas (Figura 9). De acordo com ABBAS *et al.* (2003), a perda de circulação é geralmente classificada de acordo com sua intensidade, em três níveis: o primeiro nível consiste nas perdas mais suaves, que são inferiores a 1,59 m³/h (10 bbl/h); no segundo nível ocorrem perdas acima de 1,59 m³/h (10 bbl/h), mas algum fluido retorna à superfície; o terceiro nível é aquele onde há total perda de circulação e, neste caso, nenhum fluido retorna à superfície pelo anular. No entanto, EL-HASSAN *et al.* (2005), classificam a perda de circulação em quatro níveis de intensidade: o nível

mais suave corresponde às perdas inferiores a 3,18 m³/h (20 bbl/h); perdas parciais estão entre 3,18 – 31,79 m³/h (20 – 200 bbl/h); perdas severas ocorrem entre 31,79 – 79,49 m³/h (200 – 500 bbl/h); perdas totais são àquelas superiores a 79,49 m³/h (500 bbl/h) ou não há retorno de pasta pelo anular. HUTTON *et al.* (2009), também classificam a perda de circulação em quatro níveis, entretanto, os limites para as perdas suaves, parciais e severas são diferentes dos apresentados por EL-HASSAN *et al.* (2005). Segundo HUTTON *et al.* (2009), os níveis de perda de circulação apresentam os seguintes limites: perdas mais suaves correspondem às perdas inferiores a 1,59 m³/h (10 bbl/h); perdas parciais variam entre 1,59 – 15,90 m³/h (10 – 100 bbl/h); perdas severas variam entre 15,90 – 79,49 m³/h (100 – 500 bbl/h); perdas totais são àquelas superiores a 79,49 m³/h (500 bbl/h). Uma forma de se combater as perdas de circulação é a limitação da pressão exercida pelo fluido de perfuração e pela pasta de cimentação quando estes são bombeados para o poço. A pressão exercida pela pasta de cimentação é limitada por sua massa específica, que depende diretamente dos materiais que fazem parte de sua dosagem. Em algumas condições, para se atender ao limite de pressão aceitável para o poço que será cimentado, são empregadas pastas leves. As pastas leves são pastas com baixas massas específicas, que são alcançadas pela inserção de materiais estendedores em suas dosagens. No entanto, quando se trata das pastas leves convencionais, geralmente o teor água/sólido é alto, as mesmas apresentam bom desempenho ao longo de seu bombeamento e após a pega. Entretanto, as pastas leves convencionais desenvolvem baixas resistências à compressão, altas porosidades e permeabilidades, que limitam sua aplicação (MOULIN *et al.*, 1997).

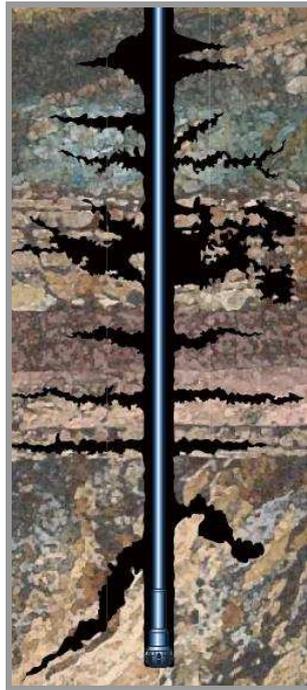


Figura 9 – Ilustração de uma formação fraca (ABBAS *et al.*, 2001).

3.2 Técnicas de Dosagens de Pastas Leves

A solução adotada pela indústria da perfuração, no final de década de 1990, para a produção de pastas leves com alto desempenho, foi a implementação da teoria do empacotamento de partículas durante a dosagem das pastas. De acordo com REVIL e JAIN (1998), após apenas um ano de emprego deste método, mais de 150 trabalhos em poços foram realizados com sucesso. Por meio de um método de empacotamento, materiais de granulometrias diferentes foram empregados na dosagem da pasta de forma que as partículas menores preenchessem os vazios gerados pelas partículas maiores (Figura 10). Segundo REVIL e JAIN (1998), uma das principais vantagens deste método para dosagem de pastas de cimentação foi a produção de pastas de baixas densidades com altas resistências à compressão, sendo possível alcançar resistências à compressão iguais a 13,8 MPa (2000 psi) para pastas com densidade igual a 1198 kg/m^3 (10 ppg) e 27,6 MPa (4000 psi) para pastas com densidade igual a 1438 kg/m^3 (12 ppg). Além disso, o método proporcionou outros benefícios às pastas, tais como, permeabilidade e porosidade muito baixas após o endurecimento, melhor estabilidade e controle de perda de fluido comparado aos sistemas convencionais (REVIL e JAIN, 1998).

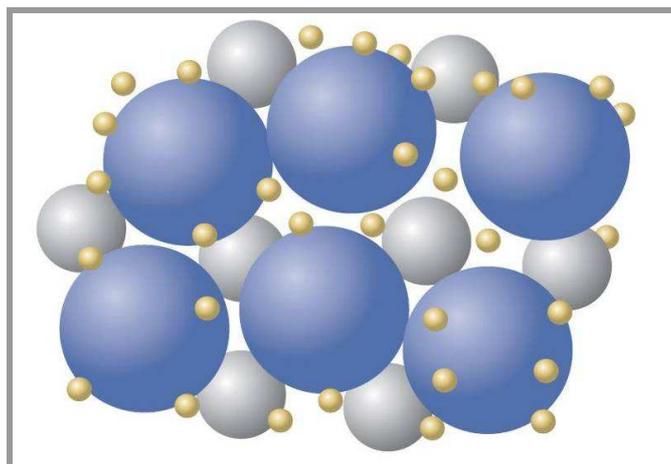


Figura 10 – Ilustração do empacotamento de partículas (AL-SUWAIDI *et al.*, 2001).

MOULIN *et al.* (1997), pesquisadores da *Schlumberger Dowell*, adotaram um modelo de empacotamento da mistura granular seca durante a dosagem de pastas leves. Com o emprego desta tecnologia, os autores conseguiram dosar pastas leves com massas específicas variando entre 1258 e 1557 kg/m³ (10,5 – 13 lbm/gal). As pastas leves produzidas desenvolveram altas resistências à compressão iniciais (24 horas), superiores a 13,8 MPa (2000 psi) e a 27,6 MPa (4000 psi), para pastas com massas específicas de 1258 kg/m³ (10,5 lbm/gal) e de 1438 kg/m³ (12 lbm/gal), respectivamente. Além disso, as pastas apresentaram baixas permeabilidades (inferiores a 9,869 nm) e baixas porosidades (20%) no estado endurecido. Devido à otimização granulométrica da mistura seca, a pasta subsequente apresentou redução no teor de água. Os valores ótimos para a porosidade das pastas leves otimizadas variaram entre 0,40 e 0,45. As propriedades das pastas empacotadas no estado endurecido foram similares ou melhores quando comparadas com uma pasta convencional, de massa específica igual a 1893 kg/m³ (15,8 lbm/gal). As pastas leves apresentaram, após cinco dias, retrações volumétricas inferiores a 1%, quando comparadas à pasta convencional (4 – 4,5 %). A resistência à compressão foi medida em cubos curados a temperatura de 176,7°C (350°F) e pressão de 20,7 MPa (3000 psi) por uma semana e doze semanas. Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados após a cura por uma semana e por doze semanas indicaram que não houve retrogressão desta propriedade. Além disso, as pastas com massas específicas iguais a 1405 kg/m³ (11,73 lbm/gal), 1426 kg/m³ (11,90 lbm/gal) e 1438 kg/m³ (12,00 lbm/gal) apresentaram resistências à compressão,

após uma semana de cura em autoclave, respectivamente iguais a 23,1 MPa (3350 psi), 24,0 MPa (3480 psi) e 27,6 MPa (4000 psi). Ensaio de tração na flexão em três pontos foram realizados em pastas curadas por três dias em câmara de autoclave (pressão de 20,7 MPa/ 3000 psi). Os resultados de tração na flexão para as pastas de massas específicas iguais a 1366 kg/m³ (11,4 lbm/gal) e 1462 kg/m³ (12,2 lbm/gal), curadas sob uma temperatura de 76,7°C (170°F), foram respectivamente iguais a 6,4 MPa (932 psi) e 3,3 MPa (472 psi). A permeabilidade foi medida em cubos curados por sete dias (pressão de cura de 20,7 MPa) e as pastas leves apresentaram resultados 10 vezes menores que a pasta convencional. A tecnologia de empacotamento da mistura granular seca foi adotada para a confecção de pastas leves destinadas a poços com problemas de migração de gás e, além disso, localizados em formações com baixo gradiente de fratura. Antes da adoção deste método, os problemas citados anteriormente eram combatidos com o emprego de dois tipos de pastas de cimentação, a primeira contendo um aditivo para combater a migração de gás e, a segunda, contendo microesferas. Entretanto, a execução da cimentação com dois tipos de pastas era complicada, pois exigia uma logística complexa e, além disso, às vezes era necessária a realização de recimentação, tornando o trabalho mais caro e demorado.

JAIN *et al.* (2000), pesquisadores da *Schlumberger* e da *Petroleum Development Oman*, apresentam em seu trabalho pastas com alta densidade e alto desempenho para cimentação de poços em campos no Sul de Oman (HDHPS⁵), dosadas através de um modelo de empacotamento de partículas. Os poços desta região estão em zona de sal e atingem até 4800 metros de profundidade, 90 MPa (13000 psi) de pressão e temperatura de até 120°C (248°F). As pastas empregadas inicialmente nos poços do Sul de Oman apresentavam na dosagem hematita como agente adensante. No entanto, a presença deste material prejudicava as propriedades da pasta. Um dos problemas observado nas pastas era sua segregação, com a ocorrência de concentração da hematita no fundo do poço. Além disso, 4 horas após a cimentação ocorria influxo de fluidos da formação para o poço perfurado (*kick*), que demandava quatro dias perdidos para a realização do

⁵ HDHPS (do inglês, *high density high performance slurry*): Pasta de alto desempenho e alta densidade.

controle do poço. Com o principal objetivo se mitigarem os problemas causados pela inserção de hematita nas pastas, pesquisadores empregaram a teoria de empacotamento de grãos para a dosagem de pastas de alta densidade e alto desempenho. Os testes laboratoriais realizados confirmaram a eficiência do método empregado, pois foi possível a dosagem de pastas de alta densidade, até 2875 kg/m^3 (24 lbm/gal), com reologias controláveis e ajustáveis. Além disso, as pastas HDHPS apresentaram menor sensibilidade a possíveis flutuações na densidade e maior estabilidade, desenvolvimento mais rápido de resistência à compressão e maior resistência à compressão final, menor permeabilidade e porosidade, quando comparadas às pastas convencionais. Pastas convencionais e de alta densidade e alto desempenho com massa específica igual a 2336 kg/m^3 (19,5 lbm/gal) foram produzidas.

DASGUPTA *et al.* (2006), pesquisadores da *Society of Petroleum Engineers* e da *Oil & Natural Gas Corporation Limited*, apresentam em seu trabalho resultados de testes de laboratório em pastas de cimentação leves e ultraleves com adequadas resistências à compressão. Para tal, empregaram um modelo de empacotamento de partículas, adotando três tipos de materiais granulares. O primeiro material adotado foi o cimento classe G, com diâmetro médio entre 20 - 25 μm . O segundo material escolhido foi de acordo com sua alta atividade pozolânica, para incrementar a resistência da pasta, além disso, também foi considerado o tamanho de seus grãos, cuja granulometria era inferior a do cimento. Um critério para a escolha do terceiro material foi sua baixa massa específica e o outro critério foi sua granulometria, superior a do cimento. Materiais de baixas massas específicas, tais como, microesferas de vidro e de cerâmica, plástico, borracha, gilsonita e carvão foram identificados como terceiros constituintes para a dosagem das pastas leves. Foram produzidas sete pastas leves e ultraleves, cujas massas específicas variaram entre $1050 - 1600 \text{ kg/m}^3$ (1,05 - 1,60 sg). As resistências à compressão das pastas (24 horas) variaram entre 8,2 - 18,9 MPa (1184 - 2735 psi). Nenhuma pasta apresentou água livre e as perdas por filtrado variaram entre 300 - 832 ml. As pastas estudadas foram empregadas em poços localizados no Campo de *Mumbai High* (Oceano Índico), que apresentavam perdas para a formação fraturada. Para a cimentação dos poços NH-7H, IT#1H e N5-11ZHA foram adotadas pastas leves empacotadas com massas específicas iguais a 1460 kg/m^3 (1,46 sg) e não foram observadas perdas. No caso do poço NH-7H, o emprego de uma pasta leve empacotada,

com massa específica igual a 1460 kg/m^3 (1,46 sg), possibilitou a cimentação de uma coluna de 1500 m sem qualquer perda de circulação, sendo que, com uma pasta convencional, de massa específica igual a 1900 kg/m^3 (1,90 sg), o levantamento de uma coluna com mais de 600/700 m não foi possível.

MIRANDA (2008), pesquisadora da *Petrobras*, também adotou um modelo de empacotamento de partículas para a dosagem de pastas leves. Em seu trabalho, a pesquisadora confeccionou pastas leves com cimento CPP classe G, sílica ativa e microesfera oca cerâmica. As pastas leves dosadas pela pesquisadora apresentaram massas específicas iguais a $1,40 \text{ g/cm}^3$ (11,7 lb/gal), $1,60 \text{ g/cm}^3$ (13,2 lb/gal) e $1,8 \text{ g/cm}^3$ (14,9 lb/gal). Após sete dias de cura em um banho térmico e uma temperatura de 76°C ($168,8^\circ\text{F}$), os cubos moldados para cada pasta foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial. Os resultados de resistência a compressão para as pastas com massas específicas iguais a $1,40 \text{ g/cm}^3$, $1,60 \text{ g/cm}^3$ e $1,80 \text{ g/cm}^3$ foram respectivamente iguais a: 18 MPa (2543 psi), 21 MPa (3066 psi) e 29 MPa (4186 psi). Em relação às propriedades reológicas, as pastas apresentaram viscosidade plástica média igual a 166 mPa.s (166 cP) e os limites de escoamento foram inferiores a 4 Pa (8 lbf/100 pé²). As pastas leves se apresentaram estáveis.

As referências apresentadas neste capítulo mostram que há, na indústria do petróleo, um grande interesse no emprego do método de empacotamento da mistura granular seca durante a dosagem de pastas leves. A possibilidade da dosagem de pastas leves com baixas massas específicas e altas resistências à compressão, baixas porosidades e permeabilidades tem sido um atrativo para a implementação desta tecnologia na dosagem de pastas leves empregadas em poços com formações fracas, com problemas de perdas de circulação ou migração de gás. Considerando todos os benefícios que podem ser alcançados a partir da dosagem de pastas leves com granulometria otimizada, neste trabalho também foi empregado método de empacotamento de partículas, que será apresentado no item seguinte.

3.3 Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) de Partículas

O Modelo de Empacotamento Compressível de Partículas (MEC ou CPM, do inglês *Compressive Packing Model*) é a terceira geração de modelos de empacotamento desenvolvidos no *Laboratoire Central et Ponts et Chaussées* (LCPC) (DE LARRARD e SEDRAN, 2002). O MEC é apresentado por DE LARRARD (1999) e SEDRAN (1999) e consiste em um método de dosagem que otimiza a mistura granular seca, promovendo a máxima compacidade de seus componentes e a correlaciona com as propriedades reológicas do concreto e com suas propriedades no estado endurecido. O MEC pode ser compreendido conceitualmente em duas etapas:

- Etapa I: Nesta primeira etapa, um modelo algébrico-geométrico é desenvolvido, através do qual a máxima compacidade possível de uma mistura granular seca é determinada (Modelo de Empacotamento Virtual). A compacidade virtual é obtida quando partículas são arranjadas uma a uma da melhor forma possível;
- Etapa II: Nesta etapa, há o desenvolvimento de um modelo físico-experimental de compactação da mistura granular, que é correlacionado ao modelo anterior através da equação de compressibilidade. Através deste modelo calcula-se a compacidade real de uma mistura granular seca e molhada.

3.3.1 Modelo de Empacotamento Virtual

Para a compreensão do modelo de empacotamento virtual é necessário definir a compacidade virtual de empacotamento (β), que é a máxima compacidade que uma mistura granular monodispersa pode atingir empilhando os grãos um a um, sem alterar sua forma original. Uma mistura monodispersa é composta por grãos de uma mesma granulometria ou com uma granulometria média.

Uma mistura pode ser polidispersa, ou composta por grãos de diferentes tamanhos. Assim, cada tipo/tamanho de grãos corresponde a uma classe. Quando os grãos de uma das classes da mistura asseguram a continuidade sólida da mistura granular, esta classe é denominada classe dominante. Para a melhor compreensão do modelo, as definições serão realizadas para uma mistura binária.

3.3.1.1 Mistura Binária sem Interação

Uma mistura binária é composta por duas classes granulares, cujos diâmetros são respectivamente d_1 e d_2 , onde $d_1 > d_2$. Os volumes ocupados pelas classes 1 e 2 em um unitário são ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente. Os teores dos grãos das classes 1 e 2 são y_1 e y_2 , respectivamente.

$$y_1 = \frac{\Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2} \quad \text{Equação 1}$$

$$y_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} \quad \text{Equação 2}$$

A compacidade virtual de empacotamento da mistura binária (γ) é determinada pela Equação 3.

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{Equação 3}$$

Uma mistura é considerada sem interação se $d_1 \gg d_2$. Desta forma, o arranjo dos grãos da classe 1 não é perturbado pela presença dos grãos da classe 2. No entanto, deve ser feita a distinção entre duas situações: a primeira, em que os grãos maiores são dominantes e, a segunda, onde os grãos menores são dominantes.

3.3.1.1.1 Grãos graúdos dominantes

Para a mistura com grãos maiores dominantes, estes grãos ocupam o volume enquanto os grãos menores preenchem seus vazios. Assim, pode-se escrever:

$$\Phi_1 = \beta_1 \quad \text{Equação 4}$$

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 = \beta_1 + \Phi_2 = \beta_1 + y_2\gamma \quad \text{Equação 5}$$

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{(1 - y_2)} \quad \text{Equação 6}$$

3.3.1.1.2 Grãos miúdos dominantes

Para a mistura com grãos pequenos dominantes, estes grãos ocupam a porosidade formada pelos grãos maiores. Assim, pode-se escrever:

$$\Phi_2 = \beta_2(1 - \Phi_1) \quad \text{Equação 7}$$

$$\gamma = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_1 + \beta_2(1 - \Phi_1) = y_1\gamma + \beta_2(1 - y_1\gamma) \quad \text{Equação 8}$$

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \beta_2)} \quad \text{Equação 9}$$

Pode-se representar graficamente a compacidade virtual de uma mistura binária (ver Figura 11), em que $\gamma^{(1)}$ é compacidade virtual máxima da mistura binária para a classe 1 dominante e $\gamma^{(2)}$ é a compacidade virtual máxima da mistura binária para a classe 2 dominante. Observando-se a Figura 11 é possível verificar que a interseção entre as curvas produzidas por $\gamma^{(1)}$ e $\gamma^{(2)}$ é o momento em que a classe 2 preenche todos os vazios da classe 1. A compacidade virtual máxima da mistura é dada para $\gamma^{(1)} = \gamma^{(2)}$.

A compacidade virtual da mistura binária é função das compacidades virtuais para classe 1 e classe 2 dominantes.

$$\gamma = \inf(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad \text{Equação 10}$$

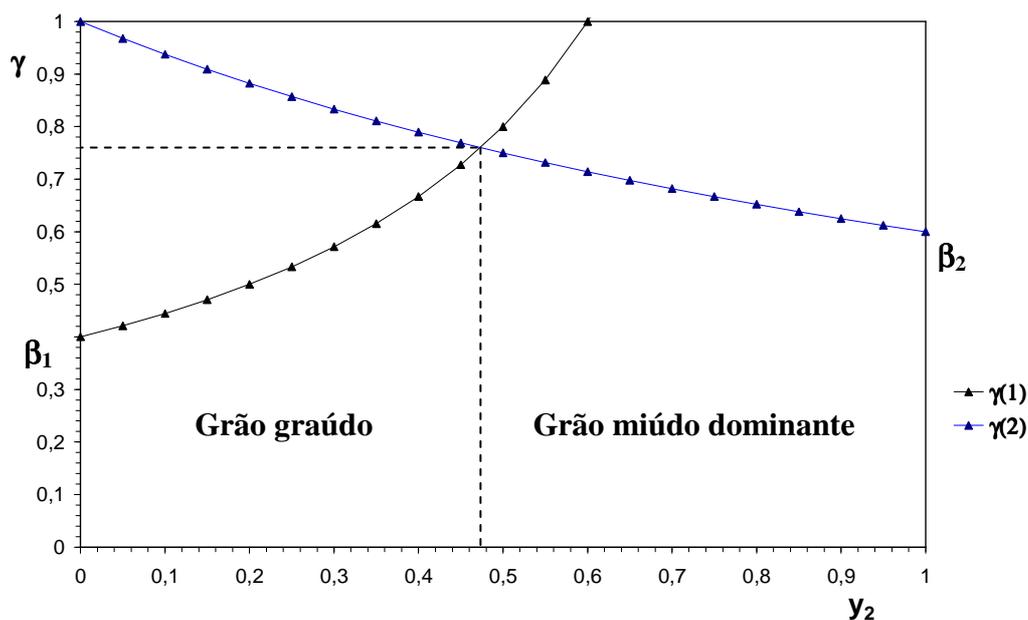


Figura 11 – Compacidade virtual de uma mistura binária.

3.3.1.2 Mistura Binária com Interação Parcial

Considerando a interação parcial entre duas classes, quando os grãos da classe 1 são um pouco maiores do que os grãos da classe 2 ($d_1 > d_2$), dois efeitos físicos podem ocorrer na mistura binária: efeito de afastamento e efeito de parede.

A adição de grãos da classe 2 numa mistura em que a classe 1 é dominante, os grãos menores (classe 2) precisam deslocar os grãos maiores (classe 1) para se acomodarem, provocando o afastamento dos grãos de classe 1. Assim, o efeito de afastamento (a_{12}) dos grãos da classe 1 na presença dos grãos da classe 2 pode ser determinado a partir da Equação 11.

$$a_{12} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1.02}} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

a_{12} – coeficiente do efeito de afastamento.

O coeficiente do efeito de afastamento varia entre $a_{12} = 0$ (quando $d_1 \gg d_2$ e se considera que não há interação devido ao efeito de afastamento) e $a_{12} = 1$ (quando $d_1 = d_2$ e se considera que há interação total devido ao efeito de afastamento).

A compacidade virtual quando a classe 1 é dominante, considerando o efeito de afastamento, pode ser determinada a partir da Equação 12.

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - a_{12} \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) y_2} \quad \text{Equação 12}$$

Com a adição de um grão da classe 1 em uma mistura granular em que a classe 2 é dominante, este grão causará o aparecimento de uma porosidade ao redor de sua superfície. Este fenômeno é denominado efeito de parede (b_{21}) e pode ser calculado através da Equação 13.

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^{1.5} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

b_{21} – coeficiente do efeito de parede.

O coeficiente do efeito de parede varia entre $b_{21} = 0$ (quando $d_1 \gg d_2$ e se considera que não há interação devido ao efeito de parede) e $b_{21} = 1$ (quando $d_1 = d_2$ e se considera que há interação total devido ao efeito de parede).

A compacidade virtual, quando a classe 2 é dominante considerando o efeito de parede, pode ser determinada a partir da Equação 14.

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_1}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21} \beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1}\right)\right] y_1} \quad \text{Equação 14}$$

Da mesma forma que na mistura sem interação, a compacidade virtual da mistura binária é função das compacidades virtuais para classe 1 e classe 2 dominantes.

$$\gamma = \inf(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad \text{Equação 15}$$

3.3.2 Modelo de Empacotamento Real

A relação entre o modelo de empacotamento virtual e o modelo de empacotamento real é realizada através do índice de compactação (K), que depende do protocolo de empacotamento utilizado (ver Tabela 4). O índice de compactação pode ser determinado através da Equação 16.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

C - compacidade real da mistura granular seca.

A compacidade real da mistura é definida como o volume sólido em um volume unitário. A porosidade da mistura (π) ou volume de vazios é determinada através da Equação 17.

$$\pi = 1 - C \quad \text{Equação 17}$$

Quando a água é inserida na mistura granular, a compacidade da mistura passa a ser denominada compacidade molhada (ϕ) e é igual a:

$$\begin{aligned} \phi &= C \quad \text{para } w \leq \pi \\ \phi &= 1 - w \quad \text{para } w > \pi \end{aligned} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

w – teor de água na mistura.

À medida que os vazios entre os grãos são preenchidos pela água, a compacidade molhada passa a ser igual à compacidade da mistura granular seca. Quando a água preenche todos os vazios da mistura granular $w = \pi$ e $w = w_{\text{mínimo}}$. A partir deste momento, para inserir mais água na mistura é necessária a saída de grãos para fornecer espaço para a água. Assim, a compacidade molhada traduz a parte sólida da mistura a partir da inserção da gota de água além da porosidade inicial entre os grãos.

Tabela 4 – Índices de compactação.

	Empacotamento Seco				Empacotamento Molhado
Processos	Simples colocação	Apiloar com uma barra	Vibração	Vibração e compressão de 10 kPa	Demanda d'água
Índices de compactação (k)	4,1	4,5	4,75	9,0	6,7

Capítulo 4 PASTAS FIBROSAS PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os estudos encontrados na literatura em que reforços fibrosos foram empregados em pastas de cimentação para poços de petróleo. As fibras têm sido adicionadas em pastas de cimentação por se tratar se um sistema efetivo contra perdas de circulação e uma importante solução para formações inconsolidadas (SIMBALA *et al.*, 2005). Os problemas de perdas de circulação na cimentação de poços ocorrem quando estes poços estão localizados em formações altamente permeáveis como os arenitos, naturalmente fraturadas como as rochas calcárias ou através de zonas depletadas (LOW *et al.*, 2003). Para a solução dos problemas de perdas de circulação são adicionados alguns materiais na pasta de cimentação primária ou secundária, dentre os quais estão as fibras. A fim de combater as perdas de circulação durante a cimentação de poços de petróleo, um tipo de fibra sintética flexível de poliéster (*Recron-3S*, da *Reliance Industries Limited*) foi desenvolvido. Este tipo de fibra é encontrado nos comprimentos de 4,8 mm, 6 mm e 12 mm e diâmetro entre 30 – 40 µm. As aplicações desta fibra como material controlador de perdas em pastas de cimentação são apresentadas por DASGUPTA *et al.* (2009) e SUYAN *et al.* (2007). DASGUPTA *et al.* (2009) inseriram a fibra de poliéster em pastas leves e este material apresentou fácil dispersão na pasta e não proporcionou problemas de entupimento dos equipamentos durante o bombeamento. Além disso, a adição deste material proporcionou um melhor efeito de tamponamento quando comparada à pasta convencional.

Outro tipo de fibra apresentado por alguns autores é a fibra flexível a base de sílica, que tem sido inserida em pastas leves para o combate às perdas de circulação em poços de

petróleo (EL-HASSAN *et al.*, 2003; LOW *et al.*, 2003; ROMERO *et al.*, 2004; GARDUÑO *et al.*, 2006).

O reforço fibroso também tem sido aplicado por alguns pesquisadores em pastas de cimentação com o objetivo de se beneficiar sua resistência à tração e capacidade de deformação. SIMBALA *et al.* (2005), pesquisadores da *Petroproduccion* e da *Schlumberger*, adotaram pastas de cimentação fibrosas em poços no Equador submetidos a fluidos corrosivos que comprometiam sua vida útil. Neste caso, o comportamento da pasta fibrosa em relação à resistência à tração foi o interesse dos operadores. As pastas convencionais empregadas na cimentação primária de poços em campos no Oriente do Equador não resistiam aos fluidos corrosivos que, conseqüentemente, atingiam os revestimentos e os danificavam. Em vários casos, os danos causados aos revestimentos eram suficientemente severos para proporcionar o fechamento do poço. A Figura 12a ilustra a evolução do procedimento adotado, onde as colunas 1 e 2 representam o progresso da corrosão na cimentação primária. A coluna 3 representa a adição da pasta fibrosa, seguida da coluna 4, onde pode ser verificado preenchimento do anular pela pasta fibrosa. A Figura 12b esquematiza a disposição final do procedimento.

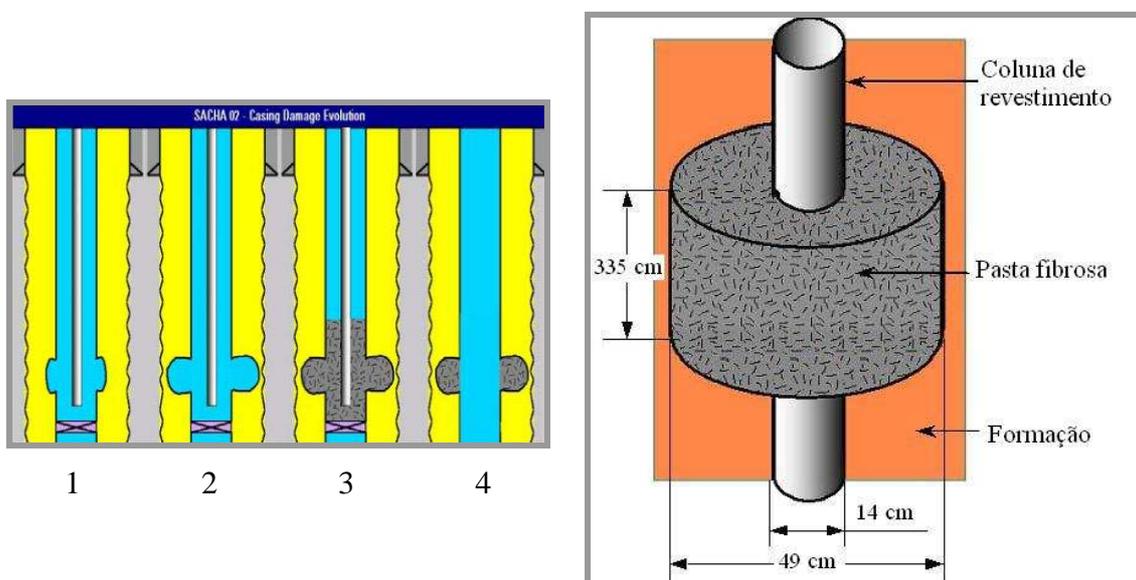


Figura 12 – (a) Esquema da solução do problema; (b) Esquema da disposição final (SIMBALA *et al.*, 2005).

Na literatura internacional, o emprego de fibras confeccionadas com vários tipos de materiais, tais como, aço, carbono, vidro, basalto e sílica tem sido difundido. A seguir serão apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura em que se aplicam pastas fibrosas para solução de problemas em cimentação de poços de petróleo.

4.2 Fibras de Aço, Carbono, Basalto, Vidro e Polipropileno

BERNDT e PHILIPPACOPOULOS (2002) investigaram a influência de fibras de aço, aço inoxidável, carbono, basalto e vidro em algumas propriedades de pastas de cimentação. Os pesquisadores alertam sobre os benefícios que as fibras têm proporcionado em concretos, tais como, aumento da resistência à tração, da capacidade de deformação, da resistência à flexão e ao cisalhamento, da ductilidade, da dureza, da resistência à fissuração induzida pelos efeitos térmicos e da retração. No caso de pastas de cimentação geotérmicas, as fibras são adicionadas para reforço e também devem apresentar durabilidade e compatibilidade térmica com o ambiente do poço. BERNDT e PHILIPPACOPOULOS (2002) avaliaram as seguintes propriedades: resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral, coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica. A pasta convencional de referência foi composta por cimento classe G e 40% de sílica ativa (teor em relação à massa de cimento), relação a/c igual a 0,55 e teores de bentonita e de dispersante iguais a respectivamente 0,034% e 0,012%, em relação à massa de cimento. Os pesquisadores também confeccionaram pastas leves, com adição de microesfera Extendsferas SLG (*PQ Corporation*). A pasta leve de referência foi composta por cimento classe G e 40% de sílica ativa (teor em relação à massa de cimento), relação a/c igual a 0,72, 0,53% de microesfera, 0,034% de bentonita e 0,012% de dispersante (teores de microesfera, bentonita e dispersante em relação à massa de cimento). Os pesquisadores utilizaram os seguintes materiais como reforço fibroso: fibra de aço (comprimento = 13 mm e diâmetro = 0,16 mm), microfibras de aço (comprimento entre 1 – 2 mm), fibras de aço inoxidável lisa e ondulada (comprimento = 19 mm e espessura = 0,86 mm), fibra de carbono (comprimentos iguais a 3,1 mm, 6,3 mm e 19 mm), microfibras de carbono (comprimento de 150 µm), fibra de basalto (comprimentos iguais a 6 mm e 15 mm) e fibra de vidro (comprimento de 12 mm). As pastas com fibras de aço nas frações volumétricas iguais a 0,5% e 1,0% obtiveram os maiores resultados de resistência à

tração por compressão diametral. As pastas confeccionadas com fibras lisas e onduladas de aço inoxidável (0,5%, 1% e 2%), microfibras de aço (0,5%, 1%, 2%, 4% e 5%) e microfibras de carbono (2% e 5%) também apresentaram resultados superiores ao da pasta de referência. As pastas com microesferas só tiveram inclusão de fibra de aço. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral para as pastas leves com fibras nos teores de 0,5% e 1,0% foram iguais a, $5,32 \pm 0,32$ MPa e $5,91 \pm 0,41$ MPa, respectivamente. No entanto, a pasta leve de referência apresentou resistência à tração por compressão diametral igual a $2,76 \pm 0,15$ MPa. A resistência à compressão foi avaliada em pastas convencionais e as pastas com adição de microfibra de aço (5%) e microfibra de carbono (2%) apresentaram resultados aproximadamente iguais à pasta de referência. No entanto, as pastas convencionais confeccionadas com 0,5% e 1,0% de fibra de aço apresentaram resultados superiores ao da pasta de referência. As propriedades térmicas foram medidas nas pastas convencionais com adição de fibra de aço (0,5% e 1,0%), microfibra de aço (5%) e microfibra de carbono (2%). Em ambas as propriedades avaliadas as pastas com adição de fibras apresentaram resultados superiores ao da pasta de referência. O coeficiente de dilatação térmica aumentou com o acréscimo de microesfera na pasta. No entanto, a inclusão de microesfera proporcionou redução na condutividade térmica.

BERNDT e MANCINI (2004) verificaram a influência da adição de fibras de aço e de carbono na resistência à tração de pastas de cimentação. Uma das pastas adotadas para a adição de reforço fibroso apresentou as seguintes composições em massa: cimento + 0,4 sílica ativa + 0,55 água + 0,034 bentonita + 0,012 dispersante. Durante a pesquisa foram empregados dois tipos de fibras de aço: microfibra com comprimento entre 1 – 2 mm e seção transversal de aproximadamente (10×25) μm e fibra de aço cilíndrica com comprimento igual a 13 mm e diâmetro da seção transversal igual a 0,16 mm. Outro tipo de microfibra também foi utilizado como reforço, a microfibra de carbono com comprimento igual a 150 μm e diâmetro da seção transversal igual a 7,2 μm . As fibras de aço reforçaram a pasta de referência em frações volumétricas entre 0,5 – 1,0%. As microfibras de aço e de carbono reforçaram a pasta de referência em frações volumétricas respectivamente iguais a 5% e 2%. Para a realização do ensaio de tração direta foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos por mistura (diâmetro = 52 mm e comprimento = 104 mm). Após 24 horas os espécimes foram desmoldados e

removidos para um banho térmico onde sofreram uma cura a 52°C por 28 dias. Os ensaios de tração direta foram realizados com a velocidade de 2 mm/min. A pasta de referência apresentou carga de pico igual a 2751 ± 258 N e módulo de elasticidade igual a $9,72 \pm 0,88$ GPa. Todas as pastas fibrosas apresentaram tanto as cargas de pico quanto os módulos de elasticidade superiores aos da pasta de referência. Os melhores desempenhos em relação às cargas de pico foram apresentados pela pastas com fibras de aço. A pasta reforçada com 5% de microfibra de aço obteve resultados de carga de pico e módulo de elasticidade respectivamente iguais a 73% e 47% superiores aos resultados apresentados pela pasta de referência. A inclusão de fibras de aço nas frações volumétricas de 0,5% e 1,0% impactou significativamente na ductilidade das pastas e em suas cargas de pico. A adição das microfibras de aço e carbono resultou no aumento do módulo de elasticidade. No entanto, a adição de fibras de aço nos teores estudados não proporcionou benefícios no módulo de elasticidade.

EL HASSAN *et al.* (2006), pesquisadores da *ADCO* e *Schlumberger*, adotaram o sistema de otimização de tamanhos de partículas associado à inclusão de microfibras metálicas durante a dosagem de pastas de cimentação empregadas em tampões para desvio da direção de poços. Os autores relatam que as pastas convencionais empregadas na indústria apresentavam problemas, tais como, baixas resistências à compressão que acarretavam na ruptura dos tampões. Os principais objetivos dos autores com o uso da nova tecnologia (Figura 13a), consistia na confecção de pastas com melhor durabilidade e resistência. O sistema empregado foi denominado pelos autores como “*High Impact Resistant Cement System*”⁶, que apresenta as seguintes vantagens em relação aos sistemas convencionais: rápido desenvolvimento de resistência à compressão, maior resistência à compressão final, maior resistência ao choque e à ruptura e maior resistência à propagação de fissuras. A pasta foi dosada com uma densidade igual a 2276 kg/m^3 (19,0 lbm/gal) e sua resistência à compressão às 24 horas foi em torno de 58,6 MPa (8500 psi). A durabilidade foi avaliada por meio de ensaio de resistência ao impacto, onde uma massa de aço de 8,545 kg foi lançada de uma altura de 60 cm sobre

⁶ *High Impact Resistant Cement System*: Sistema de cimento com alta resistência ao impacto.

o corpo-de-prova cúbico, com $(5,1 \times 5,1 \times 5,1)$ cm. Os testes foram realizados em dois tipos de pastas com massa específica igual a 1893 kg/m^3 ($15,8 \text{ lbm/gal}$). Os resultados indicaram que a pasta com reforço fibroso apresentou uma maior resistência ao choque e à ruptura que do que a pasta de referência. A pasta de referência se rompeu após seis impactos com a massa de aço (Figura 13b), enquanto a pasta reforçada com fibras de aço suportou até 80 lançamentos da massa de aço (Figura 13c). A resistência à flexão em três pontos também foi avaliada em prismas com dimensões iguais a $(30 \times 30 \times 120)$ mm. A pasta reforçada com fibra apresentou maior carga de pico e capacidade de deformação em relação à pasta de referência. Além disso, a pasta de referência apresentou ruptura frágil ao atingir a carga de pico. A pasta fibrosa foi aplicada com sucesso em oito trabalhos de tampões em poços desviados em *Abu Dhabi* (Emirados Árabes Unidos).

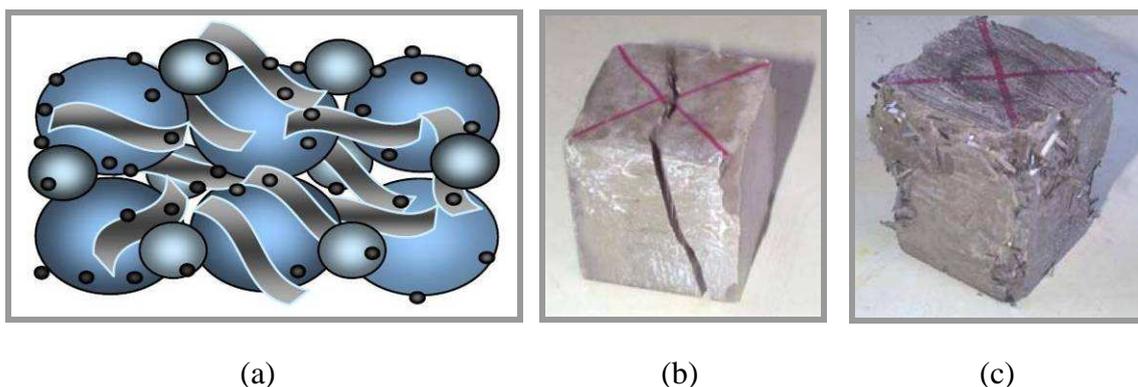


Figura 13 – (a) Ilustração do sistema de distribuição do tamanho de partículas com fibras ; (b) Cubo da pasta de referência após ensaio de resistência ao impacto; (c) Cubo da pasta fibrosa após ensaio de resistência ao impacto (EL HASSAN *et al.*, 2006).

YAO e HUA (2007) utilizaram fibra de polipropileno como reforço em pastas de cimentação visando benefício na capacidade de deformação. As pastas foram confeccionadas com cimento classe G, aditivos químicos, água ($a/c = 0,44$) e fibra de polipropileno em teores de até 0,35 (em relação à massa de cimento). Ensaio de compressão uniaxial foram realizados em cubos ($25,4 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm}$) e ensaio de flexão foram feitos em prismas ($10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$), após 48 horas de cura térmica (temperatura igual a 80°C). Os resultados de resistência à compressão das pastas foram iguais a: $18,05 \text{ MPa}$ (pasta de referência), $20,15 \text{ MPa}$ (compósito com 0,05% de

fibra), 21,24 MPa (compósito com 0,15% de fibra), 22,01 MPa (compósito com 0,25% de fibra) e 21,43 MPa (compósito com 0,35% de fibra). Os módulos de elasticidades das pastas fibrosas variaram entre 13,5 e 14,5 GPa, enquanto que o resultado da pasta de referência foi igual a 12,8 GPa. Os valores de resistência à tração na flexão das pastas fibrosas foram superiores ao da pasta de referência (igual a 8,12 MPa), pois variaram entre 8,38 e 8,52 MPa. Os pesquisadores obtiveram benefícios nas propriedades mecânicas estudadas, no entanto, afirmam que a capacidade de escoamento da pasta foi deteriorada com a inclusão da fibra, pois o espalhamento da pasta de referência de 20 cm foi reduzido à 18 cm com o reforço de polipropileno no teor igual a 0,05%.

4.3 Microfibra de Volastonita

A microfibra de volastonita é um tipo de fibra mineral composto predominantemente por cálcio e sílica. De acordo com HEINOLD *et al.* (2002) e HEINOLD *et al.* (2003), a microfibra de volastonita pode proporcionar benefícios na permeabilidade, no desenvolvimento de sua resistência à compressão, nas resistências à tração e à flexão, no controle de gás e na resistência a sulfato. Este material tem sido empregado na confecção de pastas de cimentação para poços sujeitos a temperaturas entre 0°C (32°F) e 204°C (400°F), em teores variando entre 10 – 50% em relação à massa de cimento.

HEINOLD *et al.* (2002), pesquisadores do *Society Petroleum Engineers* e da *BJ Services Company*, estudaram o efeito do acréscimo de microfibra de volastonita em algumas propriedades mecânicas de uma pasta de cimentação composta por cimento classe G e água. O teor de água das pastas variou em relação à massa de cimento entre 50 e 66%. As pastas apresentaram teores de volastonita em relação à massa de cimento iguais a 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Foram realizados ensaios de compressão uniaxial em cubos (5 × 5 × 5) cm, de tração direta em corpos-de-prova denominados “*Dog Bones*” cuja geometria está apresentada na Figura 14, além disso, também foram realizados ensaios de tração na flexão em três pontos em prismas (4 × 4 × 16) cm. A cura dos corpos-de-prova ocorreu durante 72 horas em uma mesma câmara de cura com pressão constante igual a 21 MPa (3000 psi). Em relação à temperatura de cura, duas condições foram empregadas, 38°C (100°F) e 93°C (200°F). Os corpos-de-prova curados a 93°C (200°F) apresentaram resultados de resistências à compressão e à tração

superiores aos curados a 38°C (100°F). As maiores resistências à compressão foram obtidas pela pasta com 5% de volastonita, para as duas temperaturas de cura (38°C e 93°C), que foram respectivamente iguais a 17,0 MPa (2465 psi) e 27,3 MPa (3960 psi). Os corpos-de-prova com 5%, 10%, 15% e 20% de volastonita, curados a 38°C (100°F), apresentaram resistências à tração superiores ao resultado da pasta de referência em 39%, 30%, 23% e 55%, respectivamente. No entanto, o benefício proporcionado pelo aumento do teor de volastonita na resistência à tração dos corpos-de-prova curados a 93°C (200°F) foi inferior. Sendo que, para os teores de 5%, 10%, 15% e 20% de volastonita, as resistências à tração foram respectivamente 18%, 14%, 20% e 34% superiores ao resultado da pasta de referência. A inclusão de volastonita também proporcionou benefícios na resistência à flexão para as duas temperaturas de cura empregadas.



Figura 14 – Geometria do corpo-de-prova de tração direta (HEINOLD *et al.*, 2002).

HEINOLD *et al.* (2003), pesquisadores da *Society Petroleum Engineers* e da *BJ Services Company*, desenvolveram um estudo onde os autores avaliaram as resistências à compressão, à tração por compressão diametral, à tração direta e à tração na flexão de pastas com reforço de volastonita. O método empregado para a realização do ensaio de tração por compressão diametral foi o brasileiro (Figura 15a). Os cilindros adotados para os ensaios de tração por compressão diametral apresentaram dimensões iguais a: (2,5 × 5,1) cm, (5,1 × 5,1) cm e (5,1 × 10,2) cm, pois os pesquisadores pretendiam avaliar o efeito do tamanho do corpo-de-prova neste ensaio. A velocidade de aplicação da força neste ensaio foi de 4,45 kN/min (1000 lbf/min). O ensaio de tração direta foi realizado em corpos-de-prova com geometria denominada “*Dog Bones*”, mostrada na

Figura 15b, com uma velocidade de aplicação de força igual a 2,67 kN/min (600 lbf/min). O ensaio de compressão uniaxial foi feito em cubos, com dimensões iguais a (5,1 × 5,1 × 5,1) cm. Também foram realizados ensaios de tração na flexão em três pontos em prismas de (4 × 4 × 16) cm. As pastas investigadas apresentaram em suas composições: cimento classe G + 0,02 gal/sk antiespumante (pasta de referência com densidade de 1893 kg/m³) e cimento classe G + 20% BWOC⁷ volastonita + 0,02 gal/sk antiespumante (pasta fibrosa com densidade igual a da pasta de referência). Todos os corpos-de-prova sofreram duas condições de cura por 48 horas em banhos térmicos, sendo que cada banho apresentou uma temperatura de cura, 54°C (130°F) e 82°C (180°F). Neste estudo, os pesquisadores optaram por não realizar a cura dos corpos-de-prova com pressão, pois em estudo preliminar verificaram que tanto a despressurização da câmara de cura quanto seu resfriamento comprometeram a integridade dos corpos-de-prova. A presença da fibra não incrementou a resistência à compressão para as amostras curadas em banho a 54°C (130°F). As duas pastas apresentaram resultados aproximadamente iguais a 23 MPa (3375 psi). Entretanto, os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova curados a 82°C (180°F) para as pastas de referência e fibrosa foram respectivamente iguais a 25 MPa (3645 psi) e 29 MPa (4250 psi). As resistências à tração direta e de tração na flexão das pastas fibrosas foram superiores aos resultados das pastas de referência para as duas temperaturas de cura empregadas, sendo que para as amostras curadas a 54°C (130°F), o resultado de tração direta da pasta fibrosa foi 35% superior ao da pasta de referência. No caso das amostras curadas a 82°C (180°F), resistência à tração direta da pasta fibrosa foi 59% superior ao da pasta de referência. A resistência à tração na flexão das pastas fibrosas curadas a 54°C (130°F) e 82°C (180°F) foram, respectivamente, 16% e 34% superiores aos valores apresentados pelas pastas de referências curadas nessas temperaturas. Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral indicaram que a variação dos tamanhos dos corpos-de-prova afeta na propriedade avaliada.

⁷ BWOC (do inglês, *by weight of cement*): teor em relação à massa de cimento.

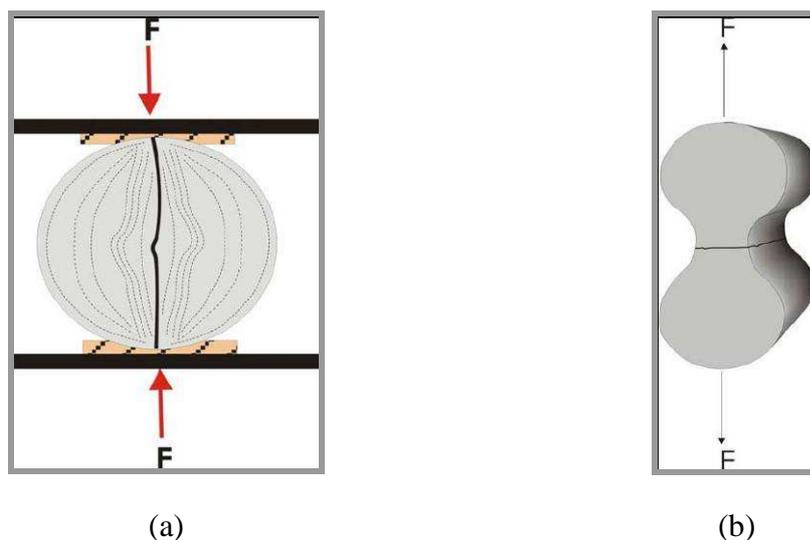


Figura 15 – Geometria dos corpos-de-prova: (a) Tração por compressão diametral; (b) Tração direta (HEINOLD *et al.*, 2003).

4.4 Fibra a base de sílica

A tecnologia em que se incorpora fibras a base de sílica (Figura 16a), especialmente desenvolvidas para a aplicação em pastas de cimentação é denominado AFCS⁸ (EL-HASSAN *et al.*, 2003) ou *Reticular Fiber Technology* (ROMERO *et al.*, 2004). Esta fibra foi desenvolvida para o controle ou a eliminação de perdas de circulação durante a cimentação de poços de petróleo (ROMERO *et al.*, 2004). A fibra a base de sílica é cilíndrica, com aproximadamente 12 mm (0,472 in.) de comprimento e 20 μm (0,000789 in.) de diâmetro. A forma fina e o tipo de material desta fibra fazem com que esta seja altamente flexível e de fácil dispersão em pastas de cimentação. Além disso, é possível que uma rede fibrosa forte seja construída através das zonas de perda de circulação. A Figura 16b ilustra uma fratura preenchida por uma pasta de cimentação empacotada com adição de fibras.

⁸ AFCS (do inglês, *advanced-fiber cement system*): Sistema que se incorpora fibras a base de sílica em pastas de cimentação.

Nos sub itens que se seguem serão apresentados alguns exemplos encontrados na literatura de aplicações de pastas de cimentação fibrosas, reforçadas com fibras a base de sílica, em poços de petróleo no México e nos Estados Unidos da América.

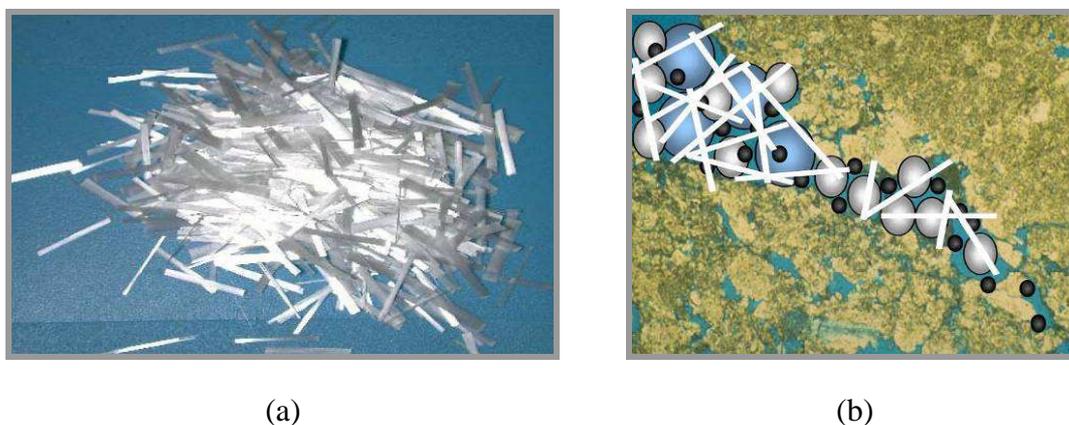


Figura 16 – (a) Fibras a base de sílica (ROMERO *et al.*, 2004); (b) Ilustração do preenchimento de uma fratura por uma pasta leve empacotada fibrosa (EL-HASSAN *et al.*, 2003).

4.4.1 Poços no México

4.4.1.1 Poço Copano 32

No Sul do México, 65% da produção de óleo e 74% da produção de gás vêm zonas provenientes de formações Mesozóicas, que consistem em formações naturalmente fraturadas, com um alto potencial de perda de circulação. ROMERO *et al.* (2004), pesquisadores da PEMEX, Society Petroleum Engineers e Schlumberger, descrevem em seu trabalho a implementação de pastas leves com reforço fibroso durante a cimentação em três poços no México entre os anos de 2003 e 2004 (Copano 32, Malva 201 e Copano 12), para combater a perda de circulação. O reforço fibroso foi realizado com fibras a base de sílica. O consumo de fibras empregado foi de $3,00 \text{ kg/m}^3$.

Outra medida adotada para se obter uma pasta leve com maior resistência à compressão e menor porosidade, foi o empacotamento da mistura granular seca da pasta, onde foram adotados três tamanhos de partículas, com diâmetros variando entre $0,30 \times 10^{-3} \text{ cm}$ e $0,02 \text{ cm}$. Para atender às condições dos poços no Sul do México, as pastas dosadas precisariam atingir baixas densidades e altas resistências à compressão. Para tal, foi

necessário dosar uma pasta com massa específica igual a 1024 kg/m^3 (8,55 lbm/gal). A pasta também precisava ser estável a altas temperaturas, aproximadamente iguais a $176,7^\circ\text{C}$ (350°F) e a pressões no fundo do poço (BHPs⁹) de 41,4 MPa (6000 psi), e também, necessitavam apresentar uma resistência à compressão mínima às 12 horas de 6,9 MPa (1000 psi).

Na terceira tentativa, uma pasta que atendesse aos critérios requeridos foi dosada, composta por esfera oca de alta pressão, cimento Portland e um tipo de cimento muito fino. O único critério que não foi atendido foi o da resistência à compressão na idade de 12 horas, pois a pasta dosada apresentou um resultado igual a 5,5 MPa (800 psi). Testes reológicos foram realizados em laboratório nesta pasta, para aplicação no poço Copano 32. As propriedades reológicas obtidas por testes de acordo com o API foram uma viscosidade plástica igual a 0,06 Pa.s (60 cP) e um limite de escoamento de 5,75 Pa (12 lbf/100ft²). Copano 32 foi o primeiro poço no Sul do México onde se adotou a tecnologia de dosagem de pasta descrita anteriormente e, após a realização de testes para verificação do isolamento do anular pela pasta adotada durante a cimentação, o operador considerou o procedimento um sucesso. Resultados satisfatórios também foram obtidos utilizando a mesma tecnologia de dosagem de pasta nos poços Malva 201 e Copano 12.

4.4.1.2 Poço Cantarell 1087-D

O campo de *Cantarell* está localizado no Golfo do México e foi descoberto em 1976 (GARDUÑO *et al.*, 2006). *Cantarell* já foi o maior campo petrolífero marítimo no mundo, com mais de 35 bilhões de barris. Agora, após quase três décadas, o campo está perto de seu esgotamento. Em seu auge, em 2004, *Cantarell* extraía 2,1 milhões de barris de petróleo por dia, ou 60% da produção total mexicana (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2007). Devido ao fato deste campo ser explorado há mais de 30 anos, a formação tem se tornado depletada com o tempo. Os poços deste campo estão sujeitos

⁹ BHPs: *bottomhole pressures* (pressões no fundo do poço).

às tensões relacionadas às variações de pressão e de temperatura, à execução dos trabalhos de estimulação, vibração, etc.

Por muitos anos, as pastas leves do campo de *Cantarell* eram baseadas na tecnologia de distribuição de partículas otimizada. Assim, as pastas dosadas apresentavam redução da porosidade e da permeabilidade e, devido ao arranjo compacto das partículas, a quantidade de sólidos de um determinado volume era maior, e conseqüentemente, havia a melhora da resistência à compressão da pasta.

A fim de se melhorar a qualidade das cimentações realizadas no campo de *Cantarell*, em agosto de 2003 uma solução inovadora foi proposta, a adição de fibras nas pastas leves compactadas. O objetivo dos pesquisadores da *PEMEX* e *Schlumberger* com a adição de fibra foi de aumentar a resistência ao cisalhamento da pasta para garantir uma resistência adicional da bainha de cimento localizada entre a formação e o revestimento de produção.

Para verificar algumas propriedades da pasta leve fibrosa foram realizados alguns testes de laboratório, tais como, resistência ao cisalhamento, à compressão e ao impacto. O ensaio de resistência ao cisalhamento foi realizado em cilindros de pastas leves fibrosas (consumo de fibras igual a $5,71 \text{ kg/m}^3$) curados sob condições atmosféricas de pressão e temperatura. Cada cilindro foi submetido à torção e sua resistência ao cisalhamento foi calculada com o resultado do torque medido durante sua ruptura. Os resultados indicaram que os cilindros com adição de fibras apresentaram resistência ao cisalhamento média 46% superior aos confeccionados sem fibras. O ensaio de resistência à compressão e o ensaio de resistência ao impacto foi realizado em amostras cúbicas curadas por uma semana com uma pressão de 20,7 MPa (3000 psi) e temperatura de 102°C (216°F). A resistência à compressão média dos cubos não foi influenciada pela adição de fibras. Entretanto, o resultado do módulo de elasticidade médio dos cubos com fibras foi 28,9% superior ao resultado dos cubos sem fibras. Os cubos de pasta fibrosa apresentaram melhor resistência ao impacto em relação aos cubos sem fibras.

A primeira aplicação desta tecnologia (pastas leves empacotadas fibrosas) na região foi no poço *Cantarell-1087D*. Em outubro de 2003, o primeiro poço no mar do México foi cimentado com sucesso com uma pasta leve empacotada fibrosa, com massa específica igual a $1,10 \text{ g/cm}^3$ ($9,17 \text{ lbm/gal}$). Devido ao sucesso desta primeira cimentação, até

agosto de 2006 foram realizados mais de 40 trabalhos de isolamento de zonas de produção através das formações depletadas no Campo de *Cantarell*.

4.4.1.3 Poços SY-36 e SB-356

EL-HASSAN *et al.* (2003), pesquisadores da *Society Petroleum Engineers*, *Schlumberger* e *ADCO*, apresentam um estudo em que fibras a base de sílica foram usadas como reforço em pastas de cimentação. Testes laboratoriais foram realizados nas pastas dosadas com fibras para verificar sua perda de fluido, em uma célula HPHT API de perda de fluido modificada. No fundo da célula API foram colocadas placas com padrão de perfuração que representam diferentes porosidades (diâmetros dos furos de 0,001 m, 0,002 m, 0,003 m e 0,004 m) e fendas retangulares representando diferentes porosidades e tamanhos de fratura (0,046 m de comprimento com 0,001 – 0,002 m de largura). Uma placa sólida foi inserida no topo da célula para agir como um pistão logo que a pressão fosse aplicada. Durante os testes as pressões variaram entre 0 e 2 MPa (290 psi) e a temperatura foi de 25°C (77°F). As matrizes para inserção de fibras foram duas: uma pasta convencional (massa específica igual a 15,8 lbm/gal) e uma pasta leve de alto desempenho (HPLW¹⁰). A mistura granular seca da pasta leve de alto desempenho foi otimizada por um sistema de distribuição de tamanho de partículas. Os resultados indicaram que a eficiência de obstrução das fibras foi maior quando estas foram inseridas a matriz HPLW, em relação à matriz convencional. Isto pode ser explicado pela maior presença de sólidos na pasta HPLW (aproximadamente 60%) comparado à pasta convencional (cerca de 40%).

¹⁰ HPLW (do inglês, *high-performance lightweight slurry*): Pasta leve de alto desempenho.

O teste de área foi realizado antes da cimentação de *liner* no Golfo do México. O aumento da concentração de fibras levou a uma impressão visual de aumento de viscosidade da pasta. O teor de fibra foi aumentado de 1,43 kg/m³ (0,5 lbm/bbl) para 8,56 kg/m³ (3 lbm/bbl). Entretanto, o gráfico de pressão não indicou o aumento da pressão de fricção com o aumento da concentração de fibra.

A pasta HPLW foi utilizada em cimentações em dois poços situados no Oriente Médio (SY-36 e SB-356). Estes poços possuem formações carbonáticas conhecidas pelos problemas crônicos de perda de circulação durante a perfuração e a cimentação (*Umm El Radhuma* e *Simsima*). Os principais objetivos das operações de cimentação eram garantir a integridade dos poços e proteger as colunas de revestimento (9 5/8 in) da água salgada corrosiva presente ao longo das regiões e também em formações com profundidades rasas.

Durante a perfuração da seção (12 1/4 in) do poço SY-36, se deparou com perda de circulação que atingiu 15,90 m³/hora (100 bbl/hora) à profundidade de 1393 m (4570 ft). A taxa de perda de circulação aumentou para 23,85 m³/hora (150 bbl/hora) quando o a coluna de revestimento (9 5/8 in) foi inserida. O fluido de perfuração apresentava massa específica igual a 1090 kg/m³ (9,1 lbm/gal) quando houve a perda de circulação. Ao realizar a cimentação do poço com uma pasta leve empacotada fibrosa, com massa específica igual a 1282 kg/m³ (10,7 lbm/gal), se esperava que também ocorresse perda de circulação. Entretanto, o processo de cimentação foi considerado bem-sucedido após fazer com que 21,3 m³ (134 bbl) de fluido de perfuração retornasse à superfície sem operações de cimentação corretivas. Durante a operação não foram verificados problemas durante a mistura e o bombeamento da pasta.

Durante a perfuração da seção (12 1/4 in) do poço SB-356, foi verificada uma perda de circulação que atingiu 79,49 m³/hora (500 bbl/hora) com o uso de lama de perfuração de massa específica igual a 1036 kg/m³ (8,65 lbm/gal). Para controlar perdas durante a cimentação da coluna de revestimento (9 5/8 - in) a cimentação foi realizada com uma pasta leve empacotada fibrosa de massa específica durante a mistura igual a 1198 kg/m³ (8,0 lbm/gal) e igual a 1054 kg/m³ (8,8 lbm/gal) no fundo do poço. A pasta apresentou tempo de espessamento igual a 4 horas e 35 minutos (100 BC), água livre API igual a zero, perda de fluido API de 95 ml/ 30 minutos, resistência à compressão em cubos na idade de 24 horas de 5,5 MPa (800 psi), viscosidade plástica (67°C – 152°F) de 0,066 Pa.s (66 cP) e limite de escoamento (67°C - 152°F) de 2,4 Pa (5 lbf/100 ft²). Durante o

deslocamento foram observados retornos parciais, que não eram esperados. Por isso, a cimentação foi considerada um sucesso. Além disso, o topo da pasta de cimento no anular foi consideravelmente alto.

4.4.2 Poços no Nordeste dos E. U. A.

LOW *et al.* (2003), pesquisadores da *Society Petroleum Engineers* e *Schlumberger*, também empregaram a fibra a base de sílica como reforço fibroso em pastas de cimentação para a mitigação de problemas de perda de circulação em poços no Nordeste de *Wyoming* (E. U. A.). Dois tipos de pastas foram testados em laboratório: pasta convencional com massa específica igual a 1893 kg/m^3 (15,8 lbm/gal) e pasta leve de alto desempenho com massa específica igual a 1486 kg/m^3 (12,4 lbm/gal). Durante a dosagem da pasta leve de alto desempenho suas partículas tiveram a compacidade otimizada. O ensaio realizado para a verificação da eficiência do reforço fibroso foi “teste dinâmico” especificado pelo *American Petroleum Institute*, com um diferencial de pressão entre 0 e 2 MPa (290 psi) e temperatura igual a 25°C (77°F). Os elementos filtrantes adotados apresentavam furos com diâmetros iguais a 1 mm, 2 mm, 4 mm e 6 mm. O ensaio de perda de fluido consiste na aplicação de uma determinada pressão numa pasta inserida em célula de teste fechada. Dentro da célula de teste existe um elemento filtrante (peneira) pelo qual uma parte da fase líquida da pasta passa durante o período de aplicação de pressão (30 minutos). A fase líquida da pasta perdida durante a filtração da pasta tem o volume medido no final de ensaio. Quanto maior o volume de fluido medido, menor é a capacidade da pasta em conter a sua fase líquida ou maior a sua susceptibilidade em perder a fase líquida para a formação. Durante o ensaio ocorre a perda de fluido até haja o entupimento das aberturas do elemento filtrante. O ensaio simula o comportamento da pasta ao entrar numa fratura da formação. Os ensaios realizados com a placa cujos furos apresentavam diâmetro igual a 1 mm e com aplicação de uma pressão igual a 2 MPa (290 psi) indicaram uma maior perda de fluido da pasta convencional (91,1 mL) em relação à pasta leve de alto desempenho (9,3 mL). Os pesquisadores verificaram que para cada tipo de elemento filtrante é necessário um teor mínimo de fibra na pasta para se alcançar o entupimento de suas aberturas. Desta forma, quanto maior a concentração de fibras, melhor é a eficiência da pasta na obstrução de furos. Os pesquisadores verificaram também em seu estudo a capacidade

de perda de fluido de pastas confeccionadas com outros tipos de fibras com diferentes comprimentos e concluíram que o parâmetro mais importante da fibra para sua aplicação para atenuação de perda de circulação é seu comprimento. No entanto, um cuidado especial deve ser tomado em relação ao comprimento máximo da fibra inserida em uma pasta de cimentação. Fibras longas podem dificultar o processo de mistura da pasta e, também, entupir o equipamento de bombeamento da pasta. Baseados nos experimentos realizados, os pesquisadores chegaram a um consenso em relação ao comprimento adequado das fibras, entre 12 – 14 mm.

Os poços de gás natural no nordeste de *Wyoming* (E. U. A.) são poços tipicamente de baixo gradiente de fratura com problemas significativos de perda de circulação. O emprego de pastas estendidas e espumadas durante a cimentação primária dos poços freqüentemente requeriam a realização de correções. A solução para os problemas dos poços da região foi o emprego de pastas leves fibrosas durante a cimentação primária, com distribuição do tamanho das partículas otimizado. A regra indica que 100% de excesso de pasta de cimentação deve ser bombeado para o poço. Na região em questão, mesmo com essa grande quantidade de pasta, foi necessária correção da cimentação primária em aproximadamente 25% dos poços. Nestes casos, ou as pastas não retornavam a superfície, ou retornavam, mas ao parar o bombeamento havia um recuo significativo da pasta. O recuo da pasta indica sua perda para a formação. Na região, dez trabalhos foram bombeados com pastas leves fibrosas de alto desempenho onde as pastas retornaram à superfície com um recuo mínimo. O excesso de pasta bombeado para os poços de reduzido de 100% para 56%. Isto indica uma redução na invasão da pasta de cimento nas zonas produtoras.

Capítulo 5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

A primeira fase deste trabalho consiste na caracterização de três pastas leves de alto desempenho, P1, P2 e P3, que foram dosadas visando o máximo empacotamento de suas misturas granulares secas. Em seguida, um extenso programa experimental foi realizado utilizando-se estas pastas (ver o organograma ilustrado na Figura 17) com o objetivo de determinar suas características físico-químicas e mecânicas. A partir das caracterizações realizadas nas pastas leves de alto desempenho, uma das pastas (P2) foi escolhida para ser reforçada com a microfibrila de volastonita e com as fibras de PVA e polipropileno. A fibra de volastonita foi inserida na pasta P2 em teores iguais a 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% (em relação ao volume de pasta). Enquanto que a fibra de PVA e de polipropileno foram utilizadas em teores (em relação ao volume de pasta) iguais a 0,50% e 1,00% e 0,50% e 0,75%, respectivamente. A Figura 18 ilustra os ensaios realizados para a avaliação das pastas leves fibrosas de alto desempenho.

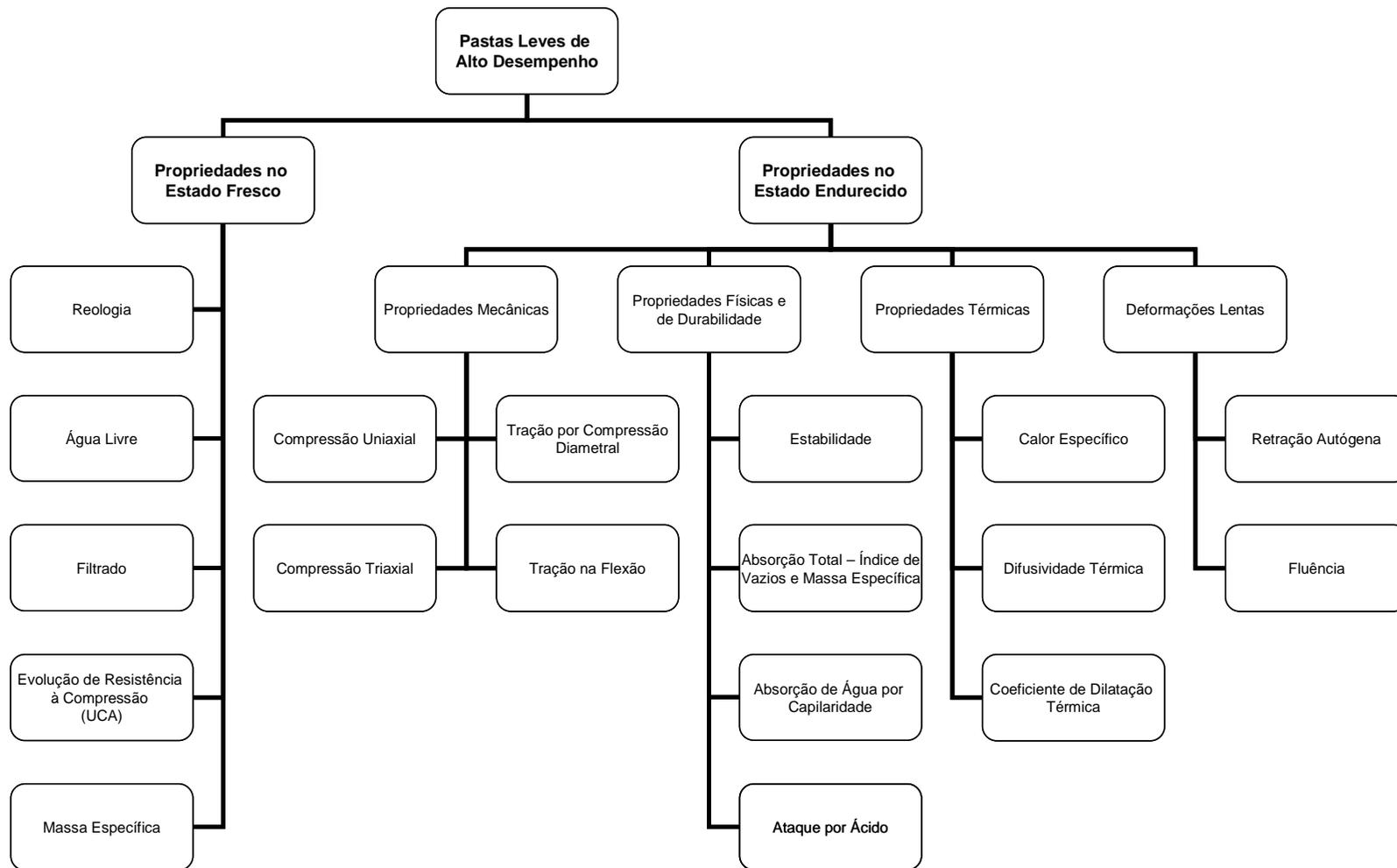


Figura 17 – Programa experimental das pastas leves de alto desempenho.

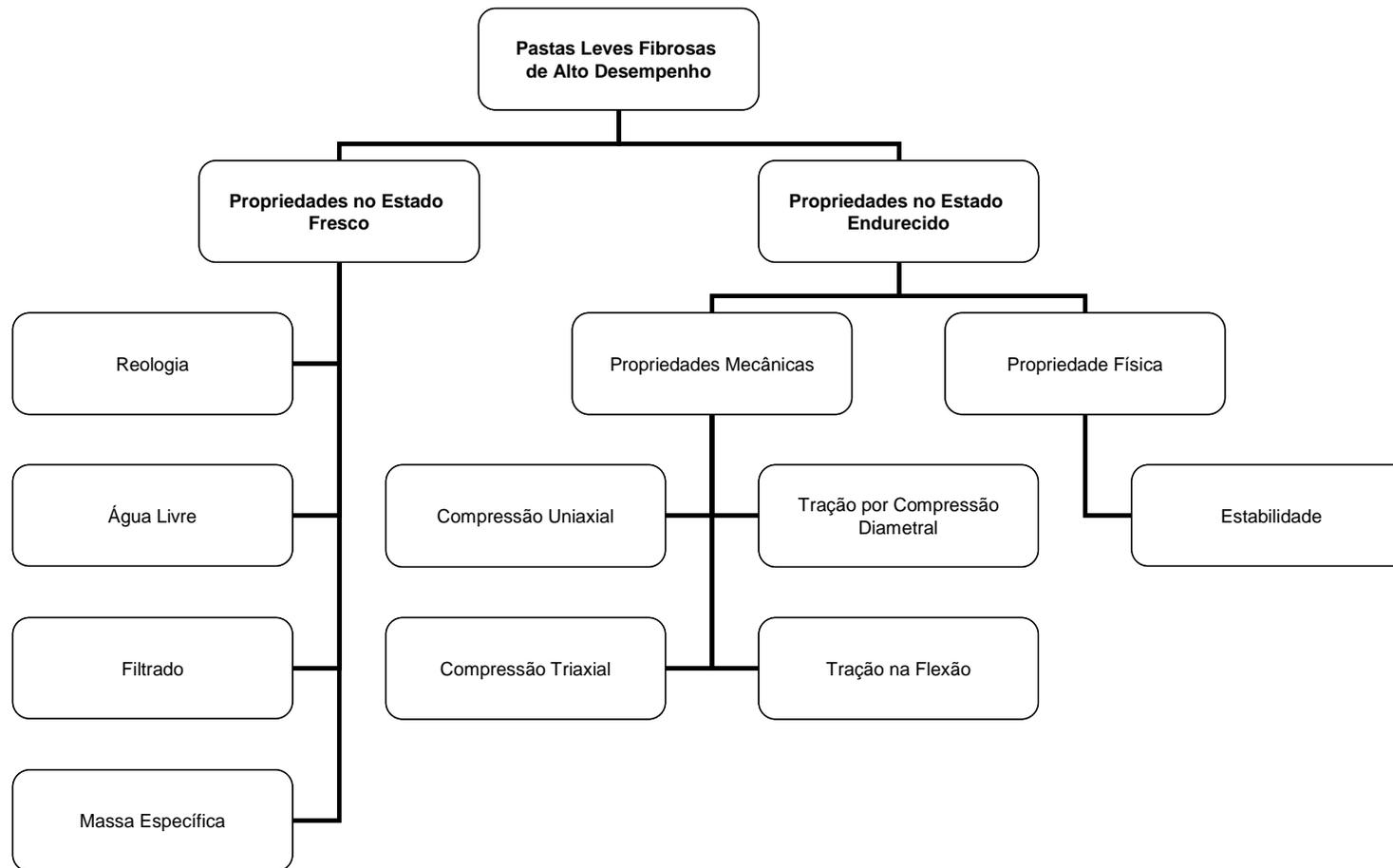


Figura 18 – Programa experimental das pastas leves fibrosas de alto desempenho.

5.2 Dosagem das Pastas Leves de Alto Desempenho

Como já mencionado, as pastas leves (P1, P2 e P3) foram dosadas com o auxílio do simulador numérico MEC_COPPE 1.0 para empacotamento de misturas secas (SILVOSO, 2008). Este simulador foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas e Materiais do PEC/COPPE/UFRJ no âmbito de um Projeto P&D com a Petrobras e baseou-se no Modelo de Empacotamento Compressível de Partículas (MEC) desenvolvido por DE LARRARD e colaboradores (1999). Para a utilização do MEC_COPPE 1.0 é necessária a inserção no programa de dados intrínsecos dos materiais granulares, tais como granulometria, massa específica e compacidade (Figura 19). Após a inclusão dos dados de cada material granular a otimização dos materiais granulares é realizada, obtendo-se como resposta a compacidade virtual e a real (Figura 20) e gráficos que correlacionam a compacidade real com os teores dos materiais (Figura 21).

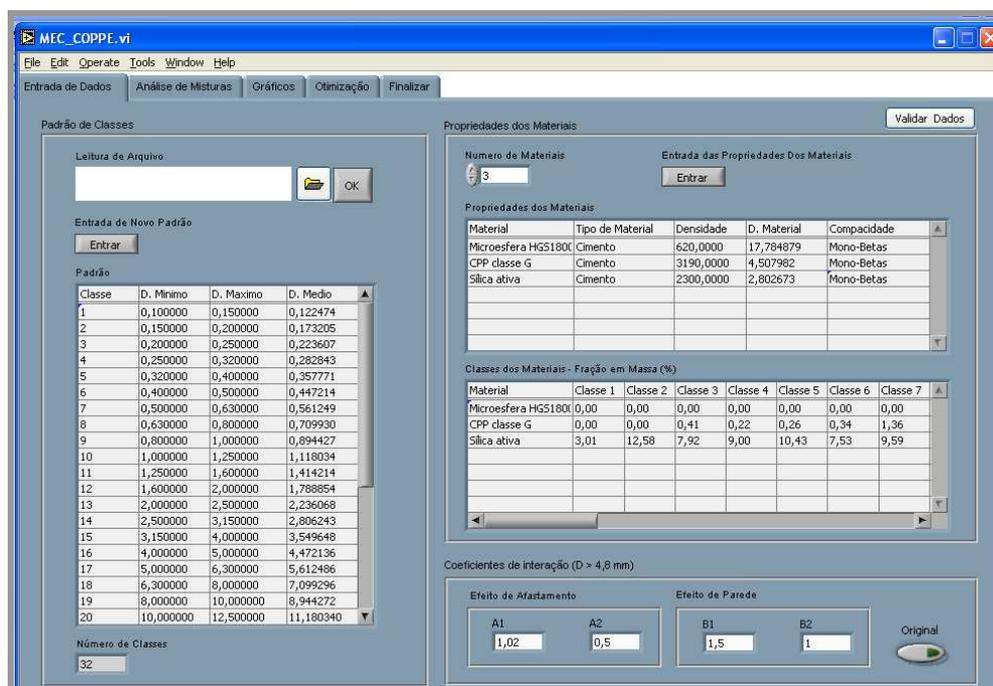


Figura 19 – Entrada de dados no MEC_COPPE 1.0.

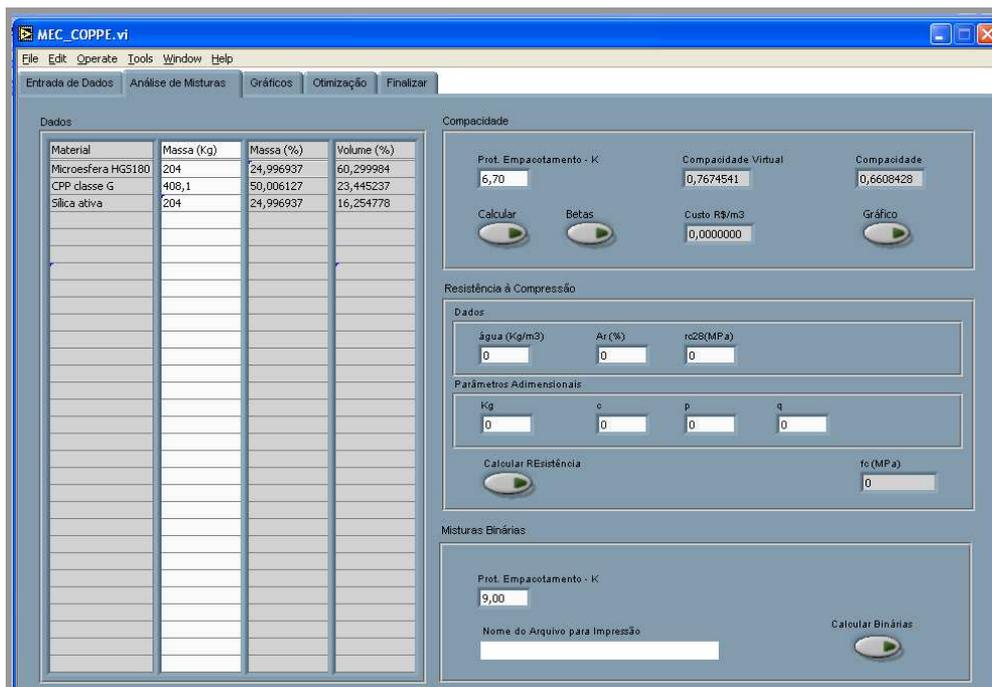


Figura 20 – Análise das misturas no MEC_COPPE 1.0.

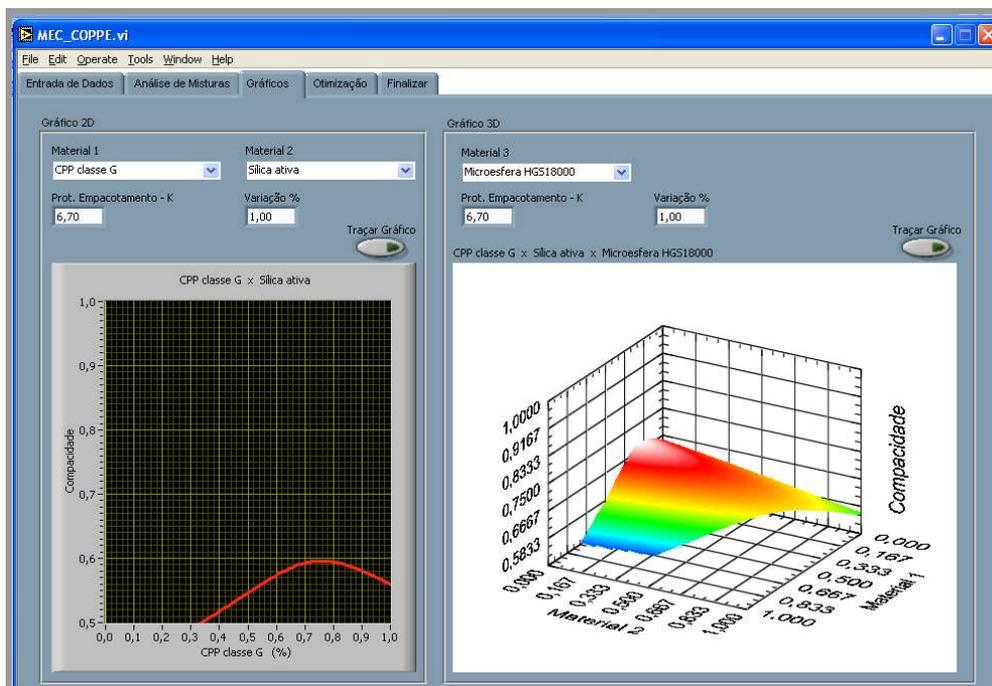


Figura 21 – Gráficos da compacidade granular obtidos utilizando-se o MEC_COPPE 1.0.

Os materiais granulares das pastas leves de alto desempenho P1, P2 e P3 foram dosados para que cada pasta atingisse sua máxima compactidade. Os teores dos materiais granulares obtidos pelo programa computacional MEC_COPPE 1.0 para as pastas P1, P2 e P3 e suas respectivas compactidades estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição granular das pastas P1, P2 e P3.

Material	Teor em massa seca (%)		
	P1	P2	P3
CPP - classe especial	38	60	-
CPP - classe G	-	-	50
Microesfera SG	25	20	-
Microesfera HGS 18000	-	-	25
Sílica ativa	10	20	25
Sílica 120#	27	-	-
Compactidade da Mistura	0,743	0,743	0,700

A partir da definição dos teores dos materiais granulares para uma mistura granular de máxima compactidade foi realizada a finalização do dosagem de cada pasta, com a definição dos teores de água e aditivos.

A quantidade de água de uma mistura otimizada está relacionada diretamente à sua porosidade e pode ser calculada a partir da Equação 17. De acordo com o MEC, a quantidade de água para a dosagem de uma pasta empacotada deve ser um pouco superior à porosidade desta pasta, que no caso de pastas de cimentação nem sempre é o suficiente para se atingir a fluidez necessária para seu bombeamento. No entanto, apesar da pasta de cimentação precisar de um teor de água que a torne bombeável, não é possível inserir água na mistura até que esta apresente uma fluidez adequada. O excesso de água pode acarretar em prejuízos na resistência mecânica, porosidade e permeabilidade em seu estado endurecido. Além disso, também pode causar problemas de exsudação e segregação na pasta. De acordo com MIRANDA (2008), para que as pastas otimizadas apresentem resistências mecânicas e químicas superiores às

apresentadas pelas pastas convencionais, um teor mínimo de água é necessário para que as mesmas se apresentem desfloculadas e, também, para que sejam bombeáveis. Assim, para não se adotar um teor de água muito alto, isto é, muito acima da porosidade da mistura granular seca, o ajuste do teor de água deve ser realizado simultaneamente com a adição de aditivo superplastificante.

MIRANDA (2008) relata em seu trabalho que, de acordo com a literatura, pastas de cimentação de compacidade otimizada devem conter um teor de água que proporcione uma porosidade na pasta fluida entre 0,35 e 0,45. Através de ensaios preliminares, a pesquisadora verificou que, em geral, as pastas com porosidade de cerca de 0,35 apresentavam-se pouco fluidas e que as pastas com porosidade em torno de 0,45 decantavam. MOULIN *et al.* (1997) verificaram que os valores ótimos para as porosidades das pastas otimizadas de seu estudo variaram entre 0,40 e 0,45. As pastas P1, P2 e P3 foram dosadas com volumes de água iniciais que proporcionassem às misturas uma porosidade em torno de 0,40. Assim, após a determinação de um valor inicial para a porosidade, o volume da fase líquida de cada pasta foi calculado pela Equação 19.

$$\pi = \frac{V_L}{(V_L + V_S)} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

π – Porosidade da pasta;

V_L – Volume de líquidos (ml);

V_S – Volume de sólidos (ml).

Os teores de água e superplastificantes das pastas P1, P2 e P3 foram ajustados de acordo com as propriedades reológicas das pastas, sendo que os limites definidos pelos fabricantes para os superplastificantes foram respeitados (Tabela 15). Além disso, ensaios de Compatibilidade e Ponto de Saturação foram realizados entre os materiais cimentícios e superplastificante de cada mistura para auxiliar na dosagem dos teores de superplastificante. Os ajustes realizados estão apresentados no Anexo A1.

5.2.1 Compatibilidade e Ponto de Saturação entre os Materiais Cimentícios e os Aditivos Químicos das Pastas P1, P2 e P3

Os ensaios de compatibilidade e ponto de saturação foram realizados para a verificação tanto da compatibilidade entre os materiais cimentícios e superplastificante quanto do teor ótimo de superplastificante de cada pasta. Para tanto, as seguintes pastas foram ensaiadas:

- Mistura 1 (referente à pasta P1): cimento CPP – classe especial (388,2 kg/m³), sílica ativa (100,9 kg/m³), água (439,1 kg/m³) e superplastificante CFR-6L;
- Mistura 2 (referente à pasta P2): cimento CPP – classe especial (659,2 kg/m³), sílica ativa (217,5 kg/m³), água (450,3 kg/m³) e superplastificante CD-33B;
- Mistura 3 (referente à pasta P3): cimento CPP - classe G (408,1 kg/m³), sílica ativa (204,0 kg/m³), água (445,9 kg/m³) e superplastificante CD-33B.

A Figura 22 apresenta as curvas de escoamento da Mistura P1 (referente aos materiais da pasta P1). Os resultados apresentados indicam que há compatibilidade entre os materiais cimentícios e o superplastificante CFR-6L. Apesar do ponto de saturação da pasta P1 ser igual a 0,6% é possível verificar na Figura 22 a pequena variação no tempo de escoamento das pastas com o acréscimo de superplastificante. Entre a pasta confeccionada com teor de superplastificante igual a 0,6% (ponto de saturação) e a pasta confeccionada sem superplastificante há uma diferença de cerca de 10 segundos nos tempos de escoamento.

As curvas de escoamento da Mistura 2 (referentes aos materiais da pasta P2) estão apresentadas na Figura 23. Os resultados mostram a compatibilidade entre os materiais cimentícios e o superplastificante CD-33B e, também, que o ponto de saturação da pasta P2 foi igual a 1,4%.

Na Figura 24 estão apresentadas as curvas de escoamento da Mistura 3 (referentes aos materiais da pasta P3). Os resultados apresentados indicam que há compatibilidade entre os materiais cimentícios e o superplastificante CD-33B e que o ponto de saturação da pasta P3 é 1,2%.

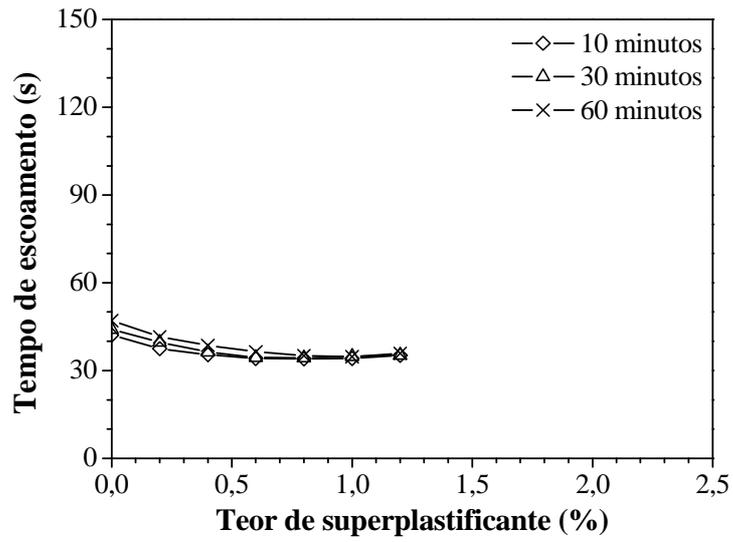


Figura 22 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 1.

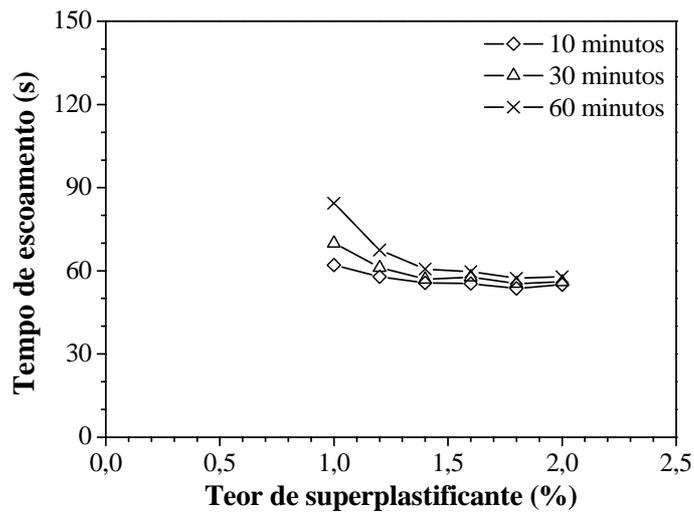


Figura 23 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 2.

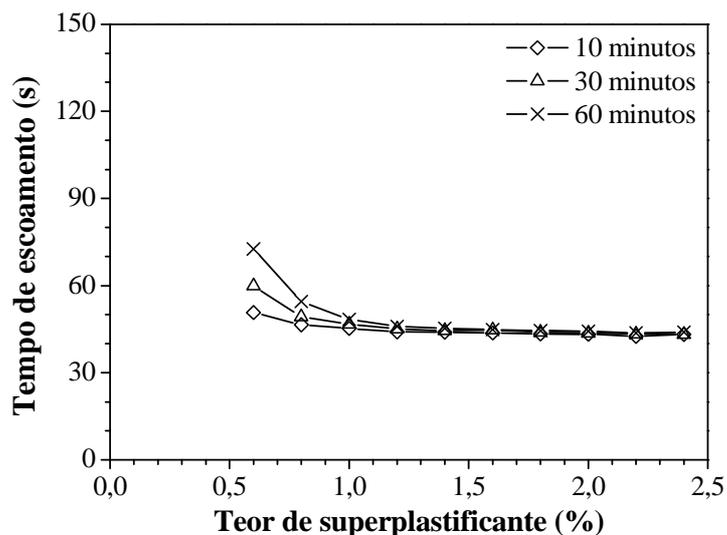


Figura 24 – Curvas de escoamento no funil de Marsh da Mistura 3.

Na Tabela 6 estão apresentados os pontos de saturação das pastas P1, P2 e P3 e, também, os teores dos superplastificantes adotados em suas dosagens. De acordo com os resultados apresentados, as pastas P1, P2 e P3 foram dosadas com teores respectivamente iguais a 0,9%, 1,5% e 1,3%. Os teores dos superplastificantes empregados nas dosagens das pastas leves foram superiores aos pontos de saturação para que suas propriedades reológicas fossem satisfatórias.

Tabela 6 – Teores dos aditivos químicos.

Pasta	Superplastificante	Teor Adotado (%)	Ponto de Saturação (%)
P1	CFR-6L	0,9	0,6
P2	CD-33B	1,5	1,4
P3	CD-33B	1,3	1,2

As proporções de todos os materiais que compuseram as pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Proporcionamento dos materiais das pastas P1, P2 e P3 (kg/m³).

Materiais/Pastas	P1	P2	P3
CPP - classe especial	388,2	659,2	-
CPP - classe G	-	-	408,1
Microesfera SG	256,2	217,5	-
Midroesfera HGS 18000	-	-	204,0
Sílica ativa	100,9	217,5	204,0
Sílica 120#	275,6	-	-
Superplastificante (CFR-6L)	13,9	-	-
Superplastificante (CD-33B)	-	13,2	8,2
Antiespumante (FP-7LB)	1,7	1,7	1,7
Água	439,1	450,3	445,9

5.3 Dosagem das Pastas Fibrosas de Alto Desempenho

Serão apresentados a seguir os procedimentos empregados para as determinações dos teores de superplastificante de terceira geração da pasta de referência, das pastas com reforço de microfibras de volastonita e das pastas reforçadas com fibras de PVA e de polipropileno.

5.3.1 Pasta de Referência

A pasta P2 foi escolhida para o recebimento de reforço fibroso após a avaliação de toda a caracterização feita nas pastas leves de alto desempenho P1, P2 e P3. O principal motivo para a escolha da pasta P2 foi a sua superioridade em relação às demais pastas referente aos resultados dos ensaios mecânicos. Com o objetivo de aumentar a fluidez da pasta P2 para o recebimento do reforço fibroso, substituiu-se o superplastificante de segunda geração empregado em sua dosagem (CD-33B) por um de terceira geração (Glenium 51).

A pasta com o novo superplastificante (Glenium 51) passou a ser denominada P2G. É importante ressaltar que a composição da nova matriz (P2G) foi mantida igual à de sua antecessora (P2), com as pastas apresentando a mesma relação a/mc.

Os parâmetros empregados para a determinação do teor adequado de superplastificante para a pasta P2G foram os resultados dos ensaios de reologia e de estabilidade com diferentes teores de superplastificante. Desta forma, a matriz que apresentou propriedades reológicas satisfatórias e também se mostrou estável foi submetida ao ensaio de água livre.

Os ensaios de estabilidade e reologia foram realizados para a pasta P2G com teores de superplastificante, em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta, iguais a 0,25% (P2G0,25), 0,30% (P2G0,30) e 0,35% (P2G0,35). Assim, após a realização dos ensaios de reologia, estabilidade e água livre destas pastas, verificou-se que o teor adequado de superplastificante de terceira geração Glenium 51 para a nova matriz foi de 0,25%. Desta forma, a matriz adotada para recebimento de reforço fibroso passou a ser denominada P2G0,25 e sua composição está apresentada na Tabela 8. As propriedades reológicas e estabilidade para os diferentes teores de superplastificantes estão apresentadas no Capítulo 8.

Tabela 8 – Composição da Pasta P2G0,25.

Material	Dosagem kg/m³
CPP - classe especial	662,25
Microesfera SG	218,54
Sílica ativa	218,54
Água	447,18
Glenium 51	7,39
FP-7LB	1,67

5.3.2 Pastas Reforçadas com Microfibra de Volastonita

Como já mencionado, os teores de microfibra de volastonita empregados para o reforço da pasta de referência foram os seguintes: 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% (em substituição ao volume de pasta). De forma similar à pasta de referência, as otimizações dos teores de superplastificante para as pastas com reforço fibroso foram feitas através da análise dos resultados dos ensaios de reologia, estabilidade e água livre. Para cada teor de microfibra de volastonita, o teor de superplastificante que proporcionou ao compósito propriedades adequadas foi utilizado na produção da mistura.

Os teores de superplastificante que foram testados para a pasta com reforço de 2,5% de microfibra de volastonita (em substituição ao volume de pasta) foram iguais a 0,25%, 0,30% e 0,35% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta). Após a realização dos ensaios de reologia e estabilidade e água livre, cujos resultados estão apresentados no Capítulo 8, verificou-se que o teor adequado para a pasta com reforço de 2,5% de volastonita também foi igual a 0,25%. Assim, a pasta com reforço fibroso de microfibra de volastonita igual a 2,5% foi denominada P2G0,25V2.

Para a pasta com reforço de 5,0% de microfibra de volastonita (em substituição ao volume de pasta), os teores de superplastificante testados foram iguais a 0,30%, 0,35% e 0,45% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta). Os resultados de reologia e estabilidade das pastas P2G0,45V5,0, P2G0,35V5,0 e P2G0,30V5,0 apresentados no Capítulo 8 indicaram que o teor adequado de superplastificante para a pasta com reforço de 5,0% de volastonita foi o de 0,30%. Desta forma, a pasta com reforço fibroso de microfibra de volastonita igual a 5,0% foi denominada P2G0,30V5,0.

Para a pasta com reforço de 7,5% de microfibra de volastonita os teores de superplastificante testados foram iguais a 0,40%, 0,45%, 0,50%, 0,60% e 0,65% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta). Os resultados de reologia e estabilidade das pastas reforçadas com um teor de volastonita igual a 7,5%, apresentados no Capítulo 8 mostraram que o teor adequado de superplastificante para esta pasta foi o de 0,40%. O resultado do ensaio de água livre, sem fase sobrenadante, atestou a adequação deste teor de superplastificante para a pasta

com reforço de 7,5% de volastonita. Desta forma, a pasta com reforço fibroso de microfibras de volastonita igual a 7,5% foi denominada P2G0,40V7,5.

A dosagem do teor de superplastificante da pasta com reforço de 10,0% de microfibras de volastonita (em substituição ao volume de pasta) também foi otimizada a partir dos resultados dos ensaios de reologia e estabilidade. Neste caso, os teores de superplastificante testados foram iguais a 0,40%, 0,45% e 0,50% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta). De acordo com os resultados de estabilidade apresentados no Capítulo 8, apenas a pasta com teor de superplastificante de 0,40% se mostrou adequada para aplicação em cimentação de poços de petróleo. Devido aos resultados obtidos nos ensaios de estabilidade apenas a pasta com teor de 0,40% de superplastificante foi submetida ao ensaio de reologia. A pasta se apresentou muito viscosa durante os ensaios de reologia, comportamento indicado pelas leituras das deflexões nas velocidades de rotação iguais a 300 rpm e 200 rpm que foram superiores a 300°, e não foi possível o cálculo das suas propriedades reológicas. Adicionalmente foi feito o ensaio de água livre para esta pasta e foi verificado a inexistência de fase sobrenadante. Apesar desta pasta não se apresentar adequada em relação à reologia, mas por se mostrar estável, o seu comportamento mecânico foi estudado com o objetivo de complementar os resultados das caracterizações feitas com as demais pastas com reforço de microfibras de volastonita. A pasta com reforço fibroso de microfibras de volastonita igual a 10,0% foi denominada P2G0,40V10,0.

5.3.3 Pastas Reforçadas com Fibras de PVA

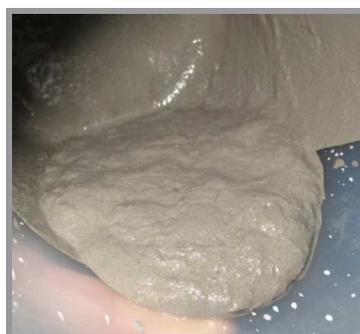
A otimização do teor de superplastificante das pastas com reforço de fibra de PVA foi realizada a partir de testes visuais das pastas com diferentes teores de superplastificante, onde foi observada a ocorrência de exsudação, de segregação e a formação de grumos. No entanto, este procedimento não foi o único empregado para determinação do teor de superplastificante adequado para as pastas fibrosas. Além deste teste, as pastas que apresentavam menor exsudação e segregação foram submetidas ao ensaio de estabilidade. Adicionalmente, a pasta que foi escolhida para cada teor de fibra de PVA foi submetida ao ensaio de água livre. De forma similar ao procedimento empregado

para as pastas com reforço de microfibras de volastonita, as composições das pastas com reforço de fibra de PVA consistem na matriz com substituição de parte de seu volume (0,50% e 1,00%) pelo mesmo volume desta fibra.

Para a pasta reforçada com 0,50% de fibra de PVA os teores de superplastificantes usados foram iguais a 0,25% e 0,30% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios da pasta). De acordo com os resultados de água livre, estabilidade (Capítulo 8) e pelo teste visual, o teor de superplastificante igual a 0,25% foi admitido para a pasta com 0,50% de reforço de fibra de PVA, que foi denominada P2G0,25PVA0,50. Os aspectos das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA0,50 estão apresentados na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente. Na Figura 26b é possível observar a separação da fase líquida da pasta durante seu escoamento. Por este motivo, esta pasta não aparentou estar com um teor de superplastificante adequado. Mesmo assim, ensaios de estabilidade foram realizados nas duas pastas, P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA0,50, para verificação de sua adequação quanto a esta propriedade e os resultados estão apresentados no Capítulo 8.



(a)



(b)

Figura 25 – Aspectos da pasta P2G0,25PVA0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 26 – Aspectos da pasta P2G0,30PVA0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

A otimização do teor de superplastificante para a pasta com substituição em volume de 1,00% de fibra também foi realizada com testes para dois teores possíveis de aditivo, iguais a, 0,30% e 0,35%. Os resultados de estabilidade apresentados no Capítulo 8 indicam que as pastas confeccionadas com os dois teores de superplastificantes testados são adequadas para aplicação em cimentação de poços. Contudo, o teor de superplastificante de 0,35% foi descartado devido ao seu aspecto heterogêneo e a pasta com 0,30% de superplastificante, P2G0,30PVA1,00, foi testada quanto água livre e indicou a inexistência de fase sobrenadante (Capítulo 8).

A Figura 27 ilustra o aspecto da pasta confeccionada com o teor de superplastificante igual a 0,30%, enquanto a Figura 28 apresenta a pasta com 0,35% do aditivo em sua composição. Na Figura 28, a segregação na pasta com 0,35% de aditivo é nítida, enquanto o aspecto da pasta com 0,30% de aditivo é homogêneo (Figura 27). Apesar da segregação observada na pasta com 0,35% de superplastificante, o ensaio de estabilidade foi realizado para os dois teores de superplastificante e os resultados estão apresentados no Capítulo 8.

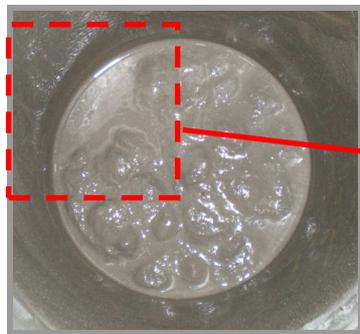


(a)



(b)

Figura 27 – Aspectos da pasta P2G0,30PVA1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 28 – Aspectos da pasta P2G0,35PVA1,00: (a) Vista superior; (b) Detalhe da segregação.

5.3.4 Pastas Reforçadas com Fibras de Polipropileno

Os teores de fibra de polipropileno testados durante o estudo foram iguais a: 0,50%, 0,75%, 0,80%, 0,85% e 1,00%. No entanto, as pastas confeccionadas com teores acima de 0,75% apresentaram segregação, conforme ilustrado no Anexo A2, e estes teores foram descartados. As pastas com teores de fibra de polipropileno iguais a 0,50% e 0,75% foram avaliadas quanto à estabilidade para auxiliar na escolha dos teores de superplastificante adequados.

A pasta reforçada com um teor igual a 0,50% de fibra de polipropileno teve uma variação do teor de superplastificante de 0,25%, 0,30% e 0,35%. As pastas

P2G0,25PP0,50 e P2G0,30PP0,50 se mostraram homogêneas, de acordo com a Figura 29 e com a Figura 30, respectivamente. Entretanto, a pasta P2G0,35PP0,50, com teor de superplastificante igual a 0,35%, não se mostrou homogênea, com a presença de grumos de fibras, conforme ilustrado na Figura 31. Ensaios de estabilidade foram realizados nas pastas P2G0,25PP0,50 e P2G0,30PP0,50 e os resultados apresentados no Capítulo 8 indicam que ambas as pastas são estáveis. Contudo, apenas a pasta P2G0,30PP0,50 foi testada quanto a água livre porque a pasta P2G0,25PP0,50 se mostrou muito viscosa durante o procedimento de mistura. O aspecto da pasta P2G0,30PP0,50 sem exsudação após o ensaio de água livre também está mostrado no Capítulo 8. O teor de superplastificante igual a 0,30% foi adotado para a pasta com teor de fibra igual a 0,50%, que foi denominada P2G0,30PP0,50.



(a)



(b)

Figura 29 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)

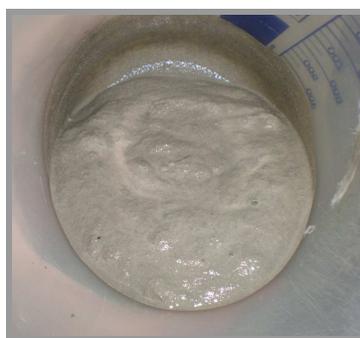


(b)

Figura 30 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 31 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,50: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

A pasta reforçada com o teor de 0,75% (em substituição ao volume de pasta) foi confeccionada com diferentes teores de superplastificante, na tentativa de produzir uma pasta homogênea. Os teores de superplastificantes testados foram de 0,25%, 0,30%, 0,35% e 0,40%. As pastas confeccionadas estão ilustradas na Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35. A pasta P2G0,25PP0,75 se mostrou muito viscosa. Em contrapartida, as pastas P2G0,35PP0,75 e P2G0,40PP0,75 não se mostraram muito viscosas mas também não se apresentaram homogêneas. Vários grumos de fibras foram verificados nestas duas pastas, sendo que na P2G0,40PP0,75 também foi verificada exsudação. Desta forma, o teor de superplastificante que se mostrou adequado para a pasta com reforço de 0,75% de fibra de polipropileno foi o de 0,30% e pasta foi denominada P2G0,30PP0,75. Os resultados do ensaio de estabilidade e a inexistência de

fase sobrenadante, apresentados no Capítulo 8, atestam que esta pasta é adequada quanto as propriedades avaliadas para a aplicação em poços de petróleo.



(a)



(b)

Figura 32 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 33 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 34 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 35 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,75: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

Alguns teores de fibra acima de 0,75% foram avaliados, mas não se mostraram adequados. Os resultados dos testes realizados estão apresentados no Anexo A2.

5.4 Preparo, Homogeneização e Cura das Pastas

Neste tópico serão descritos os procedimentos de preparo adotados para a confecção das pastas leves de alto desempenho e para a produção das pastas leves fibrosas de alto desempenho.

5.4.1 Pastas Leves de Alto Desempenho

O procedimento para preparo de pastas de cimentação utilizado foi o previsto na norma API RP10B-2 (2005), do *American Petroleum Institute*, e no Manual Interno da Petrobras – PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005). De acordo com o procedimento padrão para a confecção de uma pasta de cimentação, o equipamento adotado para o preparo da pasta é um misturador de palhetas *Waring Blendor (Chandler)* dotado de temporizador, para agitação e mistura em tempos pré-estabelecidos, e também, de tacômetro para indicação da velocidade de rotação do motor durante o processo de mistura (Figura 36). Em procedimento padrão, o preparo de uma pasta de 600 ml é efetuado com a adição da massa de cimento à água em 15 segundos, com o misturador em funcionamento a uma velocidade de 4000 rpm. Nos 35 segundos seguintes completa-se o processo de mistura com velocidade de rotação igual a 12000 rpm. Neste procedimento de mistura, a energia de mistura equivale a 5,9 kJ/kg de pasta (MIRANDA, 2008). Para os experimentos descritos neste trabalho, entretanto, este procedimento foi modificado. Como as pastas estudadas apresentam microesferas em sua composição, o período de mistura em velocidade igual a 12000 rpm tornou-se inviável, devido a possibilidade de ruptura deste material por cisalhamento. Assim, a velocidade máxima de mistura admitida para o preparo das pastas foi a de 4000 rpm, seguindo o procedimento também adotado por MIRANDA (2008).

Ao adotar uma velocidade de mistura inferior a 12000 rpm, para se manter a energia de mistura igual a 5,9 kJ/kg de pasta, foi necessário ajustar o tempo de mistura. O ajuste do tempo de mistura com a nova velocidade foi realizado a partir da Equação 20, que foi obtida experimentalmente por VORKINN e SANDERS (1993).

$$\frac{E}{M} = \frac{k}{V} \times \sum \left[\left(\frac{2 \times \pi \times rpm}{60} \right)^2 \times t \right] \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

E/M – Energia de mistura por massa de pasta (5,9 kJ/kg);

k – Constante experimental, igual a $6,47 \times 10^{-7}$ N.m/kg.m⁻³ (VORKINN e SANDERS, 1993);

V – Volume da pasta, igual a 0,6 litro;

t – Tempo de duração da mistura (segundos);

rpm – Velocidade do equipamento de mistura em rotações por minuto.

Após o rearranjo da Equação 20, para se calcular o tempo de mistura da pasta, adotando apenas velocidade de mistura igual a 4000 rpm, verificou-se que o tempo ideal de mistura das pastas, determinado a partir da Equação 21, com microesferas equivale a 5 minutos.

$$t = \frac{E}{M} \times \frac{V}{k} \times \left(\frac{60}{2 \times \pi \times rpm} \right)^2 \quad \text{Equação 21}$$

Desta forma, a ordem de preparo das misturas consistiu em:

1. Pesagem dos materiais granulares e homogeneização destes materiais em um saco plástico;
2. Pesagem dos materiais líquidos no copo do misturador, adotando a seqüência, antiespumante, superplastificante e água. No caso em que o superplastificante se tratava de um material sólido, o mesmo foi pesado separadamente em um bécker;
3. Agitação da água e aditivos químicos em velocidade baixa (4000 rpm) durante 15 segundos;
4. Adição da mistura seca à fase líquida até completar 1 minuto, para volumes de pasta iguais ou inferiores a 600 ml, ou até completar 2 minutos, para volumes de pasta iguais ou superiores a 600 ml, mantendo a velocidade igual a 4000 rpm

5. Agitação da pasta por 5 minutos com a velocidade constante de 4000 rpm.

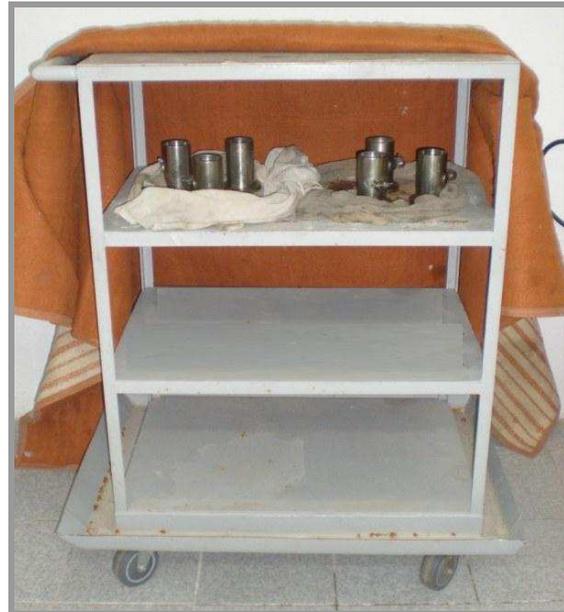
Para os ensaios de reologia, estabilidade, água livre e filtrado, as pastas foram homogeneizadas durante 20 minutos em um consistômetro atmosférico na temperatura requerida de ensaio, de acordo com a ABNT NBR 9831 (2006), a API RP10B-2 (2005) e o PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005) (Figura 37a). Para os demais ensaios, os moldes foram preenchidos com a pasta, confeccionada em um misturador de palhetas com capacidade de 4 litros (Figura 36), envolvidos por panos úmidos e cobertos com plástico e cobertor molhado a fim de evitar a secagem indesejada das amostras (Figura 37b). Após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e conduzidos a uma câmara de cura com temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual a 100%, onde permaneceram até os ensaios serem realizados.



Figura 36 – Misturadores de palhetas Chandler: capacidade de 1 litro (à esquerda) e capacidade de 4 litros (à direita).



(a)



(b)

Figura 37 – (a) Consistômetro atmosférico; (b) Cura dos corpos-de-prova durante as primeiras 24 horas.

5.4.2 Pastas Leves Fibrosas de Alto Desempenho

O tempo de mistura adotado para o preparo das pastas leves de alto desempenho, igual a 5 minutos, se tornou insuficiente para o preparo das pastas leves fibrosas de alto desempenho devido a dois fatores: presença do superplastificante de terceira geração na nova matriz (P2G0,25), que requer pelo menos 8 minutos de mistura para agir eficientemente, e a inclusão das fibras na pasta, que também solicitou um maior tempo de preparo. Assim, após alguns testes, verificou-se que o tempo ideal de preparo destas pastas seria igual a 10 minutos. Com o auxílio da Equação 22, obtida após o rearranjo da Equação 20, foi possível a determinação da velocidade de rotação de 2970 rpm para um tempo de mistura igual a 10 minutos.

$$rpm = \frac{60}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{E}{M} \times \frac{V}{k \times t}} \quad \text{Equação 22}$$

Desta forma, a ordem de preparo da pasta consistiu em:

1. Pesagem dos materiais granulares e homogeneização destes materiais em um saco plástico. Para a confecção das pastas com microfibras de volastonita, este material foi pesado e homogeneizado juntamente com os demais materiais granulares. Para o preparo das pastas com fibras de PVA ou de polipropileno, as fibras foram pesadas separadamente em um bécker;
2. Pesagem dos materiais líquidos no copo do misturador, adotando a seqüência, antiespumante, superplastificante e água;
3. Agitação da água e aditivos químicos em velocidade baixa (2970 rpm) durante 15 segundos;
4. Adição da mistura seca à fase líquida até completar 1 minuto, para volumes de pasta iguais ou inferiores a 600 ml, ou até completar 2 minutos, para volumes de pasta iguais ou superiores a 600 ml, mantendo a velocidade igual a 2970 rpm;
5. Agitação da pasta por 4 minutos com a velocidade constante de 2970 rpm;
6. Adição da fibra de PVA ou de polipropileno à mistura durante 1 minuto com a agitação da pasta em prosseguimento (velocidade igual a 2970 rpm);
7. Agitação da pasta por 5 minutos com a velocidade constante de 2970 rpm.

Nos casos em que os preparos se tratavam das pastas com fibras de volastonita ou da pasta de referência, o tempo de agitação da pasta durante a etapa 5 do procedimento de preparo da pasta foi alterado para 10 minutos. Além disso, as etapas 6 e 7 não foram executadas.

As pastas confeccionadas para os ensaios de reologia, estabilidade, água livre e filtrado também foram homogeneizadas durante 20 minutos em um consistômetro atmosférico na temperatura requerida de ensaio (Figura 37a). No caso dos ensaios mecânicos, após o preparo das pastas, os moldes foram preenchidos e o processo de cura durante as primeiras 24 horas ocorreu após o envolvimento dos moldes por panos úmidos, plástico e cobertor molhado (Figura 37b). Após 24 horas, os corpos-de-prova da matriz P2G0,25 e das pastas leves fibrosas foram desmoldados curados em um banho térmico por 7 dias com temperatura de cura igual a 76°C (168,8°F). Para a realização deste procedimento foram empregados dois banhos térmicos. O primeiro banho térmico (Figura 38a) foi utilizado tanto para o aquecimento de 22°C até 76°C (71,6°F até 168,8°F), quanto para o

resfriamento dos corpos-de-prova de 76°C para 22°C (168,8°F para 71,6°F). A taxa de aquecimento do banho adotado para aquecimento e resfriamento dos corpos-de-prova é igual a 0,3°C (32,5°F) por minuto. O resfriamento dos corpos-de-prova ocorreu através de trocas de calor do banho com o meio, após o desligamento do banho. O segundo banho, ilustrado na Figura 38b, foi mantido com a temperatura constante igual a 76°C (168,8°F) para o armazenamento dos corpos-de-prova por 7 dias, depois de seu aquecimento no primeiro banho. A temperatura de 76°C (168,8°F), escolhida para a realização da cura dos corpos-de-prova moldados para a caracterização mecânica de cada pasta, corresponde a um poço vertical com profundidade igual a 2440 m e gradiente geotérmico de 2°C (35,6°F) por 100 m de profundidade (API RP10B-2, 2005). A alteração do procedimento de cura destes corpos-de-prova em relação ao estudo realizado com as pastas P1, P2 e P3 teve como principal motivação a exposição dos corpos-de-prova a um procedimento de cura que simulasse a condição real de um poço. O período de residência dos corpos-de-prova no banho térmico igual a 7 dias foi determinado a partir da avaliação do estudo realizado por CORREIA (2009), onde a pesquisadora verificou o efeito do tempo de cura de corpos-de-prova em um banho térmico na resistência à compressão de uma pasta de cimentação. Em seu trabalho, CORREIA (2009) utilizou o mesmo procedimento de cura em banho térmico descrito anteriormente, com exceção da temperatura do banho, que em seu trabalho foi mantido a 50°C (122,0°F). CORREIA (2009) variou o período de cura de corpos-de-prova de uma determinada pasta em 1, 5, 7, 12, 19 e 26 dias, e após cada período de cura, realizou ensaios de compressão uniaxial nos corpos-de-prova. Os resultados indicaram que após 7 dias de cura em banho com temperatura igual a 50°C (122,0°F), a resistência à compressão uniaxial obtida foi igual a 90% do valor medido após 26 dias de cura em banho térmico na mesma temperatura.



(a)



(b)

Figura 38 – (a) Banho de aquecimento e resfriamento; (c) Banho de armazenamento.

Capítulo 6 METODOLOGIAS DE ENSAIO

6.1 Propriedades dos Materiais

6.1.1 Composição Química

As composições químicas dos cimentos, das sílicas, das microesferas e da microfibras de volastonita foram determinadas a partir de análises semiquantitativas realizadas por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X em equipamento *Shimadzu, modelo EDX 800*, do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ (Figura 39).



Figura 39 – Equipamento *Shimadzu Modelo EDX 800* utilizado para determinação das composições químicas dos materiais.

6.1.2 Distribuição Granulométrica

As distribuições granulométricas dos cimentos, das microesferas e da sílica 120# foram obtidas por meio de ensaios de granulometria a laser realizados no equipamento *Malvern Mastersizer* do Laboratório de Cimentação do CENPES/Petrobras (Figura 40). Os cimentos foram dispersos em álcool etílico absoluto P.A. por ser inerte e não reagir quimicamente com o cimento durante as realizações dos ensaios. Entretanto, o agente dispersante adotado nos ensaios das microesferas e da sílica 120# foi a água destilada.

A distribuição granulométrica da sílica ativa foi obtida pelo ensaio de sedigrafia realizado em um equipamento *Sedigraph 5100 da Micrometrics* no Setor de Caracterização Tecnológica do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT) da UFRJ (Figura 41). A amostra foi dispersa em água destilada com solução de 0,05 g/l de hexametáfosfato de sódio. O método de granulometria a laser não foi aplicado à sílica ativa devido a sua pouca eficiência ao dispersar suas partículas (DE LARRARD, 1999).



Figura 40 – Granulômetro a laser *Malvern Mastersizer*.



Figura 41 – Equipamento *Sedigraph 5100* (VELASCO, 2008).

6.1.3 Massa Específica

As massas específicas dos materiais granulares e das fibras foram determinadas por ensaios realizados em *Picnômetro a Gás AccuPyc 1330* (*Micromeritics*) do Laboratório de Cimentação do CENPES/Petrobras (Figura 42). O método consiste na determinação do volume de uma massa de amostra conhecida por meio da variação da pressão do gás em um volume previamente calibrado. A determinação da massa específica de cada material foi realizada a partir de cinco medições.



Figura 42 – Equipamento Picnômetro a gás *AccuPyc 1330*.

6.1.4 Superfície Específica

As superfícies específicas dos cimentos foram determinadas de acordo o método de permeabilidade ao ar *Blaine*, conforme procedimentos descritos na ABNT NBR NM 76 (1998). Os ensaios foram realizados em equipamento *Blaine Automático BSAI (Acmel)* do Laboratório de Cimentação do CENPES/Petrobras (Figura 43).

A superfície específica da sílica ativa foi determinada pelo método B.E.T. em equipamento *Gemini 2375 V. 5,0*, no Núcleo de Catálise (NUCAT) do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ.



Figura 43 – Equipamentos Blaine automático *BSA1*.

6.1.5 Compacidade Experimental

O Modelo de Empacotamento Compressível de Partículas (MEC), desenvolvido no LCPC (DE LARRARD, 1999; SEDRAN, 1999), foi utilizado neste trabalho para a dosagem das misturas granulares secas. Para o emprego deste método é necessário, além do conhecimento da massa específica e granulometria, o conhecimento da compacidade experimental. A compacidade experimental é um parâmetro que caracteriza o empacotamento de cada tipo de grão. Para a determinação da compacidade experimental de grãos existem procedimentos de ensaios diferentes, de acordo com o tamanho dos grãos. Quando o objetivo é a determinação da compacidade experimental de grãos cujas dimensões sejam inferiores a 100 μm , o método indicado é o ensaio de demanda d'água. Para a realização deste ensaio, os equipamentos necessários são uma balança com precisão de 0,1 grama (Figura 44a) e um misturador com capacidade de 2 litros (Figura 44b). O ensaio consiste na adição de 350 g do material granular na cuba do misturador e uma pequena quantidade de água. Em seguida, inicia-se a mistura em velocidade baixa e o misturador é mantido nesta velocidade até completar 1 minuto. A continuação do ensaio se dá a partir de inserções de pequenas quantidades de água na cuba, cuja mistura é realizada a partir deste ponto em velocidade alta, até se alcançar o estado capilar, que sucede o estado pendular (Figura 45a). O volume mínimo de água que não perturba o meu empacotamento seco é igual à porosidade da mistura. Ao acrescentar uma gota de água nesta mistura, os grãos precisam se afastar para dar espaço à gota de água. Neste ponto, a mistura passa para o estado capilar, onde a umidade da pasta correspondente ao

ponto de demanda d'água do material (Figura 45b). A massa de água ($m_{\text{água}}$) necessária para se atingir o empacotamento molhado da mistura é empregada no cálculo da compactidade experimental do material pela Equação 23.

$$C = \frac{1}{1 + \rho_{\text{mat}} \times \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{mat}}}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

C – Compactidade do material;

ρ_{mat} – Massa específica do material (g/cm^3);

$m_{\text{água}}$ – Massa de água necessária para atingir o ponto de demanda d'água (g);

m_{mat} – Massa do material utilizada para a confecção da pasta (g).



(a)



(b)

Figura 44 – Equipamentos necessários para a realização do ensaio de demanda d'água:
(a) Balança; (b) Misturador.



(a)



(b)

Figura 45 – Ponto de demanda d'água: (a) Estado pendular; (b) Estado capilar.

6.1.6 Compatibilidade e Ponto de Saturação

O método do Funil de Marsh foi utilizado para a verificação da compatibilidade entre os materiais cimentícios e o superplastificantes adotados para as pastas P1, P2 e P3. Além disso, durante o ensaio também foi possível determinar o ponto de saturação das misturas, isto é, o teor de superplastificante a partir do qual não ocorre redução significativa no tempo de fluidez da pasta. Este ensaio é descrito por AITCIN (2000) e utiliza o mesmo equipamento adotado na determinação do índice de fluidez de calda de cimento para injeção de poços de petróleo (ABNT NBR 7682, 1983). O ensaio de Funil de Marsh consiste na medição do tempo de escoamento de 1000 ml de uma pasta por um funil (Figura 46). Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes aparatos: Funil de Marsh com abertura de 5 mm de diâmetro, béquer de 2000 ml, proveta graduada 1200 ml, espátula, misturador (Figura 46) e cronômetro.



Figura 46 – Misturador (à esquerda) e Funil de Marsh com proveta graduada (à direita).

O procedimento do ensaio consistiu dos seguintes passos:

- Pesagem dos materiais granulares seguida de sua homogeneização;
- Pesagem do superplastificante líquido e da água no copo do misturador. Para as misturas onde se utilizou superplastificante sólido (CD-33B), este foi pesado em um copo plástico;
- Início da mistura (e inserção do superplastificante sólido);
- Introdução dos materiais granulares (durante 1 minuto e 30 segundos);
- Continuação da mistura até completar 6 minutos;
- Medição do tempo de escoamento de 1000 ml pasta, nos intervalos de 10, 30 e 60 minutos após o início de sua confecção. Entre os intervalos de medição a pasta foi mantida em um béquer e coberta por um plástico. Antes de cada medição de tempo de escoamento as pastas foram batidas por 30 segundos no misturador industrial adotado.

A compatibilidade entre os materiais cimentícios de uma determinada pasta e seu superplastificante é avaliada por meio do gráfico tempo de escoamento *versus* teor de superplastificante. A compatibilidade entre os materiais cimentícios e o

superplastificante é atestada pela proximidade entre os tempos de escoamento da pasta. O ponto de saturação é o teor ótimo de superplastificante para a pasta, que é verificado no gráfico traçado pelo ponto a partir do qual o aumento do teor de superplastificante não implica em benefício na dispersão de partículas dos materiais cimentícios.

6.2 Propriedades das Pastas no Estado Fresco

Os métodos de ensaios descritos a seguir são aqueles freqüentemente realizados em pastas de cimentação, quais sejam: água livre, filtrado, massa específica, reologia e a evolução da resistência à compressão pelo método ultra-sônico.

6.2.1 Água Livre

O teor de água livre ambiente foi determinado de acordo com o procedimento descrito no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005) e no API RP10B-2 (2005). O preparo da pasta e sua homogeneização na temperatura de 27°C (80°F) seguiu o procedimento descrito no item 5.4. Após a homogeneização, a pasta foi agitada novamente no misturador de palhetas em velocidade igual a 4000 rpm por 4 minutos (pastas P1, P2 e P3) e em velocidade igual a 2970 rpm por 10 minutos (demais pastas). Em seguida, 250 ml de pasta foram vertidos em uma proveta (Figura 47). A proveta foi selada e mantida em local imune de vibrações por um período 2 horas. Após este tempo, a fase sobrenadante foi removida com auxílio de uma seringa e seu volume foi medido. O teor de água livre foi determinado pela Equação 24.

$$T_{al} = 100 \times \frac{V_{al}}{V_p} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

T_{al} – Teor de água livre (%);

V_{al} – Volume de água livre (ml);

V_p – Volume de pasta (ml).

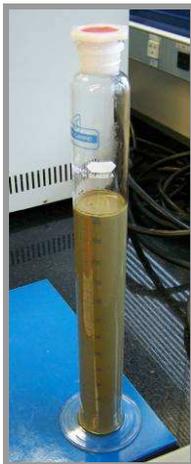


Figura 47 – Ensaio de água livre em proveta graduada.

6.2.2 Filtrado

O ensaio de filtrado ou de perda de fluido foi realizado em um filtro-prensa API (Figura 48a) de acordo com os procedimentos descritos no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005) e na norma API RP10B-2 (2005).

O preparo da pasta e sua homogeneização na temperatura de 76°C (168,8°F) foi feito de acordo com o procedimento descrito no item 5.4. Neste ensaio, a pasta foi vertida em uma célula com elemento filtrante (Figura 48b), que foi previamente ajustada à temperatura de 76°C (168,8°F) (Figura 48c). A fim de promover a perda da fase líquida da pasta ou sua desidratação, a mesma foi submetida a um diferencial de pressão de 6,90 MPa (1000 psi) aplicada por gás nitrogênio (Figura 49a). Durante o ensaio, a aplicação da pressão não deve exceder 30 minutos. A desidratação é verificada pela ocorrência de fluxo de gás (N₂) através da válvula localizada no fundo da célula de ensaio. Após o ensaio, o volume de filtrado coletado foi medido (Figura 49b) e o aspecto da pasta após ensaio de filtrado pode ser observado na Figura 49c. A temperatura de ensaio adotada (76°C/168,8°F) corresponde a um poço vertical de 2440 m com gradiente geotérmico de 2°C (35,6°C) por 100 m de profundidade (API RP10B-2, 2005).

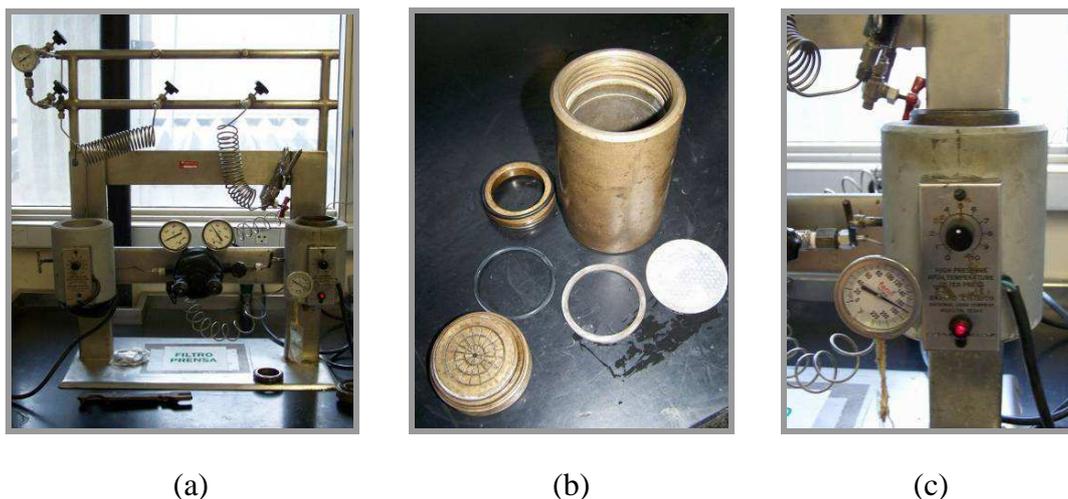


Figura 48 – Ensaio de filtrado: (a) Filtro-prensa; (b) Partes da célula do filtro-prensa; (c) Sistema de aquecimento da célula.

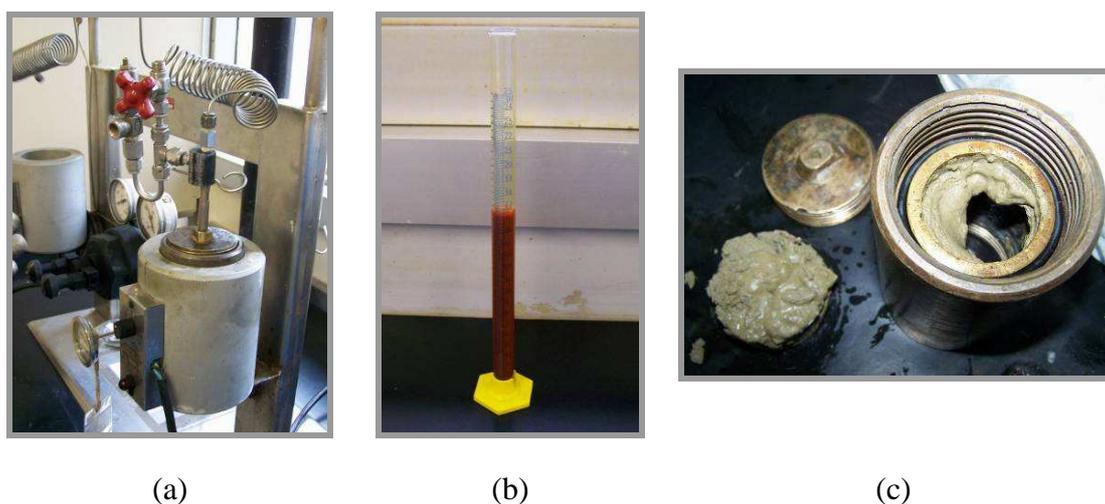


Figura 49 – Ensaio de filtrado: (a) Mangueira de entrada do N₂ acoplada na válvula da célula; (b) Medição da fase líquida perdida durante o ensaio; (c) Aspecto da pasta após o ensaio.

De acordo com o PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005), caso o ensaio de filtrado termine em um período inferior a 30 minutos, o volume de filtrado equivalente a 30 minutos de ensaio pode ser calculado pela Equação 25.

$$Q_{30} = \frac{2 \times Q_t \times C}{\sqrt{t}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

Q_{30} – Perda de fluido equivalente a um período de 30 minutos (ml);

Q_t – Volume de fluido coletado até o momento t de desidratação (ml);

t – Tempo em que ocorreu a desidratação (minutos);

C – Constante igual a 5,477.

6.2.3 Massa Específica Aparente

O ensaio de massa específica aparente foi realizado de acordo com os procedimentos descritos no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005) e na norma API RP10B-2 (2005). Para a realização deste ensaio foi utilizada uma balança de lama (Figura 50) que contém um copo, onde o fluido é inserido, que é equilibrado por contrapesos posicionados na extremidade oposta e por um cursor que se move livremente ao longo de uma escala graduada. No copo há uma tampa que possui um orifício para a saída do excesso de fluido. O equilíbrio da balança é atingido com o auxílio de um nível de bolha. O preparo da pasta foi realizado de acordo com o procedimento descrito no item 5.4. Neste ensaio, a pasta foi inserida no copo da balança, previamente calibrado com água destilada, até um nível de aproximadamente 6 mm abaixo de sua borda. Em seguida, a inexistência de bolhas de ar aprisionadas foi verificada e, por último, o copo foi totalmente preenchido com a pasta e tampado. A balança foi lavada, seca e colocada sobre sua base, com o cuidado de pressionar o orifício da tampa com o dedo polegar. Finalmente, a medição da massa específica foi feita deslocando-se o cursor até a obtenção do equilíbrio, verificado por meio da centralização da bolha do indicador de nível. A precisão da balança de lama é de $0,012 \text{ g/cm}^3$ (0,1 lb/gal).



Figura 50 – Balança de lama utilizada na determinação da massa específica aparente.

6.2.4 Reologia

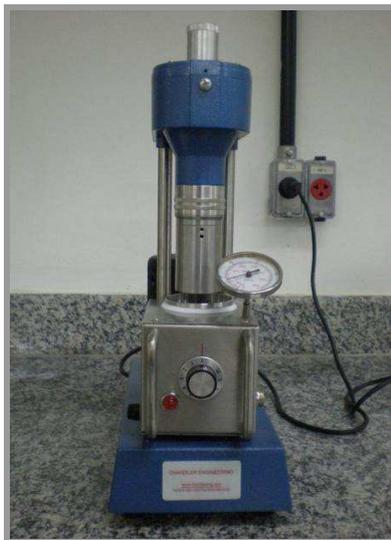
As propriedades reológicas das pastas (limite de escoamento e viscosidade plástica) foram determinadas utilizando um viscosímetro rotativo *Chandler* do Laboratório de Cimentação do LABEST/PEC/COPPE/UFRJ (Figura 51a). O ensaio foi realizado na temperatura de 27°C (80°F) de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR 9831 (2006). O conjunto rotor-bob empregado foi o R1-B1 (Figura 51b).

De acordo com SCHRAMM (2006), a razão entre os raios do rotor e do bob adotados em um ensaio de reologia é de extrema importância para a precisão das medidas de viscosidades de fluidos não-Newtonianos, além disso, o autor afirma que este valor deve variar entre 1,00 – 1,10. Para o conjunto rotor-bob R1-B1 a razão entre os raios é igual a 1,07. O conjunto rotor-bob deve ser escolhido de acordo com o tamanho das partículas que fazem parte do fluido que será submetido ao ensaio. As partículas do fluido devem ser menores do que 1/3 da distância anular formada entre o rotor e o bob (SCHRAMM, 2006).

Os ensaios de reologia foram executados na seguinte seqüência:

- Confeção e homogeneização das pastas de acordo com o item 5.4;
- Inserção da pasta no copo térmico após sua homogeneização. O copo térmico foi previamente aquecido à temperatura de ensaio;
- Instalação do copo térmico na base do viscosímetro;

- Posicionamento do copo térmico até que o nível da pasta estivesse alinhado com a linha de marcação do rotor, com o equipamento previamente ligado na velocidade de 300 rpm. Após 60 segundos foi efetuada a leitura inicial;
- As leituras seguintes foram realizadas em velocidades decrescentes de 200 rpm e 100 rpm, sendo que cada leitura foi realizada após 20 segundos de mistura;
- Alteração da velocidade para 600 rpm, mantendo-se por 60 segundos. O motor foi então desligado durante 10 segundos e, em seguida, novamente ligado na velocidade de 3 rpm. A máxima deflexão observada foi anotada para o cálculo do gel inicial da pasta;
- O motor foi desligado novamente, agora por 10 minutos. Após esse período de repouso o motor foi ligado na velocidade de 3 rpm. A máxima deflexão lida foi registrada a fim de se determinar o gel final da pasta.



(a)



(b)

Figura 51 – Ensaio de reologia: (a) Viscosímetro Chandler; (b) Conjunto rotor-bob R1-B1.

Após a realização do ensaio, o primeiro passo a fim de determinar os parâmetros reológicos da pasta consistiu no cálculo da taxa de deformação para as velocidades de rotação de 300 rpm, 200 rpm e 100 rpm. Para tal, utilizou-se a Equação 26 e a Equação 27.

$$\omega = \frac{2\pi \times \Omega}{60} \quad \text{Equação 26}$$

$$\gamma = \frac{2\omega R_0^2}{(R_0^2 - R_i^2)} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

γ – Taxa de deformação (s^{-1});

ω – Velocidade angular (s^{-1});

Ω – Velocidade de rotação do viscosímetro (rpm);

R_0 – Raio interno do rotor (cm);

R_i – Raio interno do “bob” (cm).

Em seguida, a tensão de cisalhamento foi calculada pela Equação 28.

$$\tau = F_\tau \times F_m \times \theta \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

τ – Tensão de cisalhamento (lbf/100pés² ou Pa);

F_τ – Fator da tensão de cisalhamento do viscosímetro para uma dada combinação “rotor-bob” (Tabela 9);

F_m – Coeficiente da mola de torção do instrumento (Tabela 9);

θ – Leitura do viscosímetro em graus. (Foram adotadas as leituras feitas nas rotações de 300 rpm, 200 rpm e 100 rpm.).

Tabela 9 – Fator da tensão de cisalhamento do viscosímetro para o “BOB” B1 e fator da constante elástica da mola F1.

“BOB”	F_{τ} (lbf/100pés ²)	F_{τ} (Pa)	Tipo de mola	F_m
B1	1,067	0,511	F1	1

Com os resultados de taxa de deformação e de tensão de cisalhamento foi possível a determinação dos parâmetros reológicos com o emprego de um ajuste linear (Equação 29), ao se admitir que as pastas se comportem como um fluido de *Bingham*.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

τ – Tensão de cisalhamento (Pa ou lbf/100pés²);

τ_0 – Limite de escoamento (Pa ou lbf/100pés²);

μ_p – Viscosidade plástica (Pa.s ou cP);

γ – Taxa de deformação (s⁻¹).

Os parâmetros que definem o modelo de *Bingham* são dois: o limite de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (μ_p). O termo τ_0 da Equação 29 (limite de escoamento) é a tensão cisalhante na qual o fluido entra em movimento e representa a contribuição da fase sólida da mistura pelos contatos entre os grãos. O termo $\mu_p \cdot \gamma$ da Equação 29 está relacionado com a contribuição da fase líquida, conforme ilustrado na Figura 52.

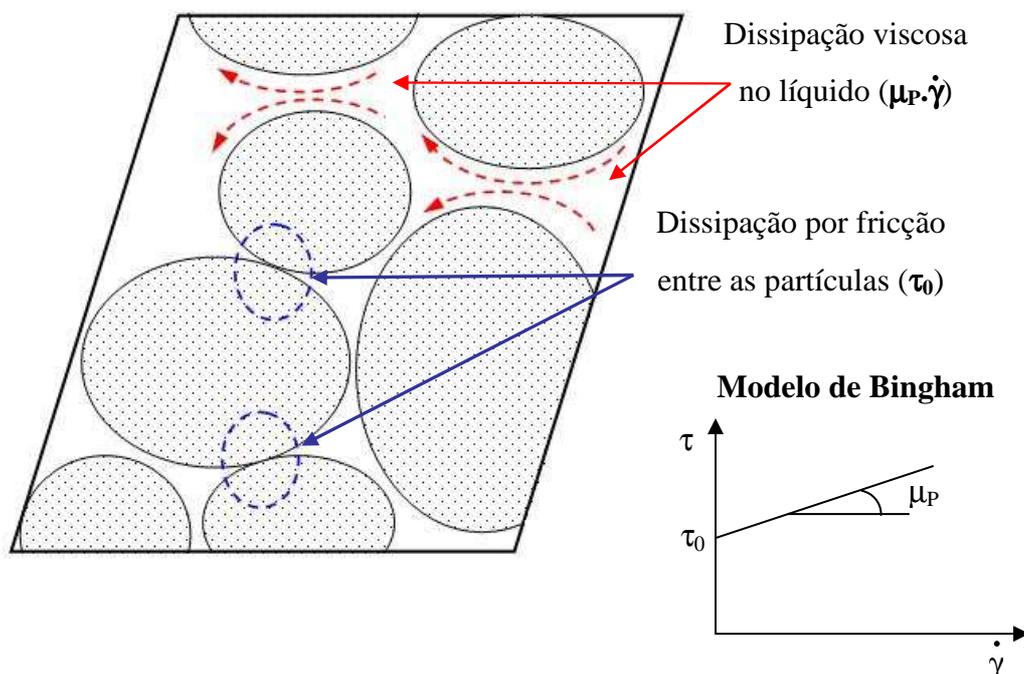


Figura 52 – Contribuição das fases sólida e líquida à resistência ao cisalhamento (Adaptado de DE LARRARD, 1999).

6.2.5 Evolução da Resistência à Compressão

A evolução da resistência à compressão das pastas P1, P2 e P3, desde sua confecção até os 7 dias de idade, foi determinada indiretamente por técnica de ultra-som. A velocidade do som é sensível às propriedades viscoelásticas dos materiais e, portanto, o ultra-som pode ser utilizado para monitorar o processo de pega e endurecimento de pastas. Os ensaios foram realizados com a pressão de ensaio igual a 1000 psi (6,90 MPa), em um equipamento *Ultrasizer Cement Analyser* (UCA) do CENPES/Petrobras (Figura 53), de acordo com o PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005). De maneira similar ao ensaio de filtrado, a temperatura utilizada no ensaio foi igual a 76°C (168,8°F).



Figura 53 – UCA do LABEST/PEC/COPPE/UFRJ.

6.3 Propriedades das Pastas no Estado Endurecido

As propriedades das pastas avaliadas em seu estado endurecido compreendem ensaios mecânicos, físicos, térmicos, de durabilidade e de variações dimensionais. A caracterização mecânica das pastas foi realizada através dos ensaios de compressão uniaxial, compressão triaxial, tração na flexão e tração por compressão diametral. As propriedades físicas que foram avaliadas abrangem ensaios de absorção total e de estabilidade. Ensaios de ataque por ácido e de absorção de água por capilaridade também foram feitos para a avaliação da durabilidade das pastas. O estudo térmico que foi feito consistiu em ensaios de calor específico, difusividade térmica e coeficiente de dilatação térmica. A variação dimensional foi avaliada por meio de ensaios de retração autógena e fluência. Neste sub item do trabalho serão apresentadas todas as metodologias de ensaios relatadas acima.

6.3.1 Propriedades Mecânicas

6.3.1.1 Comportamento sob Compressão Uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial das pastas P1, P2 e P3 foram realizados em uma prensa de ensaios *Wykeham Farrance* com célula de carga com capacidade de 200 kN (Figura 54a), com velocidade de carregamento de 0,05 mm/min. Os ensaios

foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) nas idades de 1 dia, 3 dias e 28 dias. Os deslocamentos longitudinais foram medidos por dois transdutores elétricos fixados na zona central do corpo-de-prova, ilustrados na Figura 54b.



(a)



(b)

Figura 54 – Ensaio de compressão axial: (a) Prensa de ensaios *Wykeham Farrance*; (b) Corpo-de-prova com transdutores elétricos.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial da pasta de referência P2G0,25 e das pastas fibrosas foram realizados em uma prensa de ensaios *Shimadzu UH-F 1000 kN* com capacidade de 100 toneladas (Figura 55a). A velocidade de carregamento adotada para os ensaios destas pastas, igual a 0,005 mm/min, foi diferente da aplicada às P1, P2 e P3 visando registrar seu comportamento pós-pico. Os ensaios das pastas fibrosas foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, no entanto, a idade de ensaio foi de 9 dias (1 dia de aquecimento + 7 dias em banho a 76°C + 1 dia de resfriamento). Os deslocamentos axiais foram medidos por dois transdutores elétricos fixados na zona central do corpo-de-prova (Figura 54b), enquanto os deslocamentos laterais foram medidos por dois extensômetros elétricos do tipo PA-06-1000BA-120L, da *Excel Sensores*, colados diametralmente opostos à meia altura do corpo-de-prova.

As cargas e deslocamentos axiais medidos nas duas prensas foram registrados utilizando-se sistemas de aquisições de dados *ADS 2000*, de 16 bits, da *Lynx*. Antes da realização de cada ensaio, todos os corpos-de-prova foram faceados em torno mecânico, para planificar suas faces (superior e inferior) e torná-las paralelas, evitando a ocorrência de ruptura dos cilindros por concentração de tensão em algum ponto de sua superfície.



(a)



(b)

Figura 55 – Ensaio de compressão axial: (a) Prensa de ensaios *Shimadzu UH-F*; (b) Corpo-de-prova com transdutores elétricos e extensômetros.

A partir da curva tensão \times deformação, obtida no ensaio de compressão uniaxial, foi determinado o módulo de elasticidade secante através da Equação 30 (ASTM C 469, 1994).

$$E = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade (GPa);

σ_2 – Tensão correspondente a 40% da tensão máxima (MPa);

σ_1 – Tensão correspondente à deformação ε_{a1} (MPa);

ε_{a2} – Deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm);

ε_{a1} – Deformação axial igual a 5×10^{-5} (mm/mm).

O coeficiente de Poisson foi determinado por meio da Equação 31 (ASTM C 469, 1994).

$$\nu = \left(\frac{\varepsilon_{l2} - \varepsilon_{l1}}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

ν – Coeficiente de Poisson;

ε_{l2} – Deformação lateral no centro do corpo-de-prova gerada pela tensão σ_2 (mm/mm);

ε_{l1} – Deformação lateral no centro do corpo-de-prova gerada pela tensão σ_1 (mm/mm).

6.3.1.2 Comportamento sob Compressão Triaxial

Os ensaios de resistência à compressão triaxial de todas as pastas investigadas foram realizados na prensa de ensaios *Wykeham Farrance* com célula de carga de capacidade igual a 200 kN e célula de confinamento com capacidade de 14 MPa (2030 psi). Os ensaios foram conduzidos com velocidade de carregamento de 0,1 mm/min para as pastas P1, P2 e P3 e, igual a 0,06 mm/min para as demais pastas.

O comportamento tensão *versus* deformação de cada pasta foi determinado em corpos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura). Os corpos-de-prova foram curados de acordo com os procedimentos descritos no item 5.4. Antes da realização de cada ensaio, os corpos-de-prova foram faceados em torno mecânico. Para a realização do ensaio de compressão triaxial, o corpo-de-prova era posicionado na base da célula de confinamento e envolvido com uma membrana de látex de borracha natural para evitar a penetração do óleo no corpo-de-prova durante o ensaio (Figura 56a). Em seguida, a célula de confinamento era fechada (Figura 56b) e posicionada na prensa (Figura 56c). Os deslocamentos longitudinais foram medidos por um transdutor elétrico fixado na célula de confinamento do corpo-de-prova, ilustrado na Figura 56d. As cargas

e deslocamentos axiais foram registrados por um sistema de aquisição de dados ADS 2000 (*Lynx*), de 16 bits.

As tensões de confinamento adotadas para as pastas P1, P2 e P3 foram iguais a zero, 2 MPa (290 psi) e 6 MPa (870 psi). As pressões de confinamento adotadas para as pastas leves fibrosas foram as seguintes: zero, 2 MPa (290 psi), 4 MPa (580 psi) e 8 MPa (1160 psi).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 56 – Ensaio de compressão triaxial: (a) Posicionamento do corpo-de-prova na célula de confinamento; (b) Fechamento da célula de confinamento; (c) Célula de confinamento na prensa; (d) Detalhe da fixação do transdutor elétrico.

Em poços de petróleo, a pasta de cimentação está sujeita a um estado de tensão triaxial. As tensões as quais as paredes dos poços estão sujeitas podem ser responsáveis por sua ruptura por cisalhamento. Portanto, os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e triaxial são de suma importância para a determinação de um critério de ruptura. Segundo ROCHA e AZEVEDO (2007), um dos critérios de ruptura por cisalhamento devido à compressão mais utilizados na indústria do Petróleo é o Critério de Mohr-Coulomb, que será adotado neste trabalho. A Figura 57 ilustra um gráfico tensão cisalhante \times tensão normal com a representação de círculos de Mohr, cuja reta tangente (envoltória de ruptura) corresponde ao limite de ruptura por cisalhamento devido aos esforços de compressão, representada pela Equação 32.

$$\tau = S_0 + tg(\phi) \cdot \sigma \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

τ – Tensão cisalhante (MPa);

S_0 – Coesão (ponto em que a envoltória corta o eixo y) (MPa);

σ – Tensão normal (MPa);

ϕ – Ângulo de atrito interno.

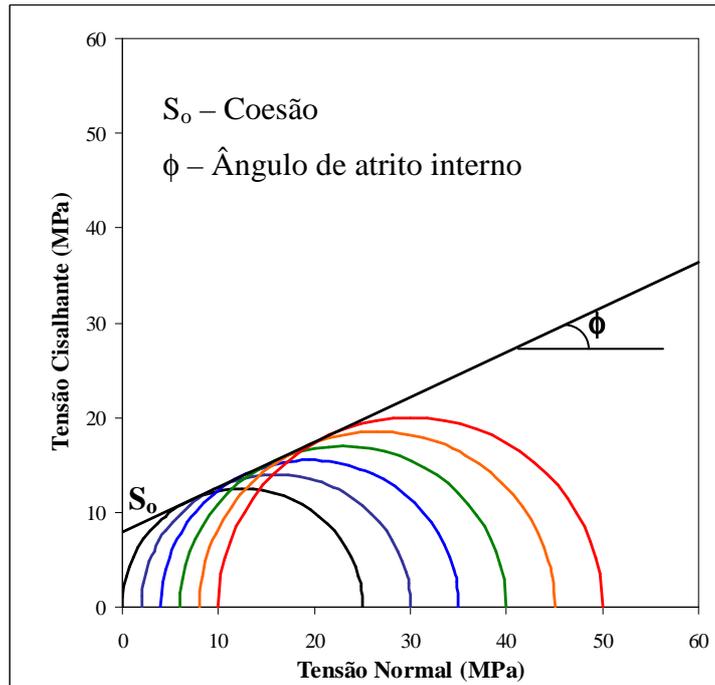


Figura 57 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Durante o ensaio triaxial, além da tensão axial desviatória (σ_d), o corpo-de-prova está sujeito à ação da tensão confinante (σ_3). Devido à ação da tensão confinante, para que o corpo-de-prova se deforme e sofra ruptura, a magnitude da tensão axial aumenta à medida que se eleva o valor da tensão confinante (Figura 58). Assim, pode-se afirmar que, com o aumento da tensão confinante há o aumento da resistência do corpo-de-prova. A Figura 59 representa de forma esquemática a evolução de um ensaio triaxial, onde há o aumento da tensão desviatória (Figura 59b) com a tensão confinante constante (onde $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$). A Figura 59c ilustra o modo de ruptura do corpo-de-prova por cisalhamento após o término do ensaio triaxial.

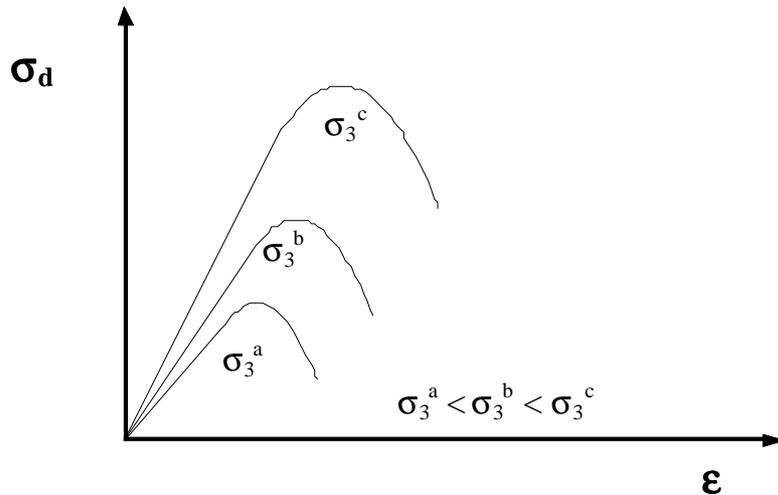


Figura 58 – Esquema de um ensaio de compressão triaxial. Adaptado de ROCHA e AZEVEDO (2007).

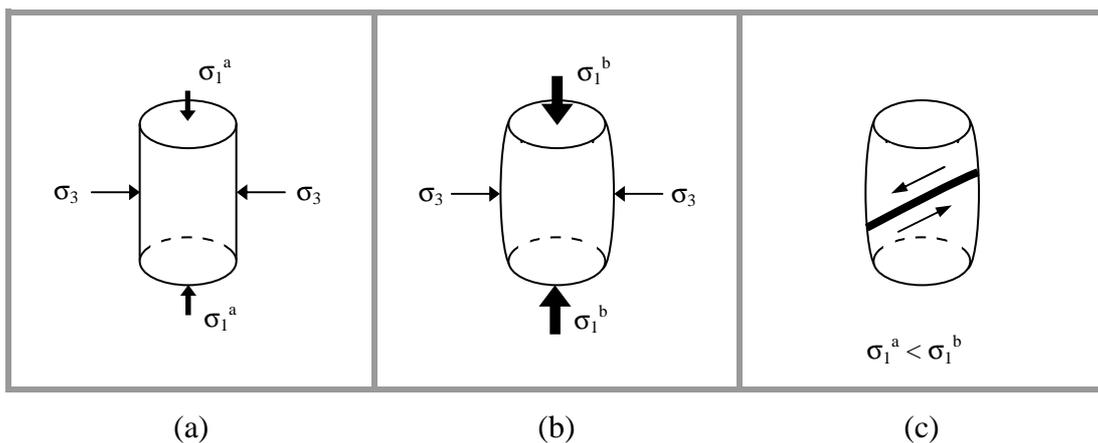


Figura 59 – Esquema de um ensaio de compressão triaxial: Adaptado de ROCHA e AZEVEDO (2007).

A Figura 60a apresenta o Critério de Mohr-Coulomb de forma simplificada (com apenas um círculo) que auxiliou no desenvolvimento das expressões para a determinação das tensões normal (Equação 33) e cisalhante (Equação 34) correspondentes ao ponto da envoltória tangente ao círculo de Mohr (ponto P). Da Figura 60a também é possível observar a relação apresentada na Equação 35.

$$\sigma_p = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos(2\beta) \quad \text{Equação 33}$$

$$\tau_p = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \text{sen}(2\beta) \quad \text{Equação 34}$$

$$2\beta = \phi + \frac{\pi}{2} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

σ_p – Tensão normal referente ao ponto P (MPa);

σ_1 – Tensão desviatória (MPa);

σ_3 – Tensão confinante (MPa);

τ_p – Tensão cisalhante referente ao ponto P (MPa).

Substituindo a Equação 33, Equação 34 e Equação 35 na Equação 32, é possível reescrever a equação da envoltória de Mohr em função das tensões principais, através da Equação 36.

$$\sigma_1 = 2S_0 \left(\frac{\cos \phi}{1 - \text{sen} \phi} \right) + \sigma_3 \left(\frac{1 + \text{sen} \phi}{1 - \text{sen} \phi} \right) \quad \text{Equação 36}$$

No entanto, para a determinação da coesão (S_0) e do ângulo de atrito interno (ϕ) das pastas foi necessário plotar os critérios de Mohr-Coulomb destas no espaço $\sigma_1 \times \sigma_3$ (Figura 60b e Equação 37). A partir dos gráficos $\sigma_1 \times \sigma_3$ foi possível determinar os valores de C_0 e α e, posteriormente, calcular o ângulo de atrito interno e a coesão das pastas, através da Equação 38 e Equação 39, respectivamente, obtidas a partir da comparação da Equação 36 com a Equação 37.

$$\sigma_1 = C_0 + \text{tg}(\alpha) \cdot \sigma_3 \quad \text{Equação 37}$$

Onde:

C_0 – Resistência à compressão uniaxial (MPa).

O ângulo de atrito interno (ϕ) e a coesão (S_0) das pastas foram calculados através da Equação 38 e Equação 39, respectivamente, obtidas a partir da comparação da Equação 36 com a Equação 37.

$$\phi = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{tg} \alpha - 1}{\text{tg} \alpha + 1} \right) \quad \text{Equação 38}$$

$$S_0 = \frac{C_0(1 - \text{sen} \phi)}{2 \cos \phi} \quad \text{Equação 39}$$

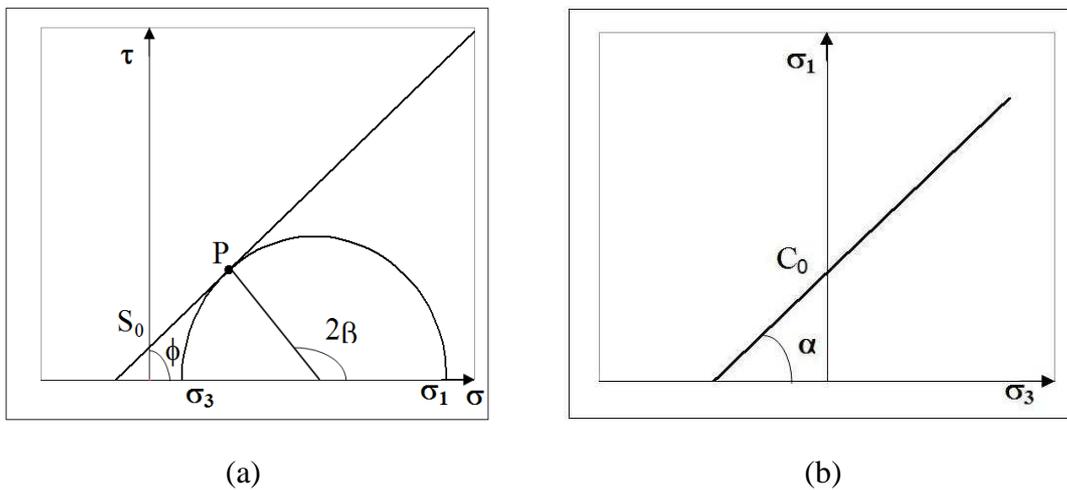


Figura 60 – Esquema para o Critério de Mohr-Coulomb: (a) No espaço $\tau \times \sigma$; (b) No espaço $\sigma_1 \times \sigma_3$.

6.3.1.3 Comportamento sob Tração por Compressão Diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado em prensa *Shimadzu UH-F 1000 kN* (Figura 61), com velocidade de carregamento igual a 0,3 mm/min, de acordo com a prescrições da ABNT NBR 7222 (1994). A resistência à tração aos 28 dias das pastas P1, P2 e P3 foi determinada em discos espessura igual a aproximadamente 25 mm e 100 mm de diâmetro (Figura 62a), cortado de cilindros com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A resistência à tração das pastas leves fibrosas e de sua matriz de referência na idade de 9 dias foi determinada em discos de aproximadamente 25 mm de espessura e 50 mm de diâmetro, cortados de cilindros com 50 mm de diâmetro e 100

mm de altura. Durante o corte dos discos o topo e base de cada cilindro foi desprezada e os discos foram cortados conforme Figura 62b.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação 40.

$$f_{TCD} = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \quad \text{Equação 40}$$

Onde:

f_{TCD} – Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_r – Carga de ruptura do corpo-de-prova (N);

D – Diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – Espessura do corpo-de-prova (mm).



Figura 61 – Prensa de ensaios *Shimadzu UH-F* com ensaio de tração por compressão diametral.



(a)



(b)

Figura 62 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) Corpo-de-prova posicionado na prensa; (b) Corte de disco.

6.3.1.4 Comportamento sob Tração na Flexão

Os ensaios de tração na flexão de todas as pastas foram realizados na prensa de ensaios *Shimadzu UH-F 1000 kN* (Figura 63a). A velocidade de carregamento adotada para os ensaios das pastas P1, P2 e P3 foi igual a 0,1 mm/min. Os ensaios realizados na pasta P2G0,25 e nas pastas fibrosas (P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5, P2G0,40V10,0, P2G0,25PVA0,5, P2G0,30PVA1,0, P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75) foram realizados com uma velocidade de carregamento foi igual a 0,0015 mm/min. A velocidade dos ensaios das pastas leves fibrosas e de sua matriz foi mais lenta que a das pastas P1, P2 e P3 visando medir o comportamento pós-pico das mesmas. Foi realizado o ensaio de flexão em quatro pontos, com aplicação da carga no terço central do prisma, de acordo com a norma da ABNT para concreto, ABNT NBR 12142 (1991). Os prismas ensaiados à flexão apresentavam as seguintes dimensões: 50 mm de altura, 50 mm de largura e 228 mm de comprimento. As pastas leves de alto desempenho foram ensaiadas após 28 dias de cura em câmara úmida. As pastas leves fibrosas e sua matriz foram ensaiadas após 9 dias de cura, conforme procedimento descrito no item 5.4. Os deslocamentos foram medidos por um transdutor elétrico fixado a meia altura do corpo-de-prova prismático, conforme ilustrado na Figura 63b.

As cargas e deslocamentos foram registrados utilizando-se sistemas de aquisições de dados *ADS 2000*, de 16 bits, da *Lynx*.

A resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) foi calculada com a Equação 41.

$$f_F = \frac{F_r \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 41}$$

Onde:

f_F – Resistência à tração na flexão (MPa);

F_r – Carga de ruptura do corpo-de-prova (N);

L – Dimensão do vão entre os apoios (mm);

b – Largura da seção do corpo-de-prova (mm);

h – Altura da seção do corpo-de-prova (mm).



(a)



(b)

Figura 63 – Ensaio de tração na flexão: (a) Prensa de ensaios *Shimadzu UH-F*; (b) Corpo-de-prova posicionado na prensa.

6.3.1.4.1 Determinação da Capacidade de Absorver Energia

Neste tópico do trabalho serão apresentados alguns dos métodos para o cálculo da tenacidade de concretos submetidos ao ensaio de flexão, quais sejam: ASTM C1018 (1992), JCI-JSCE SF4 (1983) e NBN B15-238 (1992).

Os índices de tenacidade da norma ASTM C1018 (1992) apresenta um método para determinação dos índices de energia adimensionais, que são determinados a partir de relações entre as áreas sob a curva carga *versus* deflexão do ensaio de flexão. Os índices de tenacidade na flexão são determinados a partir de relações entre as áreas sob a curva carga *versus* deflexão formadas até múltiplos da deflexão de primeira fissura, iguais a 3, 5,5, 10,5 e 15,5, e a área sob a curva até a primeira fissura (δ_f). Uma curva carga *versus* deflexão está ilustrada na Figura 64, onde são apresentadas as relações entre áreas adotadas para os cálculos dos índices de tenacidades I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} .

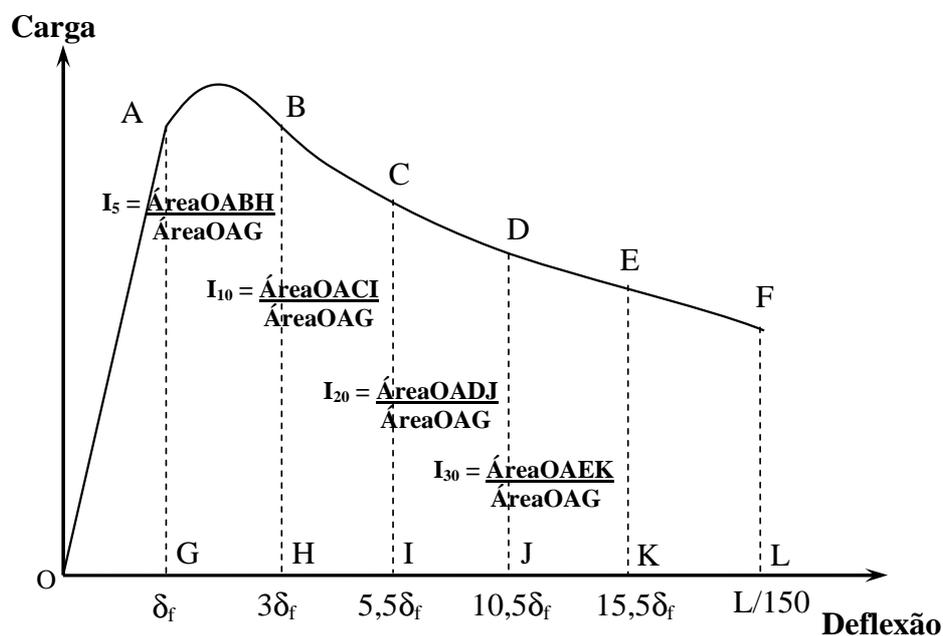


Figura 64 – Curva carga *versus* deflexão de um ensaio de flexão (Segundo a ASTM C1018).

A norma japonesa JCI-JSCE SF-4 (1983) adota a capacidade de absorção de energia até uma deflexão limite para a determinação da tenacidade de um compósito. O índice de tenacidade da norma japonesa é definido em termos absolutos como a energia necessária para se fletir uma viga até uma deflexão no meio de seu vão igual a L/n ($n = 150$). A tenacidade (T) consiste na área sob a curva carga *versus* deflexão até a deflexão $L/150$, que corresponde à área do quadrilátero OAFL da Figura 64. A vantagem do emprego da norma japonesa é que este método não requer o ponto de primeira fissura

para o cálculo do índice de tenacidade. O fator de tenacidade é determinado pela Equação 42.

$$FT = \frac{T}{\delta} \times \frac{L}{bh^2} \quad \text{Equação 42}$$

Onde:

FT – Fator de tenacidade na flexão (kgf/cm² ou MPa);

T – Tenacidade na flexão (kgf.cm ou J);

δ – Deflexão equivalente a L/n (cm ou mm);

b – Largura do corpo-de-prova (cm ou mm);

h – Altura do corpo-de-prova (cm ou mm);

L – Vão entre apoios do corpo-de-prova durante o ensaio (cm ou mm).

O índice de tenacidade, calculado de acordo com as prescrições da norma belga NBN B15-238 (1992) é determinado a partir da energia absoluta (T_n) da curva carga *versus* deflexão ilustrada na Figura 65. A energia absoluta (T_n) consiste na área sob a curva representada na Figura 65, até uma deflexão igual a L/n, onde L é o vão livre entre os apoios e não são parâmetros limites (n = 600, 450, 300, 150). O fator de tenacidade é determinado pela Equação 43.

$$FT = \frac{nT_n}{bh^2} \quad \text{Equação 43}$$

Onde:

FT – Fator de tenacidade na flexão (kgf/cm² ou MPa);

T_n – Tenacidade na flexão até a deflexão L/n (kgf.cm ou J);

b – Largura do corpo-de-prova (cm ou mm);

h – Altura do corpo-de-prova (cm ou mm).

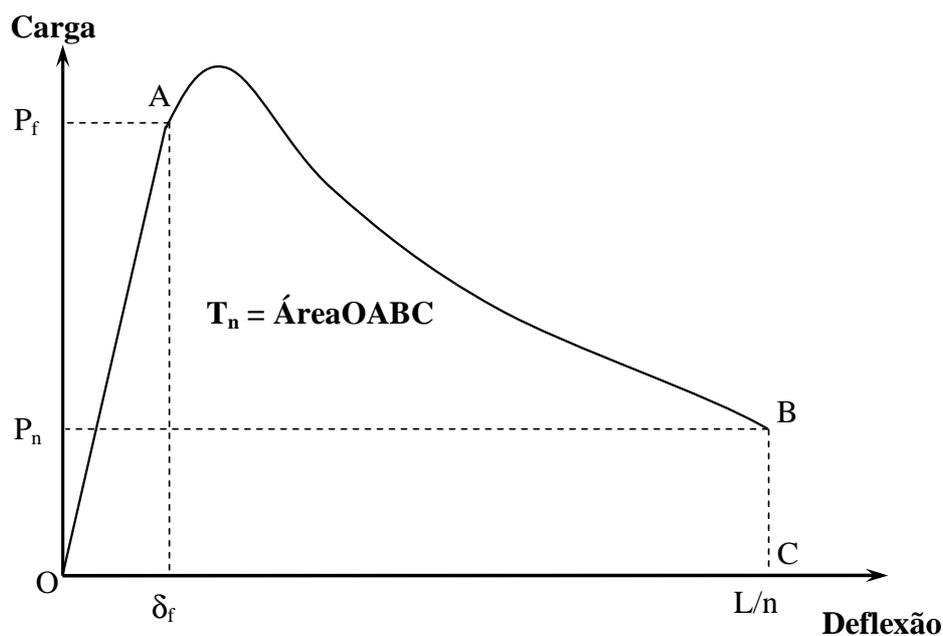


Figura 65 – Curva carga *versus* deflexão de um ensaio de flexão (Segundo a NBN B15-238).

6.3.2 Propriedades Físicas e de Durabilidade

6.3.2.1 Estabilidade

O ensaio de estabilidade foi realizado em todas as pastas deste trabalho conforme o procedimento descrito no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005) e na API RP10B-2 (2005), utilizando-se uma temperatura de circulação igual a 27°C (80°F). Neste caso, a pasta foi preparada e homogeneizada de acordo com o item 5.4. Em seguida, a mistura foi vertida para o tubo decantador previamente engraxado (Figura 66a) e, após seu preenchimento, o mesmo foi vedado e levado para o banho térmico ajustado à temperatura de 27°C (80°F) (Figura 66b). Após 24 horas o corpo-de-prova foi desmoldado (Figura 67a) e cortado em quatro partes iguais identificadas da seguinte forma: T (topo), 1 (intermediária 1), 2 (intermediária 2) e F (fundo) (ver a Figura 67b).

Na seqüência foram determinadas as massas das amostras na água e no ar para todos os corpos-de-prova, medidas respectivamente, a partir da massa imersa em água, com a amostra sem tocar as paredes do recipiente, e com a amostra apoiada no fundo (Figura

67c). A determinação da massa específica de cada amostra foi realizada através da Equação 44.

$$ME = \frac{M_{ar}}{M_{\acute{a}gua}}$$

Equação 44

Onde:

ME – Massa específica (g/cm^3);

M_{ar} – Massa da amostra no ar (g);

$M_{\acute{a}gua}$ – Massa da amostra na água (g).

A pasta é considerada estável caso a maior diferença de massa específica entre as seções topo e fundo ($\Delta\rho$) seja menor ou igual a $0,06 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($0,5 \text{ lb}/\text{gal}$) e se o rebaixamento do topo da pasta for inferior a 5 mm. Caso contrário, a pasta é considerada instável e deve ser reformulada.



(a)



(b)

Figura 66 – Ensaio de estabilidade: (a) Inserção da pasta no molde; (b) Moldes no banho térmico.

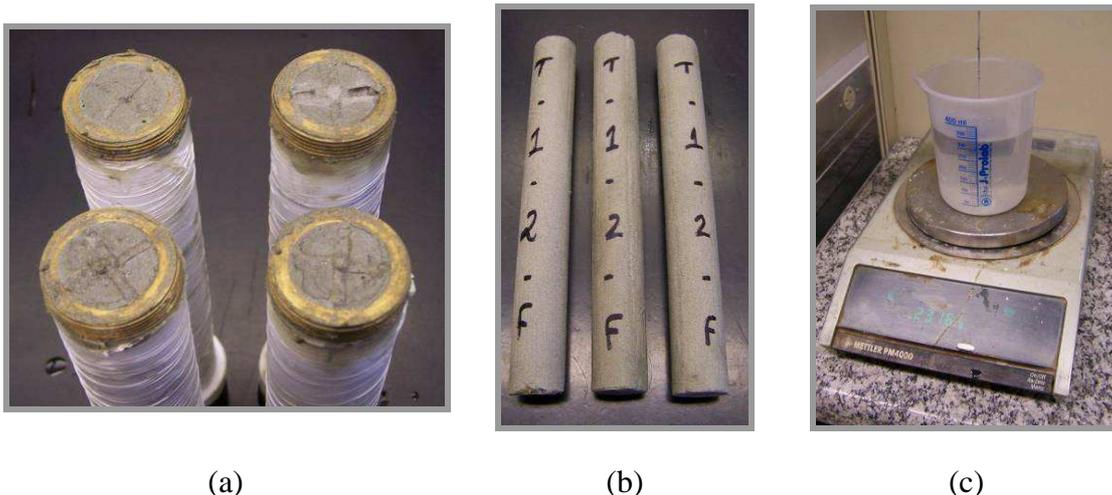


Figura 67 – Ensaio de estabilidade: (a) Desforma dos corpos-de-prova; (b) Preparo para o corte; (c) Medição de massa.

6.3.2.2 Absorção Total, Índice de Vazios e Massa Específica

O ensaio de absorção total de água foi realizado nas pastas P1, P2 e P3 de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 9778 (2005). Neste ensaio, três corpos-de-prova (cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) de cada pasta foram mantidos em cura em câmara úmida por um período de 28 dias após a moldagem. Em seguida, os corpos-de-prova foram secos em estufa a uma temperatura de 38°C (100°F) e, posteriormente, imersos em água até constância de massa. Posteriormente, os corpos-de-prova foram submetidos à fervura em água por cinco horas e, após seu resfriamento, as massas dos corpos-de-prova nas condições submersa e de saturação com superfície seca foram determinadas. Com isso, foi possível calcular a absorção de água por imersão (Equação 45), o índice de vazios (Equação 46) e a massa específica real da pasta endurecida (Equação 47) a partir dos valores médios de massa seca, saturada com superfície seca e submersa.

$$A = 100 \times \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \quad \text{Equação 45}$$

$$I_v = 100 \times \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \right) \quad \text{Equação 46}$$

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

A – Absorção de água por imersão (%);

I_v – Índice de vazios da pasta endurecida (%);

ρ_r – Massa específica real da pasta endurecida (kg/m³);

M_{sat} – Massa do corpo-de-prova saturado em água (kg);

M_s – Massa do corpo-de-prova seco em estufa (kg);

M_i – Massa do corpo-de-prova saturado e imerso em água (kg).

6.3.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

A ensaio de absorção de água por ascensão capilar foi realizado nas pastas leves de alto desempenho (P1, P2 e P3) de acordo com a ABNT NBR 9779 (1995). Dois corpos-de-prova (cilindros de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) de cada pasta foram secos em estufa até constância de massa, após a cura em câmara úmida por um período de 28 dias. Em seguida, os corpos-de-prova tiveram a face lateral selada com fita impermeável de alumínio para evitar a evaporação da água pela lateral (Figura 68a). Os corpos-de-prova foram posicionados sobre suportes em recipiente onde o nível de água foi mantido constante em 5 mm acima da base do corpo-de-prova (Figura 68b). A absorção de água foi monitorada pelo ganho de massa no tempo. Leituras foram efetuadas no período entre 1 hora e 76 dias após o contato dos corpos-de-prova com a água. A absorção de água por capilaridade foi calculada a partir da Equação 48.

$$A_c = \frac{M - M_s}{S} \quad \text{Equação 48}$$

Onde:

A_c – Absorção de água por capilaridade (g/cm²);

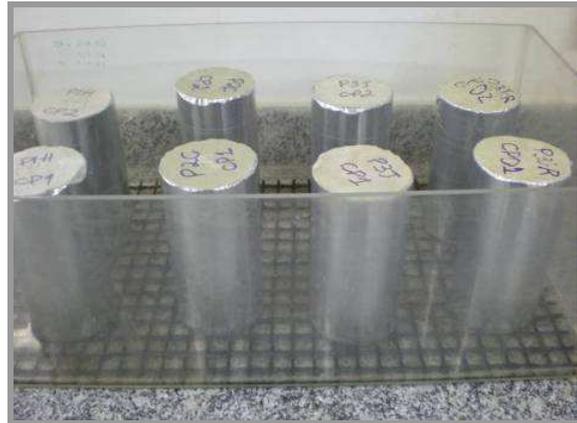
M – Massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

M_s – Massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (g);

S – Área da seção transversal do corpo-de-prova (cm^2).



(a)



(b)

Figura 68 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) Corpo-de-prova após secagem e selagem; (b) Ensaio em curso com diferentes corpos-de-prova.

As absorptividades das pastas foram calculadas em dois estágios, representados pelas duas inclinações representadas na Figura 69. O primeiro estágio (S1), ou estágio de absorção, é caracterizado pelo comportamento linear de ganho de massa de água em relação ao tempo, que ocorre nos poros capilares maiores (FONTES, 2008). No segundo estágio (S2), o ganho de massa em relação ao tempo não segue um comportamento linear. De acordo com FONTES (2008), o estágio S2 é conhecido como período de saturação e o fluxo de água ocorre nos poros capilares menores. A absorptividade calculada corresponde à absorção de água pelos poros capilares menores. O ponto de mudança entre os dois estágios é denominado como ponto de transição (P_T).

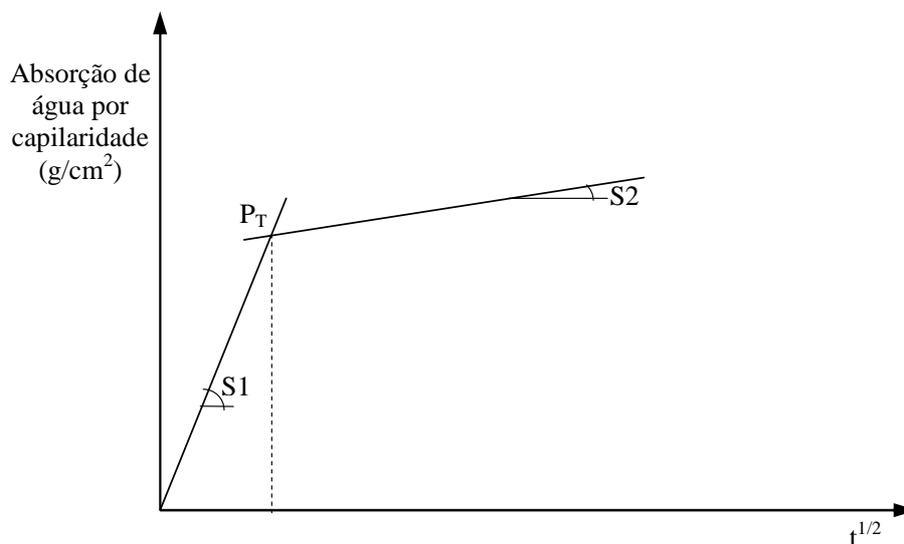


Figura 69 – Gráfico típico da absorção de água por capilaridade *versus* a raiz quadrada do tempo. Adaptado de FONTES (2008).

6.3.2.4 Ataque por Ácido

Ensaio de resistência ao ataque por soluções ácidas à pasta de cimento foram realizados nas pastas leves de alto desempenho (P1, P2 e P3) seguindo-se o procedimento descrito por no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005). O procedimento de ensaio adotado foi desenvolvido no Laboratório de Cimentação do CENPES com o objetivo de padronizar a quantificação da dissolução do cimento por ácidos (MIRANDA e SILVA, 1997). Os corpos-de-prova foram atacados pelo ácido *Mud Acid* Regular (12% de ácido clorídrico e 3% de ácido fluorídrico). Para tanto, foram moldados três corpos-de-prova cúbicos (aresta igual a 5 cm) por pasta e, antes da realização da ataque, os corpos-de-prova foram curados por sete dias em um banho atmosférico com temperatura igual a 76°C (168°F). De acordo com o procedimento de ensaio, a temperatura de cura dos corpos-de-prova deve ser superior à temperatura de ensaio em 10 – 15°C (50 – 59°F). Além disso, o procedimento também recomenda que a temperatura máxima para a realização deste ensaio seja de 66°C (150°F). Assim, o ensaio foi realizado a uma temperatura de 65°C (149°F) segundo o seguinte procedimento:

- Aquecimento da água do banho atmosférico à temperatura de 76°C (168°F);

- Inserção de 3 litros do ácido em um béquer de plástico e isolamento de sua parte superior com filme plástico (fixado por um elástico);
- Inserção do béquer no banho previamente aquecido. O nível de água do banho após a colocação do béquer foi igual ao do fluido contido no béquer (Figura 70);
- Durante o aquecimento do ácido, a temperatura do banho atmosférico foi reduzida gradativamente até que o ácido atingisse a temperatura de ensaio, igual a 65°C (149°F);
- Medição da massa do corpo-de-prova cúbico (massa inicial) e inserção deste no béquer com o auxílio de uma pinça;
- Após 40 minutos de ataque do corpo-de-prova pelo ácido, este foi retirado do béquer e colocado em cima de uma toalha de papel;
- Medição da massa do corpo-de-prova (massa final).

A quantificação do ataque ácido ao corpo-de-prova foi realizado pela sua perda de massa, calculada através da Equação 49.

$$P_m = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 49}$$

Onde:

P_m – Perda de massa (%);

M_i – Massa inicial do corpo-de-prova, medida antes deste ser inserido no ácido (g);

M_f – Massa final do corpo-de-prova, medida após este sofrer o ataque do ácido (g).

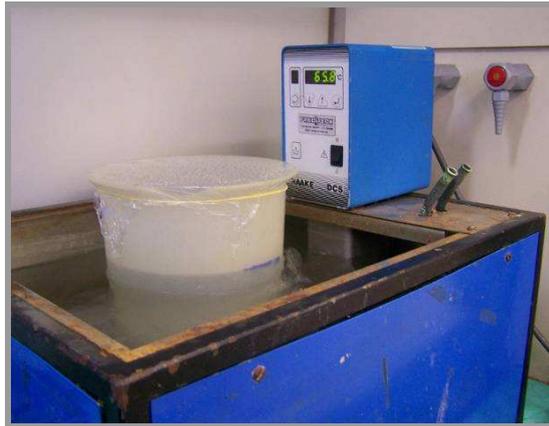


Figura 70 – Ensaio de ataque por ácido.

6.3.3 Propriedades Térmicas

O comportamento térmico das pastas leves de alto desempenho P1, P2 e P3 foi verificado por meio de ensaios de calor específico, difusividade térmica e de coeficiente de dilatação térmica. Além dos ensaios citados, também foi possível a determinação analítica da condutividade térmica de cada pasta leve de alto desempenho. As metodologias de ensaios adotadas para a determinação das propriedades térmicas serão apresentadas neste tópico do trabalho.

6.3.3.1 Calor Específico

O ensaio para a determinação do calor específico de cada pasta foi realizado em dois corpos-de-prova cilíndricos por mistura, com diâmetro igual a 200 mm e altura igual a 400 mm, dotados de orifícios centrais de 38 mm de diâmetro ao longo de seu comprimento (Figura 71a e b). O equipamento utilizado durante o ensaio trata-se de um calorímetro isotérmico (Figura 72a) e foram adotados os procedimentos descritos por ANDRADE *et al.* (1997) e pela ABNT NBR 12817 (1993). Ao longo do ensaio o calor foi fornecido por uma resistência elétrica, a temperatura do ensaio foi medida por um termômetro inserido no interior do recipiente, onde o corpo-de-prova foi colocado e a quantidade de calor para elevar a temperatura do corpo-de-prova foi medida por um wattímetro (Figura 72b).

O ensaio foi realizado de acordo com o seguinte procedimento:

- Pesagem do corpo-de-prova;
- Pesagem da água destilada no recipiente interno do calorímetro (Figura 73a);
- Inserção do corpo-de-prova no recipiente de água destilada e deste recipiente no calorímetro (Figura 73b);
- Inserção do aquecedor de resistência elétrica no furo central do corpo-de-prova (Figura 73c). Com o objetivo de se homogeneizar a temperatura da água, durante o ensaio ocorreu a circulação de água dentro do calorímetro, gerada por uma hélice com velocidade de rotação constante;
- Inserção da tampa do recipiente interno (Figura 74a);
- Inserção da paina (isolante térmico) sobre a tampa do recipiente interno (Figura 74b);
- Inserção da tampa externa do calorímetro, dotada de um motor necessário para proporcionar a rotação da hélice (Figura 74c).

O início do ensaio ocorreu com 30 minutos de agitação da água, seguida por 60 minutos de aquecimento do sistema com a medição da quantidade de calor fornecida pelo wattímetro. O ensaio foi finalizado após o período de 180 minutos. Foram realizadas três determinações em cada corpo-de-prova, com variação da temperatura em 20°C (68°F), 35°C (95°F) e 50°C (122°F), sendo que a temperatura final do primeiro ensaio foi adotada como temperatura inicial do ensaio seguinte.

O calor específico de cada pasta foi obtido pela Equação 50.

$$C = \frac{E}{m \cdot \Delta T} \quad \text{Equação 50}$$

Onde:

C – Calor específico da pasta (cal/g.°C);

E – Energia absorvida pelo corpo-de-prova (cal);

m – Massa do corpo-de-prova (g);

ΔT – Variação de temperatura ao longo do ensaio (°C).



(a)

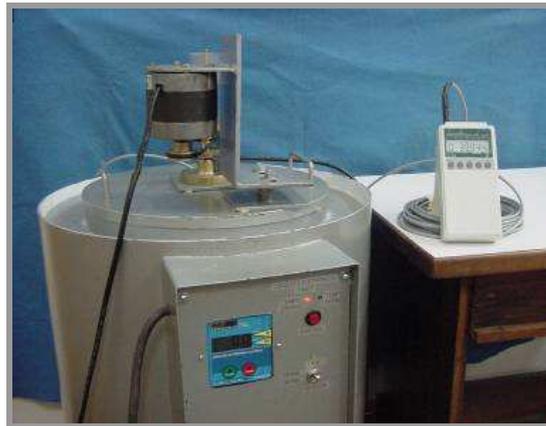


(b)

Figura 71 – Ensaio de calor específico: (a) Moldagem dos corpos-de-prova da pasta P2; (b) Corpo-de-prova da pasta P2.



(a)



(b)

Figura 72 – Ensaio de calor específico: (a) Calorímetro isotérmico; (b) Ensaio em andamento.



(a)

(b)

(c)

Figura 73 – Ensaio de calor específico: (a) Pesagem da água destilada; (b) Corpo-de-prova inserido no calorímetro; (c) Inserção do aquecedor no centro do corpo-de-prova.



(a)

(b)

(c)

Figura 74 – Ensaio de calor específico: (a) Inserção da tampa interna; (b) Inserção da paina; (c) Inserção da tampa externa.

6.3.3.2 Difusividade Térmica

O método de ensaio adotado para a determinação da difusividade térmica das pastas leves de alto desempenho estão descritos na ABNT NBR 12818 (1993) e em ANDRADE *et. al.* (1997). Para a determinação desta propriedade foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos, por pasta, com 200 mm de diâmetro, 400 mm de altura e dotados de orifício central de 10 ± 1 mm de diâmetro e comprimento até a metade de sua altura (Figura 75a e b). Durante os ensaios, cada corpo-de-prova foi aquecido por resistências elétricas e sua temperatura foi medida por um termômetro inserido no seu orifício central (Figura 76a). Os ensaios foram iniciados nas temperaturas de 20°C (68°F), 40°C (104°F) e 60°C (140°F) e, em seguida, o resfriamento do corpo-de-prova foi realizado em um banho de água gelada com temperatura em torno de 4°C (39°F), que

está mostrado na Figura 76b. Com a finalização desta etapa obteve-se a curva de resfriamento do corpo-de-prova a partir da temperatura inicial do ensaio até a temperatura de estabilização do banho.

Conhecendo-se a diferença entre a temperatura do corpo-de-prova com o banho de resfriamento no início do ensaio (θ) e no período “t” (θ_3) foram estabelecidas as relações θ_3/θ , para os intervalos de tempo a partir de $t = 0,5$ hora. Com estas relações, foi possível se obter os valores de $h^2.t/D^2$ a partir de tabelas baseadas em equações de trocas de calor de um cilindro de altura igual a duas vezes o seu diâmetro, contidas na ABNT NBR 12818 (1993). Onde h^2 é a difusividade (m^2/h), t é o tempo decorrido (h) e D é o diâmetro do corpo-de-prova (m).



(a)



(b)

Figura 75 – Ensaio de difusividade térmica: (a) Moldagem de corpo-de-prova da pasta P3; (b) Corpos-de-prova da pasta P3.



(a)

(b)

Figura 76 – Ensaio de difusividade térmica: (a) Tanque de aquecimento do corpo-de-prova; (b) Tanque de resfriamento do corpo-de-prova.

6.3.3.3 Coeficiente de Dilatação Térmica

Os coeficientes de dilatação térmica linear das pastas foram determinados por meio de ensaios realizados de acordo com a ABNT NBR 12815 (1993) e ANDRADE *et al.* (1997). Para a realização deste ensaio foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos por pasta, com dimensões iguais a 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. As medidas de deformação e temperatura dos corpos-de-prova foram obtidas por extensômetros elétricos tipo *Carlson* embutidos no interior dos corpos-de-prova (Figura 77a).

Os corpos-de-prova foram moldados com os extensômetros previamente fixados em seu interior (Figura 77b) e, após seu preenchimento, foram inseridos discos metálicos em suas superfícies (Figura 77c). Os mesmos foram mantidos em cura úmida por 24 horas e, em seguida, foram desmoldados e selados com cinco camadas de filme plástico e uma camada de fita de alumínio (para evitar trocas de umidade com o ambiente).

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento descrito a seguir:

- Os corpos-de-prova foram mantidos em uma sala a uma temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($73 \pm 36^{\circ}\text{F}$) para sua estabilização (Figura 78a). Após estabilização de temperatura dos corpos-de-prova foi efetuada a primeira leitura de deformação, denominada leitura de origem (Figura 78b);

- Os corpos-de-prova foram colocados em uma sala com temperatura de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($100 \pm 36^{\circ}\text{F}$), onde foram realizadas três leituras por dia até a estabilização da temperatura de cada corpo-de-prova (período sempre superior a 48 horas) (Figura 78a);
- Os corpos-de-prova retornam à sala de temperatura igual a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde foram realizadas três leituras diárias até a estabilização de temperatura de cada corpo-de-prova (Figura 78a);
- Os corpos-de-prova foram inseridos em uma sala, cuja temperatura era igual a $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($39 \pm 36^{\circ}\text{F}$) e, onde também foram realizadas três leituras diárias até a estabilização de temperatura de cada corpo-de-prova (Figura 78a);
- Por fim, os corpos-de-prova retornaram à sala de temperatura igual a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde foram realizadas três leituras diárias até a estabilização de temperatura de cada corpo-de-prova (Figura 78a).

Os coeficientes de dilatação térmica linear das pastas foram determinados através da Equação 51.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_q - \varepsilon_f}{T_q - T_f} \quad \text{Equação 51}$$

Onde:

α – Coeficiente de dilatação térmica das pastas ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$);

ε_q – Deformação calculada a partir da leitura de origem estabilizada (m/m);

ε_f – Deformação calculada a partir da leitura do extensômetro, na sala de ensaio (m/m);

T_q – Temperatura registrada pelo extensômetro (origem do ensaio) ($^{\circ}\text{C}$);

T_f - Temperatura registrada pelo extensômetro, na sala do ensaio ($^{\circ}\text{C}$).

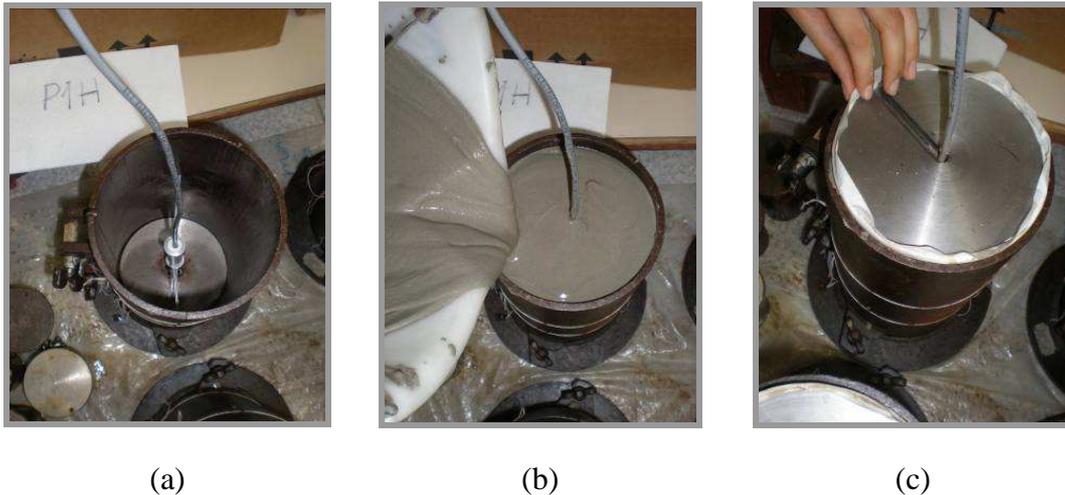


Figura 77 – Moldagem: (a) Detalhe do extensômetro *Carlson* inserido no interior do molde; (b) Preenchimento do molde; (c) Colocação do disco.



Figura 78 – Ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear: (a) Salas climatizadas; (b) Medição de deformação.

6.3.4 Variação Dimensional – Retração Autógena e Fluência

Variações volumétricas de uma mistura cimentícia, tais como, retração autógena e fluência, ocorrem devido à movimentação de água em seus capilares. A movimentação de água pode ocorrer devido ao seu consumo durante as reações de hidratação do cimento (retração autógena) ou por aplicação de um carregamento externo no material cimentício (fluência).

Neste tópico do trabalho serão apresentadas as metodologias dos ensaios realizados nas pastas leves de alto desempenho (P1, P2 e P3) referentes às suas variações dimensionais.

6.3.4.1 Retração Autógena

O ensaio de retração autógena foi realizado em três corpos-de-prova (primas de 40 mm de espessura \times 40 mm de largura \times 285 mm de comprimento) para cada mistura, no LABEST/PEC/COPPE/UFRJ. O ensaio foi realizado em laboratório com temperatura e umidade relativa controladas ($T = 23,0 \pm 1,7$ °C e $UR = 50 \pm 4$ %), atendendo as exigências da ASTM C157 (1991). A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada respeitando a seguinte seqüência:

- Inserção de placas de teflon em todas as faces do molde para reduzir o atrito do corpo-de-prova com o molde (Figura 79a);
- Inserção dos pinos nas extremidades dos moldes, para posicionamento do corpo-de-prova no comparador de retração para realizar as medições durante a terceira etapa do ensaio (Figura 79b);
- Inserção da pasta até a metade do volume do molde (Figura 79c);
- Posicionamento do termopar no centro do corpo-de-prova (Figura 80a);
- Finalização do preenchimento do molde (Figura 80b);
- Colocação de uma placa de teflon na parte superior da amostra;
- Selagem do molde com filme plástico (Figura 80c).

Como o objetivo deste estudo consistiu na determinação da deformação autógena das pastas, duas medidas foram adotadas durante o ensaio. Como já foi citado anteriormente, os corpos-de-prova foram selados com filme plástico, impedindo trocas de umidade com o ambiente, que poderiam causar retração por secagem. Outra medida adotada foi a inserção de um termopar de ferro-constantan tipo J em cada corpo-de-prova, com o objetivo de se determinar a magnitude das deformações de origem térmica

e subtraí-la de deformação medida. Após a moldagem dos três corpos-de-prova, os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados (Figura 81).

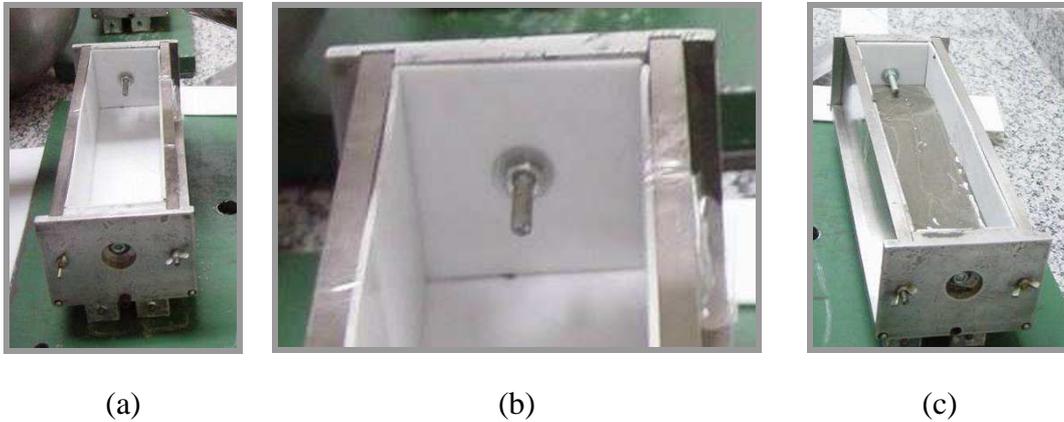


Figura 79 – Detalhes da moldagem das amostras de retração autógena: (a) Molde com teflon; (b) Detalhe do pino para posicionamento na base para leitura; (c) Preenchimento com pasta até a metade da altura do molde.

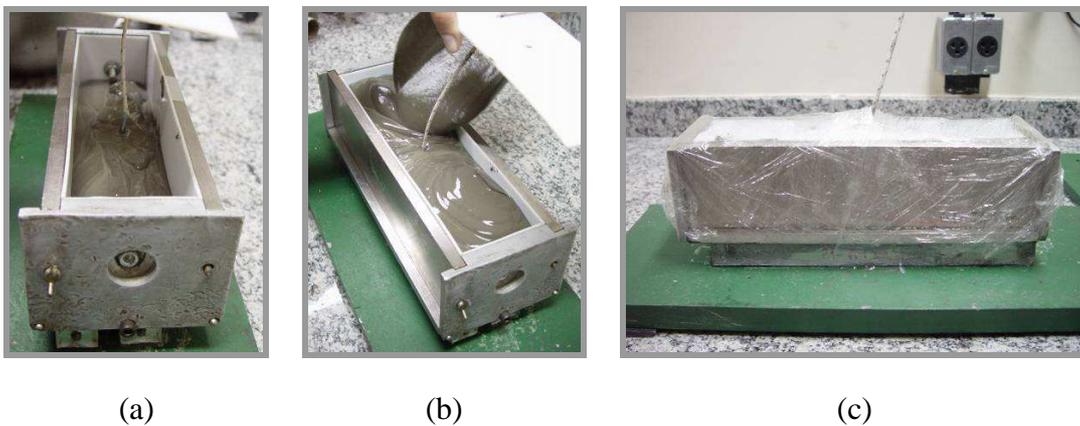


Figura 80 – Detalhes da moldagem das amostras de retração autógena: (a) Posicionamento do termopar; (b) Preenchimento final do molde; (c) Vedação do molde com filme plástico.



Figura 81 – Medição da variação de temperatura.

No início da elevação da temperatura dos corpos-de-prova, que indicava o princípio das reações de hidratação do cimento, os parafusos de fixação das placas localizadas nas extremidades dos moldes foram retirados, para que as mesmas não impedissem qualquer movimentação do corpo-de-prova (Figura 82a e b).



(a)



(b)

Figura 82 – Preparo dos moldes para colocação dos relógios: (a) Retirada de parafuso de fixação; (b) Detalhe da placa do molde sem os parafusos de fixação.

Em seguida, as porcas que foram inseridas para prender os pinos ao molde foram retiradas (Figura 83a) para o posterior posicionamento dos relógios comparadores (Figura 83b). Após o posicionamento dos relógios comparadores foram iniciadas as leituras de deformação, que prosseguiram (com os corpos-de-prova nos moldes) até o momento em que houve a equiparação das temperaturas dos corpos-de-prova em

relação à temperatura do laboratório (Figura 84). As leituras foram iniciadas para as pastas P1, P2 e P3 em 6:26 hs, 3:54 hs e 6:16 hs após o momento de misturas das pastas, respectivamente.

No primeiro dia de ensaio as medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos, passando para 30 minutos no segundo dia, 1 hora a partir do terceiro dia e até o momento de estabilização da temperatura dos corpos-de-prova com o laboratório.



Figura 83 – Preparo dos moldes para colocação dos relógios: (a) Retirada do parafuso; (b) Posicionamento do relógio comparador.



Figura 84 – Configuração da primeira etapa do ensaio de retração autóloga.

Quando a temperatura dos corpos-de-prova estabilizou, em relação à temperatura do laboratório, os mesmos foram desmoldados e selados com quatro camadas de filme

plástico e uma camada de fita de alumínio. O ensaio prosseguiu com os corpos-de-prova posicionados horizontalmente na placa de aço, com os relógios comparadores posicionados em suas extremidades, onde permaneceram durante cerca de 30 dias (Figura 85). Durante este período foram realizadas quatro leituras por dia.

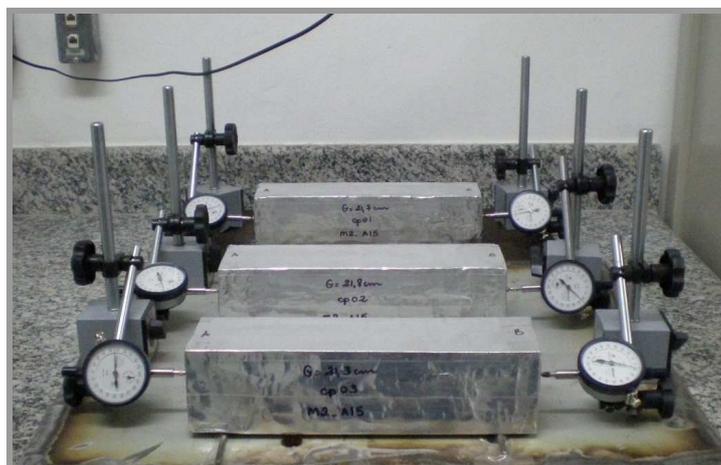


Figura 85 – Configuração da segunda etapa do ensaio de retração.

Na etapa final do ensaio de retração, os corpos-de-prova foram mantidos em prateleiras e suas medições foram feitas em um comparador de retração digital (Figura 86a). As medições de comprimentos dos corpos-de-prova foram realizadas em relação ao comprimento de uma barra de referência (Figura 86b e c). Neste período foi realizada uma leitura por dia.

A variação de massa das amostras foi controlada durante todo o estudo através da sua medição diária em uma balança de precisão de 0,01 g. Assim foi possível verificar a eficácia na selagem realizada e se houve alguma parcela da retração medida referente à retração por secagem. Segundo ILLSTON e POMEROY (1975), a selagem perfeita ocorre quando a perda de massa do corpo de prova com relação a sua massa de água atinge o valor máximo de 0,5%.

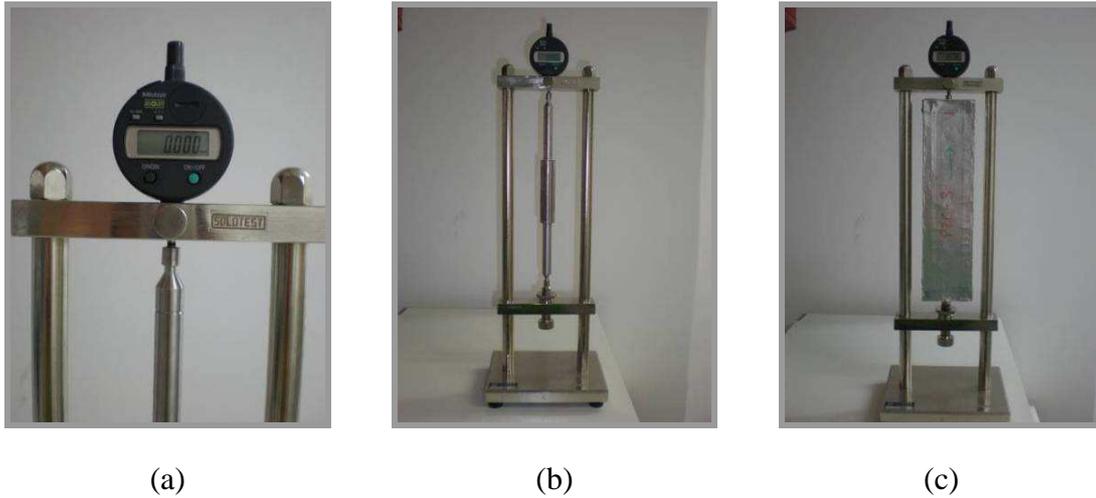


Figura 86 – Terceira etapa do ensaio de retração: (a) Detalhe do relógio digital; (b) Barra de referência; (c) Corpo-de-prova posicionado para leitura.

A retração total livre foi calculada por meio dos valores medidos utilizando-se a Equação 52 (ASTM C490, 2000).

$$\varepsilon = \frac{(L_{xi} - L_i)}{G} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 52}$$

Onde:

ε – Deformação total ($\mu\varepsilon$);

L_i – Leitura inicial do comprimento do corpo de prova, leitura de referência (mm);

L_{xi} – Leitura do comprimento realizada na idade determinada (mm);

G – Distância interna livre entre os pinos, medida para cada corpo-de-prova (mm) (Figura 87).

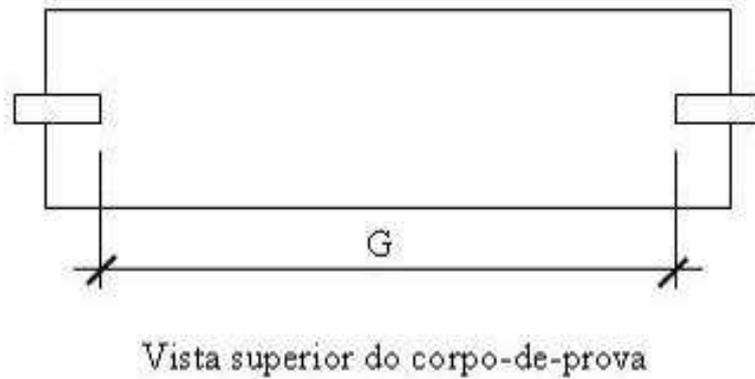


Figura 87 – Esquema da distância interna livre entre os pinos.

A retração autógena, por sua vez, foi calculada utilizando-se a hipótese de que as únicas parcelas de deformação que contribuíram para a deformação total (ϵ) foram às correspondentes à retração autógena (ϵ_{RA}) e à deformação térmica (ϵ_{θ}). Tal hipótese corresponde às condições estabelecidas pelo ensaio que não permitem o desenvolvimento de outras deformações como aquelas oriundas de esforços aplicados e de secagem do corpo-de-prova. Desta forma, a deformação autógena foi obtida através da Equação 53.

$$\epsilon_{RA} = \epsilon - \epsilon_{\theta} \quad \text{Equação 53}$$

A deformação térmica foi calculada por meio da Equação 54.

$$\epsilon_{\theta} = \alpha \times \Delta T \quad \text{Equação 54}$$

Onde:

α – Coeficiente de variação térmica das pastas, adotado igual a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (LANGE *et al.*, 2002);

ΔT – Variação de temperatura na mistura ($^{\circ}\text{C}$).

6.3.4.2 Fluência na Compressão

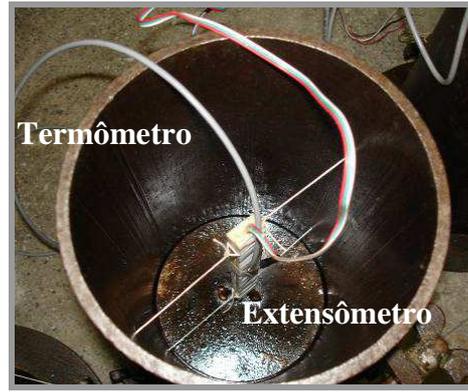
Neste trabalho foi medida a fluência básica das pastas leves de alto desempenho (P1, P2 e P3) submetidas ao carregamento de compressão uniaxial. O ensaio de fluência foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, conforme as prescrições da norma ABNT NBR 8224 (1983) para fluência em concreto.

Para a execução do ensaio foram moldados quatro corpos-de-prova para cada pasta avaliada, sendo que, dois foram submetidos ao carregamento de compressão uniaxial e os demais foram utilizados para a medição de retração e controle de perda de massa.

Os corpos-de-prova de controle são necessários para que da deformação final medida fosse descontada a parcela da retração autógena. Já os corpos-de-prova de controle empregados para medição de massa foram importantes para que o ensaio fosse finalizado no momento em que a selagem não estivesse mais garantida. O mesmo critério para perda de massa adotado por ILLSTON e POMEROY (1975) e empregado neste trabalho durante o ensaio de retração autógena foi adotado durante o ensaio de fluência. Outro parâmetro que foi medido durante o ensaio de fluência foi a temperatura dos corpos-de-prova, com o objetivo de descontar a deformação de origem térmica da deformação total medida. A variação de temperatura nos corpos-de-prova ao longo do ensaio foi medida através de termômetros PT100. As deformações foram medidas através de extensômetros elétricos KM120 da *Excel Sensores*. Os termômetros e extensômetros foram presos aos moldes antes da inserção da pasta, de acordo com a Figura 88.



(a)



(b)

Figura 88 – Preparo do molde: (a) Molde cilíndrico; (b) Fixação do termômetro e do extensômetro no molde (VELASCO, 2008)

Para cada pasta avaliada os corpos-de-prova foram moldados e, posteriormente, envolvidos por panos molhados e envolvidos por sacos plásticos, a fim de se manter o ambiente com umidade igual a 100% (Figura 89a), segundo procedimento estabelecido por VELASCO (2008). Após as primeiras 48 horas de cura, os corpos-de-prova foram desmoldados e selados. A selagem foi inicialmente realizada com o envolvimento de cada corpo-de-prova com cinco camadas de filme plástico (Figura 89b) e, em seguida, foi aplicada uma camada de fita de alumínio (Figura 89c). A finalização da selagem foi realizada através da aplicação de uma camada de silicone e inserção acima do silicone de uma abraçadeira, tanto no topo quanto no fundo de cada cilindro (Figura 89d).



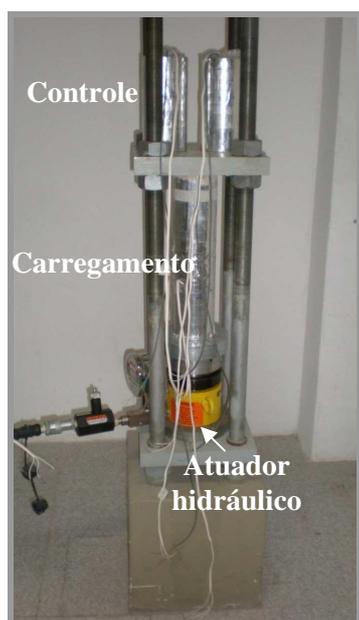
Figura 89 – Preparo do corpo-de-prova: (a) Selagem após a moldagem; (b) Selagem do corpo-de-prova com filme plástico; (c) Selagem do corpo-de-prova com fita de alumínio; (d) Corpo-de-prova com abraçadeiras (Fonte: VELASCO, 2008).

Depois da selagem, os corpos-de-prova aguardaram a data para o início do ensaio, ou de aplicação de carga. Durante o período de espera, as medidas de deformação e de temperatura foram realizadas (Figura 90), através de um aparelho medidor de deformação e de um *datalogger*, respectivamente.



Figura 90 – Aparelhos para medição de deformação e de temperatura (Fonte: VELASCO, 2008).

Ao completarem 28 dias de moldados, os corpos-de-prova destinados ao carregamento foram transferidos para o pórtico, onde foram posicionados juntamente com o atuador hidráulico (Figura 91a). Os corpos-de-prova de controle foram mantidos acima do pórtico, como pode ser observado na Figura 91.



(a)



(b)

Figura 91 – Preparo dos corpos-de-prova para o carregamento: (a) Colocação no pórtico; (b) Bomba e linhas de pressão.

O carregamento foi realizado pelo atuador hidráulico posicionado sob os corpos-de-prova, ligado a uma mangueira conectada a uma linha de pressão com uma bomba manual hidráulica (Figura 91b). As pastas P1, P2 e P3 foram carregadas na idade de 28 dias, sob tensões respectivamente iguais a 99 bar (9,9 MPa), 182 bar (18,2 MPa) e 130 bar (13,0 MPa). Uma visão geral da montagem do ensaio de fluência para as pastas P1, P2 e P3 está ilustrada na Figura 92. O valor da pressão aplicada em cada pórtico foi verificado por meio de manômetros fixados nas saídas dos atuadores (Figura 92).

Aos 28 dias, os corpos-de-prova foram carregados a uma tensão correspondentes a 40% da tensão de ruptura. As tensões de ruptura das pastas de alto desempenho foram obtidas por meio de ensaios de compressão uniaxial na prensa de ensaios *Shimadzu UH-F 1000 kN*. Os corpos-de-prova foram mantidos com o carregamento durante 90 dias. Após este período, os mesmos foram descarregados e as leituras de recuperação das deformações foram realizadas até sua estabilização, o que ocorreu depois de 30 dias.

A leitura de referência de cada pasta foi feita antes do carregamento e, tanto após o carregamento quanto após o descarregamento foram realizadas leituras a cada 5 minutos

nos primeiros 30 minutos, a cada meia hora durante as próximas duas horas e a cada 1 hora durante as 10 horas seguintes. Após este período foram realizadas leituras diárias. Uma descrição mais detalhada do procedimento deste ensaio pode ser encontrada em VELASCO (2008).

A partir das leituras efetuadas foram traçados gráficos onde é possível observar no carregamento a deformação elástica e fluência específica e, no descarregamento, a recuperação elástica e fluência específica reversível e irreversível.

Após a medição de deformação ao longo do ensaio e das medições de retração e de temperatura foi possível a determinação da deformação por fluência de cada pasta, através da Equação 55.

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{TOTAL} - \varepsilon_{RA} - \varepsilon_{\Delta T} \quad \text{Equação 55}$$

Onde:

ε_F – Deformação por fluência ($\mu\varepsilon$);

ε_{TOTAL} – Deformação total medida ($\mu\varepsilon$);

ε_{RA} – Deformação por retração autógena ($\mu\varepsilon$);

$\varepsilon_{\Delta T}$ – Deformação térmica ($\mu\varepsilon$).

A fluência específica foi calculada por meio da Equação 56.

$$F_{específica} = \frac{\varepsilon_F}{\sigma} \quad \text{Equação 56}$$

Onde:

$F_{específica}$ – Fluência específica ($\times 10^{-6}/\text{MPa}$);

σ – Tensão de carregamento, igual a 40% da tensão de ruptura (MPa).



Figura 92 – Ensaio de fluência das pastas leves de alto desempenho.

6.4 Análise Estatística dos Resultados Experimentais

A análise estatística dos resultados experimentais foi realizada pelo método da Análise de Variância (ANOVA) do programa computacional *OriginPro8*. Antes da aplicação do modelo para a comparação dos resultados foi feita a verificação de sua adequação. O teste adotado para a comparação das médias foi o Método de *Tukey*, a um nível de confiança igual a 95%.

Capítulo 7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PASTAS LEVES DE ALTO DESEMPENHO

7.1 Caracterização dos Materiais

No presente trabalho foram produzidas pastas leves de alto desempenho e pastas leves fibrosas de alto desempenho. Para tanto, as pastas foram confeccionadas com materiais estendedores tais como as microesferas de vidro e cerâmicas. Com o objetivo de se produzirem pastas leves de alto desempenho foi empregada a sílica ativa na dosagem de todas as pastas e em uma das pastas foi inserida, adicionalmente, a sílica 120#. Como já mencionado, na dosagem das misturas empregou-se o MEC visado atingir o máximo empacotamento granular seco.

Na produção das pastas leves fibrosas, o superplastificante de segunda geração foi substituído por outro de terceira geração para aumentar a fluidez da matriz e, conseqüentemente, a dispersão do reforço fibroso. As seguintes fibras foram utilizadas como reforço: microfibras de volastonita e fibras de PVA e polipropileno.

Neste capítulo serão apresentadas as características dos materiais empregados para a confecção das pastas leves e fibrosas.

7.1.1 Cimentos

Na pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para aplicação em poços de petróleo. O cimento CPP - classe G foi produzido pela Fábrica de Cimento Alvorada (Cantagalo – RJ)

enquanto o cimento CPP - classe especial foi produzido pela Fábrica de Cimento Sergipe - CIMESA (Laranjeiras – SE).

As composições químicas dos cimentos estão apresentadas na Tabela 10 e é possível dizer que estes materiais são quimicamente iguais, compostos predominantemente por óxido de cálcio e de dióxido de silício.

Tabela 10 – Composições químicas dos cimentos.

Composto Químico	Composição (%)	
	CPP – classe G	CPP – classe especial
SiO ₂	17,74	17,05
Al ₂ O ₃	3,94	4,34
Fe ₂ O ₃	5,21	3,67
CaO	66,90	68,10
K ₂ O	0,52	1,14
SO ₃	5,05	5,18
SrO	0,27	0,21
TiO ₂	0,26	0,31
MnO	0,11	-

As massas específicas e superfícies específicas dos cimentos estão apresentadas na Tabela 11. Os cimentos apresentaram praticamente a mesma massa específica, mas o cimento CPP – classe G apresentou superfície específica Blaine 6,1% superior ao CPP – classe especial.

Tabela 11 – Propriedades físicas dos cimentos.

Propriedade	CPP – classe G	CPP – classe especial
Massa específica (g/cm ³)/(lb/gal)	3,19 / 26,63	3,20 / 26,71
Superfície específica Blaine (cm ² /g)	3236	3049

As distribuições granulométricas dos cimentos utilizados estão apresentadas na Figura 93. Os resultados indicaram que o CPP – classe G é mais fino que o CPP – classe especial, que está de acordo com os resultados de superfície específicas Blaine apresentadas anteriormente. Os valores de D₉₀ são de 43,0 µm (CPP - classe G) e 54,2 µm (CPP – classe especial), respectivamente. Os diâmetros abaixo dos quais se situam 50% das partículas (D₅₀) para os cimentos são iguais a 14,8 µm (CPP – classe G) e 19,4 µm (CPP – classe especial). Os valores de D₁₀ dos cimentos foram iguais a 2,1 µm (CPP - classe G) e 3,4 µm (CPP – classe especial).

As compacidades experimentais dos cimentos foram iguais a 0,56 (CPP – classe G) e 0,57 (CPP – classe especial).

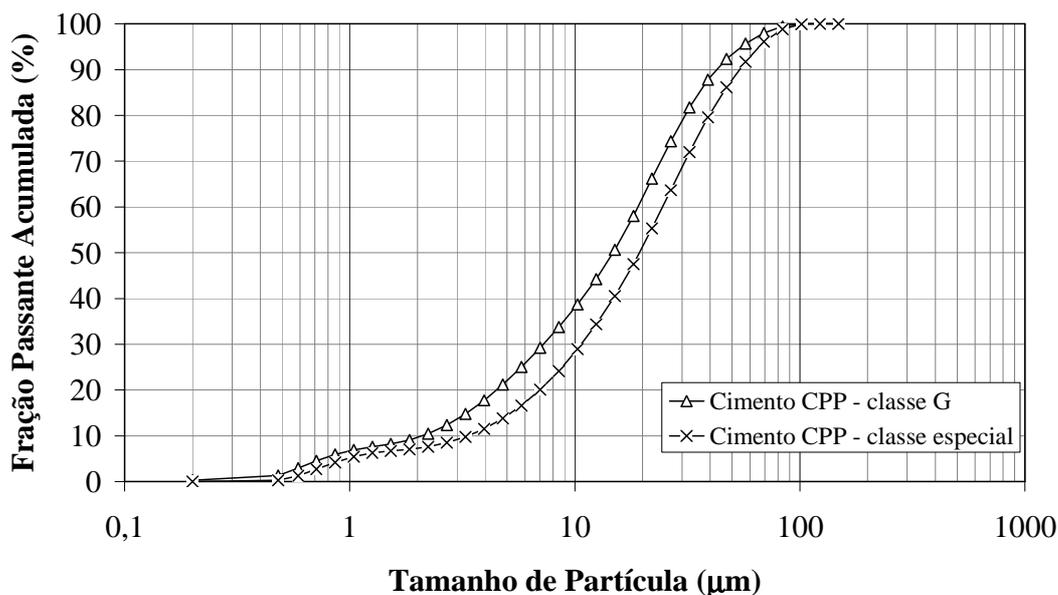


Figura 93 – Distribuição granulométrica das partículas dos cimentos CPP - classe G e CPP – classe especial.

7.1.2 Sílica Ativa

Neste trabalho foi empregada a sílica ativa *Silmix*, produzida pela Camargo Corrêa Cimentos (Laranjeiras – SE). A composição química da sílica ativa está apresentada na Tabela 12 e mostra que 95,12% deste material consiste em dióxido de silício (SiO₂).

Tabela 12 – Composição química da sílica ativa.

Composto Químico	Composição (%)
SiO ₂	95,12
Al ₂ O ₃	1,62
Fe ₂ O ₃	0,08
CaO	0,38
K ₂ O	1,09
SO ₃	1,72

A sílica ativa utilizada neste trabalho apresentou massa específica igual a $2,30 \text{ g/cm}^3$ (19,20 lb/gal). A superfície específica deste material é de $10,0 \text{ m}^2/\text{g}$. A compactidade experimental da sílica ativa foi igual a 0,42.

Sua distribuição granulométrica, obtida pelo ensaio de sedigrafia, está apresentada na Figura 94. Os valores de D_{90} e D_{50} foram respectivamente iguais a $6,6 \mu\text{m}$ e $0,4 \mu\text{m}$.

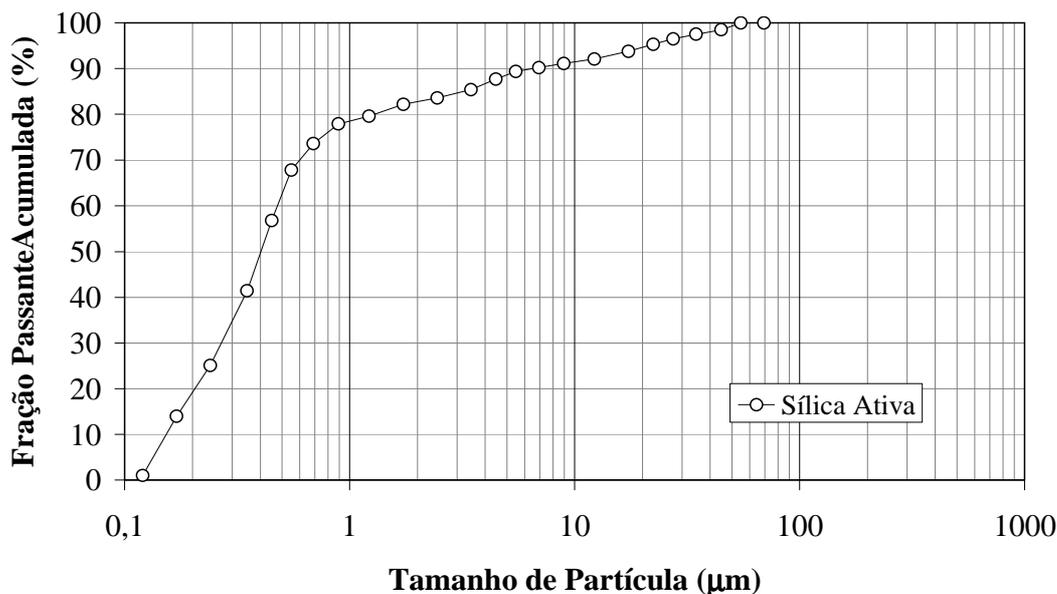


Figura 94 – Distribuição granulométrica das partículas da sílica ativa.

7.1.3 Materiais Estendedores

A microesfera cerâmica utilizada foi a SG fornecida pela *PQ Corporation* e pertencente à classe “*Z-Light Spheres*” (ver a Figura 95a). Quanto à sua forma, trata-se de esferas ocas de parede fina que apresentam a cor cinza e são compostas de cerâmica e quartzo. De acordo com o fabricante, este material apresenta diâmetro entre $10 - 350 \mu\text{m}$, diâmetro médio entre $120 - 130 \mu\text{m}$, resistência à compressão igual a 19 MPa (2700 psi), ponto de amolecimento igual a 1200°C (2192°F) e espessura da parede aproximadamente igual a 10% de seu diâmetro.

A microesfera de vidro escolhida foi a HGS 18000, fornecida pela *3M*, que possui resistência à compressão teórica igual a 124 MPa (18000 psi). Este material apresenta a coloração branca e está ilustrado na Figura 95b.



(a)



(b)

Figura 95 – Microesferas: (a) Cerâmica; (b) De vidro.

As massas específicas das microesferas de cerâmica e de vidro são respectivamente iguais a $0,91 \text{ g/cm}^3$ (7,60 lb/gal) e $0,62 \text{ g/cm}^3$ (5,18 lb/gal). As microesferas de vidro e cerâmica apresentaram compacidades experimentais de 0,51 e 0,65, respectivamente. Tendo em vista que as partículas têm a mesma forma esférica, os valores de compacidade obtidos permitem concluir que a granulometria das esferas cerâmicas é mais ampla que a das esferas de vidro, as partículas mais finas ocupando os vazios das partículas com maiores diâmetros. Tal fato é comprovado pelas distribuições granulométricas apresentadas na Figura 96.

As composições químicas destes materiais estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Composições químicas das microesferas.

Composto Químico	Composição (%)	
	Microesfera Cerâmica SG	Microesfera de Vidro HGS 18000
SiO ₂	47,70	80,02
Al ₂ O ₃	41,52	-
Fe ₂ O ₃	3,69	-
K ₂ O	2,32	-
CaO	2,36	18,34
SO ₃	1,43	1,64
TiO ₂	0,99	-

As curvas granulométricas das microesferas de vidro e cerâmica estão apresentadas na Figura 96. A microesfera SG apresentam D₉₀, D₅₀ e D₁₀ respectivamente iguais a 242,6, 133,8 µm e 63,1 µm. Entretanto, a microesfera HGS 18000 apresenta uma granulometria mais fina que a microesfera SG, sendo que os valores de D₉₀, D₅₀ e D₁₀ da microesfera de vidro são iguais a 38,7 µm, 21,4 µm e 10,7 µm, respectivamente.

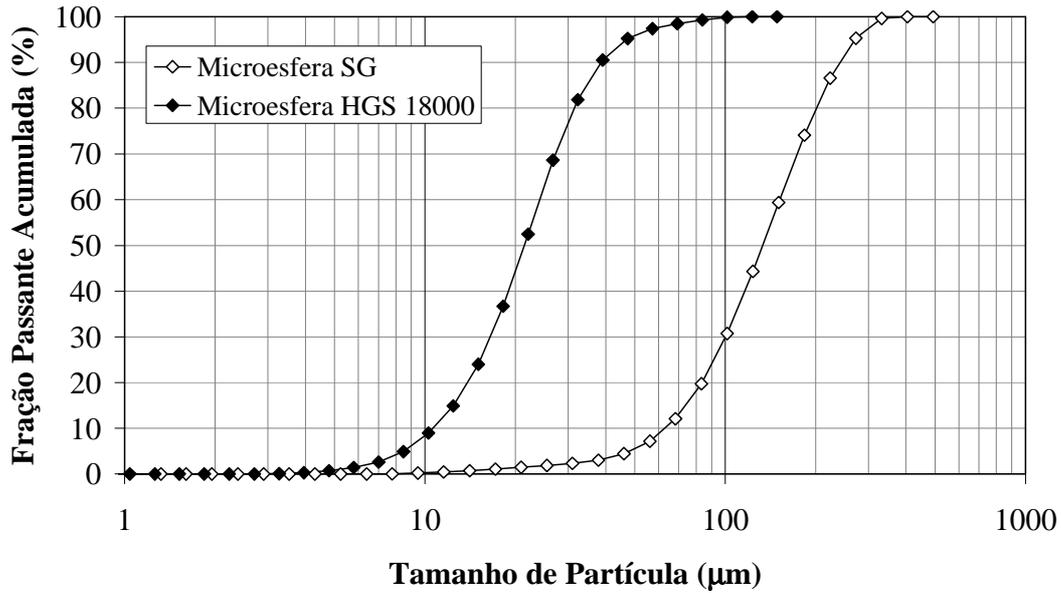


Figura 96 – Distribuições granulométricas das microesferas.

7.1.4 Sílica 120#

Na dosagem de uma das pastas estudadas foi utilizado quartzo moído proveniente da *Mineração Jundu* (Descalvado – SP), denominado comercialmente de sílica 120# pelo fato de ser classificado na peneira ABNT 120, que está mostrado na Figura 97.



Figura 97 – Sílica 120#.

A composição química da sílica 120# apresentada na Tabela 14 indica a predominância de dióxido de silício neste material. A massa específica da sílica 120# é igual a 2,66 g/cm³ (22,20 lb/gal) e sua compactidade experimental de 0,57.

Tabela 14 – Composição química da sílica 120#.

Composto Químico	Composição (%)
SiO ₂	96,25
Al ₂ O ₃	2,25
Fe ₂ O ₃	0,12
SO ₃	1,39

A distribuição de tamanhos de partículas do quartzo moído (sílica 120#) está apresentada na Figura 98. Os valores D₉₀, D₅₀ e D₁₀ deste material são iguais a 186,6 µm, 129,0 µm e 86,8 µm.

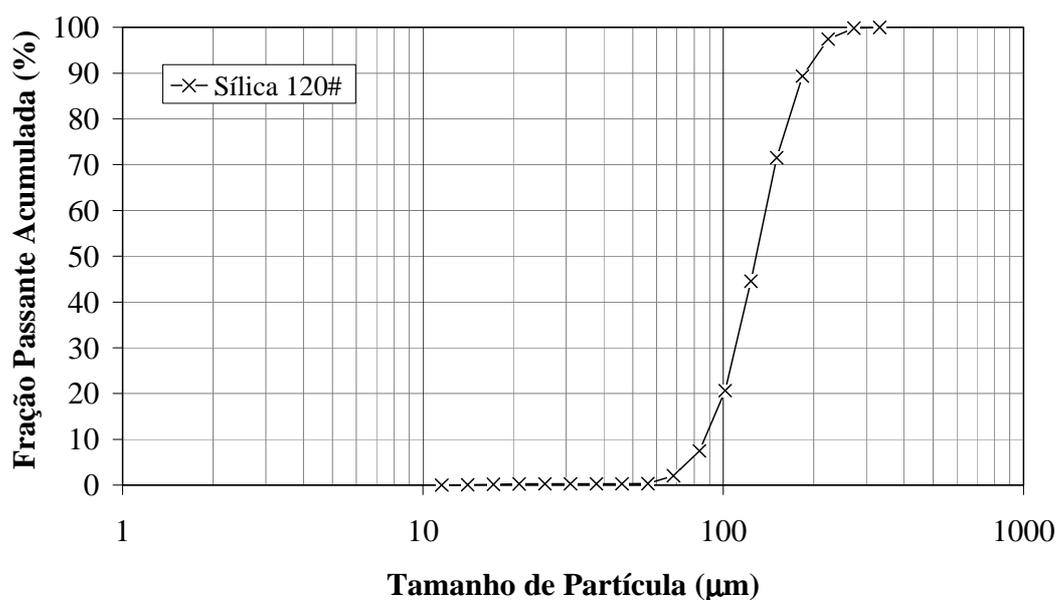


Figura 98 – Distribuição granulométrica da sílica 120#.

7.1.5 Aditivos Químicos

Nesta pesquisa foram utilizados três tipos de aditivos químicos superplastificantes (CFR-6L, CD-33B e Glenium 51) e um aditivo químico antiespumante (FP-7LB).

O aditivo químico CFR-6L é do tipo polinaftaleno sulfonato, de segunda geração e apresenta em sua composição de 30 – 60 % de condensado de sal orgânico sulfonado.

O superplastificante sólido CD-33B é um aditivo de segunda geração do tipo condensado de formaldeído cetona sulfonato e possui em sua composição uma concentração inferior a 60% de cetona sulfonada.

O aditivo superplastificante líquido Glenium 51 de terceira geração, a base de éter carboxílico modificado, possui um teor de sólidos é igual a 29,8%.

O agente antiespumante líquido FP-7LB utilizado apresenta em sua composição uma concentração de silicone inferior a 60%.

As massas específicas, volumes absolutos e concentrações dos aditivos químicos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Características dos aditivos químicos.

Produto	Tipo	Massa específica (g/cm³) – (lb/gal)	Concentração*
CD-33B	Superplastificante	1,16 – 9,68	0,2 – 2,0 %
CFR-6L	Superplastificante	1,15 – 9,60	0,10 – 0,30 gpc
Glenium 51	Superplastificante	1,07 – 8,93	-
FP-7LB	Antiespumante	1,00 – 8,35	0,01 – 0,02 gpc

* **Concentração de aditivo:** As concentrações são indicadas pelos fabricantes. Para *aditivo sólido* a concentração é expressa em percentagem de massa de aditivo em relação à massa de cimento; para *aditivo líquido* a concentração é expressa em galões de aditivos por pé cúbico de cimento (gpc).

1 gpc = 0,0888 mL/g de cimento.

7.1.6 Fibras

7.1.6.1 Microfibra de Volastonita

A microfibra de volastonita JG Energyarc utilizada no presente estudo é uma fibra mineral composta basicamente de cálcio e silício (ver a composição química apresentada na Tabela 16). De acordo com o fabricante, a dimensão transversal desta fibra pode variar entre 5 – 100 μm e a longitudinal entre 50 μm – 2 mm. A massa específica desta fibra é de 2,90 g/cm^3 (24,21 lb/gal). A Figura 99 ilustra a aparência da fibra.

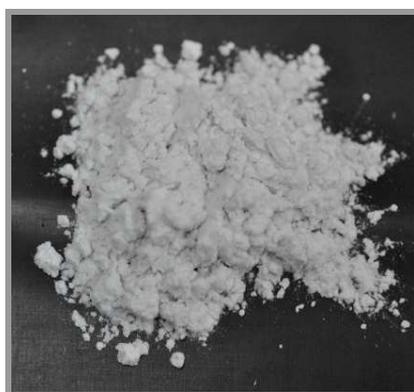


Figura 99 – Microfibra de volastonita.

Tabela 16 – Composição química da microfibra de volastonita.

Composto Químico	Composição (%)
SiO ₂	46,35
CaO	52,39
SO ₃	0,68
Fe ₂ O ₃	0,42
K ₂ O	0,16

7.1.6.2 Fibras de PVA e de Polipropileno

A fibra de álcool polivinílico, ilustrada na Figura 100a, utilizada como reforço foi a PVA (REC 15) da *Kuraray Co* (Japão). A fibra de PVA apresenta comprimento igual a 12 mm, diâmetro de 40 μm e massa específica igual a 1,34 g/cm^3 (11,19 lb/gal). A fibra de PVA possui relação de aspecto (l/d) igual a 300. O fabricante também informa que a resistência à tração e o módulo de elasticidade desta fibra são respectivamente iguais a 1600 MPa e 40 GPa.

A fibra de polipropileno utilizada foi a NeoFibra MF (*Neomatex*), composta por feixes de mono-filamentos obtidos por extrusão, que após receberem tratamentos superficiais para facilitar sua dispersão no concreto, são cortados dando origem as microfibras de polipropileno (ver a Figura 100b). As características desta fibra são as seguintes: comprimento igual a 12 mm, diâmetro do mono-filamento 12 μm e massa específica igual a 0,93 g/cm^3 (7,76 lb/gal). O ponde de fusão segundo o fabricante é de 160°C (320°F). O fabricante também informa em sua ficha técnica que a fibra de polipropileno apresenta excelente resistência alcalina, e ainda, é imputrescível, quimicamente inerte e não enferruja. A relação de aspecto (l/d) da fibra de polipropileno é igual a 1000.

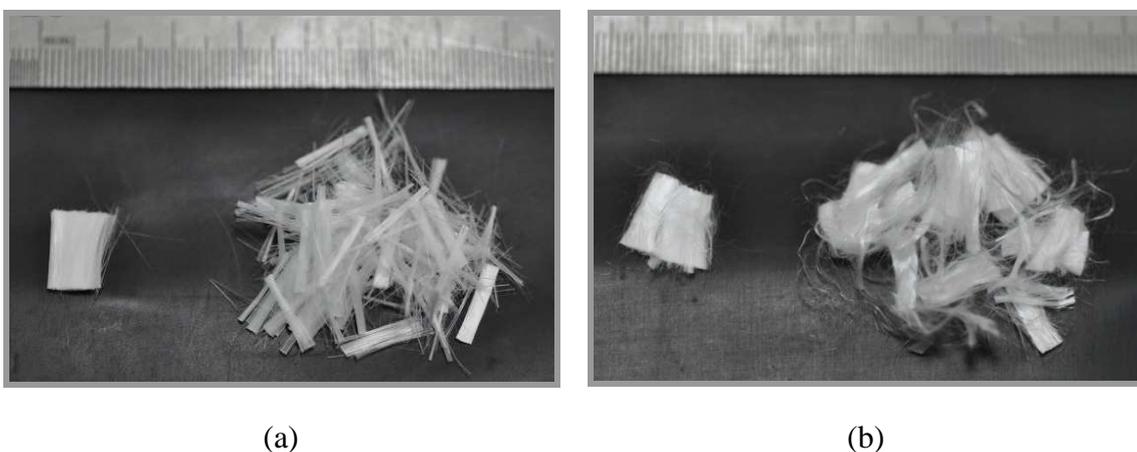


Figura 100 – Fibras: (a) PVA; (b) Polipropileno.

7.1.7 Água

A água utilizada para a confecção das pastas foi proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro após o processo de deionização.

7.1.8 Sumário das Propriedades dos Materiais

Neste sub item do trabalho será apresentado um resumo das propriedades dos materiais utilizados para a confecção das pastas avaliadas. As curvas granulométricas dos materiais granulares estão apresentadas na Figura 101. Os resultados mostram que os cimentos apresentam distribuição granulometria similar, enquanto que a microesfera de vidro HGS18000 apresenta granulometria um pouco maior que a dos cimentos. Os valores de D_{50} destes materiais são iguais a: 14,8 μm (CPP – classe G), 19,8 μm (CPP – classe especial) e 21,4 μm (microesfera HGS18000). Os valores de D_{10} destes materiais são iguais a: 2,1 μm (CPP – classe G), 3,4 μm (CPP – classe especial) e 10,7 μm (microesfera HGS18000). As diferenças de distribuições granulométricas se tornam mais evidentes ao se comparar os cimentos com a sílica ativa, a sílica 120# e a microesfera SG. A sílica ativa é o material de menor granulometria com D_{50} igual a 0,4 μm . Enquanto que, as maiores distribuições granulométricas são aquelas referentes à sílica 120# ($D_{50} = 129,0 \mu\text{m}$) e à microesfera SG ($D_{50} = 63,1 \mu\text{m}$). As diferentes composições granulométricas dos materiais utilizados para a confecção das pastas contribuíram para os empacotamentos das pastas leves.

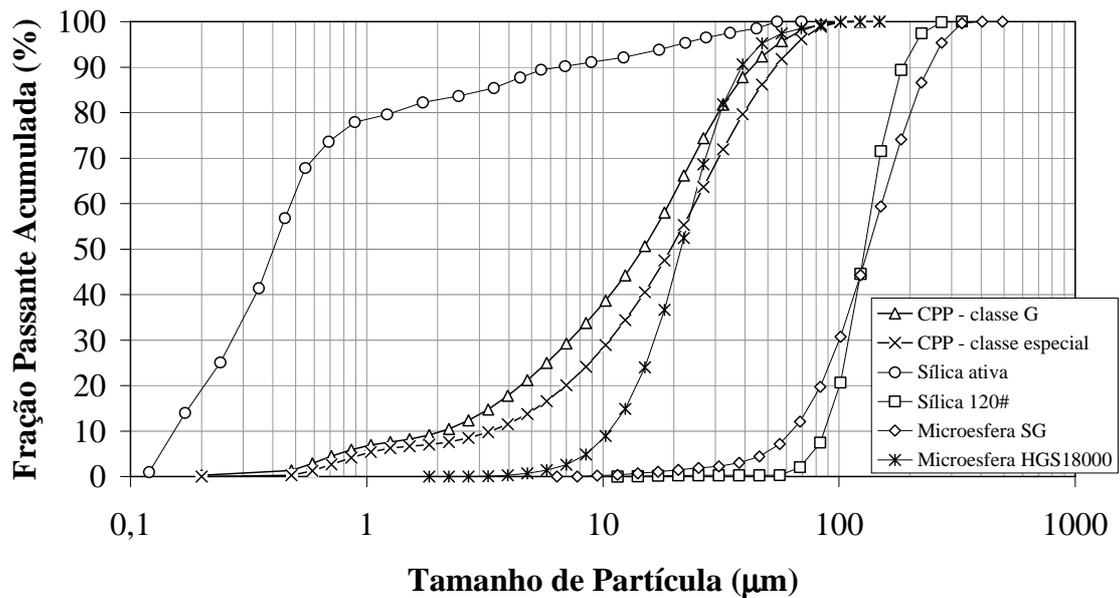


Figura 101 – Distribuições granulométricas dos materiais granulares.

As massas específicas e compacidades experimentais dos materiais utilizados para a confecção das pastas caracterizadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 17. As compacidades experimentais consistem em valores determinados a partir de ensaios realizados apenas com cada material granular e a água. Na Tabela 17 também estão mostradas as superfícies específicas das materiais cimentícios utilizados no estudo.

Os resultados indicam que os cimentos apresentaram praticamente a mesma massa específica. No entanto, em relação à superfície específica Blaine, o cimento CPP – classe G apresentou um resultado 6,1% superior ao CPP – classe especial. Esta diferença de superfície específica entre os cimentos está em consonância com as distribuições granulométricas deste materiais, em que o CPP – classe G apresentou uma granulometria inferior à do CPP – classe especial, conforme pode ser verificado na Figura 101.

Os resultados indicam que todas as adições utilizadas nas pastas leves apresentam massas específicas inferiores às dos cimentos. As massas específicas das adições variaram entre 0,62 e 2,66 g/cm³, valores estes correspondentes à microesfera de vidro e à sílica ativa, respectivamente.

Tabela 17 – Compacidades experimentais dos materiais granulares.

Material	Massa Específica (g/cm³ – lb/gal)	Superfície Específica (cm²/g)	Compacidade Experimental
Cimento CPP classe G	3,19 – 26,63	3236	0,56
Cimento CPP classe especial	3,20 – 26,71	3049	0,57
Sílica ativa	2,30 – 19,20	100000	0,42
Sílica 120#	2,66 – 22,20	-	0,57
Microesfera cerâmica SG	0,91 – 7,60	-	0,51
Microesfera de vidro HGS18000	0,62 – 5,18	-	0,65

7.2 Propriedades das Pastas no Estado Fresco

7.2.1 Reologia

A Figura 102 apresenta os gráficos tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação das pastas P1, P2 e P3. A partir dos gráficos apresentados na Figura 102 foram realizados ajustes lineares para cada pasta dentro do quadro do Modelo de *Bingham*. Assim, foi possível determinar os resultados dos limites de escoamento e viscosidade plástica das pastas estudadas. Os resultados das propriedades reológicas das pastas P1, P2 e P3 estão apresentados na Tabela 18.

As propriedades reológicas das pastas leves (Tabela 18) apresentaram a mesma tendência, sendo que $P1 < P2 < P3$ para o limite de escoamento, viscosidade plástica, gel inicial e gel final. A comparação entre as propriedades reológicas das pastas estudadas é não pode ser realizada pois existem muitas variáveis em relação aos tipos e consumos de materiais utilizados nas dosagens das pastas.

Uma referência em relação às magnitudes das propriedades reológicas de pastas leves confeccionadas com microesferas cerâmicas pode ser encontrada no trabalho de MIRANDA (2008). A pesquisadora realizou ensaios de reologia em pastas leves confeccionadas com cimento CPP – classe G, microesfera SG e sílica ativa em diferentes teores. As pastas apresentaram massas específicas aparentes entre 1,40 e 1,80 g/cm³. Os teores de água (em relação à massa de sólidos) variaram entre 35 e 43%. Os teores de superplastificante de segunda geração (em relação à massa de cimento) variaram entre 1,5 e 4,0%. As pastas foram dosadas a partir do mesmo modelo de empacotamento utilizado neste trabalho. As viscosidades plásticas das pastas leves variaram entre 154 e 177 mPa.s, enquanto que seus limites de escoamento oscilaram entre -1 e 4 Pa.

DASGUPTA *et al.* (2006) apresentaram em seu trabalho a caracterização de pastas leves e ultraleves dosadas a partir de um modelo de empacotamento de partículas visando benefícios na resistência e na permeabilidade das misturas. Os materiais granulares utilizados nas dosagens das pastas e outras propriedades estão apresentadas no Capítulo 3. As pastas estudadas apresentaram viscosidades plásticas entre 26 e 200 mPa.s (cP), enquanto que seus limites de escoamento variaram entre 3,8 e 13,4 Pa (8 e 28 lbf/100ft²).

Durante o ensaio de reologia existem dois fatos que podem ocorrer que, independente das leituras efetuadas, indicam se as propriedades reológicas da pasta ensaiada são satisfatórias: a gelificação da pasta durante o ensaio (Figura 103) e a sedimentação de material no fundo do copo do viscosímetro, que pode ser verificada visualmente ou com o auxílio de uma espátula. Cabe ressaltar que durante os ensaios das pastas P1, P2 e P3 estes fatos não foram observados.

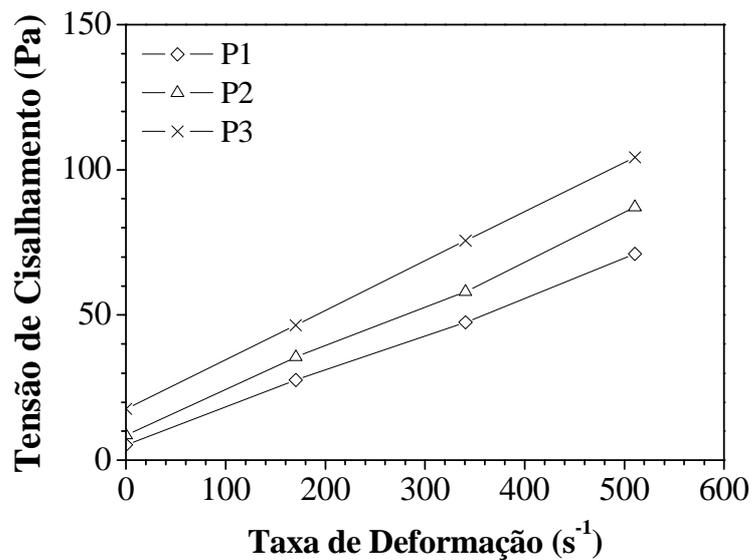


Figura 102 – Gráficos tensão de cisalhamento \times taxa de deformação das pastas P1, P2 e P3.

Tabela 18 – Propriedades reológicas das pastas P1, P2 e P3.

Propriedades Reológicas	P1	P2*	P3
Viscosidade plástica (mPa.s) / (cP)	127,6 / 127,6	151,6 / 151,6	169,6 / 169,6
Limite de escoamento (Pa) / (lbf/100pé ²)	5,3 / 11,0	8,6 / 18,0	17,7 / 37,0
Correlação	0,9977	0,9945	1,000
Gel inicial (Pa) / (lbf/100pé ²)	7,7 / 16,0	9,5 / 19,9	12,8 / 26,7
Gel final (Pa) / (lbf/100pé ²)	11,8 / 24,6	15,8 / 27,7	17,9 / 37,4

* As propriedades reológicas da pasta P2 foram calculadas a partir da média de três ensaios. No entanto, os resultados das demais pastas consistem em apenas uma determinação por mistura.



Figura 103 – Exemplo de pasta gelificada.

7.2.2 Água Livre

A Figura 104 ilustra os ensaios de água livre realizados nas pastas P1 (Figura 104a), P2 (Figura 104b) e P3 (Figura 104c) e é possível observar a ausência de água sobrenadante ao final dos ensaios das três pastas. Desta forma, os teores de água livre para as três pastas foram iguais a zero.

O ensaio de água livre expressa a estabilidade da pasta de cimentação durante seu estado fresco. No caso de pastas empacotadas, geralmente não há ocorrência de água exsudada após o período de repouso. Isto pode ser atribuído ao menor teor de água nestas misturas quando comparado ao teor empregado em pastas convencionais. Além disso, o uso de materiais com superfície específica superior à do cimento em pastas

empacotadas, como a sílica ativa, faz com que esta pasta apresente uma maior área molhável do que uma pasta convencional.

Não existe um limite estabelecido para o teor de água livre de uma pasta de cimentação. Entretanto, o teor máximo de 5,9% é admitido para pastas contendo apenas cimento (CPP – classe G ou classe especial) e água, quando se avalia estes cimentos para uso em poços de petróleo pela ABNT NBR 9831 (2006).

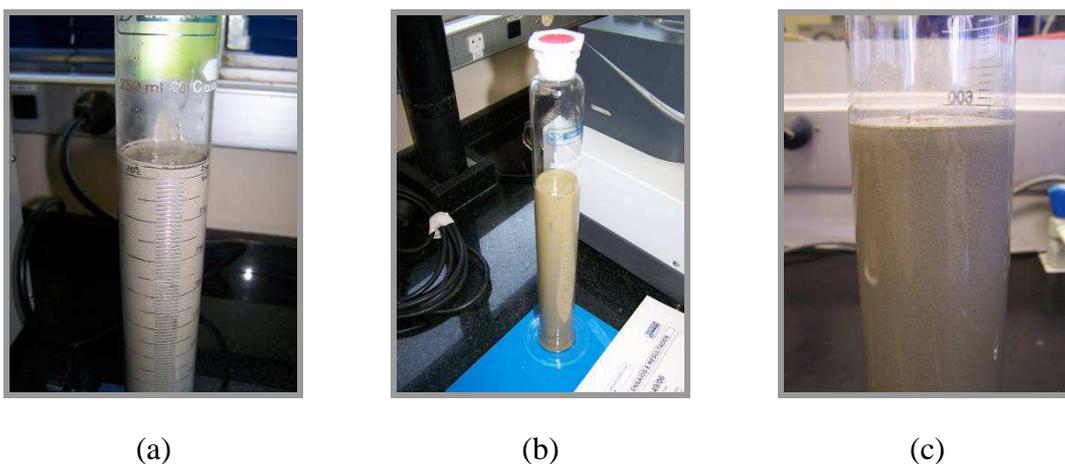


Figura 104 – Ensaio de água livre das pastas: (a) P1; (b) P2; (c) P3.

7.2.3 Perda de Fluido

O ensaio de perda de fluido (filtrado) em meio estático foi realizado nas pastas P1, P2 e P3 com o objetivo de estimar a susceptibilidade destas pastas em perder parte de sua fase aquosa para a formação. Os ensaios de filtrado das pastas P1, P2 e P3 ocorreram durante 7, 63 e 8,4 segundos, respectivamente. Como os ensaios das pastas P1, P2 e P3 duraram menos de 30 minutos, atendendo à recomendação do procedimento descrito no PROCELAB (CAMPOS *et al.*, 2005), o volume de filtrado equivalente a 30 minutos de ensaio foi calculado através da Equação 25. Os resultados de tempo de escoamento, volume de fluido perdido durante o tempo de escoamento e da perda de fluido equivalente a um período de 30 minutos (Q_{30}) para as pasta P1, P2 e P3 estão apresentados na Tabela 19.

A pasta que apresentou a menor perda de fluido foi a P2 e a maior perda de fluido foi apresentada pela pasta P3. Cabe ressaltar que as pastas dosadas não apresentaram em sua composição algum aditivo químico redutor de filtrado.

Tabela 19 – Filtrados das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	t (min)	Q_t (ml)	Q₃₀ (cm³)
P1	0,117	7,9	253
P2	1,050	16,7	160
P3	0,140	18,5	540

O estudo realizado por DASGUPTA *et al.* (2006) visava a solução de problemas referentes a perda de circulação em poços no Campo *Mumbai High*. As pastas leves e ultraleves apresentaram perdas de fluidos entre 300 e 832 ml e foram empregadas com sucesso na cimentação de alguns poços. Os pesquisadores também não utilizaram aditivos controladores de filtrado nas dosagens de suas pastas.

7.2.4 Massa Específica Aparente

As massas específicas aparentes das pastas P1, P2 e P3 determinadas a partir do ensaio na balança de lama, foram iguais a 1,53 g/cm³ (12,8 lb/gal), 1,26 g/cm³ (10,55 lb/gal) e 1,49 g/cm³ (12,45 lb/gal). Todas as pastas avaliadas quanto à massa específica apresentaram resultados para esta propriedade inferiores a 1,70 g/cm³ (14,0 lb/gal), que é o valor indicado por MIRANDA (2008) como limite para massa específica de uma pasta leve.

7.2.5 Evolução da Resistência à Compressão

As evoluções de resistência à compressão utilizando o UCA para as pastas P1, P2 e P3 estão apresentados na Figura 105, na Figura 106 e na Figura 107, respectivamente. A

Figura 108 apresenta a evolução das resistências à compressão no tempo das pastas P1, P2 e P3. A Tabela 20 mostra os resultados das resistências à compressão das pastas em idades diferentes, onde é possível verificar que a pasta P2 apresentou os maiores valores. A superioridade da resistência à compressão da pasta P2 em relação às demais pastas pode ser explicada pelo maior teor de materiais cimentícios e menor relação a/mc em sua composição. A taxa de evolução da resistência à compressão da pasta P2 foi mais rápida entre as pastas estudadas. Tal fato pode ser visualizado na Figura 108, através das inclinações dos ramos ascendentes das pastas estudadas, onde as pastas P1 e P3 apresentam aproximadamente a mesma taxa e a P2 foi superior à das demais pastas.

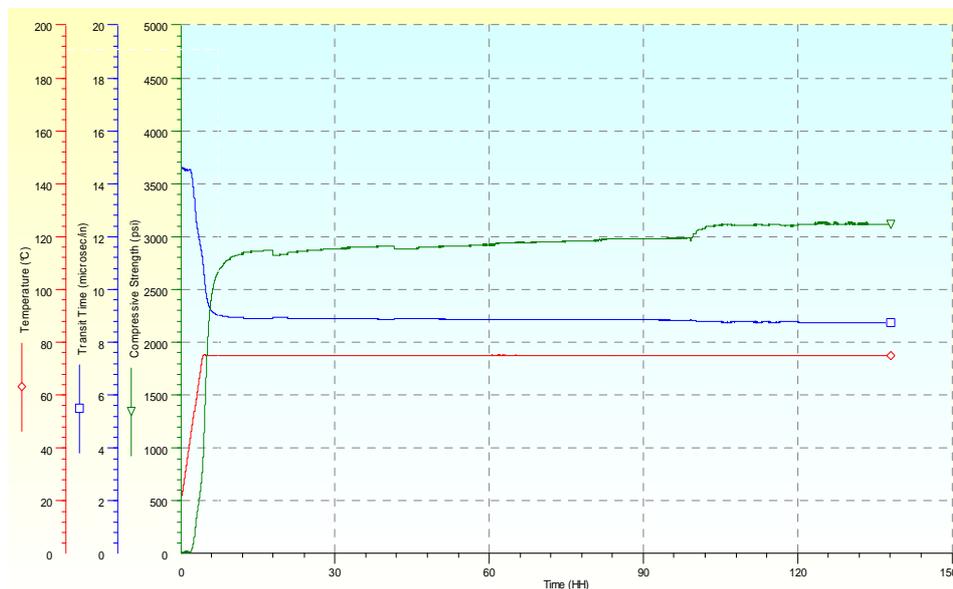


Figura 105 – Resistência à compressão da pasta P1.

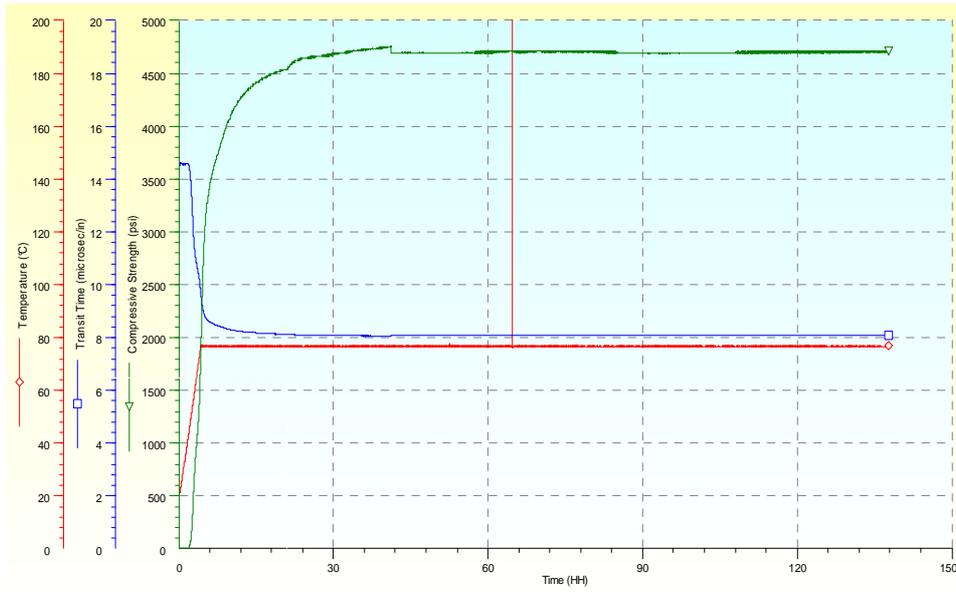


Figura 106 – Resistência à compressão da pasta P2.

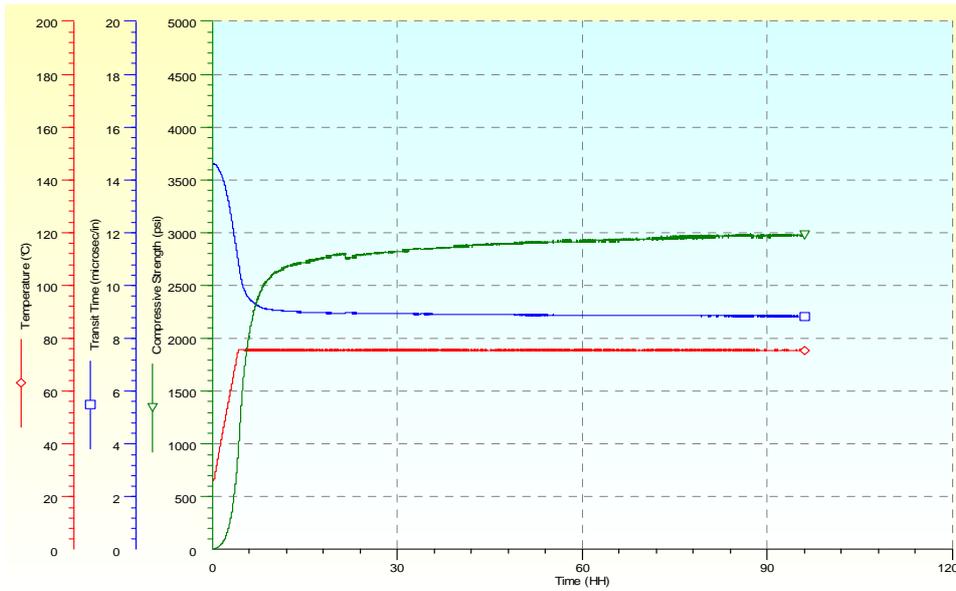


Figura 107 – Resistência à compressão da pasta P3.

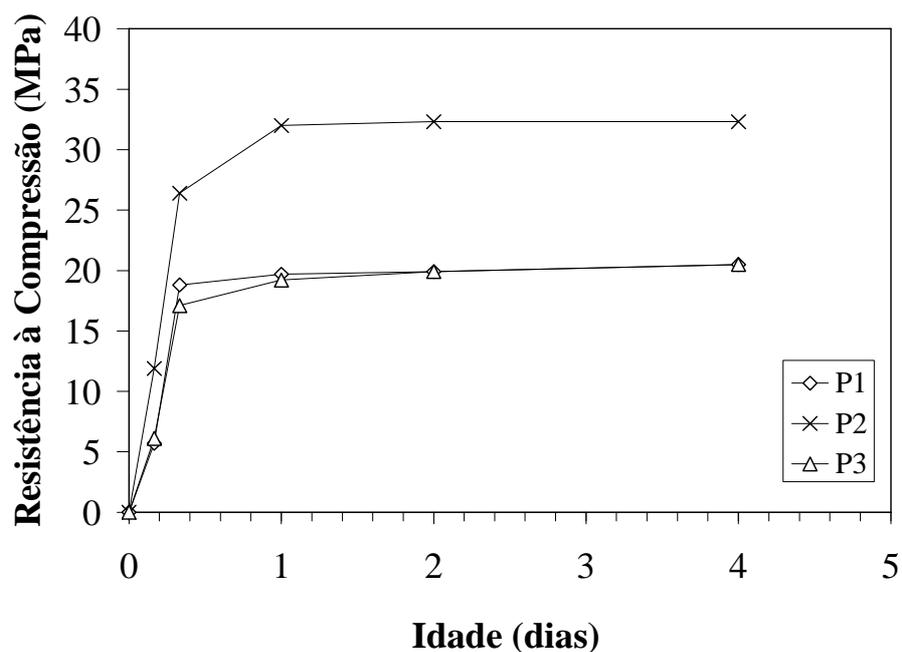


Figura 108 – Gráficos de resistência à compressão no tempo das pastas P1, P2 e P3.

Tabela 20 – Resultados de resistência à compressão das pastas leves de alto desempenho.

Idade (dias)	P1 (MPa – psi)	P2 (MPa – psi)	P3 (MPa – psi)
4 hs	5,7 - 829	11,9 - 1722	6,1 – 879
8 hs	18,8 - 2719	26,4 – 3829	17,1 – 2476
1	19,7 – 2851	32,0 – 4635	19,2 – 2781
2	19,9 – 2889	32,3 – 4678	19,9 – 2892
4	20,5 – 2975	32,3 – 4678	20,5 – 2969

Os resultados da resistência à compressão obtidos pelo equipamento UCA são, sabidamente, diferentes das resistências obtidas pelo ensaio de compressão uniaxial. As resistências do UCA são obtidas de modelos que tentam correlacionar velocidade de pulso ultrassônico e resistência, necessitando de uma calibração que depende das características individuais de cada material ensaiado. O UCA fornece, principalmente, uma informação qualitativa sobre a cinética da reação quando o material está submetido

a determinadas pressão e temperatura. Fornece também informação sobre o momento da solidificação se tal medida foi importante para o modelo termo-químico-mecânico utilizado. É importante considerar também que os tempos constantes das Figura 105 a Figura 107 não podem ser equiparados aos tempos das resistências apresentados no parágrafo 7.3.1.1, já que o programa de temperaturas das pastas ensaiadas no UCA aceleram a hidratação destas.

7.3 Propriedades das Pastas no Estado Endurecido

7.3.1 Comportamento Mecânico

7.3.1.1 Comportamento sob Compressão Uniaxial

As curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Figura 109, na Figura 110 e na Figura 111, respectivamente. As curvas tensão *versus* deformação de todos os corpos de prova ensaiados são apresentadas no Anexo A3. Os valores médios de resistência à compressão de ruptura ($f_{c,RUP}$), deformação axial de ruptura ($\epsilon_{A,RUP}$), módulo de elasticidade e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 21. Os resultados apresentados na Tabela 21 correspondem aos valores médios de quatro corpos-de-prova por ensaio.

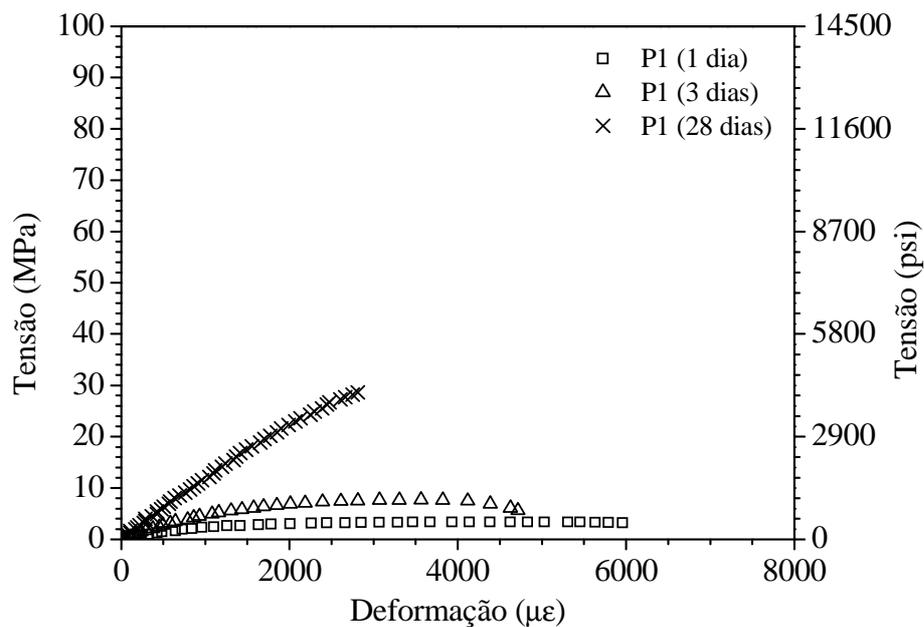


Figura 109 – Curvas típicas tensão x deformação da pasta P1.

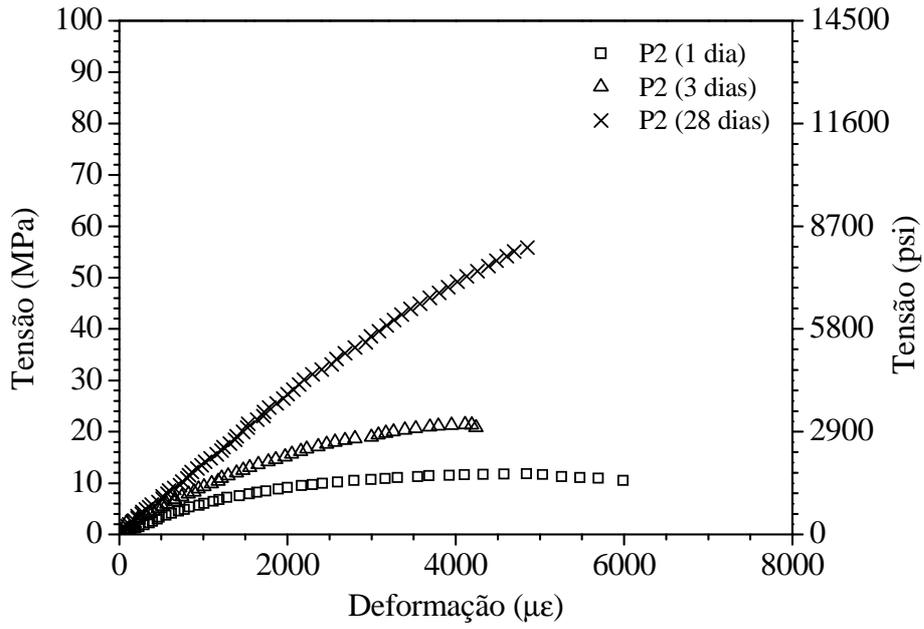


Figura 110 – Curvas típicas tensão \times deformação da pasta P2.

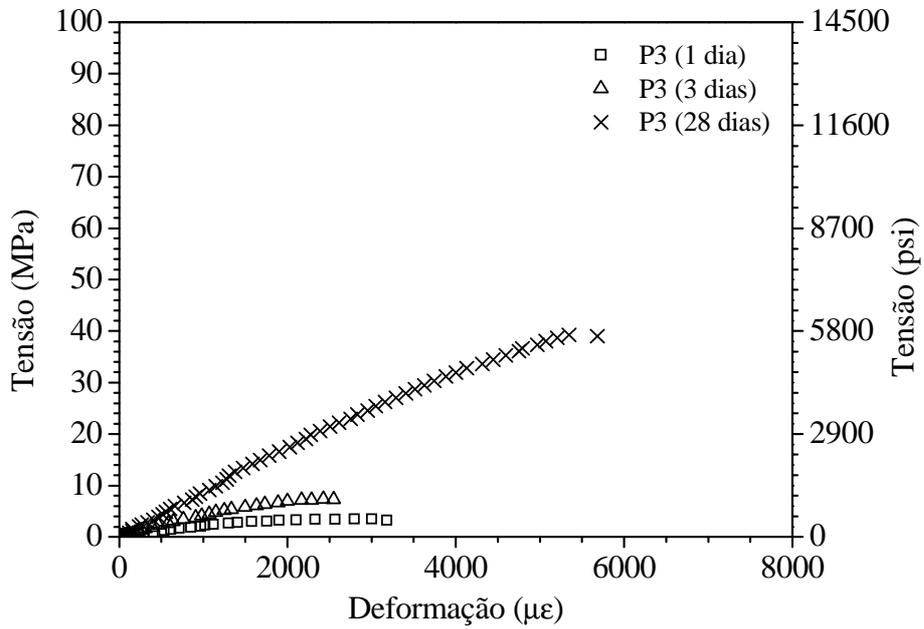


Figura 111 – Curvas típicas tensão \times deformação da pasta P3.

Tabela 21 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial.

Pasta	Idade (dias)	$f_{c,RUP}$ (MPa - psi)	CV (%)	$\epsilon_{A,RUP} - CV$ ($\mu\epsilon - \%$)	E (GPa - 1000psi)	CV (%)
P1	1	3,4 - 493	2,3	3444 – 11,1	3,4 - 493	1,0
	3	7,3 - 1059	5,6	2859 – 16,1	11,9 - 1732	11,4
	28	27,5 - 3989	10,2	2732 – 13,6	12,9 - 1874	6,2
P2	1**	11,1 - 1610	8,9	4212 – 13,7	8,1 - 1171	14,6
	3*	22,0 - 3191	3,3	4277 – 2,9	9,0 - 1311	11,5
	28*	57,1 - 8282	3,7	5142 – 4,0	13,9 - 2020	3,4
P3	1	3,3 - 479	4,3	2722 – 11,4	2,5 - 363	11,8
	3*	7,5 – 1088	2,5	2518 – 11,9	4,7 – 683	3,1
	28	38,2 – 5540	4,1	5196 – 7,0	9,8 – 1423	9,9

* Valores referentes à média de três corpos-de-prova.

**Valores referentes à média de cinco corpos-de-prova.

Os resultados obtidos indicaram que a mistura P2 apresentou os maiores valores de resistência à compressão para todas as idades ensaiadas. Deve-se ressaltar que esta mistura possui a menor relação água-material cimentício (cimento + sílica ativa) e o maior consumo de cimento Portland e sílica ativa entre as misturas em estudo. O desempenho inferior da pasta P1 em relação à sua resistência à compressão de ruptura pode ser explicado pelo menor consumo de cimento desta pasta e pelo maior consumo de agregado com menor resistência (microesfera SG).

As curvas típicas normalizadas tensão *versus* deformação das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Figura 112, na Figura 113 e na Figura 114, respectivamente. Cada curva normalizada mostra o endurecimento da pasta com o avanço da hidratação. Desta forma, a pasta jovem passa de um comportamento elasto-plástico para um comportamento elasto-frágil, com o aumento do período de cura entre 1, 3 e 28 dias.

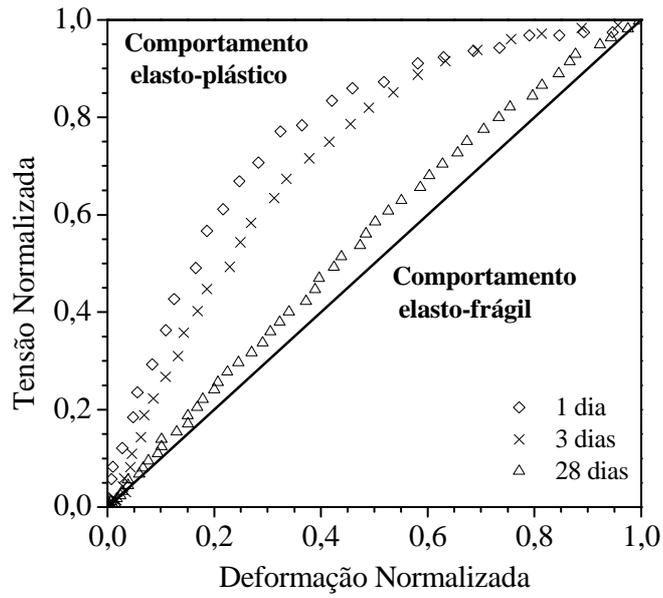


Figura 112 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P1.

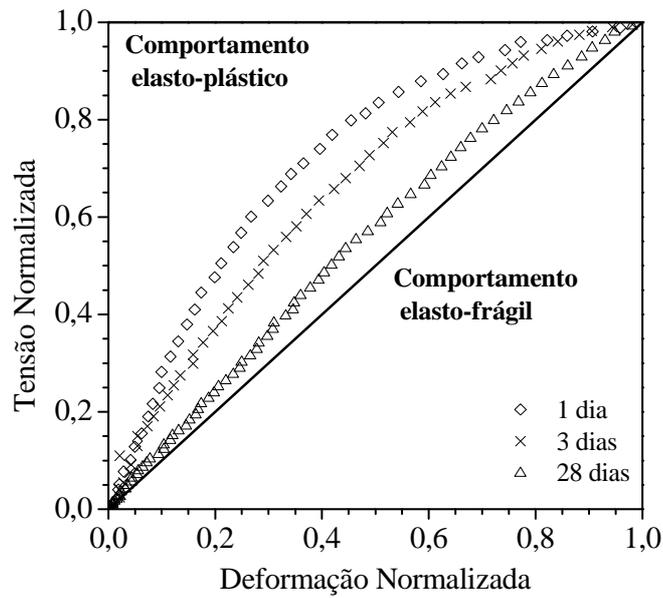


Figura 113 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P2.

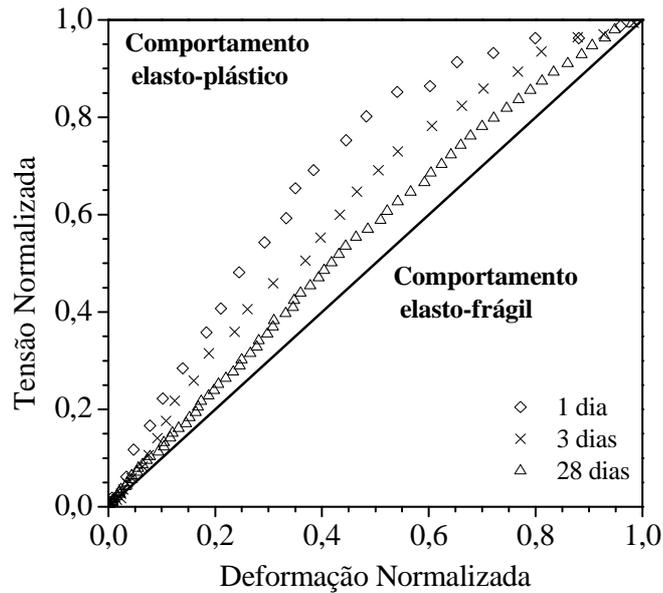


Figura 114 – Curvas típicas tensão x deformação normalizadas da pasta P3.

A Figura 115a ilustra os valores de resistência de ruptura à compressão da pasta P1 nas idades de 1 dia, 3 dias em relação à mesma propriedade aos 28 dias. Os resultados de resistência de ruptura à compressão apresentaram-se significativamente diferentes na análise estatística com a variação dos períodos de cura para as três pastas em estudo. Nas idades de 1 dia e 3 dias a pasta P1 atingiu, respectivamente, 12% e 27% da resistência medida aos 28 dias (Figura 115a). A Figura 115b ilustra os valores de deformações de ruptura da pasta P1 nas idades de 1 dia, 3 dias em relação à mesma propriedade aos 28 dias. As deformações de ruptura da pasta P1 não apresentaram diferenças significativas de acordo com a análise estatística para as diferentes idades de cura. A análise estatística indicou que os módulos de elasticidade da pasta P1 após 3 e 28 dias de cura não apresentaram diferenças significativas entre si. Entretanto, o resultado desta propriedade após 1 dia de cura foi estatisticamente diferentes aos valores das demais idades de cura, sendo que após 1 dia de cura, esta pasta apresentou módulo cerca de 26% aos valores desta propriedade nas demais idades (Figura 115c).

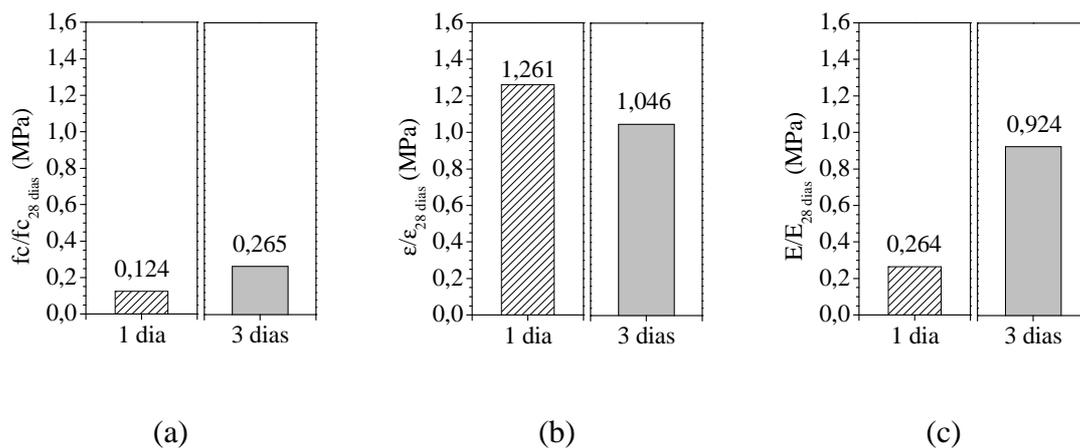


Figura 115 – Resultados da pasta P1 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.

Os resultados de resistência à compressão de ruptura da pasta P2 nas idades de 1 dia e 3 dias em relação aos resultados desta propriedade aos 28 dias estão apresentados na Figura 116a. A pasta P2, em 1 dia e 3 dias, apresentou resultados de resistência iguais a 20% e 39% do valor obtido aos 28 dias, respectivamente. Os resultados apresentados na Figura 116a indicam que a evolução da hidratação foi mais rápida para a pasta P2 do que para as demais pastas, seguida decrescentemente por P1 e P3. Este comportamento está em consonância com os resultados de evolução de resistência à compressão das pastas pelo método ultrassônico entre 1 e 4 dias, apresentado em 7.2.5. As deformações de ruptura da pasta P2 nas idades de 1 dia e 3 dias relativas ao valor alcançado na idade de 28 dias estão apresentadas na Figura 116b. Os resultados obtidos de deformações de ruptura nas idades de 1 dia e 3 dias de cura foram estatisticamente iguais entre si. O mesmo comportamento foi observado entre os resultados de deformações aos 3 dias e 28 dias. Entretanto, comparando-se os resultados de 1 dia e 28 dias, verificou-se que estes foram significativamente diferentes de acordo com a análise estatística, sendo que a deformação alcançada após 1 dia de cura foi 82% do valor desta propriedade aos 28 dias. Os módulos de elasticidade da pasta P2 de 1 dia e 3 dias relativos ao resultado aos 28 dias estão mostrados na Figura 116c. Os módulos de elasticidade obtidos após 1 dia e 3 dias de cura foram estatisticamente iguais e, apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao valor desta propriedade após 28 dias de cura. De acordo

com a Figura 116c, a pasta P2 apresentou nas idades de 1 e 3 dias módulo aproximadamente iguais a 60% do valor obtido aos 28 dias.

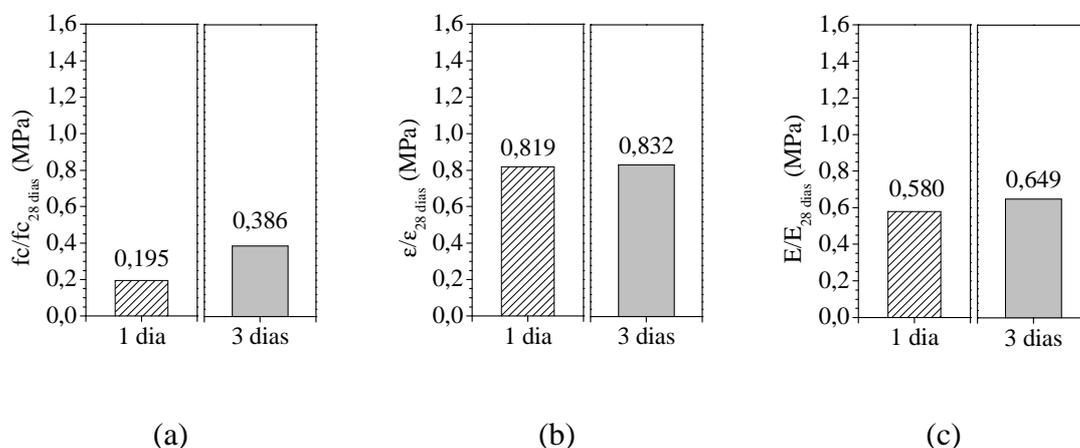


Figura 116 – Resultados da pasta P2 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.

A Figura 117 ilustra os resultados de resistência à compressão de ruptura, deformação de ruptura e módulo de elasticidade da pasta P3 nas idades de 1 e 3 dias em relação aos respectivos resultados obtidos aos 28 dias. A análise estatística apontou que as resistência à compressão desta pasta nas três idades ensaiadas apresentaram diferenças significativas entre si. Desta forma, nas idades de 1 e 3 dias a pasta P3 alcançou respectivamente 9% e 20% da resistência medida aos 28 dias (Figura 117a). Os resultados de deformação na ruptura para a pasta P3 se mostraram estatisticamente iguais entre as idades de cura de 1 dia e 3 dias. De acordo com a Figura 117b, nas idades de 1 dia e 3 dias a pasta P3 apresentou deformações iguais a aproximadamente 50% do valor obtido após 28 dias de cura. Os resultados de módulo de elasticidade para a pasta P3 apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as idades de cura de 1 dia, 3 dias e 28 dias. De acordo com a Figura 117c, nas idades de 1 dia e 3 dias a pasta P3 apresentou módulos iguais a 26% e 48% do valor obtido após 28 dias de cura, respectivamente.

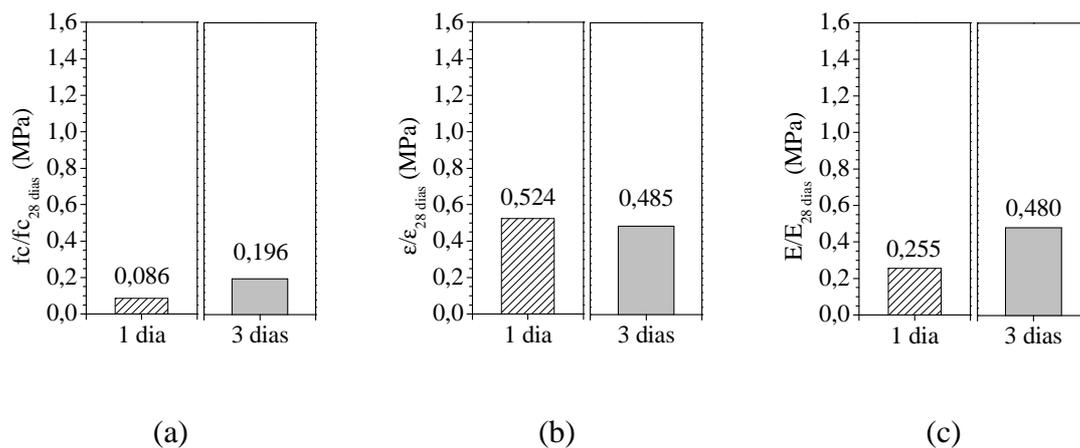


Figura 117 – Resultados da pasta P3 em 1 dia e 3 dias em relação ao valor obtido aos 28 dias: (a) Resistência à compressão; (b) Deformação na ruptura; (c) Módulo de elasticidade.

Os modos de ruptura das pastas P1, P2 e P3 ensaiadas após 1 e 28 dias de cura estão ilustrados na Figura 118 e Figura 119, respectivamente. Na idade de 1 dia as pastas apresentaram modos de fratura cônico, cisalhado e colunar. Enquanto que aos 28 dias, os modos de ruptura foram predominantemente cônico e cisalhado.



(a)

(b)



(c)

Figura 118 – Modos de ruptura das pastas leves após 1 dia de cura: (a) Pasta P1; (b) Pasta P2; (c) Pasta P3.



(a)



(b)



(c)

Figura 119 – Modos de ruptura das pastas leves após 28 dias de cura: (a) Pasta P1; (b) Pasta P2; (c) Pasta P3.

MOULIN *et al.* (1997) avaliaram em seu trabalho pastas leves dosadas através de um modelo de empacotamento de partículas. O método de dosagem foi empregado visando melhorar o desempenho de pastas leves. As pastas leves com massas específicas entre 1405 e 1438 kg/m³ (11,7 – 12,0 lbm/gal) apresentaram resistências à compressão, medidas em cubos curados a temperatura de 176,7°C (350°F) e pressão de 20,7 MPa (3000 psi) por uma semana, entre 23,1 MPa (3350 psi) e 27,6 MPa (4000 psi).

7.3.1.2 Comportamento sob Compressão Triaxial

Os resultados de tensões desviatórias das pastas P1, P2 e P3 estão apresentados na Tabela 22. Os resultados que são mostrados na Tabela 22 correspondem aos valores médios de quatro corpos-de-prova por mistura. As curvas tensão cisalhante *versus* tensão normal obtidas dos ensaios triaxiais das pastas P1, P2 e P3 estão apresentados na Figura 120, na Figura 121 e na Figura 122, respectivamente.

Tabela 22 – Tensões desviatórias das pastas P1, P2 e P3.

Pasta	σ_3 (MPa - psi)	σ_d (MPa - psi)	CV (%)
P1	0	27,5 – 3989	10,2
	2 – 290	30,4 – 4409	5,0
	6 – 870	32,1 – 4656	5,9
P2	0	57,1 – 8282	3,7
	2 – 290	59,9 – 8688	1,3
	6 – 870	63,6 – 9224	2,5
P3	0	38,2 – 5540	4,1
	2 – 290	36,9 – 5352*	0,8
	6 – 870	38,1 – 5526	5,2

*Valor referente à média de dois corpos-de-prova.

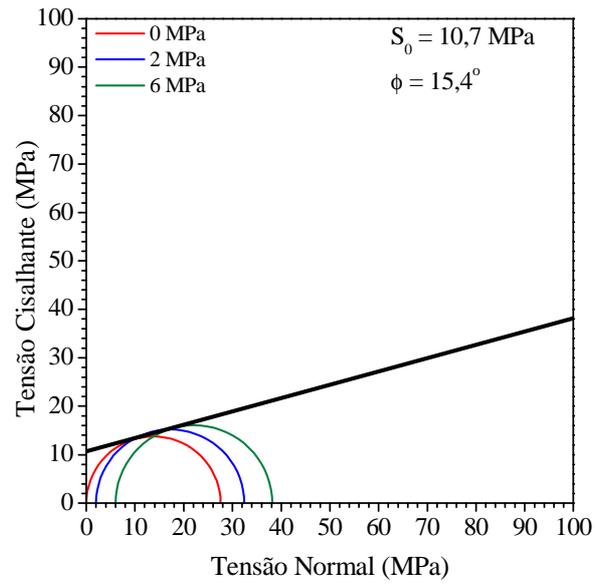


Figura 120 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P1.

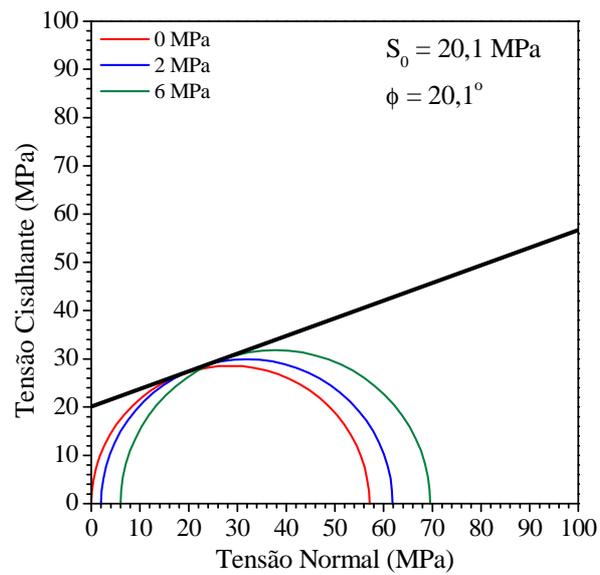


Figura 121 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P2.

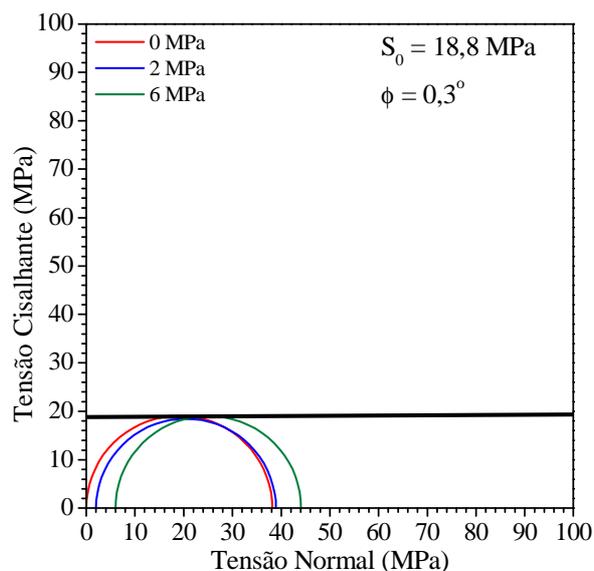


Figura 122 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb da pasta P3.

Os resultados indicam que as pastas P1 e P2 apresentaram incrementos em suas tensões desviatórias com o aumento do confinamento. No entanto, tal comportamento não foi observado para a pasta P3.

De acordo com a análise estatística realizada entre os resultados de tensão desviatória da pasta P1 sob as diferentes tensões de confinamento, esta propriedade quando submetida ao ensaio sob tensão confinante igual a 2 MPa foi igual ao resultado para o ensaio sem confinamento. As tensões desviatórias da pasta P1 para os ensaios sob tensões de confinamento iguais a 2 MPa e 6 MPa também são estatisticamente iguais. No entanto, de acordo com a análise estatística, a tensão desviatória desta pasta ensaiada sem confinamento apresentou resultado estatisticamente diferente ao obtido sob tensão de confinamento de 6 MPa. Neste caso, a tensão desviatória correspondente ao ensaio sob tensão de confinamento igual a 6 MPa foi 17% superior ao resultados alcançado sem confinamento.

A análise estatística entre os resultados de tensão desviatória da pasta P2 mostrou diferenças significativas com o acréscimo de pressão de confinamento. As tensões desviatórias sob confinamento de 2 MPa e 6 MPa foram 5% e 11% superiores ao valor alcançado sem o confinamento, respectivamente. Adicionalmente, a tensão desviatória sob confinamento de 6 MPa foi 6% superior ao resultado obtido sob confinamento de 2 MPa.

A avaliação estatística dos resultados das tensões desviatórias da pasta P3 para todas as tensões de confinamento empregadas indicou que não houve diferenças significativas entre os resultados ao nível de significância igual a 0,05.

Os resultados de coesão e ângulo de atrito interno de cada pasta estão apresentados na Tabela 23. A pasta P2 apresentou o maior resultado de coesão, seguida pelas pastas P3 e P1. Os consumos de cimento destas pastas foram de: 388,2 kg/m³ (P1), 659,2 kg/m³ (P2) e 408,1 kg/m³ (P3). Neste caso, pode-se afirmar que em relação ao consumo de cimento P2 > P3 > P1 e é possível que tal fato explique os resultados das coesões das pastas estudadas. MAHBOUBI e AJORLOO (2005) realizaram testes de compressão triaxial em concretos e verificaram que a coesão aumentou com o aumento do teor de cimento nas misturas. A pasta P2 apresentou o maior ângulo de atrito interno, seguida pela pasta P1. O ângulo de atrito interno da pasta P3 foi igual a zero. O atrito entre os grãos da pasta P3 é baixo, provavelmente devido a natureza da microesfera de vidro, cuja superfície é vítrea e lisa.

Tabela 23 – Coesão e ângulo de atrito interno das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	S₀ (MPa)	φ (°)
P1	10,7	15,4
P2	20,1	21,1
P3	18,8	0,3

Os modos de ruptura dos corpos-de-prova ensaiados das pastas P1, P2 e P3 são mostrados na Figura 123, Figura 124 e Figura 125, respectivamente. As pastas estudadas apresentaram modos de ruptura predominantemente cisalhados e colunares.



(a)



(b)

Figura 123 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P1: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$;
(b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$.



(a)



(b)

Figura 124 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$;
(b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$.



(a)



(b)

Figura 125 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P3: (a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$;
(b) $\sigma_3 = 6\text{MPa}$.

7.3.1.3 Comportamento sob Tração por Compressão Diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 24. Os resultados apresentados correspondem aos valores médios de três discos por pasta.

Tabela 24 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	f_{TCD} (MPa – psi)	CV (%)
P1	2,1 – 305	2,1
P2	4,2 – 609	1,6
P3	2,7 – 392	2,8

A análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas P1, P2 e P3 indicou que estes resultados apresentam diferenças significativas a um nível de significância igual a 0,05. Ou seja, os ensaios de tração por compressão diametral das pastas avaliadas indicaram que, quanto a esta propriedade, $P2 > P3 > P1$. Este tendência é a mesma para estas pastas quando submetidas aos ensaios de compressão uniaxial. A pasta P2, mais resistente dentre as três avaliadas, apresentou resistência à tração igual a 4,2 MPa (615 psi). As relações entre a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão aos 28 dias das pastas leves estão ilustradas na Figura 126. Os resultados apresentados na Figura 126 mostram que as pastas P1, P2 e P3 apresentaram resistências à tração por compressão diametral aproximadamente iguais a 7% de suas resistências à compressão uniaxial aos 28 dias.

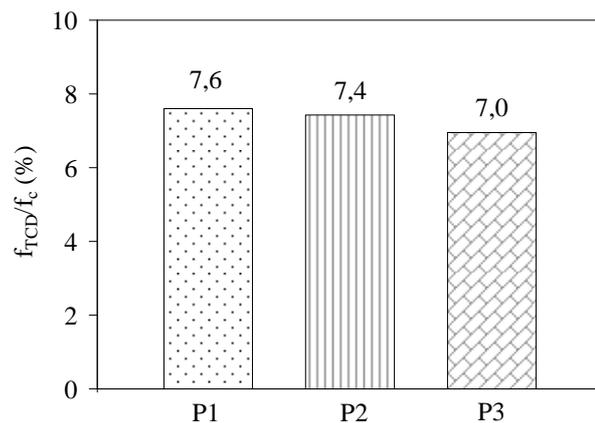


Figura 126 – Relações entre os resultados de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial aos 28 dias das pastas leves de alto desempenho.

A forma de ruptura dos discos das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Figura 127, na Figura 128 e na Figura 129, respectivamente.



(a)

Figura 127 – Modos de ruptura da pasta P1 após o ensaio de tração por compressão diametral.



(a)

Figura 128 – Modos de ruptura da pasta P2 após o ensaio de tração por compressão diametral.



(a)

Figura 129 – Modos de ruptura da pasta P3 após o ensaio de tração por compressão diametral.

7.3.1.4 Comportamento sob Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado em três prismas por mistura. Os resultados médios de módulo de ruptura e deslocamento de ruptura e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 25. As curvas carga *versus* deslocamento de todos os corpos-de-prova são apresentadas no Anexo A4.

Tabela 25 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	f_F - CV (MPa/psi - %)	δ - CV (mm - %)
P1	2,2 / 319 – 6,4	0,03532 – 10,1
P2	4,1 / 590 – 4,4	0,05281 – 5,8
P3	2,4 / 342 – 6,0	0,05088 – 3,3

De modo similar ao observado para as demais propriedades mecânicas avaliadas, a pasta P2 apresentou maior valor de resistência à tração na flexão, com módulo de ruptura igual a 4,3 MPa (627 psi). A análise estatística indicou que não houve diferença significativa entre os módulos de ruptura das pastas P1 e P3. No entanto, os resultados da pasta P2 apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação aos valores das pastas P1 e P3. Entre os deslocamentos de ruptura das pastas P2 e P3 não houve diferença significativa, no entanto a pasta P1 apresentou deslocamento estatisticamente diferente demais pastas. Entre as três pastas estudadas, a pasta P1 apresentou os menores módulos de ruptura e deslocamentos de ruptura. É possível que o menor consumo de materiais cimentícios nesta pasta seja responsável pelo seu desempenho inferior aos das demais misturas. A Figura 130 ilustra as relações entre a resistência à tração na flexão e resistência à compressão aos 28 dias das pastas leves e os resultados indicam que as pastas leves apresentaram resistências à tração na flexão cerca de 7% de suas resistências à compressão uniaxial aos 28 dias. Estes resultados estão em consonância com as relações entre os valores de tração por compressão diametral e compressão uniaxial destas pastas, apresentados na Figura 126.

A análise estatística entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral e de tração na flexão de cada pasta estudada mostrou que, para as pastas P1 e P2 não houve diferenças significativas entre os valores destas propriedades. No entanto, a análise estatística entre os valores de tração por compressão diametral e de tração na flexão da pasta P3 apontou diferenças significativas entre os mesmos. Neste caso, a resistência à tração na flexão da pasta P3 foi 13% inferior à sua resistência à tração por compressão diametral.

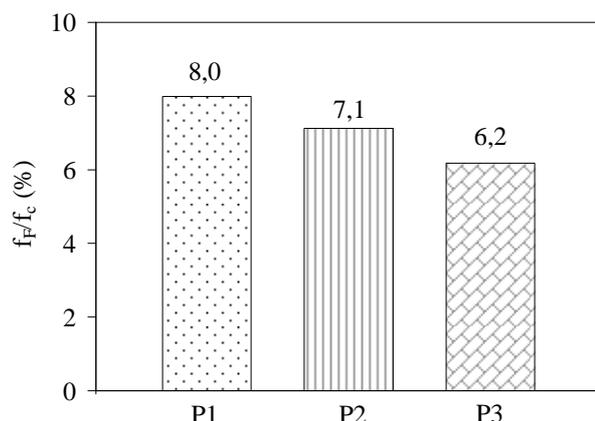


Figura 130 – Relações entre os resultados de tração na flexão e de compressão uniaxial aos 28 dias das pastas leves de alto desempenho.

A Figura 131 mostra os modos de fratura de todos os ensaiados para cada mistura, nas faces tracionadas.

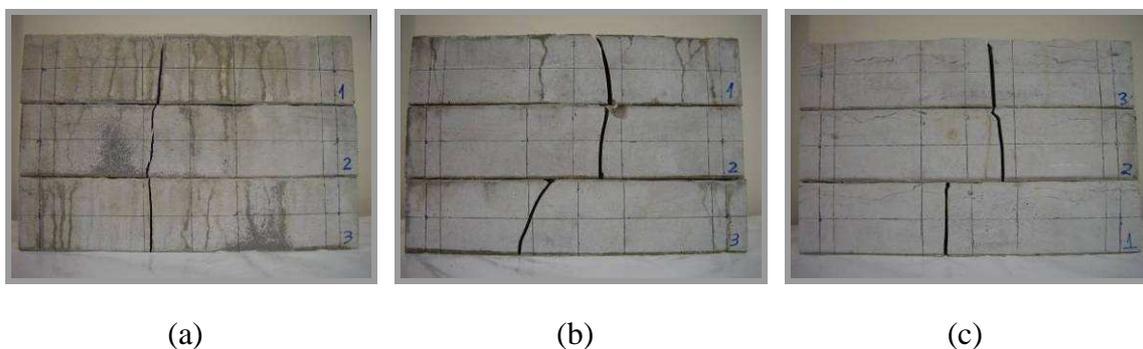


Figura 131 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas ensaiados para a determinação da resistência à tração na flexão: (a) Pasta P1; (b) Pasta P2; (c) Pasta P3.

MOULIN *et al.* (1997) também avaliaram em seu estudo a tração na flexão em três pontos de pastas leves dosadas através de um modelo de empacotamento de partículas. Os ensaios foram realizados em pastas curadas por três dias em câmara de cura em autoclave (pressão de 20,7 MPa/ 3000 psi e temperatura de 76,7°C/ 170°F). Os resultados de tração na flexão para as pastas de massas específicas iguais a 1366 kg/m³

(11,4 lbm/gal) e 1462 kg/m³ (12,2 lbm/gal), foram respectivamente iguais a 6,4 MPa (932 psi) e 3,3 MPa (472 psi).

7.3.2 Comportamento Físico

7.3.2.1 Estabilidade

Os ensaios de estabilidade das pastas leves de alto desempenho P1, P2 e P3 foram realizados em três corpos-de-prova por pasta. Os resultados de rebaixamento, massa específica de topo e fundo e diferença entre as massas específicas de fundo e topo estão apresentados na Tabela 26. Todas as pastas atendem ao limite para diferença entre massas específicas de fundo e topo (ΔME), por este motivo, as três pastas são designadas como estáveis. Além disso, para todos os corpos-de-prova ensaiados não foram verificados rebaixamentos após suas desmoldagens.

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de estabilidade das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	Amostra	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P1	1	0	1,528 – 12,75	1,537 – 12,83	0,009 (0,08)
	2	0	1,533 – 12,79	1,538 – 12,84	0,005 (0,05)
	3	0	1,530 – 12,77	1,536 – 12,82	0,006 (0,05)
P2	1	0	1,570 – 13,10	1,577 – 13,16	0,007 (0,06)
	2	0	1,560 – 13,02	1,582 – 13,20	0,022 (0,18)
	3	0	1,576 – 13,15	1,573 – 13,13	-0,003 (-0,02)
P3	1	0	1,293 – 10,79	1,291 – 10,78	-0,002 (-0,01)
	2	0	1,290 – 10,77	1,292 – 10,78	0,001 (0,01)
	3	0	1,291 – 10,77	1,292 – 10,78	0,001 (0,01)

Estes resultados vêm corroborar aqueles já obtidos por MIRANDA (2008) que indicam que as pastas dosadas dentro do quadro de compactidade máxima têm excelente comportamento no que diz respeito à segregação.

7.3.2.2 Absorção Total, Índice de Vazios e Massa Específica

Durante a realização do ensaio de absorção total foi possível a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica real de cada pasta. De acordo com a norma ABNT NBR 9778 (2005), a absorção de água por imersão consiste no incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. Esta norma descreve o índice de vazios como a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total do corpo-de-prova. Além disso, define a massa específica real como a relação entre a massa do material seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Na Tabela 27 estão apresentados os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das pastas P1, P2 e P3 e seus respectivos coeficientes de variação, calculados a partir da Equação 45, Equação 46 e Equação 47, respectivamente. Além disso, na Tabela 27 também estão apresentadas as relações a/mc das pastas leves de alto desempenho.

Tabela 27 – Resultados de absorção de água, índice de vazios, massa específica e relação a/mc das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	Absorção de Água por Imersão	Índice de Vazios	Massa Específica Real	Relação a/mc
	A (%) – CV (%)	I _v (%) – CV (%)	ρ_r (kg/m ³) – CV (%)	
P1	20,2 – 2,1	25,21 – 1,7	1246 – 0,4	0,90
P2	10,9 – 0,7	15,27 – 0,6	1397 – 0,1	0,51
P3	17,2 – 0,5	18,78 – 0,4	1091 – 0,1	0,73

A análise estatística dos resultados de absorção de água das três pastas indicou que as diferenças entre as pastas são significativas a um nível de significância igual a 0,05. A

mesma relação entre os resultados das três pastas foi observada para as análises estatísticas tanto do índice de vazios quanto da massa específica das pastas. É possível observar que a pasta P2 apresentou a menor absorção de água e índice de vazios, enquanto a mistura P1 apresentou os maiores valores para estas propriedades. Estes resultados estão em consonância com as relações a/mc apresentadas na Tabela 27. Como esperado, quanto maior a relação a/mc da pasta, maior o valor do índice de vazios. A Figura 132 apresenta a relação entre os valores de índice de vazios e de resistência à compressão das pastas. Observa-se que quanto maior a resistência à compressão da pasta, menor é o valor do índice de vazios.

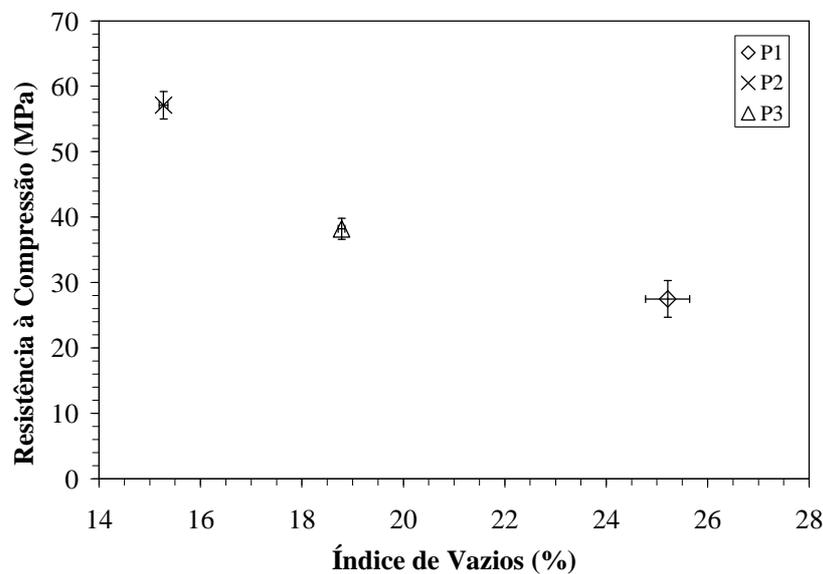


Figura 132 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias \times índice de vazios das pastas leves de alto desempenho.

A Figura 134 apresenta a relação entre resistências à compressão das pastas P1, P2 e P3 aos 28 dias e suas respectivas massas específicas. Adicionalmente, os resultados obtidos por MOULIN *et al.* (1997) também são ilustrados na Figura 134. Apesar dos diferentes procedimentos de cura adotados nos dois trabalhos, as pastas leves de MOULIN *et al.* (1997) foram dosadas através de um modelo de empacotamento de partículas visando seu melhor desempenho. É possível verificar que as pastas leves P1, P2 e P3 foram dosadas com massas específicas inferiores a 1400 kg/m^3 e alcançaram resistências superiores aos valores obtidos por MOULIN *et al.* (1997).

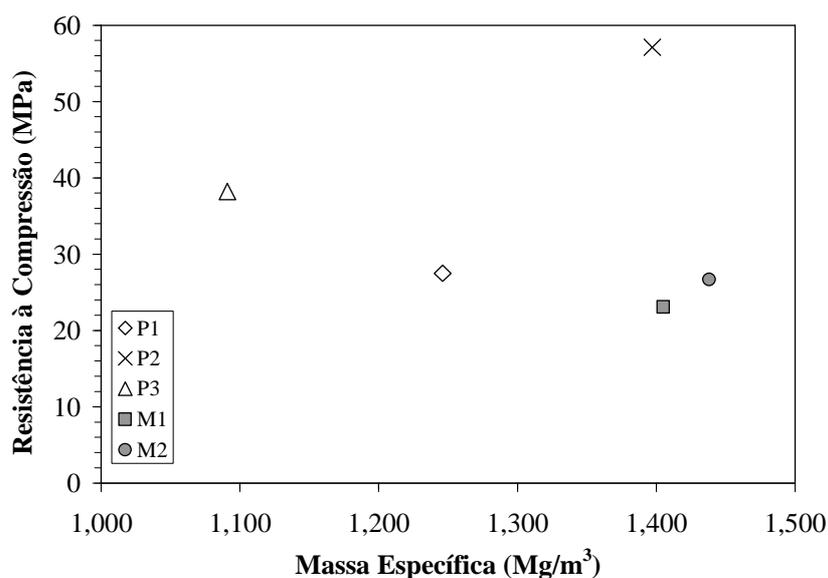


Figura 133 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias x massa específica das pastas leves de alto desempenho.

Os valores de massa específica das pastas em estado endurecido, após 28 dias de cura em câmara úmida, indicaram que todas as pastas podem ser enquadradas na categoria de pastas leves porque apresentam massas específicas abaixo de 1700 kg/m^3 ($14,0 \text{ lb/gal}$). A pasta P2 apresenta massa específica superior às demais em virtude da elevada concentração de cimento Portland na mistura (60%, em massa).

7.3.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

A evolução do ingresso de água por ascensão capilar nas pastas pode ser observado na Figura 134. A avaliação da absorção capilar foi conduzida até os 37 dias para as pastas P1, P2 e P3, após uma cura inicial de 28 dias em câmara úmida.

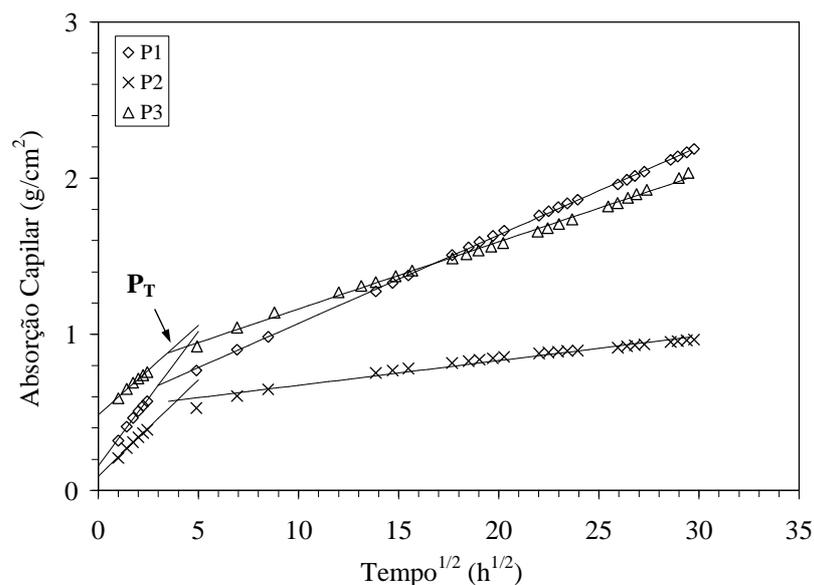


Figura 134 – Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade *versus* raiz quadrada do tempo das pastas leves.

Tabela 28 – Resultados de ponto de transição, absortividade e relação a/mc das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	P_T ($g/cm^2 \cdot h^{1/2}$)	Absortividade ($g/cm^2 \cdot h^{1/2}$)		Relação a/mc
		S1	S2	
P1	0,673 – 2,991	0,172	0,057	0,90
P2	0,578 – 3,936	0,124	0,016	0,51
P3	0,881 – 3,4667	0,115	0,043	0,73

Os resultados indicam que a pasta P2 apresenta menor valor absorção de água por capilaridade. Por outro lado, a pasta P1 apresenta maior absorção capilar, sobretudo a partir de 13 dias de ensaio. Há uma diferença expressiva entre a absorção capilar da pasta P2 e as demais misturas. Esta diferença foi também constatada para outras propriedades, como resistência à compressão e absorção de água (A). Com os pontos iniciais das curvas que relacionam a absorção com a raiz quadrada do tempo foi calculada a absortividade das misturas, a partir do coeficiente angular das curvas de regressão linear. A Figura 134 também apresenta os ajustes lineares das curvas de

absorção de água *versus* raiz quadrada do tempo das pastas leves de alto desempenho. As absorptividades das pastas P1, P2 e P3, determinadas nos tanto no estágio de absorção (S1) quanto no estágio de saturação (S2), bem como seus pontos de transição (P_T) estão apresentados na Tabela 28. Não há diferença expressiva entre as pastas com relação à absorptividade no estágio de absorção, determinada nas primeiras 6 horas de ensaio, com exceção para a mistura P1, que apresentou absorptividade igual a $0,172 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$. Entretanto, as misturas P2 e P3 apresentam absorptividades iguais a $0,124 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ e $0,115 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$, respectivamente.

No estágio de saturação as absorptividades das pastas estudadas variaram entre $0,016 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ (P2) e $0,057 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ (P1).

7.3.2.4 Ataque por Ácido

As massas iniciais, finais e perdas de massa dos corpos-de-prova das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Tabela 29. De acordo com os resultados, as pastas P1 e P2 foram mais resistentes ao ataque ácido do que a pasta P3. De acordo com a análise estatística, as perdas de massa das pastas P1 e P2 não apresentaram diferenças significativas. A maior perda foi sofrida pela pasta P3, que foi aproximadamente 4% superior ao valor das demais pastas. Um dos cubos ensaiados da pasta P3 está ilustrado na Figura 135a, antes do ataque pelo ácido e, na Figura 135b, após o ataque pelo ácido.

Tabela 29 – Resultados de perda de massa das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (%)	Perda de Massa Média (%)	CV (%)
P1	1	196,05	180,04	8,30	8,86	7,0
	2	194,97	177,98	8,85		
	3	192,81	174,71	9,44		
P2	1	205,86	189,03	8,26	7,68	6,1
	2	204,00	189,13	7,29		
	3	206,53	191,06	7,49		
P3	1	164,59	144,04	12,49	12,52	3,8
	2	154,93	134,77	13,01		
	3	153,40	134,88	12,07		



(a)



(b)

Figura 135 – Corpo-de-prova da pasta P3: (a) Antes do ataque; (b) Após o ataque.

As operações de acidificação fazem parte da rotina operacional das empresas de petróleo para a remoção de danos na formação e para o aumento da produção (NÓBREGA *et al.*, 2007), por meio de tratamentos matriciais ou por fraturamentos. No caso da operação de fraturamento, a pressão de injeção é superior à pressão de fratura da

rocha e o oposto é admitido para tratamentos matriciais. Os dois tipos de tratamentos podem ser realizados com ácidos, sendo que o matricial é realizado em rochas permeáveis e visa melhorar a conectividade do poço com a formação pela criação de canais adicionais de fluxo e pelo aumento da condutividade dos canais existentes (PEREIRA e FERNANDES, 2009). Os tratamentos por fraturamentos são empregados em formações de baixa permeabilidade para a criação de fraturas longas.

Durante estes tipos de operações, a dissolução de compostos de cálcio de uma rocha carbonática é desejável. No entanto, um tratamento de estimulação à formação com uma solução ácida pode causar danos à pasta de cimentação que preenche o anular. Isto pode ocorrer porque a estimulação com ácidos é realizada por meio de canhoneios, isto é, por perfurações de dentro do revestimento até a formação. Neste caso, o ácido injetado entra em contato com a pasta de cimentação, tanto através da passagem pela perfuração feita quanto pelas interfaces revestimento/bainha e/ou bainha/formação. Além disso, o processo torna o ambiente da formação de caráter mais ácido ao longo do tempo e, conseqüentemente, mais agressivo à natural alcalinidade do cimento (NÓBREGA *et al.*, 2007). Segundo MIRANDA (2008), a consequência da exposição da pasta de cimento ao ácido é a solubilização do cimento. De acordo com MIRANDA (2008) o tipo de ácido mais agressivo ao cimento consiste na mistura entre ácido clorídrico 15% e ácido fluorídrico 3% (em peso). Por este motivo, neste trabalho o ataque ácido foi realizado com esta mistura.

MIRANDA (2008) realizou ensaios de ataque por ácido (HCL 12% e HF 3%) em pastas de cimentação seguindo o mesmo procedimento apresentado neste trabalho. A pesquisadora quantificou a resistência ao ácido de pastas de compacidades otimizadas, de uma pasta pura e de uma pasta com sílica 325#. As pastas apresentaram as seguintes perdas de massa:

- Sub-classe 1 (40% cimento, 30% sílica ativa, 30% microesfera e relação água/sólido igual a 43%): 10%;
- Sub-classe 2 (60% cimento, 20% sílica ativa, 20% microesfera e relação água/sólido igual a 37%): 8%;
- Sub-classe 3 (80% cimento, 10% sílica ativa, 10% microesfera e relação água/sólido igual a 35%): 10%;

- Sub-classe 4 (80% cimento, 10% sílica ativa e relação água/sólido igual a 33%): 9%;
- Pasta pura (100% cimento e relação água/sólido igual a 46%): 25%;
- Pasta com sílica 325# (74% cimento, 26% sílica 325# e relação água/sólido igual a 42%): 16%.

As pastas leves de granulometrias otimizadas apresentaram perdas de massa entre 8 e 10%. A maior perda, igual a 25%, foi alcançada pela pasta pura, seguida da pasta com sílica 325#, cuja perda foi de 16%. A pesquisadores atribui as menores resistências ao ataque ácido das pastas pura e com sílica 325# aos seus maiores diâmetros de poro crítico (verificados por ensaio de porosimetria) e à presença de portlandita nestas pastas. Os resultados deste trabalho, onde as perdas de massa variaram entre 7,68 e 12,52%, estão em consonância com os resultados obtidos por MIRANDA (2008).

7.3.3 Comportamento Térmico

7.3.3.1 Calor Específico

Na Figura 136 estão apresentados os valores dos calores específicos das pastas P1, P2 e P3 com o aumento de temperatura. Os valores médios de calor específico das pastas P1, P2 e P3 estão apresentados na Tabela 30.

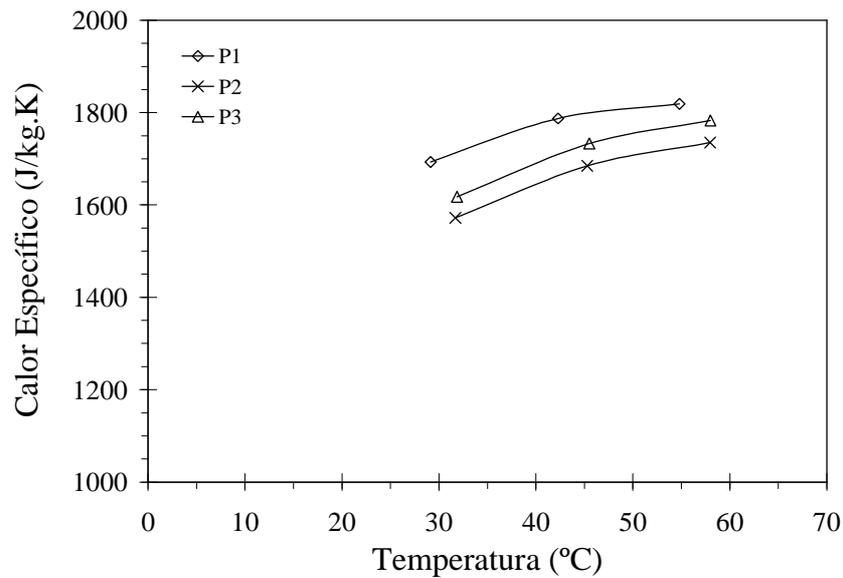


Figura 136 – Variação do calor específico com a temperatura das pastas P1, P2 e P3.

Tabela 30 – Calor específico de cada pasta.

Pasta	Calor Específico		
	cal/(g.°C)	J/(kg.K)	CV (%)
P1	0,422	1766	3,4
P2	0,398	1664	5,0
P3	0,410	1711	6,3

A análise estatística indicou que não houve diferenças significativas entre os resultados de calor específico das pastas em estudo. As três pastas apresentaram curvas semelhantes para a relação entre o calor específico e a temperatura média. De acordo com a análise estatística, para as pastas P2 e P3 não houve variação significativa do calor específico com o aumento de temperatura. No entanto, para a pasta P1, houve diferença significativa de seu calor específico com a elevação da temperatura, que variou entre 1693 – 1819 J/kgK.

Estudo realizado por ANDRADE *et al.* (1997) em pastas confeccionadas com cimento e água ($a/c = 0,6$) apresentou resultados de calor específico entre 1663 e 1945 J/(kg.K).

7.3.3.2 Difusividade Térmica

Os resultados de difusividade térmica das pastas estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Difusividade térmica das pastas leves de alto desempenho.

Pasta	Difusividade Térmica (m ² /dia)		
	20°C (68°F)	40°C (104°F)	60°C (140°F)
P1	0,03020	0,03030	0,02930
P2	0,02235	0,02470	0,02315
P3	0,01910	0,01950	0,01840

As pastas estudadas apresentaram valores desta propriedade 0,01900 e 0,02993 m²/dia. A análise estatística indicou que houve variação significativa entre os resultados de difusividade das pastas P1, P2 e P3. Não houve, para as pastas estudadas, variação significativa nos resultados de difusividade ao se alterar a temperatura de ensaio, de acordo com a análise estatística. De acordo com ANDRADE *et al.*(1997), a difusividade de um concreto aumenta com o aumento de seu volume de agregados. O maior resultado de difusividade da pasta P1 pode ser explicado pela presença de quartzo em sua composição, na forma de microesfera SG e de sílica 120#.

Os resultados apresentados pelas pastas leves estão em consonância com o estudo realizado por ANDRADE *et al.* (1997), onde uma pasta confeccionada com cimento e água (a/c = 0,6) apresentou um valor de difusividade térmica igual a 0,029 m²/dia (20°C, 40°C e 60°C).

7.3.3.3 Condutividade Térmica

A condutividade térmica de cada pasta leve de alto desempenho foi determinada analiticamente, em função dos valores obtidos nos ensaios para determinação do calor específico e de difusividade térmica, através da Equação 57 (ANDRADE *et al.*, 1997).

$$k = h^2 \times c \times \rho_r$$

Equação 57

Onde:

k – Condutividade térmica (W/m.K ou J/m.s.K);

h^2 – Difusividade térmica (m²/s ou m²/dia);

c – Calor específico (J/kg.K);

ρ_r – Massa específica (kg/m³), determinada para cada pasta leve a partir do ensaio de absorção total (Tabela 27).

Os resultados de condutividade térmica das pastas estudadas estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Condutividades térmicas das pastas leves.

Pastas	Condutividade Térmica J/(m.s.K)
P1	0,76
P2	0,63
P3	0,41

Dentre as três pastas, observa-se que a pasta P1 apresentou maior valor de condutividade térmica. Essa pasta apresenta em sua composição uma maior quantidade de quartzo (na forma de microesfera SG e de sílica 120#) o que pode justificar esse comportamento. Estudo realizado por VELASCO (2008) em concretos de alto desempenho apresentou condutividade térmica variando entre 2,58 e 3,03 J/(m.s.K).

7.3.3.4 Coeficiente de Dilatação Térmica

Os ensaios para a determinação dos coeficientes de dilatação térmica foram realizados nas pastas (165 dias após a moldagem). Os valores médios para cada ciclo de

temperatura e os resultados médios de cada pasta estão apresentados na Tabela 33. A Figura 137 ilustra os coeficientes médios das pastas leves de alto desempenho.

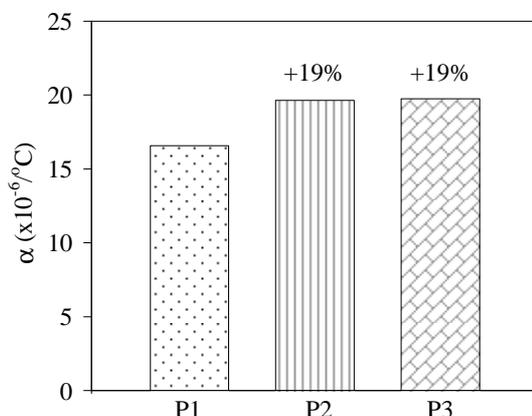


Figura 137 – Coeficientes médios das pastas P1, P2 e P3.

Tabela 33 – Coeficientes de dilatação térmica linear das pastas.

Pasta	Ciclos de Temperatura				α - CV $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ - %
	$\sim 20^{\circ}\text{C}$ a $\sim 40^{\circ}\text{C}$	$\sim 40^{\circ}\text{C}$ a $\sim 20^{\circ}\text{C}$	$\sim 20^{\circ}\text{C}$ a $\sim 4^{\circ}\text{C}$	$\sim 4^{\circ}\text{C}$ a $\sim 20^{\circ}\text{C}$	
P1	17,44	18,81	14,34	15,40	16,57 – 11,0
P2	20,33	20,01	18,98	19,24	19,64 – 3,4
P3	19,44	20,22	19,53	19,75	19,76 – 2,7

Os coeficientes de dilatação térmica médios das pastas variaram entre $16,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $19,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. De acordo com MEYERS (1950), citado por SHUI *et al.* (2010), valores típicos de coeficiente de expansão térmica de pastas variam entre $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. SHUI *et al.* (2010) estudaram pastas de cimento e pastas com substituição de cimento por sílica ativa em teores iguais a 10% e 15% (em massa) com relações a/mc = 0,35. Os valores máximos de coeficiente de dilatação térmica destas pastas variaram entre $17,12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $22,84 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

7.3.4 Variação Dimensional

Neste tópico do trabalho serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nas pastas P1, P2 e P3 para determinação de sua retração autógena e fluência.

7.3.4.1 Retração Autógena

A evolução das retrações autógenas médias das pastas P1, P2 e P3 durante 28 dias está apresentada na Figura 138, as demais curvas estão apresentadas no Anexo A6. Os resultados correspondem à média de três corpos-de-prova por pasta. Os valores de retrações autógenas das pastas em algumas idades são apresentados na Tabela 34. Na Tabela 35 estão mostrados os consumos de materiais cimentícios das pastas P1, P2 e P3 (cimento + sílica ativa) e, também, suas relações a/mc.

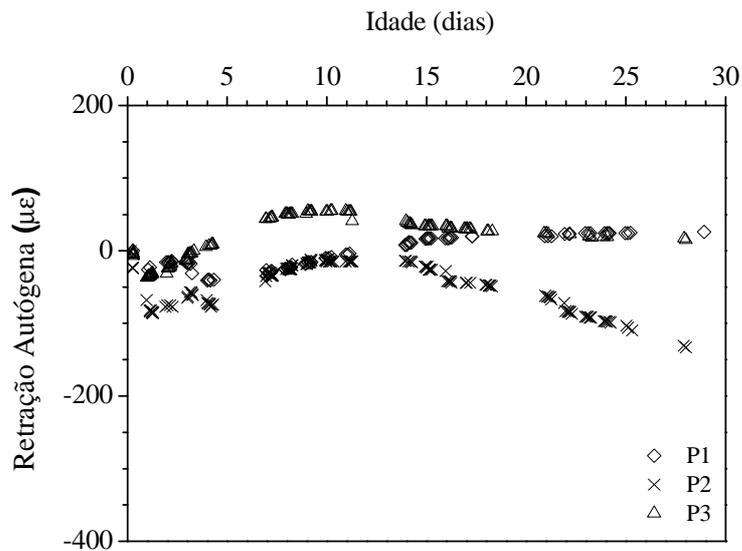


Figura 138 – Curvas médias da retração autógena nos primeiros 35 dias.

Tabela 34 – Retrações autógenas das pastas em algumas idades.

Idade (dias)	RA ($\mu\epsilon$)		
	P1	P2	P3
1	-26	-68	-37
4	-41	-72	7
7	-34	-31	44
10	-11	-12	54
14	8	-15	39
21	20	-63	24
28	26	-133	15

(Na tabela, o sinal negativo significa retração autógena e o sinal positivo significa expansão autógena.)

Tabela 35 – Consumos de materiais cimentícios, de água e relação a/mc das pastas.

Pasta	Consumo de Cimento (kg/m^3)	Consumo de Sílica Ativa (kg/m^3)	Consumo de água (kg/m^3)	Relação a/mc
P1	388,2	100,9	439,1	0,90
P2	659,2	217,5	450,3	0,51
P3	408,1	204,0	445,9	0,73

De forma global, o maior resultado de retração autógena (133 $\mu\epsilon$) foi atingido pela pasta P2 aos 28 dias, que apresenta a menor relação a/mc e o maior consumo de cimento e de sílica ativa (ver a Tabela 35). No entanto, pode-se dizer que as três pastas apresentaram deformações relativamente baixas em relação a esta propriedade, pois as deformações oscilaram entre -133 e 54 $\mu\epsilon$, sendo coerente uma vez que suas relações a/mc foram superiores a 0,50 (ver Tabela 35). Aos 28 dias de ensaio, a maior perda de massa foi alcançada pasta P3 (0,28 %), seguida de P2 (0,18%) e de P1 (0,10%). Os resultados de RA obtidos para as pastas P1, P2 e P3 aos 28 dias, onde $RA_{P2} > RA_{P3} > RA_{P1}$, também

estão coerentes com os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, em que $f_{cP2} > f_{cP3} > f_{cP1}$ (Tabela 21).

Valores elevados de retração autógena foram encontrados por BALTHAR (2004), que realizou um estudo em pastas de cimento, onde a pasta confeccionada com o cimento CPIII-40 e água ($a/c = 0,3$) alcançou aos 28 dias uma retração autógena de $1378 \mu\epsilon$. As pastas do presente estudo apresentaram valores menores desta propriedade possivelmente devido a alguns fatores, quais sejam: maiores teores a/mc e uso de adições, tais como sílica 120# e microesferas.

As curvas médias de variação de temperatura no tempo das pastas P1, P2 e P3 são apresentadas na Figura 139, as demais curvas estão apresentadas no Anexo A6.

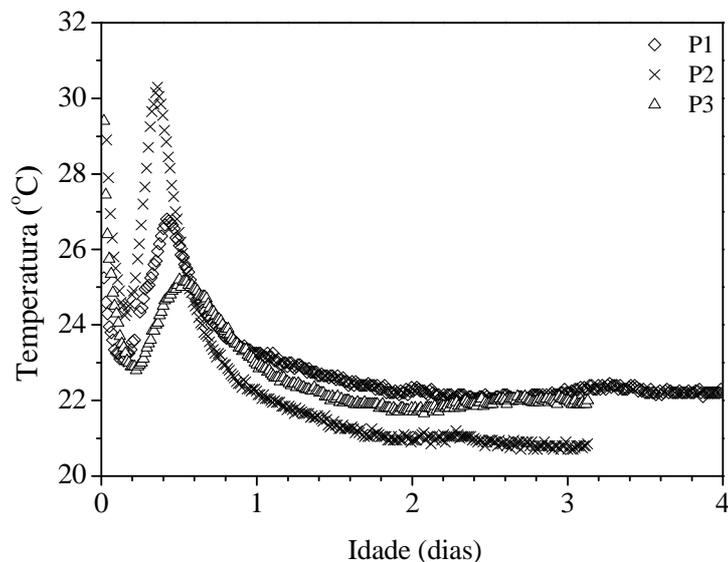


Figura 139 – Curvas médias de variação de temperatura.

A maior elevação de temperatura ($6,1^{\circ}\text{C}$) foi alcançada pela pasta P2. Após a mistura, a pasta P2 atingiu a temperatura mínima de $24,3^{\circ}\text{C}$ (3,7 horas após a mistura). A partir desse momento, as reações de hidratação iniciaram, liberando calor e elevando a temperatura até o valor máximo de $30,4^{\circ}\text{C}$ (8,5 horas após a mistura). A maior elevação de temperatura da pasta P2 pode ser explicada pelo maior consumo de cimento desta mistura em relação às demais (ver a Tabela 35). A segunda maior elevação de temperatura foi observada para a pasta P1 ($4,0^{\circ}\text{C}$). Neste caso, a pasta P1 apresentou

uma queda de temperatura após mistura, atingindo a temperatura mínima de 23°C, 3 horas após a mistura, e a máxima de 27,0°C, 10,3 horas após a mistura. Dentre as três pastas estudadas, a pasta P3 apresentou a menor elevação de temperatura (2,5°C). Verificou-se, para a pasta P3, que após a mistura a temperatura decresceu até o valor mínimo de 22,8°C (5,3 horas após a mistura) e subiu até o valor máximo de 25,25°C (12:38 horas após a mistura).

7.3.4.2 Fluência na Compressão

A Figura 140 ilustra as deformações elásticas das pastas P1, P2 e P3 nas fases de carregamento e de descarregamento simultaneamente com suas deformações por fluência específicas. A Figura 141 mostra apenas as deformações por fluência específica das pastas P1, P2 e P3. O comportamento de fluência na compressão para cada pasta leve de alto desempenho corresponde aos resultados médios de dois corpos-de-prova por pasta. Na Tabela 36 são apresentados os valores de fluência específica e de fluência irreversível das pastas em estudo. Além disso, na Tabela 36 também são informados os resultados de módulo de elasticidade durante as fases de carregamento e de descarregamento.

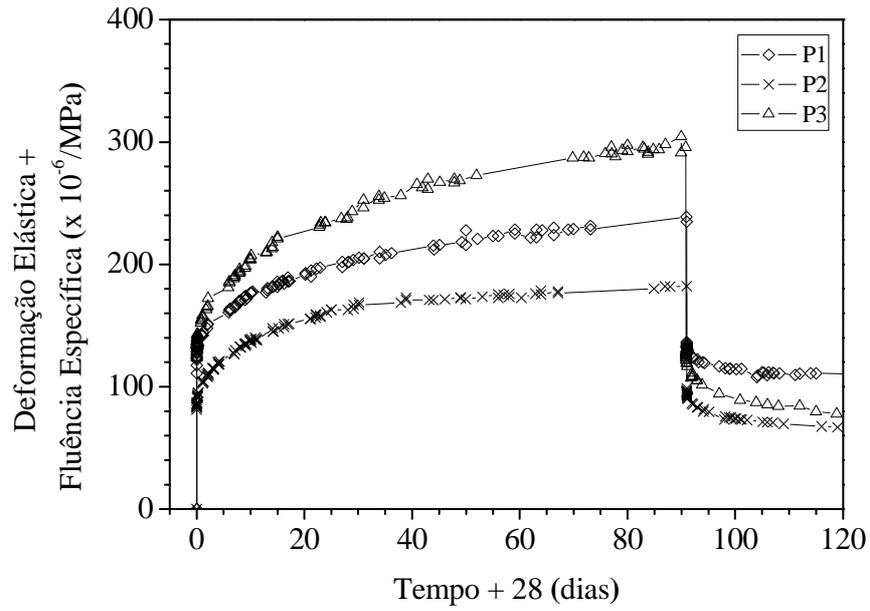


Figura 140 – Fluência básica das pastas com fase elástica.

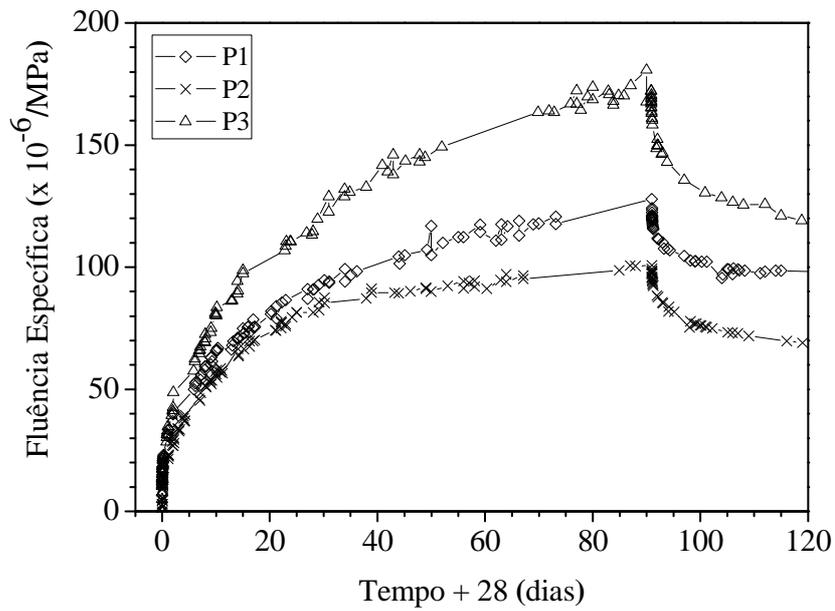


Figura 141 – Fluência básica das pastas sem fase elástica.

Tabela 36 – Resistência à compressão e fluências (específica e irreversível) das pastas.

Pasta	Carregamento		Descarregamento	
	Fluência Específica (10 ⁻⁶ /MPa)	E (GPa)	Fluência Irreversível (10 ⁻⁶ /MPa)	E (GPa)
P1	127,96	9,03	102,88	9,91
P2	100,80	10,84	67,71	12,01
P3	180,81	6,92	117,62	6,29

A pasta P2, que se trata da mais resistente entre as três misturas avaliadas, apresentou os menores resultados de fluência específica e fluência irreversível, seguida das pastas P1 e P3. Cabe ressaltar que um dos fatores intrínsecos ao material, mencionados por ANDRADE *et al.*(1997), que afetam a fluência é a resistência do concreto. Segundo os autores, a fluência final é inversamente proporcional à resistência do concreto no momento de aplicação da carga.

Os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias obtidos através do ensaio de fluência na compressão foram inferiores aqueles determinados no ensaio de compressão uniaxial (ver a Tabela 21). As pastas P1, P2 e P3 apresentaram decréscimos respectivamente iguais a 30,0%, 22,0% e 29,4% em seus módulos de elasticidade. VELASCO (2008) realizou um estudo de fluência na compressão de concretos de alto desempenho e também obteve resultados de módulo de elasticidade na fluência inferiores aqueles determinados a partir dos ensaios de compressão uniaxial. Esta diferença deve-se aos diferentes procedimentos de ensaio incluindo tamanho do corpo-de-prova, aplicação de carga e protocolo de leitura de deformação.

As curvas de fluência da Figura 140 e da Figura 141 conjuntamente com os resultados da Tabela 36 indicam uma relação entre módulo de elasticidade e fluência específica. Se tomarmos, por exemplo uma relação entre o inverso do módulo de elasticidade e a fluência específica máxima, encontramos uma relação linear para as pastas analisadas neste trabalho como pode ser visto na Figura 142.

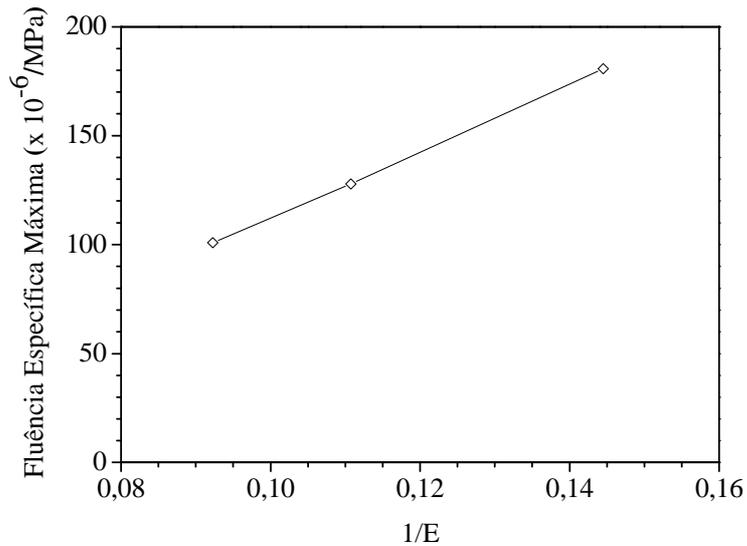


Figura 142 – Fluência específica máxima *versus* 1/E.

A relação entre módulo de elasticidade e fluência pode ser compreendida através de modelos reológicos de leis de comportamento. Se tomarmos, por exemplo, o modelo da cadeia de Maxwell Generalizada, ilustrado na Figura 143 (BAZANT e WU, 1974) nota-se que o comportamento do material está associado a elementos de Maxwell que representam fases da microestrutura. Cada elemento é composto de uma mola e de um amortecedor, sendo que a soma dos módulos de todas as molas é igual ao módulo elástico macroscópico, ligando as características microscópicas visco-elásticas ao módulo elástico macroscópico.

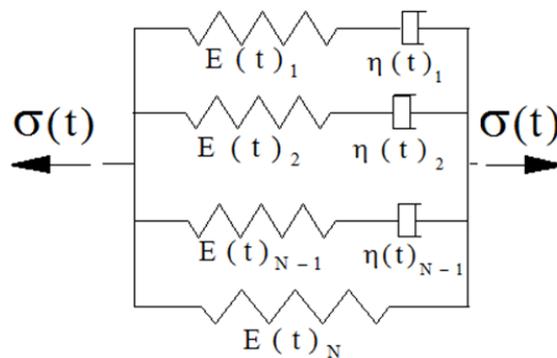


Figura 143 – Modelo da Cadeia de Maxwell Generalizada.

O coeficiente de fluência (Figura 144) fornece uma indicação da cinética do fenômeno de deformação diferida, relacionado neste caso aos amortecedores dos elementos da cadeia de Maxwell. Este amortecimento origina-se, em parte, no movimento da água no meio poroso que constitui o material endurecido (SERCOMBE *et al.*, 2000). Uma indicação qualitativa deste movimento de água pode ser obtida da Figura 134 que mostra a absorção de água por capilaridade nas pastas ensaiadas. Nesta figura observa-se que, para tempos mais longos, a cinética da absorção da pasta P2 é mais lenta que as cinéticas de absorção de P1 e P3 que são similares, comportamento também observado para a cinética da fluência para tempos mais avançados na Figura 144.

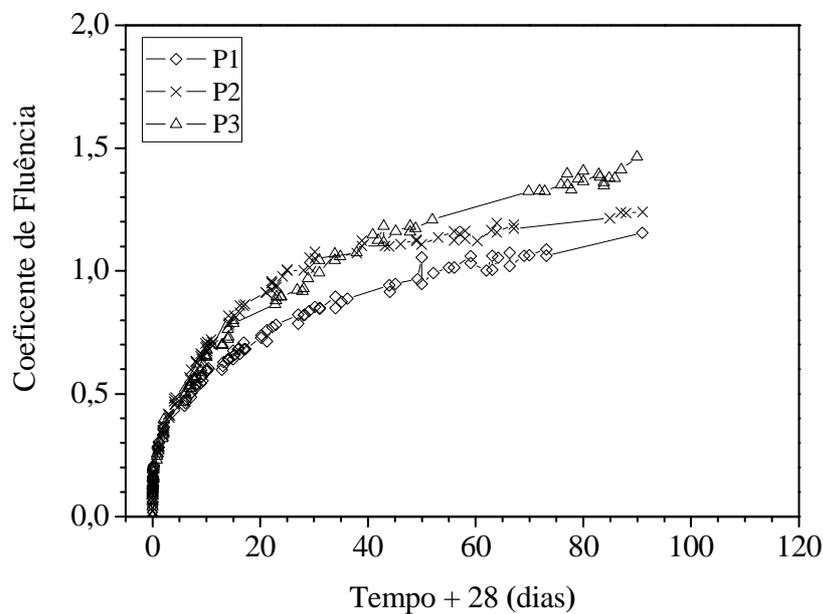


Figura 144 – Coeficientes de fluência das pastas leves.

Capítulo 8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PASTAS LEVES FIBROSAS DE ALTO DESEMPENHO

Ensaio de estabilidade, reologia, perda de fluido, massa específica e água livre foram realizados para as pastas fibrosas em estudo, com exceção das medições de reologia das pastas reforçadas com as fibras de PVA e de polipropileno, uma vez que o comprimento destas fibras, igual a 12mm, inviabilizou a realização deste ensaio no viscosímetro de cilindros coaxiais. As pastas fibrosas e sua matriz também foram caracterizadas em relação às suas propriedades mecânicas. Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de todos o estudo realizado nas pastas fibrosas e em sua matriz.

8.1 Estabilidade, Reologia e Água Livre

8.1.1 Pasta de Referência com Diferentes Teores de Superplastificante

Os resultados de reologia das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35 estão apresentados na Tabela 37 e a Figura 145 ilustra as variações das propriedades reológicas com o teor de superplastificante. As pastas estudadas apresentaram decréscimos no limite de escoamento, gel final e gel inicial com o aumento no teor de superplastificante. As viscosidades plásticas das pastas variaram entre 90,1 e 97,6 mPa.s.

Tabela 37 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.

Pasta	μ mPa.s (cP)	τ_0 Pa (lbf/100pé ²)	R ²	GI Pa (lbf/100pé ²)	GF Pa (lbf/100pé ²)
P2G0,35	90,1 (90,1)	0 (0)	1,0000	2,0 (4,3)	8,2 (17,1)
P2G0,30	96,1 (96,1)	3,9 (8,1)	0,9987	3,6 (7,5)	12,8 (26,7)
	96,1 (96,1)	4,8 (10,0)	0,9997	3,6 (7,5)	12,8 (26,7)
	97,6 (97,6)	4,4 (9,3)	0,9999	5,1 (10,7)	12,8 (26,7)
P2G0,25	93,1 (93,1)	6,5 (13,6)	0,9986	5,1 (10,7)	14,3 (29,9)
	90,1 (90,1)	6,3 (13,2)	0,9996	5,6 (11,9)	14,3 (29,9)
	93,1 (93,1)	7,3 (15,2)	0,9997	5,6 (11,9)	14,3 (29,9)

A análise estatística dos resultados de viscosidade plástica da pasta de referência indicou que a variação no teor de superplastificante entre 0,25% e 0,30% pasta proporcionou diferenças significativas nesta propriedade. Sendo que, a viscosidade plástica da pasta P2G0,30 foi 5% superior ao resultado desta propriedade apresentado pela pasta P2G0,25. A análise estatística também mostrou que houve diferenças significativas entre os resultados de limite de escoamento com a alteração do teor de superplastificante da mistura de 0,25% para 0,30%. O decréscimo do limite de escoamento da pasta com o aumento do teor de superplastificante pode ser observado na Figura 145. Neste caso, o limite de escoamento da pasta P2G0,35 foi igual a zero e passou a 4,4 Pa com a redução no teor de superplastificante para 0,30% (P2G0,30). O limite de escoamento da pasta P2G0,25 sofreu um acréscimo de 53% com a diminuição do teor de superplastificante em 0,05% em relação à pasta P2G0,30. Em relação ao gel inicial, a análise estatística entre os resultados das pastas P2G0,30 e P2G0,25 não indicou diferenças significativas. Adicionalmente, o aumento do teor de superplastificante na pasta fez com que $GF_{P2G0,25} > GF_{P2G0,30} > GF_{P2G0,35}$. De acordo com a análise estatística entre as pastas P2G0,25 e P2G0,30, a variação no teor de superplastificante causou a redução do gel final. Desta forma, o gel final da pasta P2G0,25 foi 11% superior ao da pasta P2G0,30. A pasta P2G0,35 não foi analisada estatisticamente com as demais pastas por apresentar um único resultado por propriedade, que não é estatisticamente representativo.

Os ensaios de reologia foram realizados em todas as pastas sem a formação de anel gelificado e, também, sem verificação de segregação de material no copo do viscosímetro.

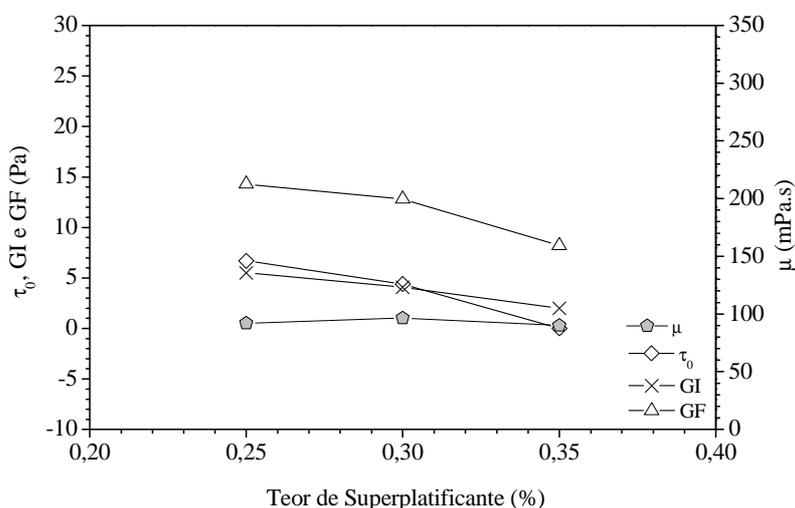


Figura 145 – Propriedades reológicas x teor de superplastificante das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.

Os resultados de estabilidade das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35 estão apresentados na Tabela 38 e indicam que, apesar de nenhuma das amostras ensaiadas ter apresentado rebaixamento, apenas a pasta com P2G0,25 se mostrou estável. Assim, a última verificação foi realizada para a confirmação do teor de superplastificante da pasta de referência por meio do ensaio de água livre. O aspecto da pasta após o período de repouso pode ser observado na Figura 146, onde é possível verificar a inexistência de água exsudada.

Tabela 38 – Estabilidades das pastas P2G0,25, P2G0,30 e P2G0,35.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,35	1	0	1,394 – 11,63	1,534 – 12,80	0,140 (1,17)
	2	0	1,457 – 12,16	1,734 – 14,47	0,277 (2,31)
	3	0	1,368 – 11,41	1,588 – 13,25	0,220 (1,84)
P2G0,30	1	0	1,434 – 11,97	1,491 – 12,44	0,057 (0,47)
	2	0	1,546 – 12,90	1,769 – 14,76	0,223 (1,86)
	3	0	1,549 – 12,93	1,740 – 14,52	0,191 (1,59)
	4	0	1,498 – 12,50	1,579 – 13,18	0,081 (0,68)
	5	0	1,459 – 12,17	1,491 – 12,44	0,032 (0,27)
P2G0,25	1	0	1,504 – 12,55	1,508 – 12,59	0,004 (0,10)
	2	0	1,556 – 12,99	1,542 – 12,87	-0,014 (-0,17)
	3	0	1,547 – 12,91	1,552 – 12,95	0,005 (0,04)
	4	0	1,563 – 13,05	1,555 – 12,98	-0,008 (-0,04)
	5	0	1,580 – 13,18	1,572 – 13,12	-0,008 (-0,06)



Figura 146 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25.

Na Figura 147a e b são comparados os valores de limite de escoamento, gel inicial, gel final e viscosidade plástica das pastas P2 e P2G0,25. Os resultados indicaram que a troca dos superplastificantes foi benéfica nas propriedades reológicas. A análise estatística indicou que a troca dos aditivos resultou em diferenças significativas nos resultados de viscosidade plástica, limite de escoamento e gel inicial e, adicionalmente, não apontou diferenças significativas entre os valores de gel final das pastas. A substituição do superplastificante CD-33B (pasta P2) pelo Glenium 51 (pasta P2G0,25) ocasionou reduções na viscosidade plástica, limite de escoamento e gel inicial respectivamente iguais a 39%, 22% e 43%.

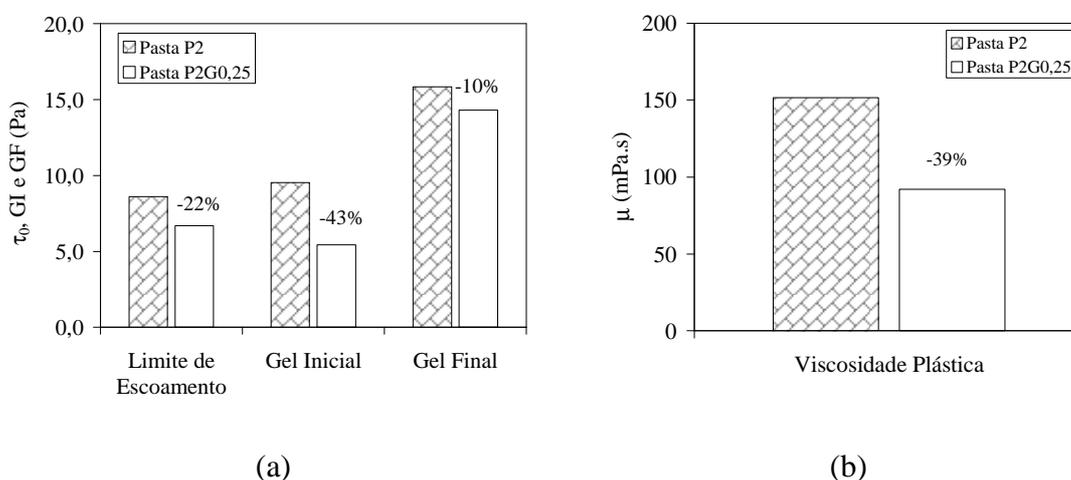


Figura 147 – Comparação entre as propriedades reológicas das pastas P2 e P2G0,25: (a) Limite de escoamento, gel inicial e gel final; (b) Viscosidade Plástica.

8.1.2 Pastas Reforçadas com 2,5% de Volastonita

Os resultados de reologia das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5 estão apresentados na Tabela 39. A Figura 148 ilustra as variações das propriedades reológicas médias das pastas com reforço de 2,5% de volastonita com o acréscimo de superplastificante em sua composição, onde é possível observar o decréscimo de cada propriedade com o aumento do teor de superplastificante.

Neste caso, a análise estatística não foi realizada porque as pastas confeccionadas com teores de superplastificante iguais a 0,35% e 0,30% foram submetidas a apenas um

ensaio de reologia por pasta. O ensaio de reologia da pasta P2G0,30V2,5 não foi repetido porque foi realizado simultaneamente com o ensaio de estabilidade, que indicou a instabilidade desta pasta. Nenhum dos ensaios de reologia apresentou formação de anel gelificado.

Tabela 39 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5.

Pasta	μ mPa.s (cP)	τ_0 Pa (lbf/100pé ²)	R ²	GI Pa (lbf/100pé ²)	GF Pa (lbf/100pé ²)
P2G0,35V2,5	124,6 (124,6)	-1,9 (-3,9)	0,9988	1,5 (3,2)	7,2 (14,9)
P2G0,30V2,5	132,1 (132,1)	-0,3 (-0,7)	0,9998	2,0 (4,3)	7,7 (16,0)
P2G0,25V2,5	145,6 (145,6)	22,7 (47,3)	0,9991	12,3 (25,6)	21,0 (43,8)
	142,6 (142,6)	26,6 (55,5)	0,9997	13,3 (27,8)	22,0 (45,9)
	148,6 (148,6)	25,0 (52,3)	0,9997	14,3 (29,9)	21,0 (43,8)

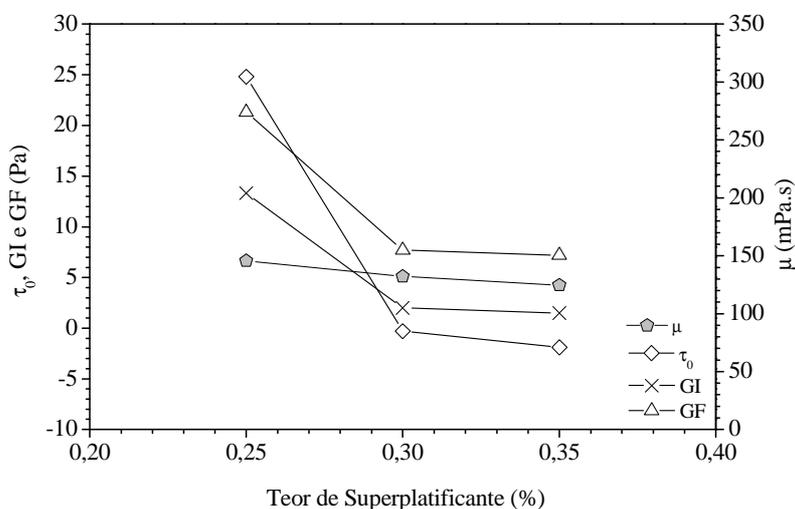


Figura 148 – Propriedades reológicas x teor de superplastificante das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5.

Os resultados de estabilidade das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5 estão apresentados na Tabela 40 e, indicam que, apenas a pasta com teor de superplastificante igual a 0,25% se mostrou estável.

Os resultados dos ensaios de reologia e estabilidade indicaram que o teor adequado para a pasta com reforço de 2,5% de volastonita também foi igual a 0,25%.

Tabela 40 – Estabilidades das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V2,5 e P2G0,35V2,5.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,30V2,5	1	0	1,445 – 12,06	1,732 – 14,46	0,287 (2,40)
	2	0	1,413 – 11,79	1,621 – 13,53	0,208 (1,74)
	3	0	1,534 – 12,80	1,636 – 13,65	0,102 (0,85)
P2G0,25V2,5	1	0	1,545 – 12,89	1,536 – 12,82	-0,009 (-0,07)
	2	0	1,663 – 13,88	1,659 – 13,84	-0,004 (-0,04)
	3	0	1,599 – 13,34	1,570 – 13,10	-0,029 (-0,24)
	4	0	1,539 – 12,85	1,523 – 12,71	-0,016 (-0,14)

De forma a complementar os ensaios de reologia e estabilidade para a verificação da adequação do teor de 0,25% de superplastificante, o teor de água livre também foi determinado para a pasta P2G0,25V2,5. Na Figura 149 é possível observar que não houve exsudação de água durante o ensaio.



Figura 149 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25V2,5.

8.1.3 Pastas Reforçadas com 5,0% de Volastonita

Os resultados dos ensaios de reologia realizados nas pastas com reforço de 5,0% de volastonita com diferentes teores de superplastificante estão apresentados na Tabela 41. A Figura 150 ilustra as variações das propriedades reológicas com o teor de superplastificante. Os resultados das propriedades reológicas das pastas com os diferentes teores de superplastificante não foram analisados estatisticamente, pois para as pastas P2G0,35V5,0 e P2G0,45V5,0 foi realizada apenas uma determinação de reologia por mistura. A pasta P2G0,45V5,0 formou anel gelificado durante o ensaio, por este motivo suas propriedades reológicas não são apresentadas na Tabela 41 e, também, devido ao comportamento desta pasta durante o ensaio de reologia, a mesma não foi submetida ao ensaio de estabilidade. A pasta P2G0,35V5,0 apresentou segregação durante o ensaio de reologia.

Tabela 41 – Propriedades reológicas das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.

Pasta	μ mPa.s (cP)	τ_0 Pa (lbf/100pé ²)	R ²	GI Pa (lbf/100pé ²)	GF Pa (lbf/100pé ²)
P2G0,35V5,0	183,10 (183,10)	0,9 (1,8)	0,9996	2,6 (5,3)	8,7 (18,1)
P2G0,30V5,0	217,60 (217,60)	22,0 (45,9)	0,9987	9,7 (20,3)	17,9 (37,4)
	211,60 (211,60)	18,1 (37,7)	0,9996	7,7 (16,0)	17,4 (36,3)
	201,10 (201,10)	18,4 (38,4)	0,9930	9,2 (19,2)	17,9 (37,4)

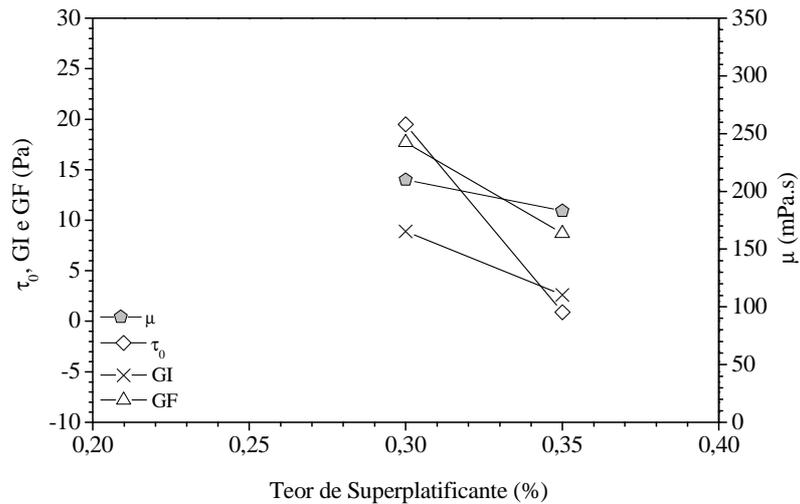


Figura 150 – Propriedades reológicas \times teor de superplastificante das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.

Os resultados dos ensaios de estabilidade realizados com as pastas P2G0,35V5,0 e P2G0,30V5,0 estão apresentados na Tabela 42. Os resultados que indicam que apesar de todas as amostras ensaiadas apresentarem rebaixamento igual a zero, apenas a pasta P2G0,30V5,0 se mostrou estável, por apresentar $\Delta ME < 0,06 \text{ g/cm}^3$. A segregação visualizada no ensaio de reologia da P2G0,35V5,0 foi confirmada pelo ensaio de estabilidade, em que $\Delta ME > 0,06 \text{ g/cm}^3$ foi observado para todas as amostras desta mistura (ver a Tabela 42). Desta forma, a única pasta submetida ao ensaio de água livre foi a P2G0,30V5,0, que não apresentou fase sobrenadante durante o ensaio (Figura 151).

Tabela 42 – Estabilidades das pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,35V5,0.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,35V5,0	1	0	1,441 – 12,03	1,825 – 15,23	0,384 (3,20)
	2	0	1,410 – 11,76	1,756 – 14,65	0,346 (2,89)
	3	0	1,505 – 12,56	1,842 – 15,37	0,337 (2,81)
	4	0	1,432 – 11,95	1,650 – 13,77	0,218 (1,82)
P2G0,30V5,0	1	0	1,601 – 13,36	1,577 – 13,16	-0,024 (-0,20)
	2	0	1,643 – 13,71	1,689 – 14,10	0,046 (0,39)
	3	0	1,570 – 13,10	1,530 – 12,77	-0,040 (-0,33)
	4	0	1,510 – 12,60	1,487 – 12,41	-0,023 (-0,19)



Figura 151 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30V5,0:

8.1.4 Pastas Reforçadas com 7,5% de Volastonita

As propriedades reológicas da pasta com reforço de microfibras de volastonita igual a 7,5% estão apresentadas na Tabela 43. A pasta com teor de microfibras de volastonita igual a 7,5% foi testada com os seguintes teores de superplastificante: 0,40%, 0,45%, 0,50%, 0,60% e 0,65%.

As propriedades reológicas das pastas P2G0,45V7,5, P2G0,50V7,5, P2G0,60V7,5 e P2G0,65V7,5 não estão apresentados na Tabela 43 porque durante os ensaios destas pastas foi observada a formação de anel gelificado.

Tabela 43 – Propriedades reológicas da pasta P2G0,40V7,5.

Pasta	μ mPa.s (cP)	τ_0 Pa (lbf/100pé ²)	R ²	GI Pa (lbf/100pé ²)	GF Pa (lbf/100pé ²)
P2G0,40V7,5*	286,70 (286,70)	5,5 (11,4)	1,0000	3,1 (6,4)	11,8 (24,6)
	297,20 (297,20)	7,7 (16,0)	1,0000	4,1 (8,5)	13,3 (27,8)
	315,20 (315,20)	7,7 (16,0)	1,0000	4,6 (9,6)	13,3 (27,8)

* O limite de escoamento e viscosidade plástica foram calculados apenas a partir das leituras nas velocidades de 200rpm e 100rpm.

A Tabela 44 apresenta os resultados de estabilidade das pastas estudadas e indicam que as pastas P2G0,35V7,5 e P2G0,40V7,5 foram as únicas que se apresentaram estáveis. Os resultados dos ensaios de estabilidade apresentados na Tabela 44 confirmam as segregações observadas durante os ensaios de reologia para as pastas com teores de superplastificantes iguais e acima de 0,45%. A Figura 152 ilustra os resultados de ΔME versus teor de superplastificante e, por meio deste gráfico, é possível observar o aumento da segregação na pasta com o acréscimo de superplastificante.

Apesar da pasta com 0,35% de superplastificante se mostrar estável, seu comportamento quanto à reologia não foi determinado porque durante o preparo sua alta viscosidade forçou muito o motor do misturador. Desta forma, o teor de superplastificante igual a 0,40% foi considerado o mais adequado para a pasta com 7,5% de volastonita e, para complementar a avaliação da pasta P2G0,40V7,5, esta foi testada quanto à água livre.

Tabela 44 – Estabilidades das pastas P2G0,35V7,5, P2G0,40V7,5, P2G0,45V7,5, P2G0,50V7,5, P2G0,60V7,5 e P2G0,65V7,5.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,65V7,5	1	0	1,109 – 9,26	2,164 – 18,06	1,055 (8,80)
	2	0	1,121 – 9,36	2,190 – 18,28	1,069 (8,92)
P2G0,60V7,5	1	0	1,178 – 9,83	2,140 – 17,86	0,962 (8,03)
	2	0	1,160 – 9,68	2,120 – 17,69	0,960 (8,01)
	3	0	1,151 – 9,61	2,106 – 17,57	0,955 (7,96)
P2G0,50V7,5	1	0	1,311 – 10,94	2,072 – 17,29	0,761 (6,35)
	2	0	1,262 – 10,53	2,009 – 16,77	0,747 (6,24)
P2G0,45V7,5	1	0	1,547 – 12,91	1,707 – 14,24	0,160 (1,33)
	2	0	1,568 – 13,09	1,849 – 15,43	0,281 (2,34)
P2G0,40V7,5	1	0	1,474 – 12,30	1,499 – 12,51	0,025 (0,21)
	2	0	1,575 – 13,14	1,571 – 13,11	-0,004 (-0,03)
	3	0	1,620 – 13,52	1,612 – 13,46	-0,008 (-0,06)
	4	0	1,454 – 12,13	1,441 – 12,03	-0,013 (-0,10)
	5	0	1,517 – 12,66	1,533 – 12,80	0,016 (0,14)
P2G0,35V7,5	1	0	1,543 – 12,87	1,491 – 12,44	-0,052 (-0,43)
	2	0	1,619 – 13,51	1,581 – 13,19	-0,038 (-0,32)
	3	0	1,676 – 13,99	1,664 – 13,89	-0,012 (-0,16)

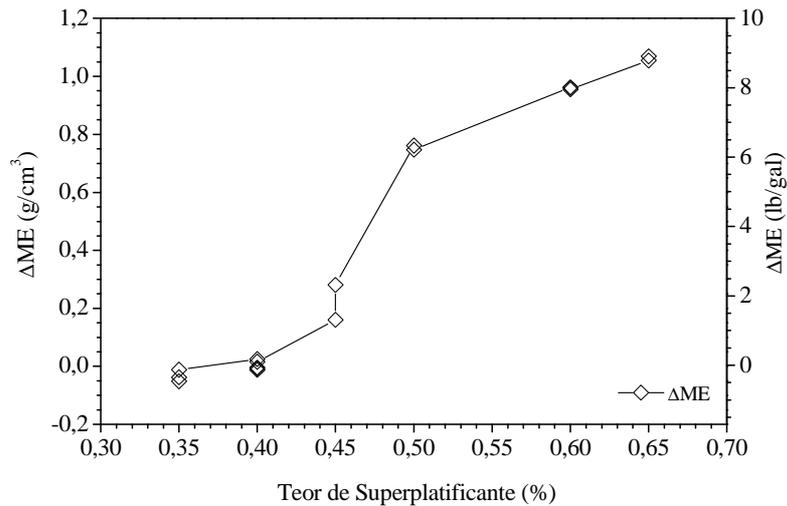


Figura 152 – Resultados de Δ ME das pastas com 7,5% volastonita e diferentes teores de superplastificante.

O ensaio de água livre está ilustrado na Figura 153 e indica que não houve exsudação de água após o período de repouso.



Figura 153 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,40V7,5.

8.1.5 Pasta Reforçada com 10,0% de Volastonita

A Tabela 45 apresenta as deflexões lidas durante os ensaios de reologia da pasta P2G0,40V10,0. Não foi possível a determinação das propriedades reológicas destas

pastas, pois as leituras nas velocidades de rotação de 300 rpm e 200 rpm nos três ensaios realizados foram superiores a 300°. No entanto, apesar das leituras obtidas atestarem que a pasta P2G0,40V10,0 é muito viscosa, neste estudo optou-se pela investigação de suas propriedades mecânicas e de estabilidade e água livre de forma a complementar o estudo realizado com os outros teores de microfibras de volastonita.

Tabela 45 – Deflexões medidas durante os ensaios de reologia da pasta P2G0,40V10,0.

Velocidade de Rotação (rpm)	Deflexão (°)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
300	> 300	> 300	> 300
200	> 300	> 300	> 300
100	158	164	162
3	11	12	13
3	28	30	34

A Tabela 46 apresenta os resultados dos ensaios de estabilidade das pastas P2G0,40V10,0, P2G0,45V10,0 e P2G0,50V10,0. Todas as pastas apresentaram rebaixamento igual a zero, mas apenas a pasta P2G0,40V10,0 se mostrou estável por apresentar $\Delta ME < 0,06 \text{ g/cm}^3$. Por este motivo, as pastas P2G0,45V10,0 e P2G0,50V10,0 nem foram testadas quanto as suas propriedades reológicas.

A Figura 154 ilustra o ensaio de água livre da pasta P2G0,40V10,0 e, após o período de repouso, a pasta não apresentou fase sobrenadante.

Tabela 46 – Estabilidades das pastas P2G0,40V10,0, P2G0,45V10,0 e P2G0,50V10,0.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,50V10,0	1	0	1,485 – 12,39	1,757 – 14,66	0,272 (2,27)
	2	0	1,621 – 13,53	1,772 – 14,79	0,151 (1,26)
P2G0,45V10,0	1	0	1,661 – 13,87	1,722 – 14,37	0,061 (0,50)
	2	0	1,556 – 12,98	1,621 – 13,53	0,065 (0,55)
	3	0	1,575 – 13,14	1,635 – 13,64	0,060 (0,50)
	4	0	1,635 – 13,64	1,746 – 14,57	0,111 (0,93)
P2G0,40V10,0	1	0	1,655 – 13,81	1,643 – 13,71	-0,012 (-0,10)
	2	0	1,611 – 13,44	1,607 – 13,41	-0,004 (-0,03)
	3	0	1,694 – 14,14	1,693 – 14,13	-0,001 (-0,01)



Figura 154 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,40V10,0.

8.1.6 Pastas Reforçadas com Fibras de PVA

Os resultados dos ensaios de estabilidade realizados na pasta reforçada com 0,50% de fibra de PVA estão apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 – Estabilidades das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA0,50.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,30PVA0,50	1	0	1,429 – 11,93	1,386 – 11,56	-0,043 (-0,37)
	2	0	1,534 – 12,80	1,498 – 12,50	-0,036 (-0,30)
	3	0	1,574 – 13,14	1,552 – 12,95	-0,022 (-0,19)
	4	0	1,473 – 12,30	1,471 – 12,27	-0,002 (-0,03)
	5	0	1,513 – 12,63	1,492 – 12,45	-0,021 (-0,18)
	6	0	1,532 – 12,78	1,494 – 12,47	-0,038 (-0,31)
P2G0,25PVA0,50	1	0	1,486 – 12,40	1,478 – 12,34	-0,008 (-0,06)
	2	0	1,518 – 12,67	1,499 – 12,51	-0,019 (-0,16)
	3	0	1,552 – 12,95	1,533 – 12,79	-0,019 (-0,16)
	4	0	1,511 – 12,61	1,455 – 12,14	-0,056 (-0,47)
	5	0	1,509 – 12,59	1,496 – 12,49	-0,013 (-0,10)
	6	0	1,486 – 12,40	1,479 – 12,35	-0,007 (-0,05)

Pastas confeccionadas com teores de superplastificante iguais a 0,25% e 0,30%, em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios, foram testadas. Apesar de nenhuma das amostras ter apresentado rebaixamento e de todas terem apresentados $\Delta ME < 0,06 \text{ g/cm}^3$, tornado-as adequadas quanto a esta propriedade para aplicação em poços de petróleo, apenas a pasta P2G0,25PVA0,50 foi submetida ao ensaio de água livre. O aspecto da pasta após o período de repouso está ilustrado na Figura 155, onde é possível visualizar a inexistência de exsudação da fase fluida.



(a)



(b)

Figura 155 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,25PVA0,50: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.

O teor de 1,00% de fibra de PVA também foi adotado para o reforço da matriz. Os resultados dos ensaios de estabilidade realizados durante o processo de dosagem do teor de superplastificante da pasta reforçada com 1,00% de fibra de PVA estão mostrados na Tabela 48. Neste caso, os teores de superplastificante testados foram iguais a 0,30% e 0,35% (em massa de sólidos do superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios). Todas as amostras avaliadas quanto a estabilidade se mostraram adequadas em relação a esta propriedade para a aplicação cimentação de poços de petróleo. Entretanto, apenas a pasta P2G0,30PVA1,00 foi avaliada quanto ao teor de água livre, que foi igual a zero, conforme ilustrado na Figura 156.

Tabela 48 – Estabilidades das pastas P2G0,30PVA1,00 e P2G0,35PVA1,00.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,35PVA1,00	1	0	1,487 – 12,41	1,439 – 12,01	-0,048 (-0,40)
	2	0	1,446 – 12,07	1,423 – 11,87	-0,030 (-0,20)
	3	0	1,528 – 12,75	1,525 – 12,73	-0,003 (-0,02)
P2G0,30PVA1,00	1	0	1,491 – 12,45	1,511 – 12,61	0,020 (0,16)
	2	0	1,510 – 12,60	1,523 – 12,71	0,013 (0,11)
	3	0	1,499 – 12,51	1,495 – 12,48	-0,004 (-0,03)
	4	0	1,514 – 12,64	1,505 – 12,56	0,000 (-0,08)
	5	0	1,521 – 12,69	1,520 – 12,68	-0,001 (-0,01)
	6	0	1,533 – 12,80	1,521 – 12,69	-0,013 (-0,11)



(a)



(b)

Figura 156 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PVA1,00: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.

8.1.7 Pastas Reforçadas com Fibra de Polipropileno

Os resultados de estabilidade das pastas P2G0,25PP0,50 e P2G0,30PP0,50 estão apresentados na Tabela 49 e indicam que as duas pastas se mostraram aptas para a

cimentação de poços de petróleo em relação à propriedade avaliada. No entanto, a pasta P2G0,25PP0,50 se mostrou muito viscosa durante seu preparo e, desta forma, apenas a pasta P2G0,30PP0,50 foi testada quanto ao teor de água livre. O aspecto da pasta P2G0,30PP0,50 após o ensaio de água livre está ilustrado Figura 157, onde é possível observar que não houve exsudação durante o ensaio.

Tabela 49 – Estabilidades das pastas P2G0,25PP0,50 e P2G0,30PP0,50.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,30PP0,50	1	0	1,525 – 12,72	1,505 – 12,56	-0,020 (-0,16)
	2	0	1,463 – 12,21	1,495 – 12,48	0,032 (0,27)
	3	0	1,486 – 12,40	1,519 – 12,67	-0,033 (-0,27)
	4	0	1,487 – 12,41	1,457 – 12,16	-0,030 (-0,25)
	5	0	1,462 – 12,20	1,483 – 12,38	0,021 (0,18)
P2G0,25PP0,50	1	0	1,527 – 12,75	1,498 – 12,50	-0,031 (-0,25)
	2	0	1,519 – 12,67	1,516 – 12,65	-0,003 (-0,02)
	3	0	1,515 – 12,64	1,482 – 12,37	-0,033 (-0,27)



(a)



(b)

Figura 157 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PP0,50: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.

As pastas reforçadas com um teor de 0,75% de fibra de polipropileno foram confeccionadas com teores de superplastificantes iguais a, 0,25%, 0,30%, 0,35% e 0,40%. No entanto, a pasta P2G0,30PP0,75 foi escolhida para a continuidade do estudo, conforme descrito no Capítulo 5, e os resultados de estabilidade para as amostras ensaiadas estão mostrados na Tabela 50. Os resultados apresentados na Tabela 50 atestam a conformidade desta pasta em relação ao ensaio de estabilidade. A pasta P2G0,30PP0,75 também apresentou um resultado satisfatório em relação ao ensaio de água livre, onde de acordo com a Figura 158 o teor de água livre foi igual a zero.

Tabela 50 – Estabilidade da pasta P2G0,30PP0,75.

Pasta	CP	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P2G0,30PP0,75	1	0	1,494 – 12,47	1,502 – 12,53	0,008 (0,06)
	2	0	1,508 – 12,58	1,511 – 12,61	0,003 (0,03)
	3	0	1,500 – 12,52	1,491 – 12,44	-0,009 (-0,08)
	4	0	1,508 – 12,58	1,507 – 12,58	-0,001 (0,00)
	5	0	1,500 – 12,51	1,479 – 12,34	-0,021 (0,17)



(a)



(b)

Figura 158 – Ensaio de água livre da pasta P2G0,30PP0,75: (a) Vista frontal da proveta; (b) Vista superior da proveta.

8.2 Sumário: Reologia e Estabilidade das Pastas Otimizadas

As curvas de fluxo das pastas otimizadas estão apresentadas na Figura 159, enquanto os resultados médios das propriedades reológicas estão apresentadas na Figura 160 (τ_0 , GI e GF) e na Figura 161 (μ). As diferenças entre as massas específicas do topo e da base (ΔME) das pastas estão mostradas na Figura 162.

É possível observar na Figura 159 o aumento da viscosidade plástica com o acréscimo da fibra de volastonita, mesmo para as pastas cujos teores de superplastificantes foram superiores ao das demais. As pastas fibrosas apresentaram resultados de limite de escoamento, gel inicial e gel final superiores aos resultados da pasta P2G0,25, com exceção da pasta P2G0,40V7,5, que apresentou praticamente o mesmo limite de escoamento que a pasta de referência e, também, cujo gel inicial foi inferior ao da pasta P2G0,25. Os valores de limite de escoamento e de gel final da pasta P2G0,40V7,5 são inferiores ao da pasta P2G0,25 provavelmente devido ao seu maior consumo de superplastificante.

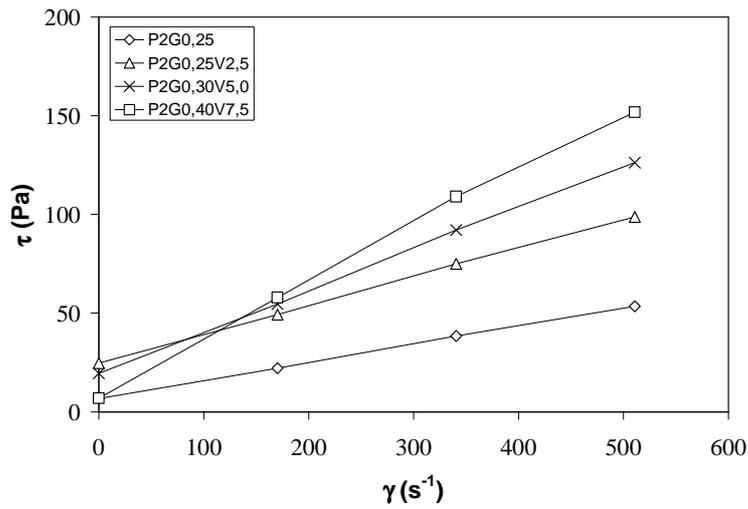


Figura 159 – Curvas de fluxo das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.

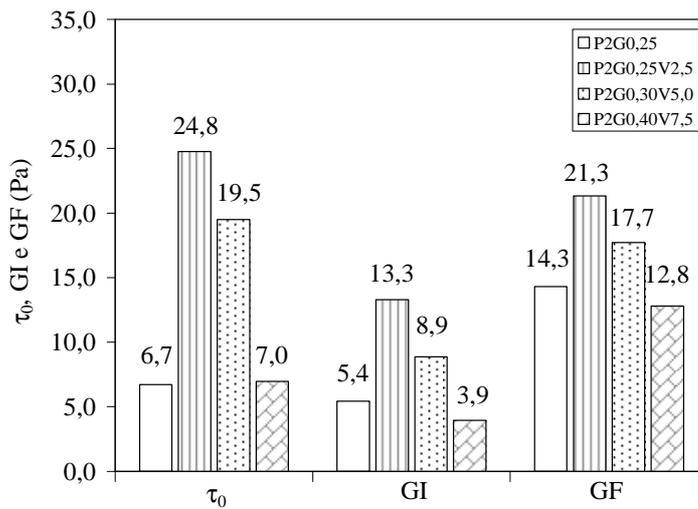


Figura 160 – Valores médios de limite de escoamento, gel inicial e gel final das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.

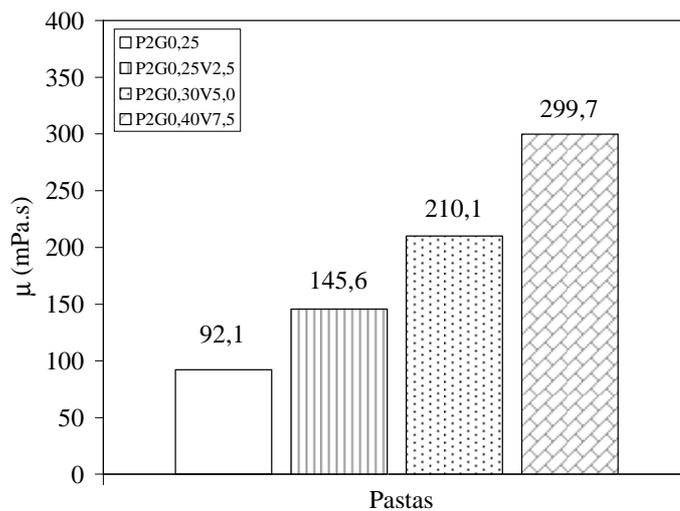


Figura 161 – Valores médios de viscosidade plástica das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.

A Figura 162 mostra que todas as pastas estudadas são estáveis, pois apresentaram valores de $\Delta ME < 0,06 \text{ g/cm}^3$.

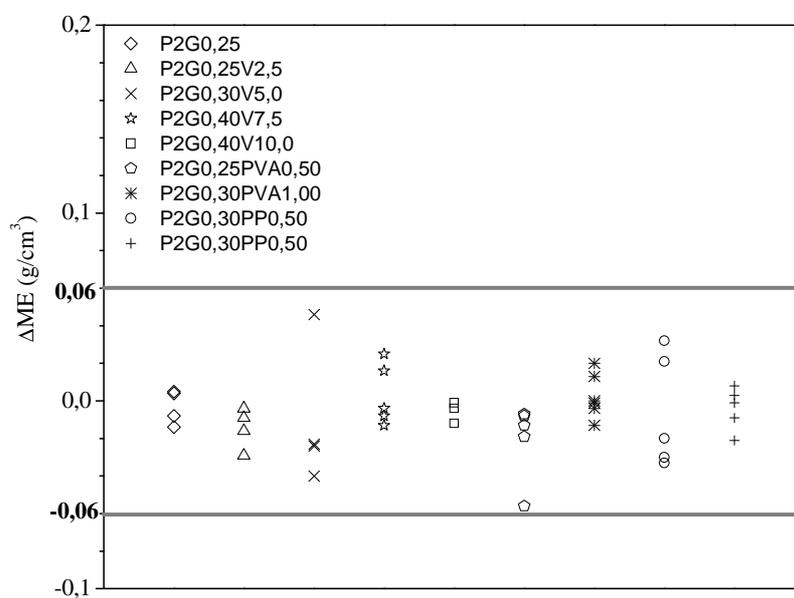


Figura 162 – Resultados de ΔME das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5.

8.3 Massa Específica Aparente

Os resultados das massas específicas da pasta de referência e das pastas fibrosas estão apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Massas específicas das pastas fibrosas.

Pasta	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica (lb/gal)
P2G0,25	1,47	12,30
P2G0,25V2,5	1,52	12,70
P2G0,30V5,0	1,55	12,94
P2G0,40V7,5	1,57	13,10
P2G0,40V10,0	1,60	13,35
P2G0,25PVA0,50	1,46	12,20
P2G0,30PVA1,00	1,48	12,35
P2G0,30PP0,50	1,48	12,35
P2G0,30PP0,75	1,45	12,10

A Figura 163 mostra a variação das massas específicas das pastas com o teor de fibra de volastonita. Os resultados indicam uma tendência de acréscimo na massa específica da pasta com o aumento do teor volastonita nas misturas. Este comportamento ocorreu uma vez que se substituiu um teor de pasta de referência com massa específica igual a 1,47 g/cm³ pela volastonita, que possui massa específica igual a 2,90 g/cm³ (24,21 lb/gal).

Como a fibra de PVA possui massa específica igual a 1,34 g/cm³ (11,19 lb/gal), que é muito próximo o da pasta P2G0,25 e o volume de reforço foi de até 1,0%, não se observou variação expressiva nesta propriedade (diferença menor que 1%). Nesta propriedade, comportamento similar foi observado para as pastas contendo fibra de polipropileno.

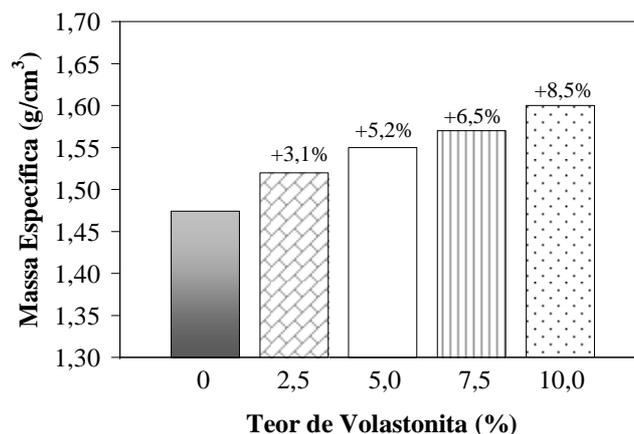


Figura 163 – Comparação entre as massas específicas das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.

8.4 Perda de Fluido

Os resultados de tempo de escoamento (t), volume de fluido perdido durante o tempo de escoamento (Q_t) e da perda de fluido equivalente a um período de desidratação de 30 minutos (Q_{30}) de todas as pastas estão apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Filtrados das pastas fibrosas.

Pasta	t (min)	Q_t (ml)	Q_{30} (cm ³)
P2G0,25	0,725	15,0	193
P2G0,25V2,5	0,569	14,5	210
P2G0,30V5,0	0,544	14,0	208
P2G0,40V7,5	0,851	12,5	148
P2G0,40V10,0	0,651	10,5	143
P2G0,25PVA0,50	1,091	19,0	199
P2G0,30PVA1,00	2,680	22,5	151
P2G0,30PP0,50	1,487	18,0	162
P2G0,30PP0,75	1,174	13,0	131

A Figura 164 ilustra os valores de perda de fluido equivalente a um período de desidratação de 30 minutos da pasta de referência (P2G0,25) e das pastas com reforço fibroso de microfibras de volastonita. Os resultados de perda de fluido indicam que para os teores de fibra de volastonita iguais a 7,5% e 10,0% houve um benefício na perda de fluido em relação à pasta P2G0,25. Neste caso, as pastas P2G0,40V7,5 e P2G0,40V10,0 apresentaram valores de Q_{30} , respectivamente, 23,1% e 26,1% inferiores ao da pasta de referência. Estes resultados estão em consonância com HEINOLD *et al.* (2002) e HEINOLD *et al.* (2003), que afirmam que o reforço de uma pasta de cimentação com uma fibra de volastonita proporciona benefícios em sua permeabilidade.

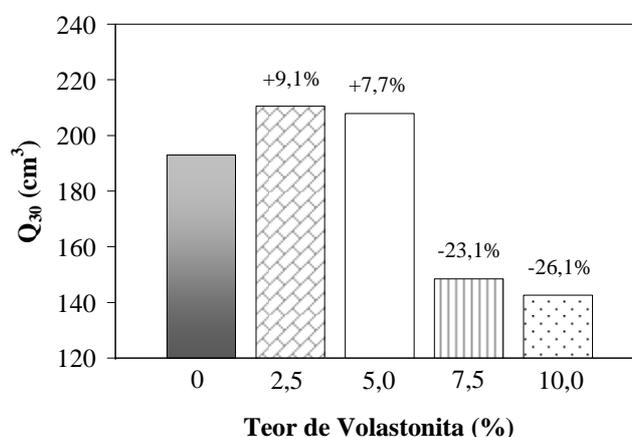


Figura 164 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.

O uso da fibra de PVA proporcionou redução no filtrado quando a fração volumétrica de 1,00% foi utilizada (ver a Figura 165). Neste caso, a pasta P2G0,30PVA1,00 alcançou um valor de perda de fluido 22,0% inferior ao apresentado pela pasta P2G0,25.

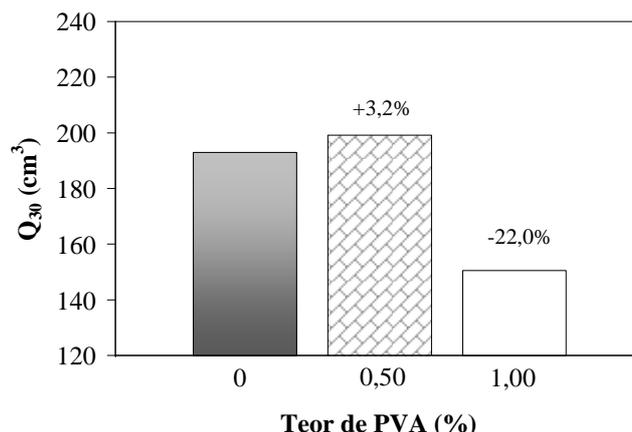


Figura 165 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de PVA e a pasta de referência.

Ao utilizar a fibra de polipropileno como reforço, as perdas de fluido também foram inferiores à perda de fluido da pasta P2G0,25, conforme ilustrado na Figura 166. A utilização de frações volumétricas iguais a 0,50% e 0,75% proporcionou decréscimos na perda de fluido (Q_{30}) da pasta de referência de 16,2% e 31,9%, respectivamente.

O emprego de fibras de PVA (teor de 1,00%) e de polipropileno (teores de 0,75% e 1,00%) promoveu decréscimos na perda de fluido de pasta de referência. Isto pode ser atribuído à formação da rede fibrosa semelhante àquela mostrada na Figura 16b, que é apresentada por EL-HASSAN *et al.* (2003) em seu trabalho para ilustrar o preenchimento da fratura de uma rocha por uma pasta leve empacotada reforçada com uma fibra flexível a base de sílica para o combate à perda de circulação.

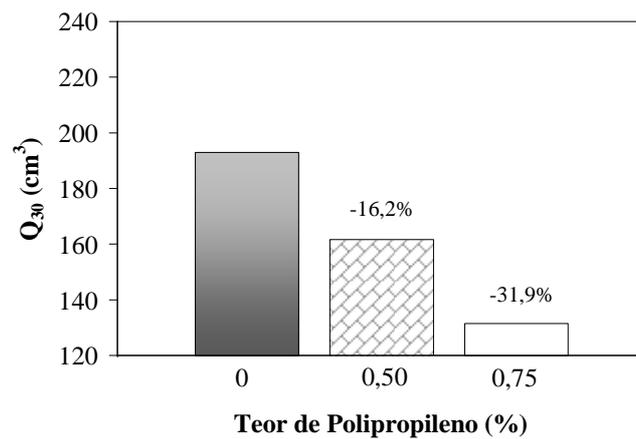


Figura 166 – Comparação entre os filtrados das pastas com reforço de polipropileno e a pasta de referência.

8.5 Propriedades das Pastas no Estado Endurecido

8.5.1 Comportamento sob Compressão Uniaxial

8.5.1.1 Pastas Reforçadas com Volastonita

As curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V7,5 estão apresentadas na Figura 109, enquanto as demais estão apresentadas no Anexo A3. Os valores médios de resistência à compressão de ruptura ($f_{C,RUP}$), deformação axial ($\epsilon_{A,RUP}$) e lateral ($\epsilon_{L,RUP}$) de ruptura, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 21. Os resultados apresentados na Tabela 21 correspondem aos valores médios de sete corpos-de-prova, no entanto o deslocamento lateral foi medido em cinco corpos-de-prova.

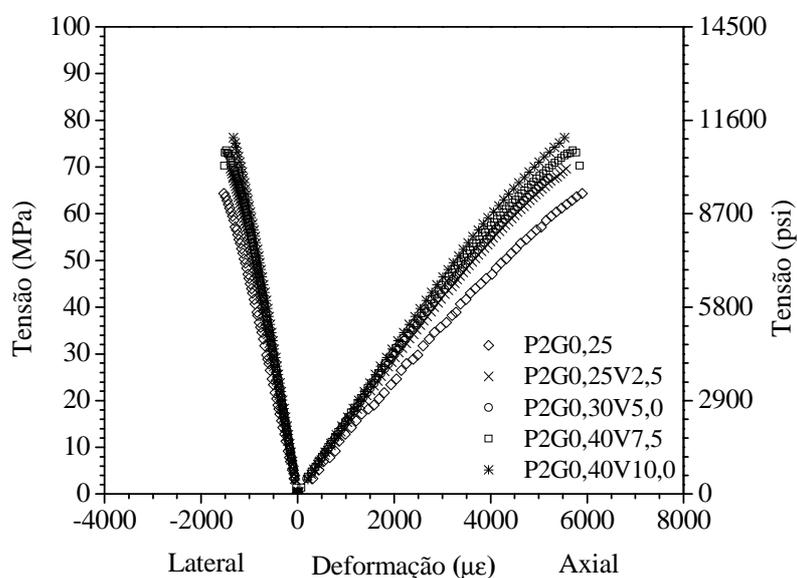


Figura 167 – Curvas típicas tensão x deformação das pastas reforçadas com volastonita.

Tabela 53 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com volastonita.

Pasta	$f_{c,RUP}$ - CV (MPa/psi - %)	E - CV (GPa / 1000psi - %)	$\epsilon_{A,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	$\epsilon_{L,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	ν - CV (%)
P2G0,25	68,6 / 9948 – 7,2	13,0 / 1884 – 4,3	6131 – 7,9	-1675 – 19,5	0,26 – 4,2
P2G0,25V2,5	69,4 / 10066 – 4,9	14,1 / 2045 – 2,7	5605 – 6,8	-1483 – 10,7	0,26 – 2,1
P2G0,30V5,0	71,6 / 10385 – 6,6	14,4 / 2089 – 2,1	5699 – 11,4	-1465 – 16,6*	0,25 – 0,8**
P2G0,40V7,5	73,8 / 10704 – 5,2	15,5 / 2248 – 2,1	5570 – 7,0	-1423 – 10,4*	0,25 – 2,6*
P2G0,40V10,0	79,2 / 11487 – 7,6	16,2 / 2350 – 2,5	5682 – 10,8	-1398 – 15,6**	0,25 – 1,6**

* Valores referentes à média de quatro corpos-de-prova.

**Valores referentes à média de três corpos-de-prova.

Os resultados indicam acréscimos de até 15,5% no valor da resistência à compressão uniaxial com o uso das fibras de volastonita. No entanto, a análise estatística indicou que a substituição do volume de pasta por microfibras de volastonita até o teor de 7,5% não proporcionou diferenças significativas nos resultados de tensão na ruptura ($f_{C,RUP}$). Desta forma, as tensões de ruptura das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0 e P2G0,40V7,5 são consideradas estatisticamente iguais.

O reforço da pasta de referência com microfibras de volastonita foi ainda mais importante no incremento do módulo de elasticidade. Em relação à pasta P2G0,25, os reforços de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0% proporcionaram acréscimos no módulo de elasticidade, respectivamente iguais a, 8,5%, 10,8%, 19,2% e 24,6% (ver a Figura 168). De acordo com a análise estatística, apenas os módulos das pastas P2G0,25V2,5 e P2G0,30V5,0 não apresentaram diferenças significativas entre si.

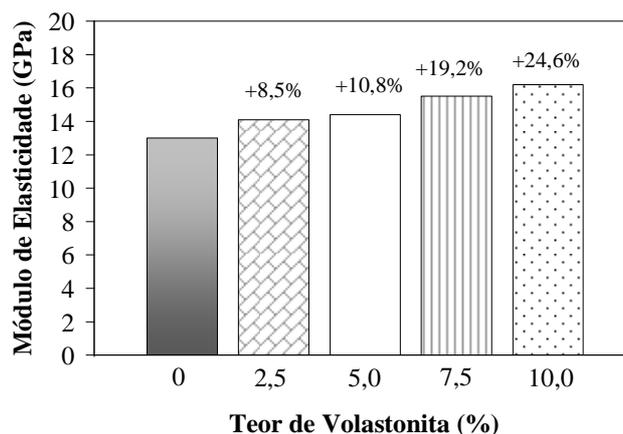


Figura 168 – Comparação entre os módulos de elasticidade das pastas com reforço de volastonita e a pasta de referência.

O reforço fibroso da pasta de referência com a microfibras de volastonita não proporcionou diferenças significativas nos coeficientes de Poisson entre as pastas avaliadas, com exceção das pastas P2G0,25V2,5 e P2G0,30V5,0.

A análise estatística das deformações axiais indicou que o reforço da pasta P2G0,25 com os diferentes teores de microfibras de volastonita não proporcionou diferenças significativas nos resultados desta propriedade. A mesma tendência foi observada para

as deformações laterais que, de acordo com a análise estatística, não apresentaram diferenças significativas ao nível de significância igual a 0,05.

Os benefícios proporcionados pelo uso da microfibras de volastonita estão em consonância com os resultados obtidos por HEINOLD *et al.* (2002) e HEINOLD *et al.* (2003). De acordo com os autores, a microfibras de volastonita reage quimicamente com a pasta de cimento beneficiando as propriedades mecânicas matriz. Isto ocorre porque a composição química da microfibras de volastonita é formada majoritariamente por óxido de cálcio (52,39%) e dióxido de silício (46,35%) (ver os resultados apresentados na Tabela 16). Além de um possível efeito químico, a microfibras de volastonita pode controlar a propagação das microfissuras, incrementando a resistência à compressão da mistura.

Os modos de ruptura das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V7,5 estão ilustrados na Figura 169, na Figura 170, na Figura 171, na Figura 172 e na Figura 173, respectivamente. As figuras ilustram que as pastas estudadas apresentaram modo de fratura frágil predominantemente colunar e cisalhado.



Figura 169 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25.



Figura 170 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25V2,5.



Figura 171 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30V5,0.

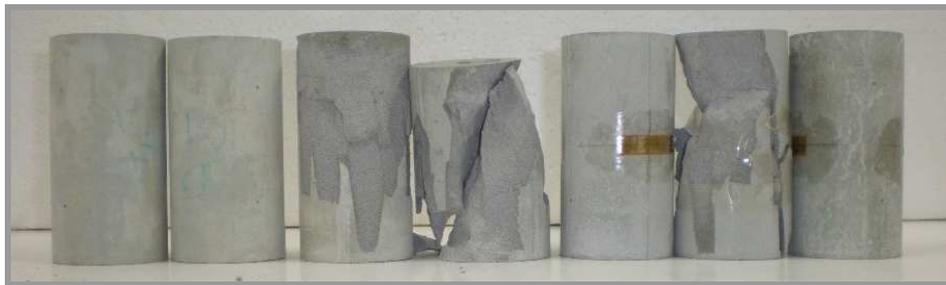


Figura 172 – Modo de ruptura da pasta P2G0,40V7,5.



Figura 173 – Modo de ruptura da pasta P2G0,40V10,0.

8.5.1.2 Pastas Reforçadas com PVA

As curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas P2G0,25, P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão apresentadas na Figura 174, enquanto as demais estão apresentadas no Anexo A3. Os valores médios de resistência à compressão de ruptura ($f_{C,RUP}$), deformação axial ($\epsilon_{A,RUP}$) e lateral ($\epsilon_{L,RUP}$) de ruptura, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 54. Os resultados apresentados na Tabela 54, referentes às pastas reforçadas com fibra de PVA, correspondem a média de sete corpos-de-prova, no entanto, a medição da deformação lateral só foi realizada em três corpos-de-prova.

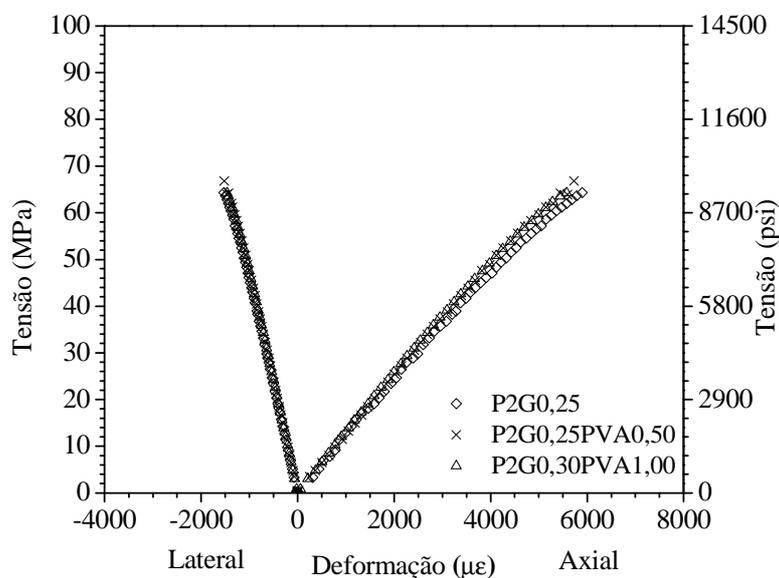


Figura 174 – Curvas típicas tensão x deformação das pastas reforçadas com PVA.

Os resultados de tensão de ruptura obtidos indicam tanto um pequeno acréscimo (menor que 1% para a mistura P2G0,25PVA0,50) quanto decréscimo (menor que 5% para a mistura P2G0,30PVA1,00) na quando a fibra de PVA foi utilizada como reforço. A análise estatística indicou que para os dois teores avaliados (0,50% e 1,00%) as diferenças não são significativas. Além, disso as pastas fibrosas e a referência também não apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, deformação axial e deformação lateral.

Tabela 54 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com PVA.

Pasta	$f_{c,RUP}$ - CV (MPa / psi - %)	E - CV (GPa / 1000psi)	$\epsilon_{A,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	$\epsilon_{L,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	ν - CV (%)
P2G0,25	68,6 / 9948 – 7,2	13,0 / 1884 – 4,3	6131 – 7,9	-1675 – 19,5	0,26 – 4,2
P2G0,25PVA0,50	69,1 / 10022 – 2,8	12,8 / 1856 – 2,1	6167 – 4,7	-1639 – 10,1	0,26 – 0,6
P2G0,30PVA1,00	65,9 / 9558 – 1,6	12,9 / 1871 – 1,4	5725 – 3,6	-1599 – 2,5	0,26 – 1,2

Os modos de ruptura das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão ilustrados na Figura 175 e na Figura 176, respectivamente. As pastas reforçadas com fibras de PVA tiveram modo de fratura dúctil dos tipos colunar e cisalhado.



Figura 175 – Modo de ruptura da pasta P2G0,25PVA0,50.



Figura 176 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PVA1,00.

8.5.1.3 Pastas Reforçadas com Polipropileno

As curvas típicas tensão *versus* deformação das pastas P2G0,25, P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75 estão apresentadas na Figura 177, enquanto as demais estão apresentadas no Anexo A3. Os valores médios de resistência à compressão de ruptura ($f_{C,RUP}$), deformação axial ($\epsilon_{A,RUP}$) e lateral ($\epsilon_{L,RUP}$) de ruptura, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 55. As propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 55 correspondem a média de sete corpos-de-prova, entretanto a medição de deformação lateral foi realizada em três corpos-de-prova.

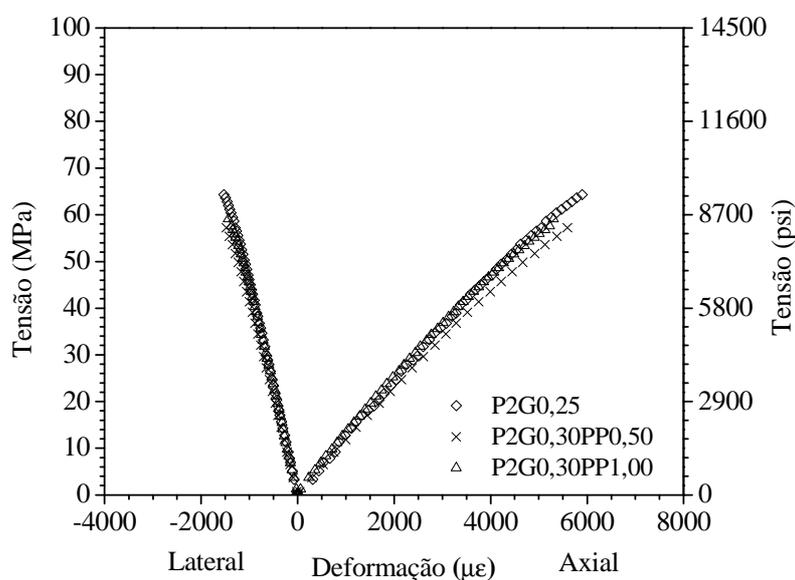


Figura 177 – Curvas típicas tensão \times deformação das pastas reforçadas com polipropileno.

Tabela 55 – Valores médios das propriedades mecânicas na compressão uniaxial das pastas reforçadas com polipropileno.

Pasta	$f_{c,RUP}$ - CV (MPa / psi - %)	E - CV (GPa / 1000psi)	$\epsilon_{A,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	$\epsilon_{L,RUP}$ - CV ($\mu\epsilon$ - %)	ν - CV (%)
P2G0,25	68,6 / 9948 – 7,2	13,0 / 1884 – 4,3	6131 – 7,9	-1675 – 19,5	0,26 – 4,2
P2G0,30PP0,50	56,9 / 8253 – 3,0	11,5 / 1668 – 4,3	5546 – 4,5	-1417 – 4,8	0,27 – 3,2
P2G0,30PP0,75	56,5 / 8195 – 3,6	12,2 / 1769 – 2,8	5201 – 5,3	-1374 – 4,4	0,26 – 3,2

Os resultados obtidos indicaram uma tendência de queda na resistência à compressão da pasta de referência com o uso do polipropileno como elemento de reforço. Por exemplo, as misturas reforçadas com 0,50% e 0,75% de polipropileno apresentaram resistências à compressão respectivamente 17,1% e 17,6% menores que a da pasta de referência. A análise estatística indicou que as diferenças são significativas.

O reforço com fibra de polipropileno nos teores de 0,50% e 0,75% provocou reduções no módulo de elasticidade, em relação ao valor da pasta P2G0,25, de respectivamente 11,5% e 6,2%. De acordo com a análise estatística essas reduções são consideradas significativas. As reduções nas tensões de ruptura e no módulo de elasticidade estão relacionadas com baixa rigidez e aderência desse tipo de reforço. Resultados similares foram obtidos por VELASCO (2002), que alcançou decréscimos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade de até, respectivamente, 9,18% (concreto com fração volumétrica de fibra de polipropileno de 0,25%) e 8,60% (concreto com fração volumétrica de fibra de polipropileno de 0,50%).

O uso de fibras de polipropileno não mudou de forma significativa o coeficiente de Poisson da pasta de referência. No entanto, o uso desta fibra nos teores de 0,50% e 0,75% proporcionou diferenças significativas na deformação axial da pasta de referência, que sofreu decréscimos respectivamente de 9,6% e 16,2%. As deformações laterais das pastas analisadas não apresentaram diferenças significativas entre si durante sua análise estatística.

Os modos de ruptura das pastas P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP1,00 estão ilustrados na Figura 178 e na Figura 179, respectivamente. Os modos de fratura das pastas reforçadas com fibras de PVA foram predominantemente do tipo colunar e cisalhado.



Figura 178 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PP0,50.



Figura 179 – Modo de ruptura da pasta P2G0,30PP0,75.

8.5.2 Comportamento sob Compressão Triaxial

Os resultados de tensões desviatórias ($\sigma_1 - \sigma_3$ últimas) das pastas P2G0,25, P2G0,30V5,0, P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PP0,50 estão apresentados na Tabela 22. Os resultados de tensão desviatória referentes à $\sigma_3 = 0$ MPa são aqueles obtidos durante os ensaios de compressão uniaxial. Os resultados correspondem à média de quatro corpos-de-prova por mistura. As curvas tensão *versus* deformação obtidas durante os ensaios de compressão triaxial das pastas P2G0,25, P2G0,30V5,0, P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PP0,50 estão apresentadas no Anexo A4.

Tabela 56 – Tensões desviatórias das pastas fibrosas a da referência.

Pasta	σ_3 (MPa - psi)	σ_d (MPa - psi)	CV (%)
P2G0,25	0	68,6 – 9948	7,2
	4 – 580	78,8 – 11433	2,9
	8 – 1160	79,3 – 11508	1,2
P2G0,30V5,0	0	71,6 – 10385	6,6
	2 - 290	78,1 - 11323	1,5
	4 – 580	80,5 – 11676	3,4
	8 – 1160	88,7 – 12870	1,2
P2G0,25PVA0,50	0	69,1 – 10022	2,8
	4 – 580	76,9 – 11156	1,3
	8 – 1160	80,9 – 11737	0,8
P2G0,30PP0,50	0	56,9 – 8253	3,0
	2 - 290	58,5 – 8480*	2,3
	4 – 580	67,0 – 9722	2,3
	8 – 1160	77,9 – 11295	1,2

*Valor referente à média de três corpos-de-prova.

Os resultados indicaram que todas as pastas apresentaram acréscimos na tensão desviatória com o aumento da tensão de confinamento.

O critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* das pastas P2G0,25 está apresentado na Figura 180, onde é possível observar o aumento da tensão desviatória com a tensão de confinamento. Esta pasta apresentou um acréscimo na tensão desviatória de aproximadamente 15% quando submetida às tensões de confinamento iguais a 4 MPa e 8 MPa. De acordo com a análise estatística, as tensões desviatórias dos ensaios submetidos às tensões de confinamento entre 4 MPa e 8 MPa não apresentaram diferenças significativas. A coesão e o ângulo de atrito desta pasta foram respectivamente iguais a 22,3 MPa e 24,7°.

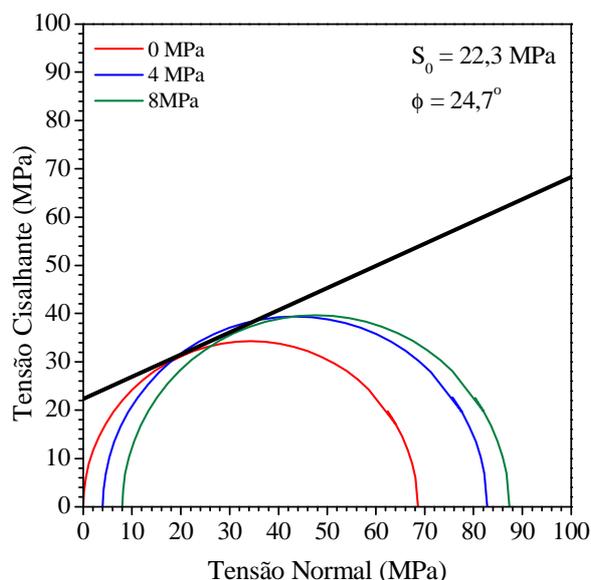


Figura 180 – Critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,25.

O critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,30V5,0 está apresentado na Figura 181. O confinamento desta pasta com tensões de 2 MPa, 4 MPa e 8 MPa proporcionou acréscimos na tensão desviatória. Tal fato foi confirmado pela análise estatística, que indicou diferenças significativas nos resultados das tensões desviatórias para as tensões de confinamento aplicadas (0, 2, 4 e 8 MPa). Os acréscimos na tensão desviatória foram iguais a: 9,1% ($\sigma_3 = 2$ MPa), 12,4% ($\sigma_3 = 4$ MPa) e 23,9% ($\sigma_3 = 8$ MPa).

MPa). A pasta P2G0,30V5,0 apresentou uma coesão de 20,5 MPa e um ângulo de atrito igual a 31,1°.

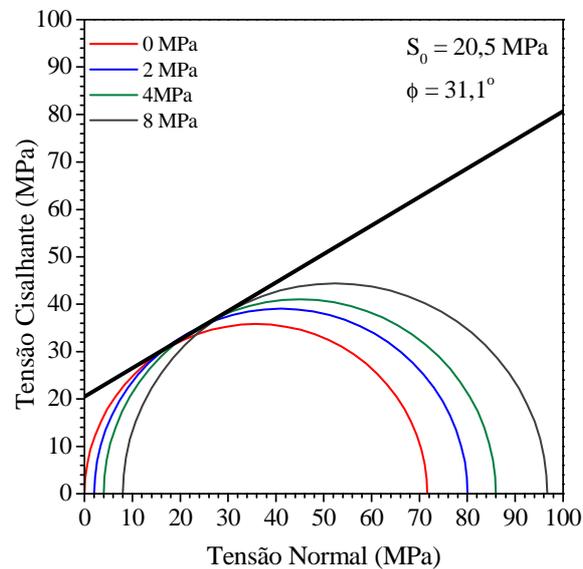


Figura 181 – Critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,30V5,0.

O critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,25PVA0,50 está apresentado na Figura 182. O aumento da tensão de confinamento proporcionou acréscimos na tensão desviatória desta pasta, cujos resultados foram significativamente diferentes de acordo com a análise estatística. As tensões desviatórias da pasta P2G0,25PVA0,50 para os ensaios sob tensões de confinamento iguais a 4 MPa e 8 MPa foram 11,3% e 17,1% superiores ao valor desta propriedade no ensaio sem confinamento. A coesão e o ângulo de atrito da pasta P2G0,25PVA0,50 foram respectivamente iguais a 21,9 MPa e 25,5°.

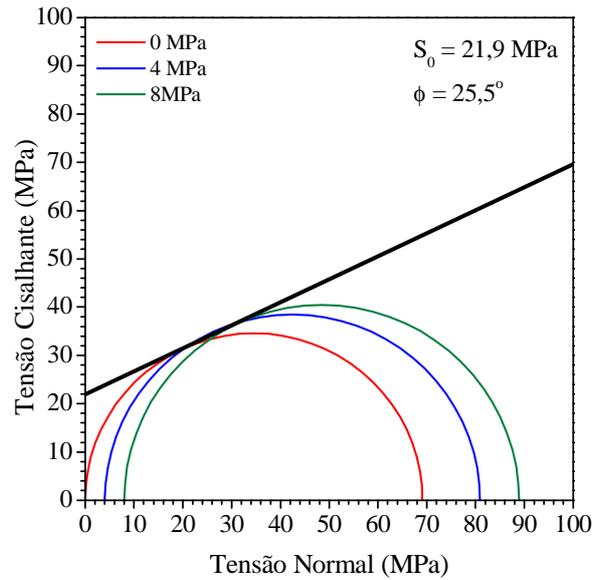


Figura 182 – Critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,25PVA0,50.

O critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,30PP0,50 está apresentado na Figura 183. Para esta pasta o confinamento só proporcionou acréscimos significativos nos ensaios realizados com tensões de confinamento iguais a 4 e 8 MPa, de acordo com a análise estatística. Assim, o confinamento proporcionou acréscimos na tensão desviatória desta pasta de 17,8% ($\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$) e 36,9% ($\sigma_3 = 8 \text{ MPa}$). A pasta P2G0,30PP0,50 apresentou uma coesão de 14,6 MPa e um ângulo de atrito igual a 34,9°.

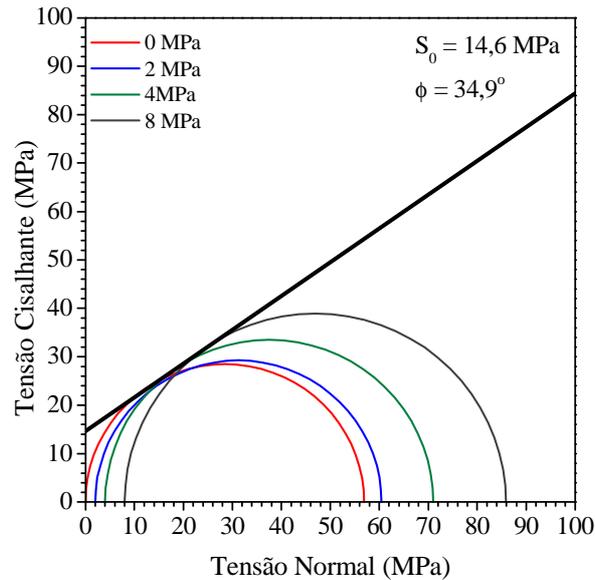


Figura 183 – Critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* da pasta P2G0,30PP0,50.

A Figura 184a e a Figura 184b mostram as comparações entre as coesões e os ângulos de atrito das pastas estudadas. Os resultados indicam que houve decréscimo na coesão e acréscimo no ângulo de atrito das pastas com o uso de reforço fibroso para as três fibras estudadas. O incremento da coesão e o decréscimo do ângulo de atrito foram mais expressivos para a pasta reforçada com fibra de polipropileno e menos significativos para a pasta reforçada com fibra de volastonita. Cabe ressaltar que as fibras usadas apresentam características diferentes e que a fibra de volastonita não foi empregada como reforço com a mesma fração volumétrica das demais fibras.

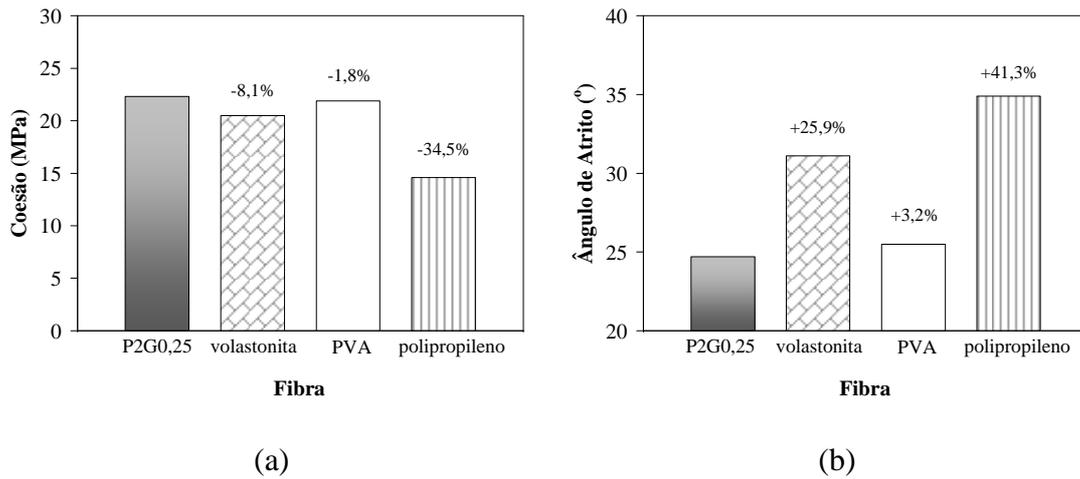


Figura 184 – Comparação entre propriedades das pastas fibrosas obtidas no ensaio triaxial com a pasta de referência: (a) Coesão; (b) Ângulo de atrito.

Os modos de ruptura da pasta P2G0,25 ensaiada sob as tensões de confinamento iguais a 4 MPa e 8 MPa estão apresentados na Figura 185. A pasta de referência apresentou modo de fratura frágil dos tipos cônico e cisalhado.

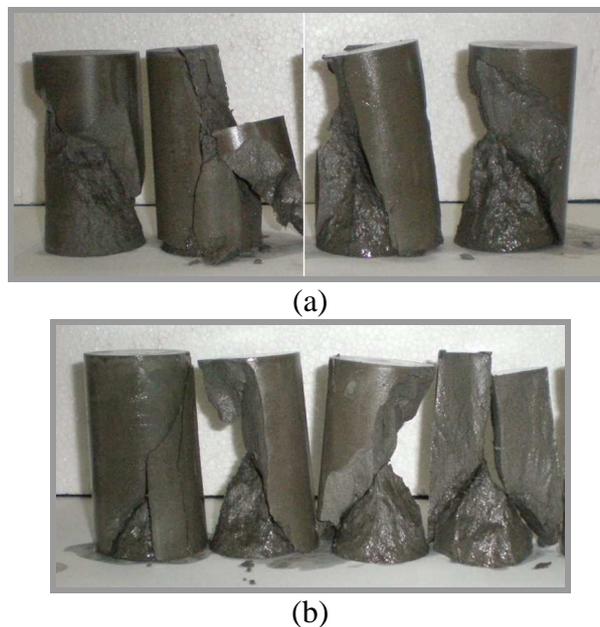


Figura 185 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,25: (a) $\sigma_3 = 4$ MPa; (b) $\sigma_3 = 8$ MPa.

Os modos de ruptura da pasta P2G0,30V5,0 ensaiada sob as tensões de confinamento iguais a 2, 4 e 8 MPa estão apresentados na Figura 186. Esta pasta apresentou modo de fratura frágil do tipo cisalhada.



(a)



(b)



(c)

Figura 186 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,30V5,0:

(a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 4\text{MPa}$; (c) $\sigma_3 = 8\text{MPa}$.

Os modos de ruptura da pasta P2G0,25PVA0,50 ensaiada sob as tensões de confinamento iguais a 4 e 8 MPa estão apresentados na Figura 187. Esta pasta apresentou modo de fratura dúctil do tipo cisalhada.



(a)



(b)

Figura 187 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,25PVA0,50:
(a) $\sigma_3 = 4\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 8\text{MPa}$.

Os modos de ruptura da pasta P2G0,30PP0,50 ensaiada sob as tensões de confinamento iguais a 4 e 8 MPa estão apresentados na Figura 188. Esta pasta apresentou modo de fratura dúctil do tipo colunar.



(a)



(b)



(c)

Figura 188 – Modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta leve P2G0,30PP0,50:
(a) $\sigma_3 = 2\text{MPa}$; (b) $\sigma_3 = 4\text{MPa}$; (c) $\sigma_3 = 8\text{MPa}$.

8.5.3 Comportamento sob Tração por Compressão Diametral

8.5.3.1 Pastas Reforçadas com Volastonita

Os resultados médios de carga de ruptura e resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência e das pastas reforçadas com microfibras de volastonita e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 57. Os valores médios foram calculados a partir de resultados de 15 amostras para cada pasta.

Tabela 57 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência e das pastas reforçadas com volastonita.

Pasta	$F_r - CV$ (kN - %)	$f_{TCD} - CV$ (MPa/psi - %)
P2G0,25	8,6 – 7,0	4,3/624 – 6,3
P2G0,25V2,5	9,5 – 8,2	4,8/696 – 8,8
P2G0,30V5,0	12,5 – 8,3	6,2/899 – 7,9
P2G0,40V7,5	13,7 – 4,6	6,9/1001 – 5,5
P2G0,40V10,0	15,2 – 10,0	7,5/1088 – 10,0

A Figura 189 mostra a variação da resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com o teor da microfibras de volastonita. O reforço da pasta de referência com uma fração volumétrica da microfibras de volastonita igual a 2,5% não proporcionou alteração significativa em sua resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a análise estatística. No entanto, o emprego das frações volumétricas desta fibra iguais a 5,0%, 7,5% e 10,0% como reforço promoveu acréscimos significativos nesta propriedade. Tal fato foi apontado pela análise estatística entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas P2G0,25, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V10,0, onde os resultados apresentaram diferenças significativas entre si. Neste caso, os incrementos da resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência com o reforço fibroso foram iguais a: 45,4% (P2G0,30V5,0), 60,8% (P2G0,40V7,5) e 76,0% (P2G0,40V10,0). Estes resultados estão em consonância com os valores de resistência à compressão, em que

houve acréscimo na resistência da pasta com o reforço fibroso. A relação f_{TCD}/f_c sofreu acréscimos iguais a 6,3% (P2G0,25), 6,9% (P2G0,25V2,5), 8,7% (P2G0,30V5,0), 9,3% (P2G0,40V7,5) e 9,5% (P2G0,40V10,0). O aumento da relação f_{TCD}/f_c com o teor de fibra indica que a resistência à tração por compressão diametral sofreu maiores acréscimos do que a resistência à compressão uniaxial.

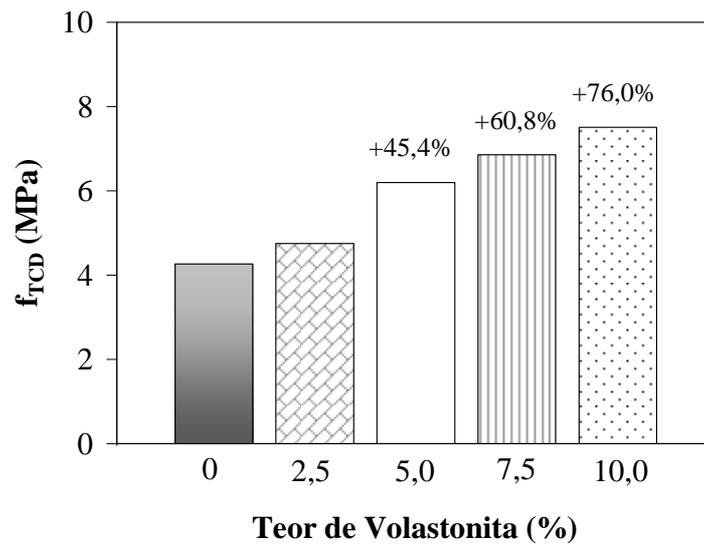


Figura 189 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com volastonita com a pasta de referência.

8.5.3.2 Pastas Reforçadas com PVA

Os resultados médios de carga de ruptura e resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência e das pastas reforçadas com fibra de PVA e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 58. Os valores referentes à carga de primeira fissura a à máxima carga após a primeira fissura da Tabela 58 consistem em médias de 15 resultados por mistura.

Tabela 58 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com PVA.

Pasta	Primeira Fissura		Pós-fissuração	
	Carga – CV (kN - %)	$f_{TCD-1}^a - CV$ (MPa/psi - %)	Carga – CV (kN - %)	$f_{TCDPF} - CV$ (MPa/psi - %)
P2G0,25	8,6 – 7,0	4,3/624 – 6,3	-	-
P2G0,25PVA0,50	8,4 – 9,0	4,2/609 – 8,9	9,5 – 15,0	4,7/682 – 15,0
P2G0,30PVA1,00	9,1 – 10,1	4,5/653 – 10,0	12,3 – 14,8	6,1/885 – 14,8

O reforço fibroso com a fibra de PVA não promoveu alteração na resistência à tração por compressão diametral calculada a partir da carga de primeira fissura. Tal fato foi indicado pela análise estatística entre os resultados das pastas fibrosas (P2G0,25PVA0,50 e P2G0,25PVA1,00) e da pasta de referência (P2G0,25), cujos resultados não apresentaram diferença estatística significativa.

No entanto, ambas as pastas reforçadas com fibras de PVA mostraram incrementos em suas resistências à tração por compressão diametral máximas após o surgimento da primeira fissura (Figura 190). A análise estatística entre os resultados desta propriedade apresentados pela pasta P2G0,25PVA0,50 apontou diferenças significativas entre os valores obtidos na primeira fissura e aqueles alcançados pós-fissuração. Neste caso, o incremento na resistência à tração por compressão diametral proporcionado pela fibra pós-fissuração foi de 12,3%. Em relação à pasta reforçada com uma fração volumétrica de fibra de PVA igual a 1,00% (P2G0,30PVA1,00), o benefício na resistência à tração por compressão diametral ainda foi superior ao alcançado pela pasta P2G0,25PVA0,50. A análise estatística entre os resultados apontou diferenças significativas entre os valores determinados a partir da carga de primeira fissura e aqueles calculados pós-fissuração. Sendo que a resistência à tração por compressão diametral máxima após a primeira fissura desta pasta foi de 6,1 MPa, valor este 35,5% ao alcançado por esta pasta na primeira fissura.

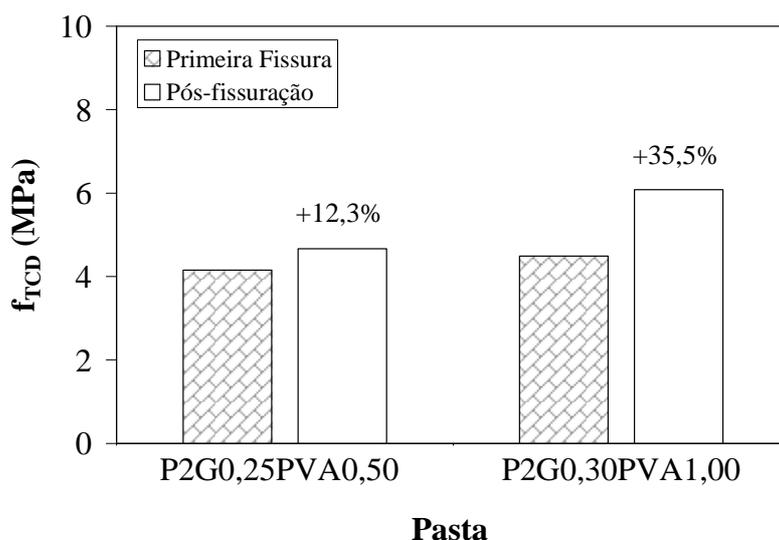


Figura 190 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com PVA.

8.5.3.3 Pastas Reforçadas com Polipropileno

Os resultados médios de carga de ruptura e resistência à tração por compressão diametral da pasta de referência e das pastas reforçadas com fibra de polipropileno e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 59. Os resultados médios apresentados na Tabela 58 foram determinados a partir de resultados de 15 amostras por mistura.

Tabela 59 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral das pastas reforçadas com polipropileno.

Pasta	Primeira Fissura		Pós-fissuração	
	Carga – CV (kN - %)	$f_{TCD-1}^a - CV$ (MPa/psi - %)	Carga – CV (kN - %)	$F_{TCDPF} - CV$ (MPa/psi - %)
P2G0,25	8,6 – 7,0	4,3/624 – 6,3	-	-
P2G0,25PVA0,50	7,3 – 6,2	3,6/522 – 6,6	9,4 – 20,0	4,6/667 – 19,9
P2G0,30PVA1,00	6,4 – 8,9	3,2/464 – 7,4	10,8 – 13,6	5,4/783 – 14,4

O reforço fibroso com fibra de polipropileno promoveu um decréscimo na resistência à tração por compressão diametral calculada com a carga de primeira fissura, que está ilustrado na Figura 191a. A análise estatística dos resultados referentes às pastas reforçadas com fibras de polipropileno e a pasta de referência apontou diferenças significativas entre os valores das três misturas. Neste caso, o reforço fibroso com fibras de polipropileno proporcionou decréscimos nesta propriedade iguais a: 16,3% (P2G0,30PP0,50) e 25,6% (P2G0,30PP0,75).

Entretanto, ao avaliar as resistências à tração por compressão diametral calculadas a partir das cargas máximas pós-fissuração, verificou-se que, de forma similar ao ocorrido com as pastas reforçadas com fibras de PVA, o reforço fibroso com polipropileno proporcionou benefícios na resistência das pastas após a abertura da primeira fissura (Figura 191b). Esta tendência foi confirmada pela análise estatística dos resultados, em que tanto para a pasta P2G0,25PVA0,50 quanto para a pasta P2G0,30PVA1,00, os valores de resistências referentes às cargas de primeira fissura e máxima pós-fissuração apresentaram diferenças significativas. Neste caso, os acréscimos de resistências das pastas após a abertura da primeira fissura foram iguais a: 27,9% (P2G0,25PVA0,50) e 68,5% (P2G0,30PVA1,00).

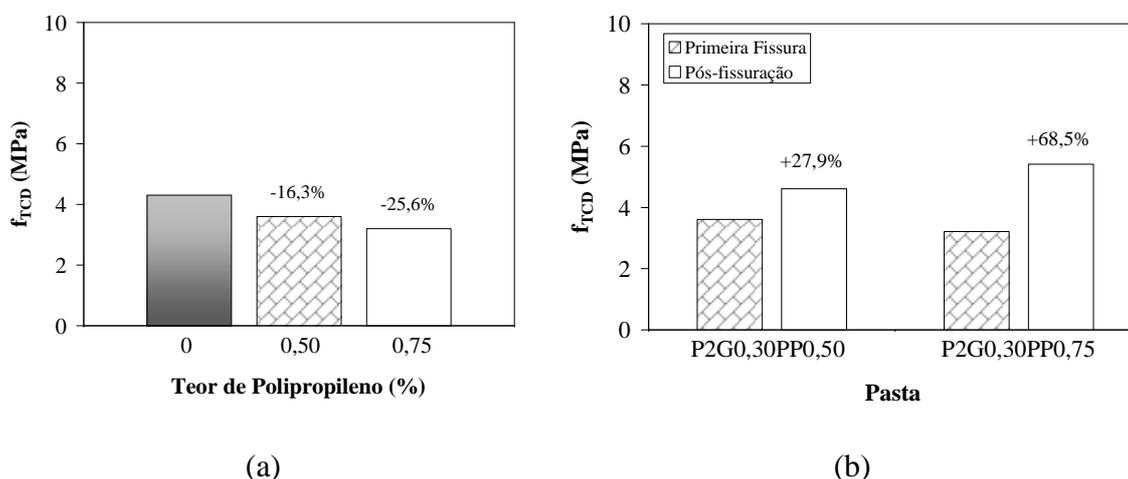


Figura 191 – Comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral: (a) Pastas reforçadas com polipropileno em relação à pasta de referência; (b) Valores das resistências das pastas fibrosas relativas à primeira fissura e pós-fissuração.

8.5.4 Comportamento sob Tração na Flexão

8.5.4.1 Pastas Reforçadas com Volastonita

As curvas típicas carga *versus* deslocamento das pastas P2G0,25, P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V10,0 estão apresentadas na Figura 192. As demais curvas são mostradas no Anexo A5. As pastas avaliadas apresentaram comportamento frágil, por isso as cargas de primeira fissura coincidiram com as cargas de ruptura. Os resultados médios da carga de ruptura, o módulo de ruptura ($f_{F_1^a F}$) e deslocamento ($\delta_1^a F$) referentes à carga de ruptura estão apresentados na Tabela 60. As propriedades mostradas na Tabela 60 correspondem a média de cinco resultados, para as pastas P2G0,25V2,5 e P2G0,40V7,5 e, de quatro resultados, para as pastas P2G0,30V5,0 e P2G0,40V10,0.

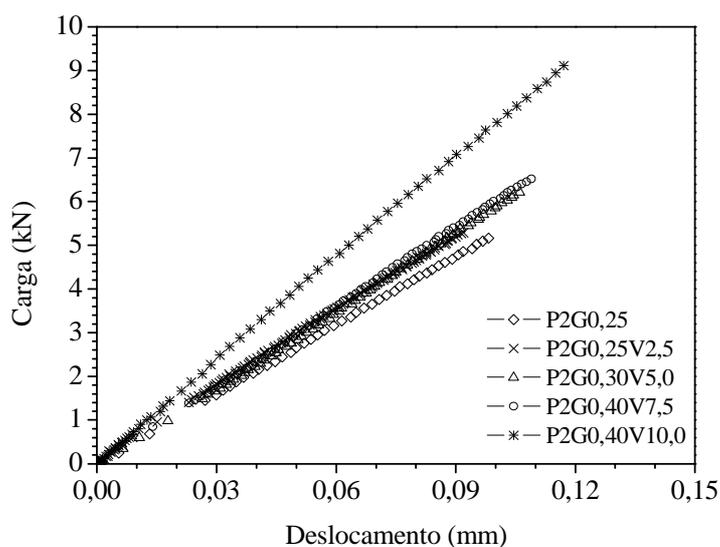


Figura 192 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25 e das pastas reforçadas com microfibras de volastonita.

Tabela 60 – Resultados de resistência à tração na flexão da pasta de referência e das pastas reforçadas com volastonita.

Pasta	Carga – CV (kN - %)	$f_{F_1 F}^a$ - CV (MPa - %)	$\delta_{1 F}^a$ - CV (mm - %)
P2G0,25	5,2 – 3,6	7,5 – 3,6	0,0949 – 7,5
P2G0,25V2,5	5,7 – 4,1	8,2 – 4,1	0,0927 – 3,5
P2G0,30V5,0	6,5 – 6,8	9,3 – 6,7	0,1070 – 2,1
P2G0,40V7,5	6,2 – 6,2	8,9 – 6,2	0,1033 – 7,6
P2G0,40V10,0	9,1 – 8,6	13,1 – 8,6	0,1216 – 7,2

Os resultados indicaram acréscimos na carga e no módulo de ruptura variando de 9% a 75% com o uso da fibra de volastonita, sendo mais expressivo para o teor de 10,0%.

A análise estatística indicou que a utilização do teor de 2,5% de volastonita não proporcionou diferença significativa nesta propriedade. No entanto, os reforços fibrosos com teores iguais a 5,0%, 7,5% e 10,0% proporcionaram alterações significativas na resistência à tração na flexão de ruptura em relação à pasta de referência (Figura 193).

A pasta de referência e a pasta reforçada 2,5% de volastonita não apresentaram diferença estatística significativa no deslocamento de ruptura. Acréscimos no deslocamento de ruptura da pasta de referência variando de 12,8% (P2G0,30V5,0) a 28,1% (P2G0,40V10,0) foram observados no presente estudo.

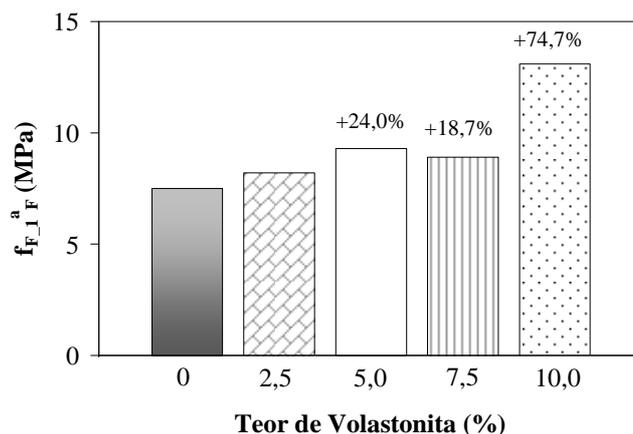


Figura 193 – Comparação entre as propriedades relativas à ruptura: (a) Resistência à tração na flexão; (b) Deslocamentos das pastas.

Os modos de ruptura dos corpos-de-prova da pasta P2G0,25 estão ilustrados na Figura 131. Os corpos-de-prova da pasta de referência (P2G0,25) sofreram ruptura do tipo frágil com a abertura de apenas uma fissura ao longo da seção transversal dos prismas.

A Figura 195a, a Figura 195b, a Figura 196a e Figura 196b mostram as faces tracionadas dos prismas das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V10,0, respectivamente. O reforço da pasta de referência com a microfibras de volastonita nos diferentes teores avaliados não proporcionou alteração no modo de ruptura da matriz.



(a)



(b)

Figura 194 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas da pasta P2G0,25: (a) corpos-de-prova CP1, CP2 e CP3; (b) corpos-de-prova CP4, CP5, CP6 e CP7.



(a)



(b)

Figura 195 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,25V2,5; (b) Pasta P2G0,30V5,0.



(a)



(b)

Figura 196 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,40V7,5; (b) Pasta P2G0,40V10,0.

8.5.4.2 Pastas Reforçadas com PVA

As curvas típicas carga *versus* deslocamento das pastas P2G0,25, P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão apresentadas na Figura 197. As demais estão apresentadas no Anexo A5. Os resultados médios de carga de primeira fissura, resistência à tração na flexão, deslocamentos referentes à carga de primeira fissura e máxima carga pós-fissuração e máxima tensão pós-fissuração estão apresentados na Tabela 61. Os resultados correspondem a média de quatro corpos-de-prova por mistura.

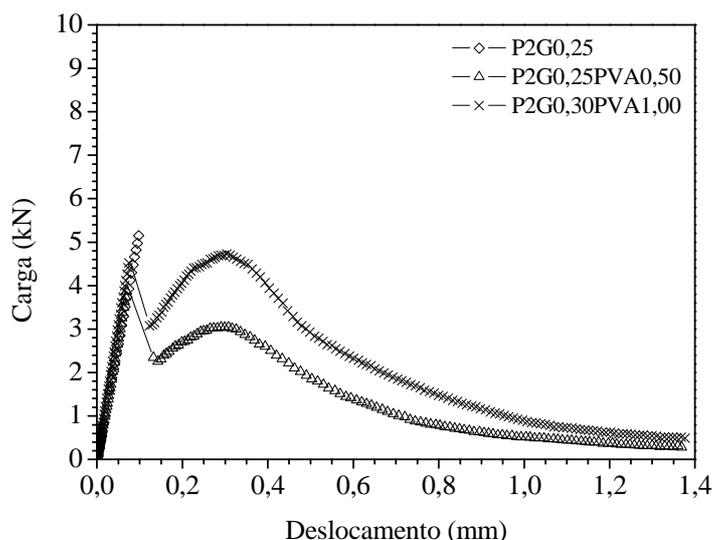


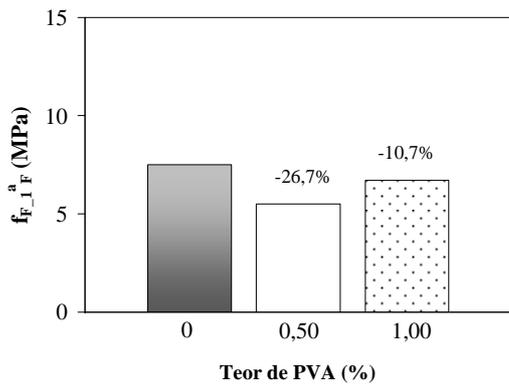
Figura 197 – Curvas força x deslocamento das pastas reforçadas com fibra de PVA.

Tabela 61 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas reforçadas com PVA.

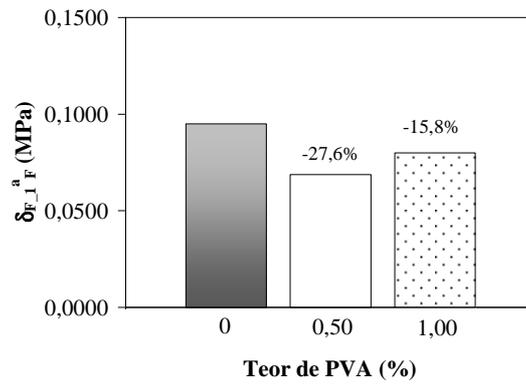
Teor de Fibra (%)	Primeira Fissura			Pós-fissuração		
	Carga – CV (kN - %)	$f_{F_1}^a - CV$ (MPa - %)	$\delta_{1F}^a - CV$ (mm - %)	Carga – CV (kN - %)	$f_{F_{PF}} - CV$ (MPa - %)	$\delta_{PF} - CV$ (mm - %)
0	5,2 – 3,6	7,5 – 3,6	0,0949 – 7,5	-	-	-
0,50	3,8 – 4,1*	5,5 – 4,1	0,0687 – 10,3	2,9 – 8,2	4,2 – 8,2	0,3018 – 11,4
1,00	4,6 – 6,1	6,7 – 6,1	0,0799 – 7,9	4,5 – 4,9	6,4 – 4,9	0,2780 – 7,0

Os resultados indicaram que a tensão de primeira fissura diminuiu com o uso de fibra em 26,7% para a pasta P2G0,25PVA0,50 e 10,7% para a pasta P2G0,30PVA1,00 (ver a Figura 198a). Estatisticamente as diferenças, nesta propriedade, foram consideradas significativas. Máximas tensões de pós-fissuração de até 6,4 MPa (aproximadamente 97% de tensão de primeira fissura) foram observadas com a adição de 1,00% de fibra de PVA.

Em relação ao deslocamento de primeira fissura foi observado o mesmo comportamento, ou seja, o uso de fibra proporcionou reduções de 27,6% para a pasta P2G0,25PVA0,50 e 15,8% para a pasta P2G0,30PVA1,00 (ver a Figura 198b). As diferenças nesta propriedade foram consideradas significativas pela análise estatística.



(a)



(b)

Figura 198 – Comparação entre as propriedades relativas à primeira fissura: (a) Resistência à tração na flexão; (b) Deslocamentos.

Os modos de ruptura das faces tracionadas dos prismas das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão mostrados, respectivamente, na Figura 199a e Figura 199b. Neste caso, a forma de ruptura foi do tipo dúctil, mas houve a abertura de uma única fissura visível.



(a)



(b)

Figura 199 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,25PVA0,50; (b) Pasta P2G0,30PVA1,00.

8.5.4.3 Pastas Reforçadas com Polipropileno

As curvas típicas força *versus* deslocamento das pastas P2G0,25, P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75 estão apresentadas na Figura 200. As demais curvas estão mostradas no Anexo A5. Os resultados médios de carga, módulo de ruptura e deslocamento referentes à carga de primeira fissura e referentes à máxima carga pós-fissuração estão apresentados na Tabela 62. Os resultados correspondem a média de cinco corpos-de-prova por pasta.

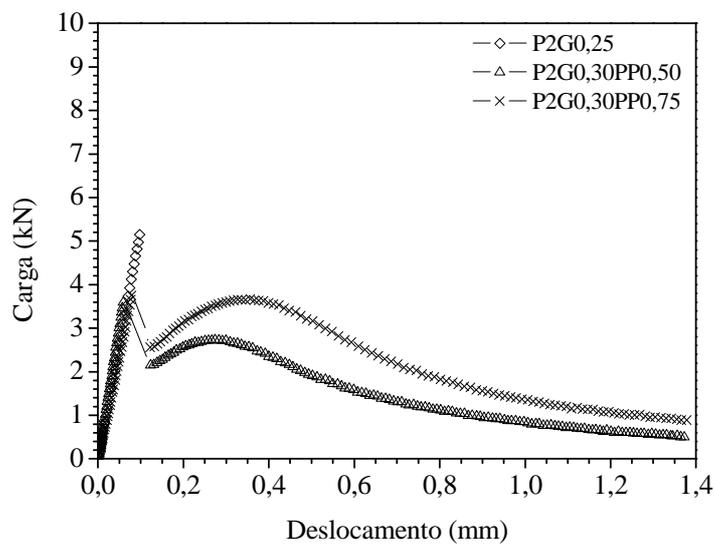


Figura 200 – Curvas carga x deslocamento das pastas reforçadas com fibra de polipropileno.

Tabela 62 – Resultados de resistência à tração na flexão das pastas reforçadas com polipropileno.

Teor de Fibra (%)	Primeira Fissura			Pós-fissuração		
	Carga – CV (kN - %)	$f_{F,1}^a$ – CV (MPa - %)	δ_{1F}^a – CV (mm - %)	Carga – CV (kN - %)	f_{F_PF} – CV (MPa - %)	δ_{PF} – CV (mm - %)
0	5,2 – 3,6	7,5 – 3,6	0,0949 – 7,5	-	-	-
0,50	3,6 – 1,4	5,2 – 1,4	0,0659 – 11,6	2,7 – 9,5	3,8 – 9,5	0,2952 – 9,5
0,75	3,6 – 6,2*	5,2 – 6,2	0,0755 – 10,8	3,7 – 7,7	5,3 – 7,7	0,3332 – 7,6

Os resultados indicaram a redução da tensão de primeira fissura com o uso da fibra de polipropileno de 30,7%. A análise estatística indicou diferença significativa desta propriedade entre as pastas fibrosas e a pasta de referência. A adição de 0,75% de fibra de polipropileno permitiu à pasta alcançar uma máxima tensão de pós-fissuração igual ao resultado referente à carga de primeira fissura.

O deslocamento de primeira fissura também sofreu decréscimo com o uso de fibras, cuja redução foi em torno de 25%. A análise estatística indicou diferença significativa no deslocamento da pasta de referência com o uso de fibras.

Os modos de ruptura das faces tracionadas dos prismas das pastas reforçadas com fibra de polipropileno estão mostrados na Figura 201a (P2G0,30PP0,50) e Figura 201b (P2G0,30PP0,75) e, as pastas reforçadas com fibra de polipropileno apresentaram modo de fratura similar ao mostrado pelas pastas reforçadas pela fibra de PVA.

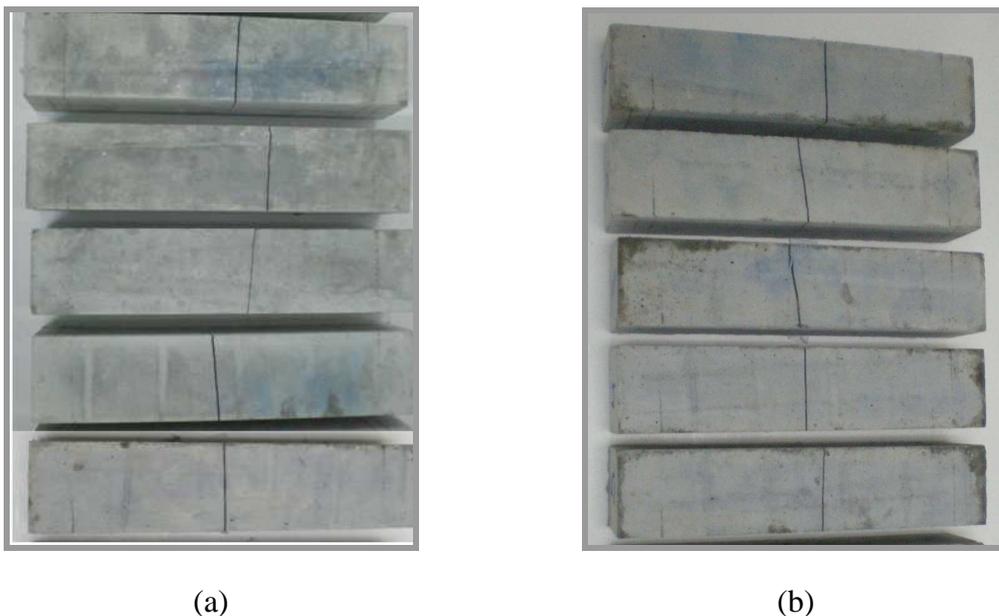


Figura 201 – Modos de fratura das faces tracionadas dos prismas: (a) Pasta P2G0,30PP0,50; (b) Pasta P2G0,30PP0,75.

8.5.4.4 Índices de Tenacidade

Apresenta-se a seguir os índices de tenacidade das pastas fibrosas determinados segundo as normas JCSE SF4 e ASTM C1018.

8.5.4.4.1 Norma Japonesa JCSE SF4

Os valores médios de tenacidade calculados de acordo com a norma japonesa JCI-JSCE SF-4 (1983) e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 63. Neste trabalho, os fatores de tenacidade FT180 e FT150 foram calculados para deslocamentos iguais a 1,0 mm e 1,2 mm, respectivamente.

Tabela 63 – Valores médios de tenacidade de acordo com a norma japonesa.

Pasta	Deslocamento de 1,0 mm			Deslocamento de 1,2 mm		
	Tenacidade (kN.mm)	FT180 (MPa)	CV (%)	Tenacidade (kN.mm)	FT150 (MPa)	CV (%)
P2G0,25PVA0,50	1,82	2,62	12,7	1,94	2,33	14,0
P2G0,30PVA1,00	2,47	3,56	8,6	2,62	3,14	8,6
P2G0,30PP0,50	1,90	2,74	9,2	2,08	2,49	10,1
P2G0,30PP0,75	2,59	3,73	5,0	2,82	3,39	4,7

Os fatores de tenacidade à flexão, ou resistência à flexão equivalente, indicam a resistência residual equivalente pós-fissuração do concreto quando ainda sob cargas a uma deflexão determinada (BANTHIA e TROTTIER, 1995, *apud* VELASCO, 2008).

A Figura 202a ilustra os fatores de tenacidade das pastas reforçadas com fibras de PVA para as deflexões iguais a 1,0 mm (FT180) e 1,2 mm (FT150) e, mostra que, a pasta que apresentou a maior capacidade de suporte de cargas durante sua deformação foi a P2G0,30PVA1,00. A análise estatística indicou diferença significativa nos resultados com a variação do teor de reforço, para os dois níveis de deflexão analisados. Neste caso, para as deflexões de 1,0 mm e 1,2 mm, a pasta P2G0,30PVA1,00 apresentou fatores de tenacidade (FT180 e FT150) 36% superiores aos valores da pasta P2G0,25PVA0,50.

A Figura 202b apresenta os fatores de tenacidade das pastas reforçadas com fibras de polipropileno (FT180 e FT150). De forma similar ao ocorrido entre as pastas reforçadas com fibras de PVA, a pasta que apresentou a maior capacidade de suporte de cargas

durante sua deformação foi a P2G0,30PP0,75. A análise estatística indicou diferença significativa nos resultados, para cada nível de deflexão estudado. Neste caso, tanto para a deflexão igual a 1,0 mm quanto para a deflexão de 1,2 mm, a pasta P2G0,30PP0,75 apresentou fatores de tenacidades 36,1% superiores aos apresentados pela pasta P2G0,30PP0,50.

Os valores do fator de tenacidade das pastas reforçadas com a mesma fração volumétrica (0,50%) não apresentou diferença estatística significativa, para cada nível de deflexão estudados. O mesmo comportamento foi verificado ao analisar os resultados das pastas reforçadas com 0,75% de fibra de polipropileno e 1,00% de fibra de PVA, que foram não foram considerados significativamente diferentes.

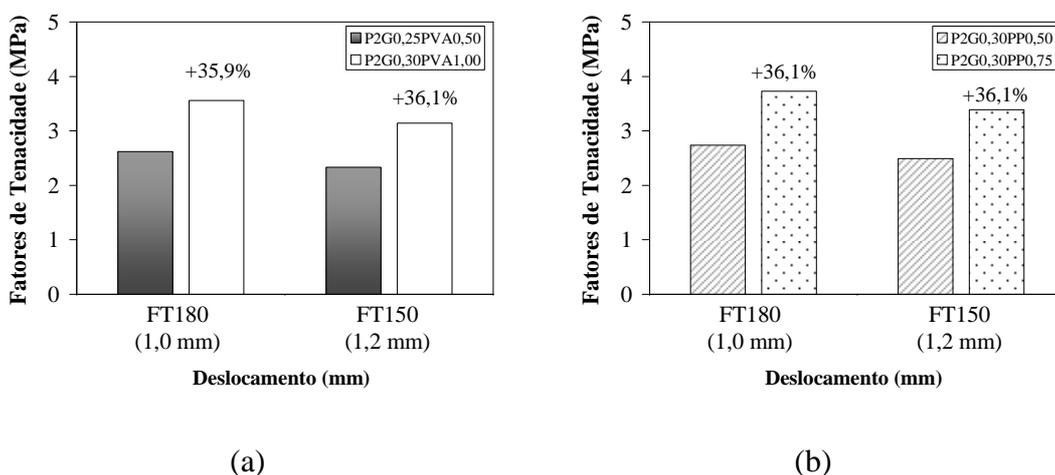


Figura 202 – Índices de tenacidade segundo a norma japonesa: (a) Pastas reforçadas com PVA; (b) Pastas reforçadas com polipropileno.

8.5.4.4.2 Norma ASTM C1018

Os índices de tenacidades (I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30}), calculados de acordo com a norma ASTM C1018 (1992), são assumidos como sendo capazes de indicar a tenacidade relativa da mistura em determinadas flexões. Além disso, estes índices também apontam a forma da curva carga versus deslocamento pós-fissuração. Os índices (I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30}) apresentam um valor mínimo de 1, para um comportamento elástico/ frágil, e valores respectivamente iguais a 5, 10, 20, 30, para comportamentos elasto-plástico ideais (TOLÊDO FILHO, 1997).

Os índices de tenacidades médios das pastas reforçadas com fibras de PVA e de polipropileno e seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 64. A Figura 203 ilustra o comportamento das pastas fibrosas nos níveis de deflexão determinados. As linhas horizontais traçadas na Figura 203 indicam os limites a partir dos quais as pastas apresentariam o comportamento de elasto-plástico perfeito. Todas as pastas avaliadas indicaram o comportamento de amolecimento, que foi mais pronunciado a partir do índice I_{20} , conforme pode ser observado na Figura 203.

De maneira global todas as pastas se mostraram próximas do comportamento ideal até o deslocamento equivalentes à 5,5 vezes o deslocamento referente à primeira fissura.

Os resultados indicaram que até os deslocamentos iguais a 0,24 mm (I_5) e 0,43 mm (I_{10}) as pastas P2G0,30PVA1,00 e P2G0,30PP0,75 se mostraram mais próximas do comportamento ideal. No entanto, para o deslocamento igual a 0,79 mm (I_{20}) apenas a pasta P2G0,30PP0,75 apresentou comportamento próximo ao elasto-plástico. Adicionalmente, para os deslocamentos entre 1,02 e 1,23 mm (I_{30}) todas as pastas se afastaram mais do comportamento elasto-plástico ideal, indicando comportamento de amolecimento, que pode ser observado na Figura 197 e na Figura 200.

Tabela 64 – Valores médios de tenacidade de acordo com a norma ASTM C1018 e de seus respectivos coeficientes de variação.

Pasta	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
P2G0,25PVA0,50	3,75 – 2,0	7,35 – 3,3	12,0 – 11,3	14,4 – 17,1
P2G0,30PVA1,00	4,24 – 2,5	8,47 – 8,1	12,5 – 13,0	14,3 – 13,8
P2G0,30PP0,50	3,76 – 3,3	7,35 – 5,0	12,99 – 5,6	16,44 – 8,1
P2G0,30PP0,75	4,37 – 4,2	9,44 – 6,9	17,16 – 11,4	21,30 – 12,1

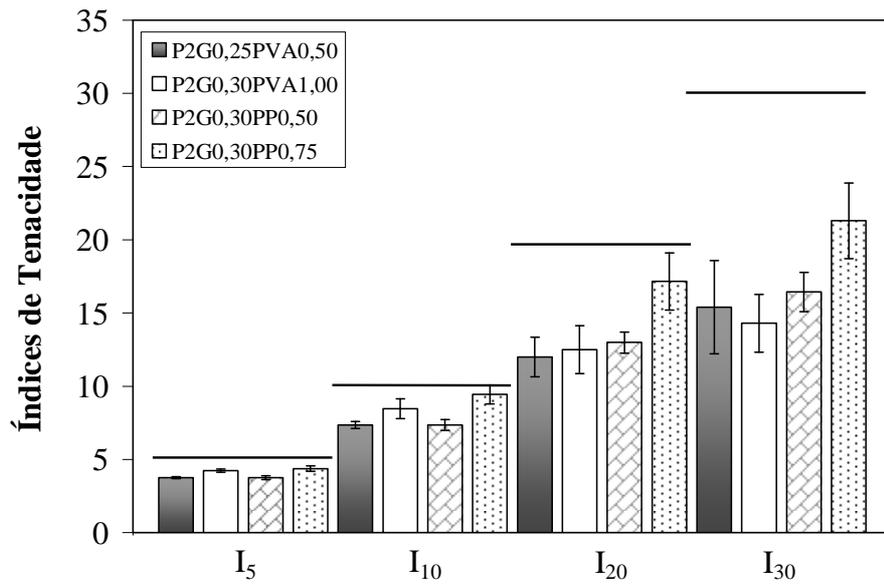


Figura 203 – Índices de tenacidade segundo a norma ASTM C1018 das pastas reforçadas com fibras de PVA e de polipropileno.

Capítulo 9 CONCLUSÕES

O uso do modelo de empacotamento compressível de partículas associado ao emprego das microesferas e sílica ativa se mostrou muito eficiente para a dosagem das pastas leves de alto desempenho. O emprego de reforço fibroso com volastonita mostrou benefícios no desempenho em relação às propriedades mecânicas, principalmente na resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. O uso das fibras de PVA e de polipropileno apontou incrementos na capacidade de deformação.

Em relação ao comportamento no estado fresco, as pastas P1, P2 e P3 apresentaram propriedades reológicas satisfatórias para a aplicação em cimentação de poços e não apresentaram fase sobrenadante durante os ensaios de água livre. Todas se mostraram estáveis, indicando que as pastas dosadas visando a compacidade máxima possuem excelente comportamento em relação à segregação. Apesar da pasta P2 apresentar o menor volume de perda de fluido, as três pastas se mostraram susceptíveis à perda de fluido para a formação. Cabe ressaltar, no entanto, que nenhuma das pastas estudadas foi dosada com aditivo químico controlador de filtrado.

A avaliação da caracterização mecânica realizada permitiu concluir que, as três pastas avaliadas (P1, P2 e P3) apresentaram alto desempenho. A mistura P2 obteve o melhor desempenho dentre as três pastas avaliadas, por apresentar a menor relação a/mc e o maior consumo de material cimentício. A pasta P2 alcançou a maior resistência à compressão aos 28 dias e a maior rigidez em relação às demais pastas, nas idades de 1, 3 e 28 dias. Nos ensaios triaxiais a pasta P2 apresentou a maior coesão. Em relação à resistência à tração por compressão diametral e à tração na flexão, o resultado da pasta P2 também foi superior aos resultados das pastas P1 e P3.

Apesar das três pastas avaliadas se apresentaram estáveis, os demais ensaios físicos realizados nas pastas P1, P2 e P3 permitiram concluir que a pasta P2 se destacou positivamente em relação às demais misturas. Em relação ao ensaio de ataque ácido, verificou-se que as pastas P1 e P2 foram mais resistentes ao ingresso da solução ácida do que a pasta P3. Os resultados de massa específica real das pastas em estado endurecido comprovaram que as pastas pesquisadas podem ser enquadradas na categoria de pastas leves. A pasta P2, de maior resistência mecânica, apresentou os menores valores de absorção de água por imersão e índice de vazios, em comparação com as pastas P1 e P3. A pasta P1, de menor resistência mecânica, apresentou os valores mais elevados para as propriedades físicas avaliadas, enquanto que a pasta P3 apresentou comportamento intermediário.

Em relação às propriedades térmicas estudadas, as variações foram as seguintes: o calor específico das pastas variou entre 1693 – 1819 J/kgK, a difusividade entre 0,01900 e 0,02993 m²/dia, a condutividade entre 2,58 e 3,03 J/(m.s.K) e o coeficiente de dilatação térmica médio entre $16,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $19,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

De forma global, o maior resultado de retração autógena foi atingido pela pasta P2 aos 28 dias, que apresenta a menor relação a/mc e o maior consumo de cimento e de sílica ativa. No entanto, pode-se dizer que as três pastas apresentaram deformações relativamente baixas em relação a esta propriedade, que oscilaram entre -133 e 54 $\mu\epsilon$. Aos 28 dias de ensaio, a maior perda de massa foi alcançada pasta P3 (0,28 %).

A pasta P2, que se trata da mais resistente entre as três misturas avaliadas, apresentou os menores resultados de fluência específica e fluência irreversível, seguida das pastas P1 e P3.

Em relação à pasta P2G0,25, pode-se dizer que a substituição do superplastificante de segunda geração pelo de terceira geração se mostrou extremamente eficaz, devido aos benefícios obtidos nas propriedades reológicas desta pasta.

O uso de microfibras de volastonita promoveu o aumento da viscosidade plástica com o acréscimo do teor, mesmo para as pastas cujos teores de superplastificantes foram superiores ao das demais. As pastas fibrosas apresentaram resultados de limite de escoamento, gel inicial e gel final superiores aos resultados da pasta P2G0,25, com exceção da pasta P2G0,40V7,5, que apresentou praticamente o mesmo limite de

escoamento que a pasta de referência e, também, gel inicial inferior ao da pasta P2G0,25, provavelmente devido ao maior consumo de superplastificante nesta pasta.

Todas as pastas fibrosas continuaram estáveis mesmo com a adição de fibra (volastonita, PVA ou polipropileno), pois apresentaram valores de $\Delta ME < 0,06 \text{ g/cm}^3$. Além disso, nenhuma das pastas fibrosas apresentou fase sobrenadante durante o ensaio de água livre. O uso das fibras PVA e polipropileno não proporcionou alteração significativa na massa específicas aparente e, apesar do acréscimo observado nesta propriedade com o teor de volastonita, as pastas reforçadas com esta fibra continuaram sendo enquadradas na categoria de pastas leves. Em relação à perda de fluido, o uso de fibras de volastonita (7,5% e 10,0%), de PVA (1,00%) e de polipropileno (0,50% e 0,75%) proporcionou decréscimos, que foram mais significativos com o reforço da pasta de referência com a fibra de polipropileno.

O reforço da pasta de referência com a microfibras de volastonita promoveu acréscimos na resistência à compressão de ruptura e no módulo de elasticidade. O uso da fibra de PVA não promoveu alteração significativa nas propriedades determinadas a partir do ensaio de compressão uniaxial. No entanto, o uso da fibra de polipropileno proporcionou decréscimos na resistência à compressão de ruptura e no módulo de elasticidade.

Os resultados indicam que houve decréscimo na coesão e acréscimo no ângulo de atrito das pastas com o uso de reforço fibroso para as três fibras estudadas. O incremento da coesão e o decréscimo do ângulo de atrito foram mais expressivos para a pasta reforçada com fibra de polipropileno e menos significativos para a pasta reforçada com fibra de volastonita.

O reforço da pasta de referência com a microfibras de volastonita permitiu acréscimos em sua resistência à tração por compressão diametral. O uso da fibra de PVA não proporcionou alteração significativa nesta propriedade, enquanto o emprego da fibra de polipropileno acarretou em redução no valor desta propriedade.

O módulo de ruptura e deslocamento de ruptura sofreram acréscimos com o teor de volastonita. No entanto, o emprego de fibras de PVA e de polipropileno proporcionou decréscimos no módulo de ruptura calculado para a carga de primeira fissura das pastas. As pastas reforçadas com fibras de PVA e de polipropileno apresentaram capacidades

de deformação superiores à da pasta de referência e aquelas obtidas pelas pastas reforçadas com fibra de volastonita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, R., JAROUI, H., DOLE, S., JUNAIDI, H., EL-HASSAN, H., FRANCIS, L., HORNSBY, L., McCRAITH, S., SHUTTLEWORTH, N., VAN DER PLAS, K., MESSIER, E., MUNK, T., NODLAND, N., SVENDSEN, R. K., TAOUTAOU, S., 2003, “A Safety Net for Controlling Lost Circulation”, *Oilfield Review*, v. 15, n. 04, pp. 20 - 27.

AİTCIN, P.-C., 2000, *Concreto de Alto Desempenho*, 1ª ed. São Paulo, PINI.

AL-SUWAIDI, A., HUN, C., BUSTILLOS, J. L., GUILLOT, D., RONDEAU, J., VIGNEAUX, P., HELOU, H., RAMÍREZ, J. A., M., ROBLES, J. L. R., 2001, “Light as a Feather, Hard as a Rock”, *Oilfield Review*, v. 13, n. 02, pp. 02 - 15.

AL-YAMI, A. S., NASR-EL-DIN, H. A., JENNINGS, S., KHAFAJI, A., AL-HUMAIDI, A., “New cement systems developed for sidetrack drilling”, *Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*, SPE 113092, Mumbai, India, 4-6 March 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2005, *Recommended Practice for Testing Well Cements: API RP 10B-2*. U.S.A.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2002, *Specification for Cements and Materials for Well Cementing: API Specification 10A*. U.S.A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000, *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete: ASTM C490*. U.S.A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002, *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement: ASTM C 219-01a*. In: Annual Book of ASTM Standards.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1997, *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fibre Reinforced Concrete (using beam with third point-loading): ASTM C 1018*. U.S.A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1991, *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete: ASTM C 157*. U.S.A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1994, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression: ASTM C 469 – 94*.

ANDRADE, W. P., Equipe do Laboratório de Concreto de FURNAS, 1997, “CONCRETOS: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades”. 1ª ed., Editora PINI, São Paulo, SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade: NBR 9779*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983, *Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez: NBR 7682*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio: NBR 9831*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998, *Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine): NBR NM 76*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, *Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: NBR 12142*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, *Concreto endurecido – Determinação da difusividade térmica linear: NBR 12818*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983, *Concreto endurecido – Determinação da fluência: NBR 8224*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, *Concreto endurecido – Determinação do calor específico: NBR 12817*. Rio de Janeiro, RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, *Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear: NBR 12815*. Rio de Janeiro, RJ.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M., 2004, *Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BANTHIA, N., TROTTIER, J. F., 1995, “Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some concerns and a proposition”. *ACI Materials Journal*, Volume 92, N. 1.

BAZANT, Z. P., WU, S. T., 1974, “Rate-type creep law of aging concrete based on Maxwell chain”, *Materials and Structures*, V. 7, N. 37, pp. 45 – 60.

BERNDT, M. L., MANCINI, C. E., 2004, “Tensile tests on plain and fibre reinforced geothermal cements”, *Journal of Materials Science*, v. 39, pp. 1727 – 1733.

BERNDT, M. L., PHILIPPACOPOULOS, A. J., 2002, “Incorporation of fibres in geothermal well cements”, *Geothermics*, v. 31, pp. 643-656.

BJORDAL, A., HARRIS, K. L., OLAUSSEN, S. R., 1993, “Colloidal Silica Cement: Description and Use in North Sea Operations”, *Offshore European Conference*, SPE 26725, Aberdeen, 7-10 September 1993.

BOSMA, M., RAVI, K., VAN DRIEL, W., SCHREPPERS, G. J., 1999, “Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 56536, Houston, Texas, 3-6 October 1999.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Disponível em:
<http://www2.camara.gov.br/comissoes/cpcms/clipping-mercosul/2007-21-12.htm>.

Acesso em 8 de setembro de 2008, 10:00.

CAMPOS, G. *et al.*, 2005, *PROCELAB – Procedimentos e Métodos de Laboratório destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos*, Rio de Janeiro: Petrobras/Schlumberger/Halliburton/BJ Services.

CAMPOS, G., SIMÃO, C. A., CONCEIÇÃO, A. C. F., 2002, *Curso Básico de Cimentação Primária*, Rio de Janeiro, Petrobras.

CHEN, L., MINDESS, S., MORGAN, D. R., 1994, “Specimen geometry and toughness of steel fibre reinforced concrete”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 6, N. 4, pp. 529 – 541.

CHEN, L., 1995, *Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete*, ACI SP-155, Edited by Stevens *et al.*, American Concrete Institute, Detroit, U.S.A.

CORREIA, R. F., 2009, *Avaliação mecânica e estrutural de pastas cimentícias para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DASGUPTA, D., BANERJEE, S., GARG, S. P., JAIN, V. K., 2006, “Lightweight slurries – A success story of application in low-fracture-gradient and depleted fields for improved cementation”, *SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition*, SPE/IADC 101810, Mumbai, India, 16 – 18 October 2006.

DE CASTRO, A., L., PANDOLFELLI, V. C., 2009, “Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil”, *Cerâmica*, v. 55, n. 333, pp. 18-32.

DE LARRARD, F., 1999, *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, v. 9, London, E&FN SPON.

DE LARRARD, F., SEDRAN, T., 2002, “Mixture-proportioning of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 32, issue 11, pp. 1699 - 1704.

EL-HASSAN, H., ABDELRAHMAN, M., JOHNSON, C., BELMAHI, A., RISHMANI, L., JAROUI, H., 2005, “Using a combination of cement systems to defeat severe lost-circulation zones”, *14th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, SPE 92374, Bahrain, 12-15 March 2005.

EL-HASSAN, H. I., ABBAS, R., JAROUI, H., MINK, T., 2003, “Using a novel fiber cement system to control lost circulation: case histories from the Middle East and the Far East”, *SPE/ IADC Middle East Technology Conference & Exhibition*, SPE/ IADC 85324, Abu Dhabi, UAE, 20-22 October 2003.

EL HASSAN, H., SHAGNOUBI, M., BELMAHI, A., JAROUI, H., VOON, E., 2006, “High-impact-resistant cement allows challenging sidetrack in Abu Dhabi”, *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, SPE 100827, Abu Dhabi, U. A. E., 5-8 November 2006.

FARIAS, M. L. R., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., 2001, “Aditivos Químicos para Concreto”, *Engenharia Estudo e Pesquisa*, v. 4, n. 2, Juiz de Fora, MG, pp. 79 – 92.

FONTES, C. M. A., 2008, *Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho*. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FORMAGINI, S., 2005, *Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GARDUÑO, R. Z., MARTINEZ, J. A., MALDONADO, R., 2006, “Synergy between engineered fibers and lightweight cement slurries to cement depleted formations”, *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, IADC/SPE 103885, Bangkok, Thailand, 13-15 November 2006.

GOPALARATNAM, V. S., *et al.*, 1991, “Fracture toughness of fibre reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, V. 88, N. 4, pp. 339 – 353.

HEINOLD, T., DILLENBECK, R. L., ROGERS, M. J., 2002, “The effect of key cement additives on the mechanical properties of normal density oil and gas well cement systems”, *Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, SPE 77867, Melbourne, Australia, 8–10 October 2002.

HEINOLD, T., DILLENBECK, R. L., WINDAL, S. B., ROGERS, M. J., 2003, “Analysis of tensile test methodologies for evaluating oil and gas well cement systems”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 84565, Denver, Colorado, U.S.A., 5-8 October 2003.

HSU, K-C, CHIU, J-J, CHEN, S-D, TSENG, Y-C, 1999, “Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability”, *Cement & Concrete Composites*, v. 21, pp. 425-430.

HUTTON, F., PAYNE, T., JEFFREYS, K., OSORIO, J., THEROND, E., VELASCO, A., WILLIAMS, H., 2009, “Fusible-particle system helps to control severe lost circulation while drilling across a fractured zone in Elk Hills Field”, CA, *SPE Western Regional Meeting*, SPE 121111, San Jose, California, U.S.A., 24-26 March 2009.

ILLSTON, J. M., POMEROY, C. D., 1975, “Recommendations for a standard creep test”, *Concrete International*, pp. 24-25.

INSTITUTE BELGE DE NORMALISATION (IBN), 1992, *Essais des betons renforce des fibres – Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques: NBN B 15 238*, Brussels, Belgium, 9p.

JAIN, B., RAITURKAR, A. M. P., HOLMES, C., DAHLIN, A., 2000, “Using particle-size distribution technology for designing high-density, high-performance cement slurries in demanding frontier exploration wells in South Oman”, *IADC/SPE Drilling Conference*, IADC/SPE 59134, New Orleans, Louisiana, U.S.A., 23-25 February 2000.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE, 1983, *Method of test for flexural strength and flexural toughness of fibre reinforced concrete: JCI-SF4*, JCI Standards for test methods of fibre reinforced, Japan.

LANGE, D.A., ALTOUBAT, S.A., 2002, “Early thermal changes”. In: *Early Age Cracking in Cementitious Systems, RILEM TC 181-EAS: Final Report*, July, pp. 37-38.

LIMA, P. R. L., 2004, *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LOPES, M. M., 2005, *Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LOW, N., DACCORD, G., BEDEL, J-P., 2003, “Designing fibered cement slurries for lost circulation applications: Case histories”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 84617, Denver, Colorado, U.S.A., 5-8 October 2003.

MAGALHÃES, M. S., 2008, *Durabilidade sob cargas térmicas de compósitos cimentícios com múltipla fissuração na tração direta*. Exame de Qualificação para Candidatura ao Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MAHBOUBI, A., AJORLOO, A., 2005, “Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression”, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, pp. 412 – 419.

MARANGON, E., 2009, *Desenvolvimento, caracterização e uso estrutural de concretos fibrosos auto-adensáveis*. Exame de Qualificação para Candidatura ao Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 2008, *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, 3ª ed., São Paulo, Editora Pini.

MELO FILHO, J. A., 2009, *Desenvolvimento e caracterização de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas e longas de sisal*. Exame de Qualificação para Candidatura ao Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEYERS, S. L., 1950, “Thermal expansion characteristics of hardened cement paste and of concrete”, *Highway Research Board Proceedings*, V. 30, pp. 193 – 200.

MINDESS, S., CHEN, L., MORGAN, D. R., 1994, “Determination of the first-crack strength and flexural toughness of steel fibre-reinforced concrete”, *Journal of Advanced Cement Based Materials*, V. 1, N. 5, pp. 201 – 208.

MINDESS, S. *et al.*, 1996, “Standard Testing”, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2*, Edited by A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, F&FN Spon, pp. 384 – 421.

MIRANDA, C. R., 2008, *Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química*, Tese de Doutorado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIRANDA, C. R., SILVA, M. G. P., 1996, “Método de laboratório para quantificação de ataque ácido ao cimento”, *4º Congresso Brasileiro de Cimento*, São Paulo, SP.

MOULIN, E., REVIL, P., JAIN, B., 1997, “Using Concrete Technology to Improve the Performance of Lightweight Cements”, *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference*, SPE/IADC 39276, Bahrain, 23-25 November 1997.

NELSON, E. B., GUILLOT, D., 2006, *Well Cementing*, 2ª ed., U.S.A., Schlumberger.

NEOMATEX. Disponível em: <http://www.neomatex.com.br>. Acesso em 17 ago. 2009, 12:17.

NÓBREGA, A. C. V., MARTINELLI, A. E., MELO, D. M. A., FERNANDES, M. R. P., FREITAS, J. C. O., NASCIMENTO, J. H. O., 2007, “Ataque ácido em compósitos portland/polímeros para poços de petróleo: Mecanismos de ação”, *4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, 2.2.0351-1, Campinas, SP, 21-24 de Outubro de 2007.

PEREIRA, A. Z. I., FERNANDES, P. D., 2009, “Estimulação de carbonatos”, *III Encontro Nacional de Hidráulica de Poços*, Campos do Jordão, SP, 07-10 de Junho de 2009.

PINTO, E. N. M. G., LIMA, F. M., MARTINELLI, A. E., MELO, D. M., MELO, M. A. F., SIMÃO, C. A., 2007, “Adição de plastificantes em pastas de cimento para poços de petróleo: Avaliação do comportamento reológico”, *4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, 2.2.412, Campinas, SP, 21-24 de Outubro de 2007.

REVIL, P., JAIN, B., 1998, “A new approach to designing high-performance lightweight cement slurries for improved zonal isolation in challenging situations”, *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology*, IADC/SPE 47830, Jakarta, Indonesia, 7-9 September 1998.

RESENDE, F. M., 2003, *Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROCHA, L. A., S., AZEVEDO, C. T., 2007, *Projetos de poços de petróleo: geopressões e assentamento de colunas de revestimentos*, Rio de Janeiro, Editora Interciência/Petrobras.

ROMERO, S. N., MONROY, R. R., JOHNSON, C., CARDENAS, F., ABRAHAM., G. A. T., 2004, “Preventing lost circulation using lightweight slurries with reticular systems: Depleted reservoirs in Southern Mexico”, *SPE International Petroleum Conference in Mexico*, SPE 92187, Puebla, Mexico, 8-9 November 2004.

RONCERO, J., 2000, *Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened state: Implications for high performance concrete*. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

SCHRAMM, G., 2006, *Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos*; Tradução e adaptação: MOTHÉ, C. G., CORREIA, D. Z., PETRI, H. M., GONÇALVES, M., CARESTIANO, T., 2 ed., Artliber Editora, São Paulo.

SEDRAN, T., 1999, *Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants*. Doctoral Thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, France.

SERCOMBE, J., HELLMICH, C., ULM, F-J, MANG, H., 2000, Modeling of early-age creep of shotcrete. I: Model and model parameters. *ASCE Journal Eng Mech*, V. 126, pp. 284 – 291.

SHUI, Z-H, ZHANG, R., CHEN, W., XUAN, D-X, 2010, “Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste”, *Construction and Building Materials*, V. 24, pp. 1761 – 1767.

SILVA, F. A., 2009, *Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal*. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVOSO, M. M., 2008, *Manual de utilização do programa MEC-COPPE 1.0 – Simulador de compacidade de misturas granulares secas através do Método de Empacotamento Compressível (MEC)*, Rio de Janeiro.

SIMBALA, V., PALOMEQUE, M., EVERS, R., ORDONEZ., E., 2005, “An effective solution to repair severely corroded casing strings: Application in the Orient Basin of Ecuador”, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference in Rio de Janeiro*, SPE 93950, Rio de Janeiro, Brazil, 20-23 June 2005.

THOMAS, J. E. *et al.*, 2004, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência/Petrobras.

TOLÊDO FILHO, R. D., 1997, *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: Caracterização experimental*. Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VELASCO, R. V., 2002, *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VELASCO, R. V., 2002, *Concreto de alto reforçado com fibras de polipropileno e de sisal submetido a altas temperaturas*. Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VELASCO, R. V., 2008, *Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: Propriedades reológicas, mecânicas e térmicas*. Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VORKINN, P. B., SANDERS, G. S., 1993, “Cement Slurry Qualification, Field Mixing, and Quality Assurance Procedures for Coiled-Tubing Squeeze Operations in Prudhoe Bay”, *Western Regional Meeting*, SPE 26089, Anchorage, Alaska, U.S.A., 26-28 May 1993.

YAO, X., HUA, S. D., 2007, "Design of a Novel Composite Agent for Improving the Toughness of Oilwell Cement Sheath", *2007 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, SPE 106010, Houston, Texas, U.S.A., 28 February – 02 March 2007.

ANEXOS

A1. ADEQUAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DAS PASTAS LEVES DE ALTO DESEMPENHO

As pastas leves de alto desempenho tiveram suas misturas granulares secas dosadas pelo MEC, conforme descrição realizada no Capítulo 5. Para a determinação dos teores de água e superplastificante de cada mistura foram realizados alguns ajustes em sua dosagem, que serão descritos a seguir. As variáveis que foram alteradas para o alcance de uma formulação ótima foram as seguintes: teor de superplastificante e massa específica da mistura seca. Assim, cada pasta partiu de uma dosagem inicial e as variáveis citadas foram alteradas até que se alcançasse a dosagem ótima para cada mistura. A verificação da adequação de cada dosagem foi feita primeiramente por meio do ensaio de reologia. Para a aprovação de cada pasta em relação ao ensaio de reologia a mesma não podia apresentar segregação de material e formação de anel gelificado durante o ensaio. Além disso, a pasta não podia aparentar-se muito viscosa, o que era verificado visualmente e pelos valores medidos das deflexões durante o ensaio. Após a aprovação da pasta em relação à reologia também foram feitos ensaios de água livre e estabilidade, para a verificação da estabilidade de cada pasta tanto no fresco quanto no estado endurecido.

O detalhamento do processo de adequação de dosagem de cada pasta leve de alto desempenho será apresentado neste capítulo.

A1.1. Pasta P1

A composição inicial da pasta P1, denominada P1A está apresentada na Tabela 65. Os teores de água e superplastificante inseridos inicialmente nesta pasta foram iguais a 12,157 gpc e 0,200 gpc, respectivamente, o suficiente para gerar uma porosidade teórica igual a 0,41.

As leituras realizadas durante o ensaio de reologia não permitiram a determinação de suas propriedades reológicas devido à formação de anel gelificado em volta do rotor, pois a mistura se apresentou muito seca.

Tabela 65 – Composição inicial da pasta P1A para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	223,61
Microesfera SG	147,58
Sílica ativa	58,14
Água	241,34
CFR6LB	4,56
Sílica 120#	158,76
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,39 / 11,6
Porosidade Teórica da Pasta	0,409

A fim de se adequar as características reológicas da pasta P1A, o teor de superplastificante foi aumentado em 50%, resultando na pasta P1B (Tabela 66). Durante a realização do ensaio também foi observada a formação de anel gelificado em volta do rotor, o que não permitiu uma avaliação da reologia.

Tabela 66 – Composição inicial da pasta P1B para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	223,33
Microesfera SG	147,40
Sílica ativa	58,07
Água	239,81
CFR6LB	6,83
Sílica 120#	158,56
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,39 / 11,6
Porosidade Teórica da Pasta	0,410

Como apenas a mudança no teor de superplastificante não foi suficiente para adequar as características reológicas da pasta, uma nova formulação foi realizada, P1C (Tabela 67). Em relação à pasta P1B, houve alteração na massa específica da mistura seca, que

passou de 1,39 g/cm³ (11,6 lb/gal) para 1,50 g/cm³ (12,5 lb/gal). Esta mistura também se apresentou muito seca, com a leitura do viscosímetro na velocidade de 200 rpm superior a 300°. Assim, não foi possível determinar suas propriedades reológicas da pasta P1C.

Tabela 67 – Composição inicial da pasta P1C para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	244,83
Microesfera SG	161,59
Sílica ativa	63,65
Água	247,32
CFR6LB	7,49
Sílica 120#	173,83
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,50 / 12,5
Porosidade Teórica da Pasta	0,423

Com o objetivo de se melhorar a reologia da pasta P1C, uma nova formulação foi produzida, a pasta P1D, cujo teor de superplastificante foi 17% superior ao da P1C (Tabela 68). Esta pasta apresentou-se seca, com a formação de anel gelificado em volta do rotor, o que caracteriza resultados falsos de reologia. Este fato pode ser caracterizado pela leitura do viscosímetro na velocidade de 300 rpm igual a 280°.

Tabela 68 – Composição inicial da pasta P1D para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	244,69
Microesfera SG	161,50
Sílica ativa	63,62
Água	246,42
CFR6LB	8,73
Sílica 120#	173,73
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,50 / 12,5
Porosidade Teórica da Pasta	0,423

Uma nova alteração no teor de superplastificante foi realizada, que resultou na composição da pasta P1E (Tabela 69). Neste caso houve uma redução em 43% no teor. Esta formulação não se revelou adequada e não foi possível a realização do ensaio de reologia, pois a mistura apresentou-se muito seca.

Tabela 69 – Composição inicial da pasta P1E para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	245,09
Microesfera SG	161,76
Sílica ativa	63,72
Água	249,12
CFR6LB	5,00
Sílica 120#	174,01
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,50 / 12,5
Porosidade Teórica da Pasta	0,422

Uma sexta composição foi então desenvolvida, denominada de pasta P1F (Tabela 70). Em relação à pasta P1E, houve uma pequena redução na massa específica da mistura seca (igual a 2%) e um aumento no teor de superplastificante de 75%. Esta pasta

apresentou propriedades reológicas satisfatórias, com valores de viscosidade plástica e limite de escoamento iguais a 0,11 Pa.s (111 cP) e 15,16 Pa (32 lbf/100 pé²), respectivamente. Entretanto, houve segregação das partículas sólidas durante a realização do ensaio de estabilidade, o que caracteriza a pasta como instável (ver a Tabela 71).

Tabela 70 – Composição inicial da pasta P1F para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	22,703
Microesfera SG	149,84
Sílica ativa	59,03
Água	271,95
CFR6LB	8,10
Sílica 120#	161,19
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,46 / 12,2
Porosidade Teórica da Pasta	0,465

Tabela 71 – Resultados de estabilidade a 80°F (27°C) da pasta P1F.

Pasta	Amostra	Rebaixamento (mm)	ME _{TOPO} g/cm ³ (lb/gal)	ME _{FUNDO} g/cm ³ (lb/gal)	ΔME g/cm ³ (lb/gal)
P1F	1	0	1,509 – 12,57	1,435 – 11,96	-0,074 (-0,61)
	2	0	1,663 – 13,86	1,581 – 13,17	-0,082 (-0,69)

Na tentativa de corrigir o problema de instabilidade da pasta, foi desenvolvida a pasta P1G, cuja composição está apresentada na Tabela 72. Em relação à pasta P1F, houve aumento de 3% na massa específica da mistura seca. Durante o ensaio foi possível observar a formação de anel gelificado em volta do rotor, indicando que a pasta estava muito seca.

Tabela 72 – Composição inicial da pasta P1G para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	250,58
Microesfera SG	165,39
Sílica ativa	65,15
Água	237,91
CFR6LB	8,94
Sílica 120#	177,92
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,51 / 12,6
Porosidade Teórica da Pasta	0,409

Como o aumento de 3% do valor da massa específica da pasta P1G revelou-se muito alto, uma nova composição foi feita, como mostra a Tabela 73. Neste caso, assumiu-se um valor de massa específica igual a 1,47 g/cm³ (12,3 lb/gal). Os resultados dos ensaios de reologia (Tabela 18), estabilidade (Tabela 26) e água livre (Figura 104A) desta pasta foram satisfatórios. Desta forma, a pasta P1H, que se trata da finalização do ajuste da primeira pasta foi denominada P1.

Tabela 73 – Composição inicial da pasta P1H para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	232,92
Microesfera SG	153,72
Sílica ativa	60,56
Água	263,44
CFR6LB	8,31
Sílica 120#	165,37
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,47 / 12,3
Porosidade Teórica da Pasta	0,451

A1.2. Pasta P2

A composição inicial da pasta P2, denominada P2A está apresentada na Tabela 74. A dosagem inicial desta pasta foi realizada para uma porosidade teórica igual a 0,40. Para tal, os teores de água e de superplastificante foram iguais a 6,612 gpc e 2,0% BWOC. Durante a realização do ensaio de reologia, a pasta se mostrou extremamente seca, com a leitura do viscosímetro na velocidade de 300 rpm superior a 300°.

Tabela 74 – Composição inicial da pasta P2A para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	396,42
Microesfera SG	130,82
Sílica ativa	130,82
Água	232,72
CD33B	7,93
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,50 / 12,5
Porosidade Teórica da Pasta	0,388

Uma nova composição para a segunda pasta foi desenvolvida (P2B), cuja formulação é apresentada na Tabela 75. Em relação à pasta P2A, houve um aumento de 25% na concentração de superplastificante. A pasta apresentou-se bem viscosa, com a leitura do viscosímetro na velocidade de 300 rpm igual a 267°.

Tabela 75 – Composição inicial da pasta P2B para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	396,06
Microesfera SG	130,70
Sílica ativa	130,70
Água	231,34
CD33B	9,90
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,50 / 12,5
Porosidade Teórica da Pasta	0,386

Na tentativa de ajustar a dosagem da pasta P2B foi produzida a pasta P2C, cuja composição está apresentada na Tabela 76. Em relação à pasta P2B, voltou-se à concentração de superplastificante utilizada em P1A e à massa específica da mistura seca foi acrescida de 1,50 g/cm³ (12,5 lb/gal) para 1,56 g/cm³ (13 lb/gal). Neste caso, a pasta P2C apresentou-se adequada em relação às propriedades reológicas (Tabela 18), estabilidade (Tabela 26) e água livre (Figura 104). Para a continuidade do estudo, esta pasta passou e ser denominada P2.

Tabela 76 – Composição inicial da pasta P2C para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe Especial	395,52
Microesfera SG	130,52
Sílica ativa	130,52
Água	270,17
CD33B	7,91
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,56 / 13,0
Porosidade Teórica da Pasta	0,450

A1.3. Pasta P3

A formulação inicial da pasta P3, denominada P3A, está apresentada na Tabela 77. A pasta P3A foi dosada para uma porosidade teórica igual a 0,39, com teores de água e de superplastificante iguais a, respectivamente, 10,236 gpc e 2,0% BWOC. Durante o ensaio de reologia a pasta apresentou-se muito seca, com leituras no viscosímetro superiores a 300° para as velocidades de 200 rpm e 300 rpm. Desta forma, não foi possível a determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 77 – Composição inicial da pasta P3A para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	255,30
Microesfera HGS18000	127,65
Sílica ativa	127,65
Água	232,01
CD33B	5,11
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,25 / 10,4
Porosidade Teórica da Pasta	0,394

Na tentativa de ajustar a dosagem da pasta P3A foi produzida a pasta P3B, cuja composição está apresentada na Tabela 78. Neste caso, o teor de superplastificante foi aumentado em 25%. Durante o ensaio de reologia a mistura apresentou-se muito seca, ainda com leituras no viscosímetro ainda superiores a 300° para as velocidades de 200 rpm e 300 rpm. Assim, não foi possível determinar suas propriedades reológicas.

Tabela 78 – Composição inicial da pasta P3B para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	255,00
Microesfera HGS18000	127,50
Sílica ativa	127,50
Água	231,34
CD33B	6,37
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,25 / 10,4
Porosidade Teórica da Pasta	0,395

A pasta P3C foi produzida a partir de um aumento de 20% no teor de superplastificante da pasta P3B. A composição da pasta P3C está mostrada na Tabela 79. Na realização do ensaio de reologia a mistura apresentou-se muito seca. Desta forma, não foi possível a determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 79 – Composição inicial da pasta P3C para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	254,70
Microesfera HGS18000	127,35
Sílica ativa	127,35
Água	230,68
CD33B	7,64
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,25 / 10,4
Porosidade Teórica da Pasta	0,395

A fim de resolver o problema reológico, optou-se pela alteração do tipo de superplastificante da mistura. O CD33B utilizado em P3C foi substituído pelo CFR6LB, que também foi empregado na pasta P1. A nova mistura foi denominada P3D e sua composição está apresentada na Tabela 80. O teor inicial do novo superplastificante foi igual a 0,35 gpc. Mesmo com a substituição do superplastificante, a mistura apresentou-

se muito seca, com leituras no viscosímetro superiores a 300° para as velocidades de 200 rpm e 300 rpm e não foi possível a determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 80 – Composição inicial da pasta P3D para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	254,49
Microesfera HGS18000	127,24
Sílica ativa	127,24
Água	229,66
CFR6LB	9,08
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,25 / 10,4
Porosidade Teórica da Pasta	0,396

Nesta etapa da dosagem optou-se por manter o mesmo teor de CFR6LB adotado na pasta P3D. Entretanto, para a confecção da pasta P3E houve uma redução na massa específica de 1,25 g/cm³ (10,4 lb/gal) para 1,22 g/cm³ (10,2 lb/gal). A composição da pasta P3E está mostrada na Tabela 81. Os resultados do ensaio de reologia também não foram satisfatórios.

Tabela 81 – Composição inicial da pasta P3E para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	229,72
Microesfera HGS18000	114,86
Sílica ativa	114,86
Água	265,71
CD33B	8,19
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,22 / 10,2
Porosidade Teórica da Pasta	0,455

A pasta P3F foi desenvolvida com aumento de 8% da massa específica da mistura seca e redução de 14% da concentração de superplastificante, em relação à pasta P3E, como indica a Tabela 82. Contudo, não foi possível a realização do ensaio de reologia nesta pasta, pois a P3F também ficou muito seca.

Tabela 82 – Composição inicial da pasta P3F para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	287,76
Microesfera HGS18000	143,88
Sílica ativa	143,88
Água	206,54
CD33B	8,80
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,32 / 11,0
Porosidade Teórica da Pasta	0,357

A pasta P3G foi desenvolvida com aumento da concentração de superplastificante (17%) e uma pequena redução da massa específica da mistura seca (1,8%), em relação à pasta P3F, como indica a Tabela 83. Entretanto, também não foi possível a realização do ensaio de reologia nesta pasta, porque esta se mostrou muito seca.

Tabela 83 – Composição inicial da pasta P3G para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	265,82
Microesfera HGS18000	132,91
Sílica ativa	132,91
Água	235,36
CD33B	9,48
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,29 / 10,8
Porosidade Teórica da Pasta	0,406

Uma nova formulação foi implementada: P3H (Tabela 84). Em relação à pasta P3G, houve uma nova alteração no tipo de superplastificante (de CFR6LB para CD33B). O teor de superplastificante empregado foi igual a 2,0% BWOC. A mistura apresentou-se muito seca, com deflexões superiores a 300° em 200 rpm e 300 rpm. Desta forma, não foi possível a determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 84 – Composição inicial da pasta P3H para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	266,56
Microesfera HGS18000	133,28
Sílica ativa	133,28
Água	238,03
CD33B	5,33
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,29 / 10,8
Porosidade Teórica da Pasta	0,404

Uma nova pasta foi formulada (P3I, Tabela 85) com uma pequena redução da massa específica da mistura seca (0,9%), em relação à mistura anterior. A mistura apresentou-se muito seca e, mais uma vez, não foi possível a determinação de suas propriedades reológicas.

Tabela 85 – Composição inicial da pasta P3I para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	255,70
Microesfera HGS18000	127,85
Sílica ativa	127,85
Água	252,77
CD33B	5,11
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,28 / 10,7
Porosidade Teórica da Pasta	0,394

Por fim, foi desenvolvida uma nova formulação com massa específica igual a 1,27 g/cm³ (10,6 lb/gal), cuja composição está mostrada na Tabela 86. Os resultados dos ensaios de reologia (Tabela 18), água livre (Figura 104) e estabilidade (Tabela 26) desta pasta foram satisfatórios. Portanto, a pasta P3J passou a ser denominada P3 para a continuidade das investigações.

Tabela 86 – Composição inicial da pasta P3J para a produção de 600 ml.

Materiais	Massa (g)
Cimento CPP – Classe G	244,84
Microesfera HGS18000	122,42
Sílica ativa	122,42
Água	267,52
CD33B	4,90
FP7LB	1,00
Massa específica mistura seca (g/cm ³)/(lb/gal)	1,27 / 10,6
Porosidade Teórica da Pasta	0,453

A2. OTIMIZAÇÃO DA PASTA COM REFORÇO DE FIBRA DE POLIPROPILENO

Neste anexo serão mostrados alguns dos teores de fibras de polipropileno que foram candidatos durante o processo de otimização do teor de fibra e de superplastificante. De acordo com os dados apresentados no Capítulo 5, os teores que se mostraram adequados para esta fibra foram iguais a 0,50% e 0,75%. No entanto, os teores iguais a 0,80%, 0,85% e 1,00% foram testados com diferentes teores de superplastificante sem sucesso com o objetivo de inserir o máximo de fibras possível na matriz.

A2.1. Pasta Reforçada com 1,00% de Fibra de Polipropileno

A definição do teor de superplastificante igual a 0,30% para a pasta com 0,50% de fibra de polipropileno, P2G0,30PP0,50, descrita no Capítulo 5, foi sucedida pela tentativa de produção de uma pasta com esta fibra num teor igual a 1,00%. O menor teor de superplastificante testado foi igual a 0,35% porque esta pasta já se apresentou muito viscosa, forçando bastante o motor do misturador durante sua confecção. Os teores de superplastificantes testados foram iguais a 0,35%, 0,40%, 0,45% e 0,50% e os aspectos das pastas produzidas com estes teores de aditivo estão apresentados na Figura 204, na Figura 205, na Figura 206 e na Figura 207, respectivamente. Todas as figuras citadas anteriormente ilustram segregação nas pastas P2G0,35PP0,50, P2G0,40PP0,50, P2G0,45PP0,50 e P2G0,05PP0,50. Além disso, mesmo com o aumento no teor de superplastificante, o teor de fibra igual a 1,00% aparentou ser muito alto para a matriz estudada, porque para todos os teores de superplastificantes testados durante o processo de mistura o motor do misturador trabalhou com dificuldade.



(a)



(b)

Figura 204 – Aspectos da pasta P2G0,35PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 205 – Aspectos da pasta P2G0,40PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 206 – Aspectos da pasta P2G0,45PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 207 – Aspectos da pasta P2G0,50PP1,00: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

A2.2. Pasta Reforçada com 0,85% de Fibra de Polipropileno

Na tentativa de produzir uma pasta com teor de fibra de polipropileno próximo a 1,00% foi adotado o teor de 0,85%. Para este teor de fibra, os teores de superplastificantes testados foram os seguintes: 0,25%, 0,30%, 0,35%, 0,40% e 0,45%. Os aspectos das pastas após a confecção estão apresentadas na Figura 208 (pasta P2G0,25PP0,85), Figura 209 (pasta P2G0,30PP0,85), Figura 210 (pasta P2G0,35PP0,85), Figura 211 (pasta P2G0,40PP0,85) e Figura 212 (pasta P2G0,45PP0,85). As pastas P2G0,25PP0,85, P2G0,30PP0,85 e P2G0,35PP0,85 se mostraram homogêneas e não foram percebidos grumos de fibras. No entanto, as mesmas sobrecarregaram muito o motor do misturador durante os processos de confecção. As pastas P2G0,40PP0,85 e P2G0,45PP0,85 apresentaram segregação, com presença de grumos e separação de fase líquida da mistura.



(a)



(b)

Figura 208 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 209 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 210 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 211 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 212 – Aspectos da pasta P2G0,45PP0,85: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

A2.3. Pasta Reforçada com 0,80% de Fibra de Polipropileno

Como o teor de fibra de 0,85% não se mostrou adequado, o teor deste material igual a 0,80% também foi testado. Para tal, o teor de superplastificante foi variado entre 0,25% e 0,40%. Os aspectos das pastas P2G0,25PP0,80, P2G0,30PP0,80, P2G0,35PP0,80 e P2G0,40PP0,80 estão ilustrados na Figura 213, Figura 214, Figura 215 e Figura 216, respectivamente. Todas as pastas com 0,80% de fibra de polipropileno não se mostraram homogêneas, com presença de vários grumos de fibras e, além disso, para as pastas com teores de superplastificantes iguais a 0,35% e 0,40%, também foi observada a separação da fase líquida da mistura.



(a)



(b)

Figura 213 – Aspectos da pasta P2G0,25PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 214 – Aspectos da pasta P2G0,30PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 215 – Aspectos da pasta P2G0,35PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.



(a)



(b)

Figura 216 – Aspectos da pasta P2G0,40PP0,80: (a) Vista superior; (b) Vista da pasta em escoamento.

A3. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO REFERENTES AOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

A3.1. Curvas tensão-deformação da pasta P1

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial da pasta P1 nas idades de 1 dia, 3 dias e 28 dias estão apresentadas na Figura 217, na Figura 218 e na Figura 219, respectivamente.

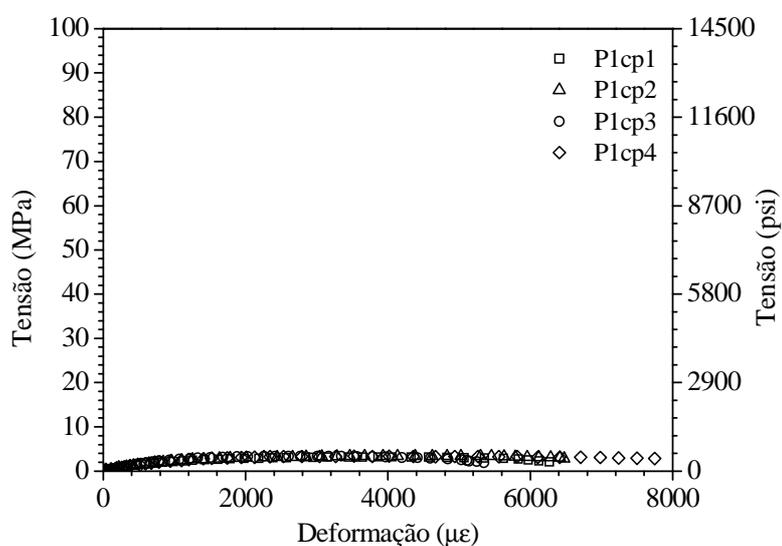


Figura 217 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 1 dia.

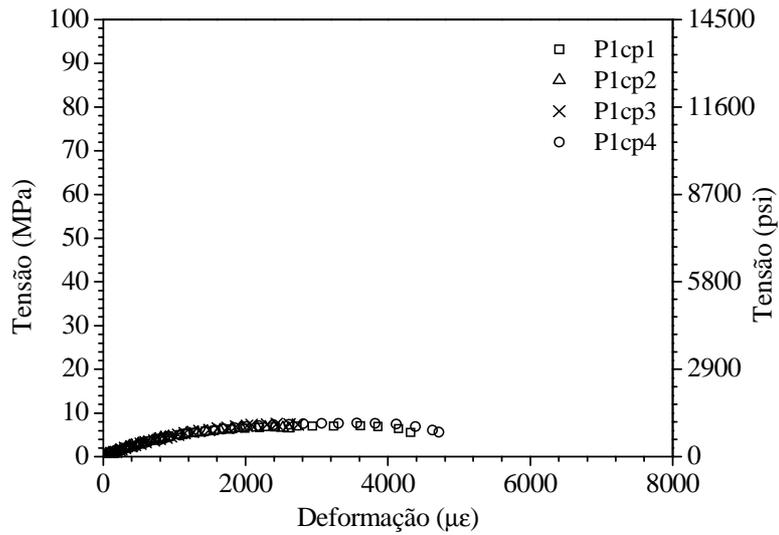


Figura 218 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 3 dias.

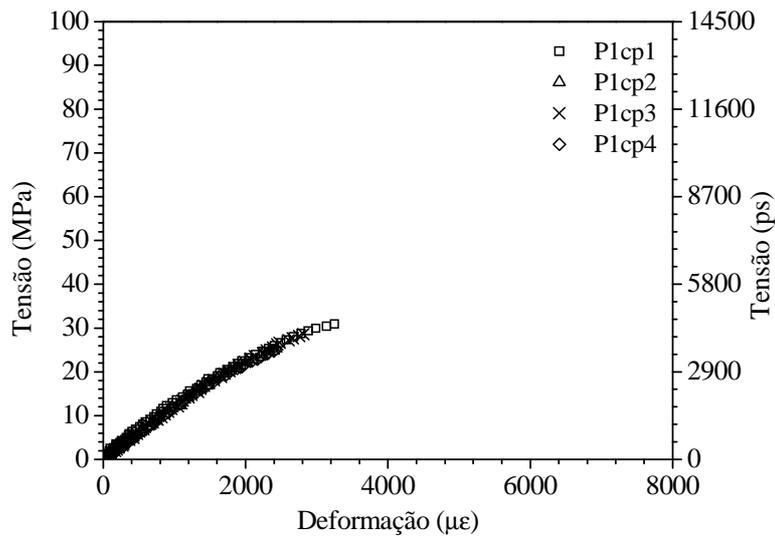


Figura 219 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 na idade de 28 dias.

A3.2. Curvas tensão-deformação da pasta P2

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial da pasta P1 nas idades de 1 dia, 3 dias e 28 dias estão apresentadas na Figura 220, na Figura 221 e na Figura 222, respectivamente.

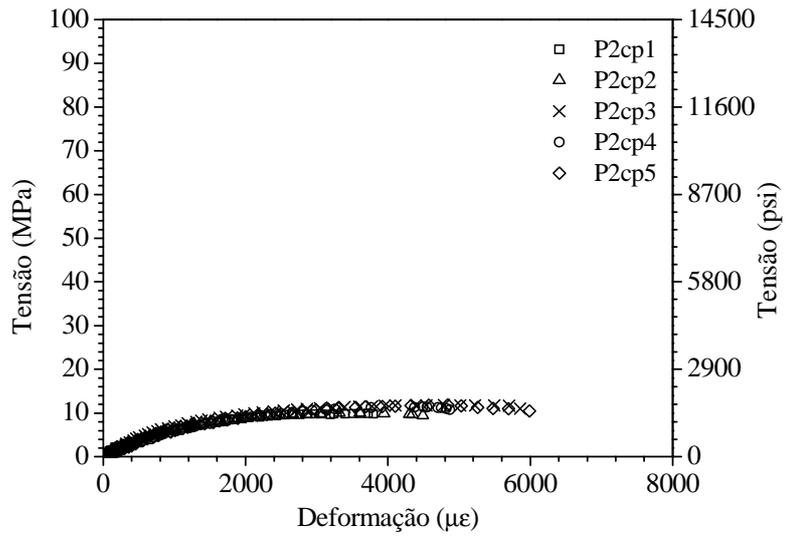


Figura 220 – Curvas tensão \times deformação da pasta P2 na idade de 1 dia.

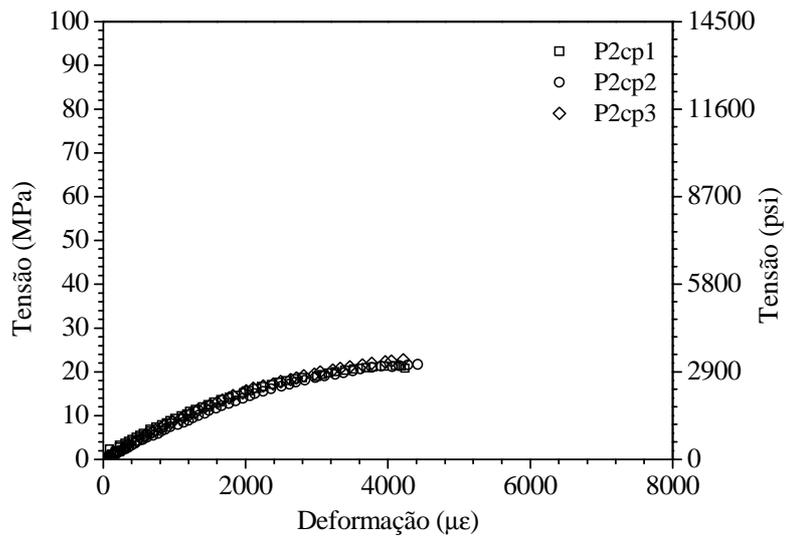


Figura 221 – Curvas tensão \times deformação da pasta P2 na idade de 3 dias.

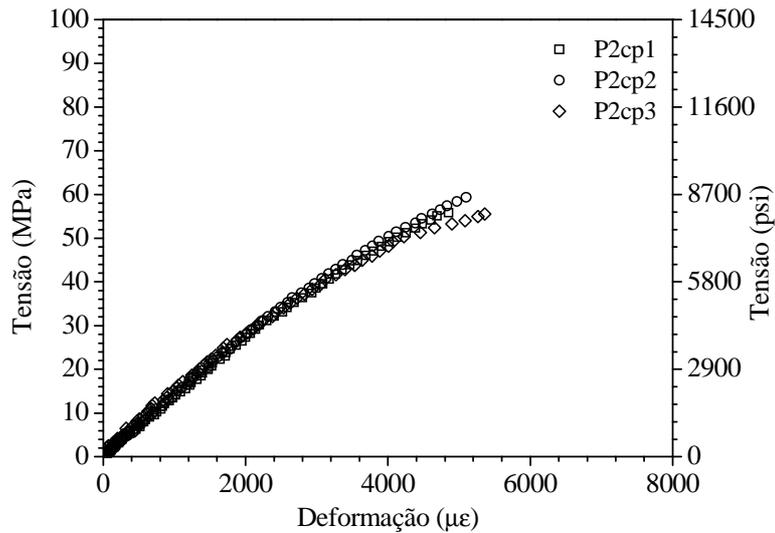


Figura 222 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 na idade de 28 dias.

A3.3. Curvas tensão-deformação da pasta P3

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial da pasta P1 nas idades de 1 dia, 3 dias e 28 dias estão apresentadas na Figura 223, na Figura 224 e na Figura 225, respectivamente.

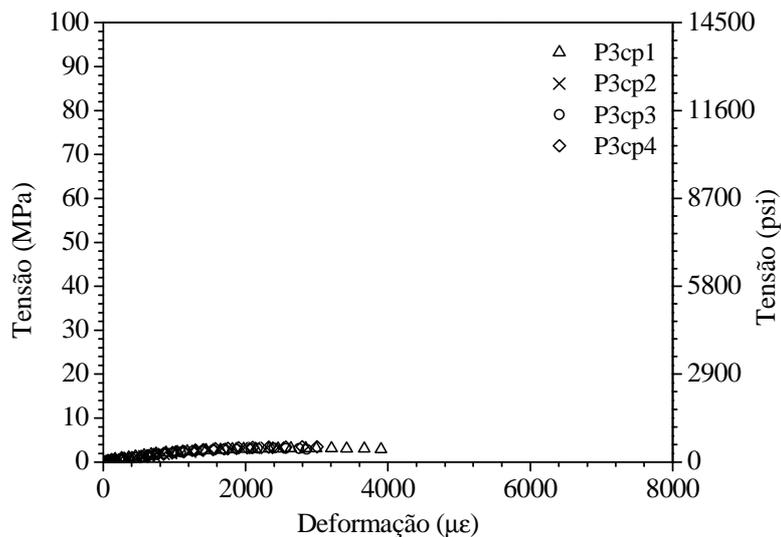


Figura 223 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 na idade de 1 dia.

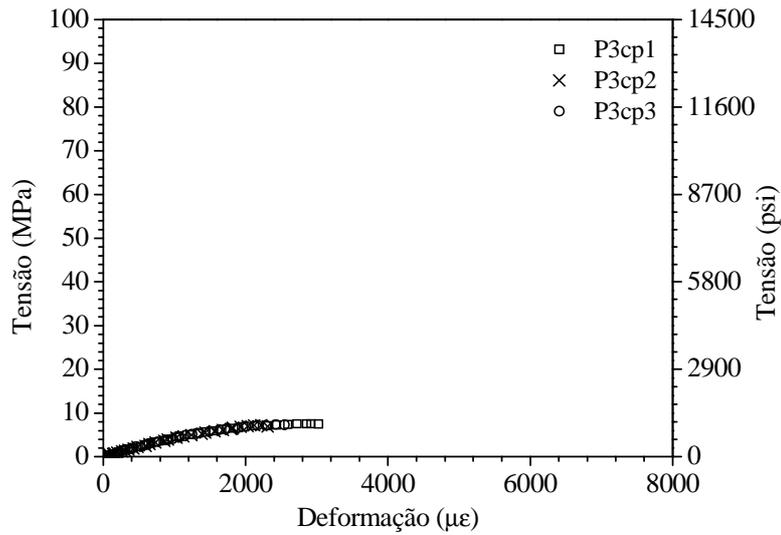


Figura 224 – Curvas tensão \times deformação da pasta P3 na idade de 3 dias.

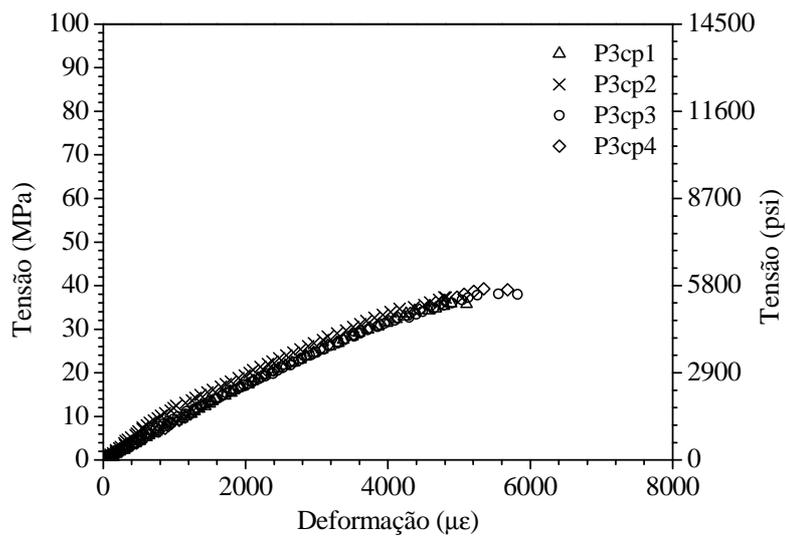


Figura 225 – Curvas tensão \times deformação da pasta P3 na idade de 28 dias.

A3.4. Curvas tensão-deformação da pasta P2G0,25

As curvas tensão *versus* deformação (axial e lateral) obtidas nos ensaios de compressão uniaxial da pasta P2G0,25 estão apresentadas na Figura 226.

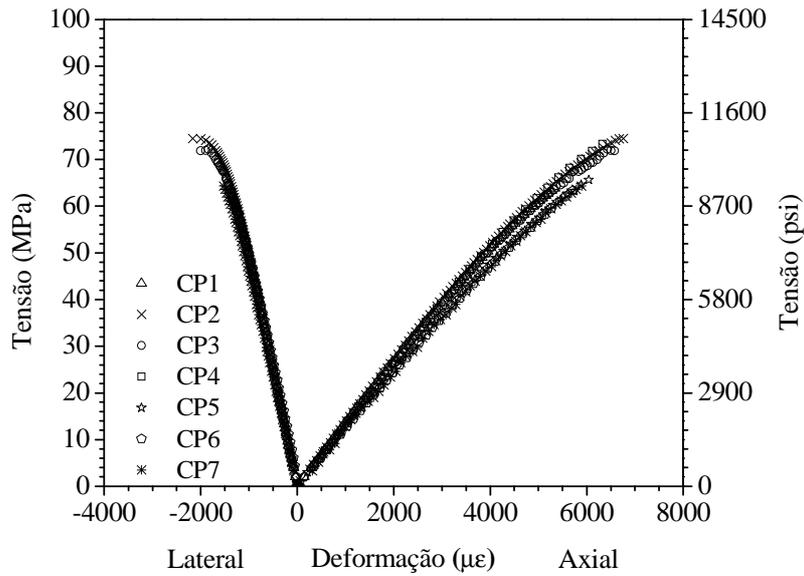


Figura 226 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25.

A3.5. Curvas tensão-deformação das pastas reforçadas com volastonita

As curvas tensão *versus* deformação (axial e lateral) obtidas nos ensaios de compressão uniaxial das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5 e P2G0,40V10,0 estão apresentadas na Figura 227, na Figura 228, na Figura 229 e na Figura 230, respectivamente.

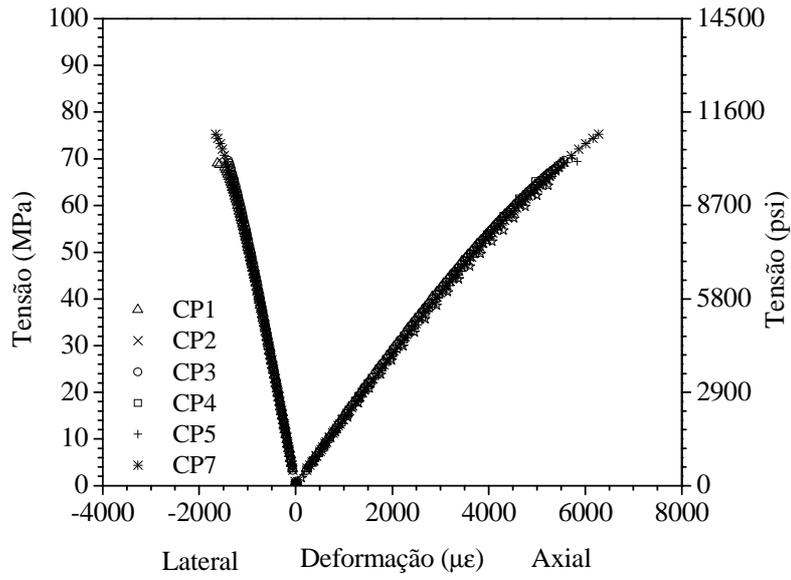


Figura 227 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25V2,5.

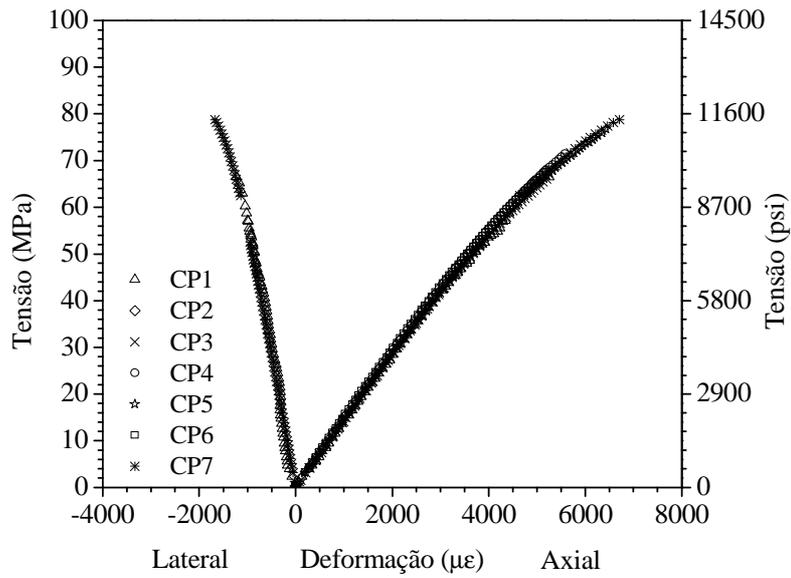


Figura 228 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30V5,0.

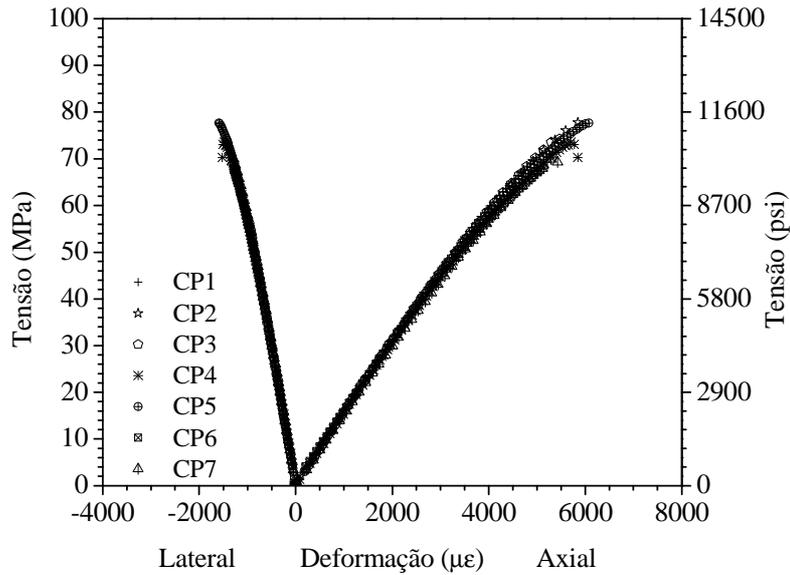


Figura 229 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,40V7,5.

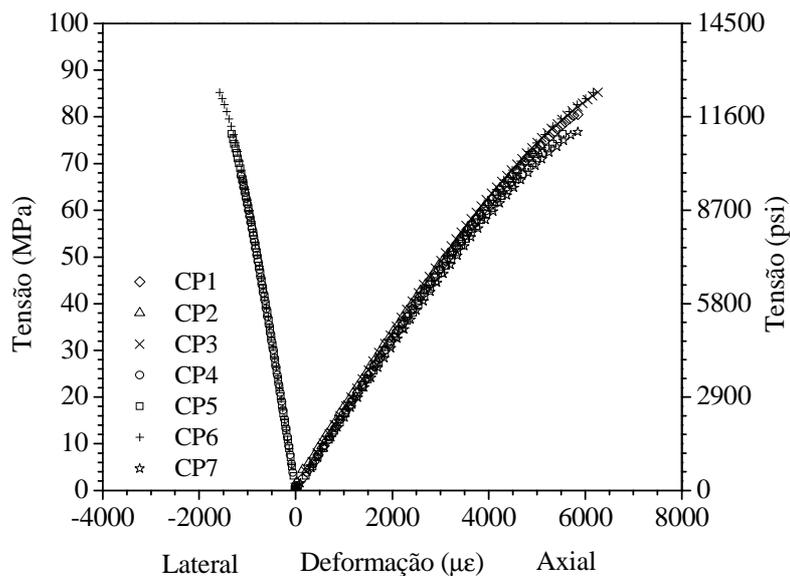


Figura 230 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,40V10,0.

A3.6. Curvas tensão-deformação das pastas reforçadas com PVA

As curvas tensão *versus* deformação (axial e lateral) obtidas nos ensaios de compressão uniaxial das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão apresentadas na Figura 231 e na Figura 232, respectivamente.

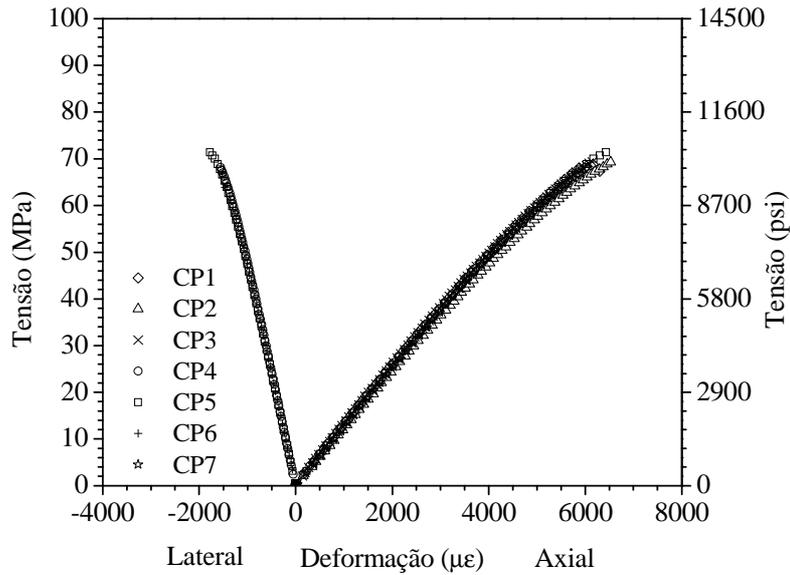


Figura 231 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,25PVA0,50.

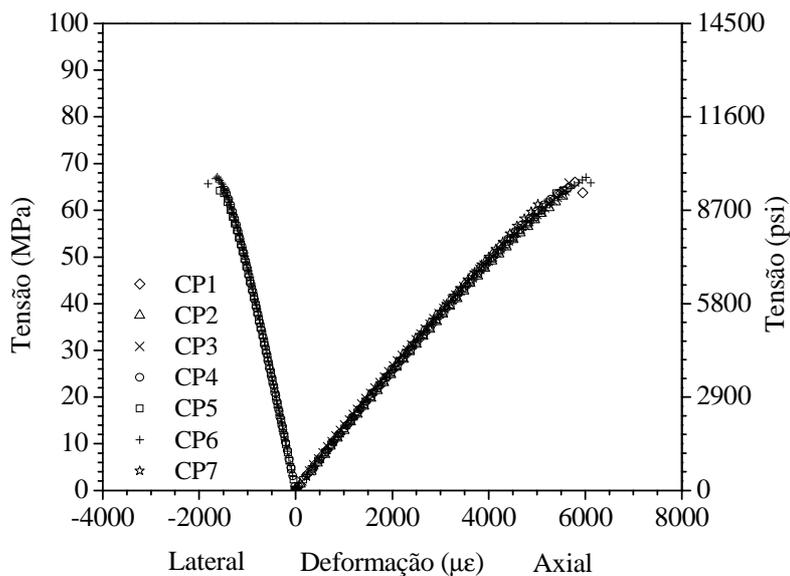


Figura 232 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PVA1,00.

A3.7. Curvas tensão-deformação das pastas reforçadas com polipropileno

As curvas tensão *versus* deformação (axial e lateral) obtidas nos ensaios de compressão uniaxial das pastas P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75 estão apresentadas na Figura 233 e na Figura 234, respectivamente.

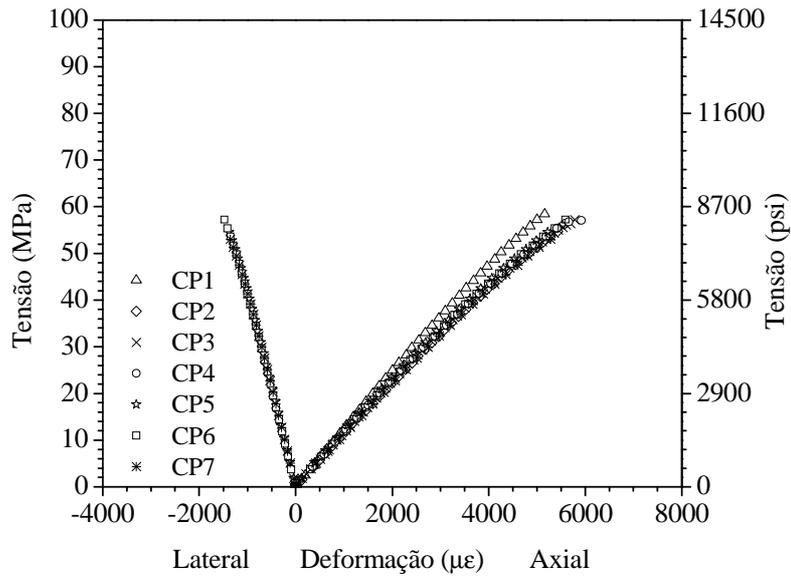


Figura 233 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PP0,50.

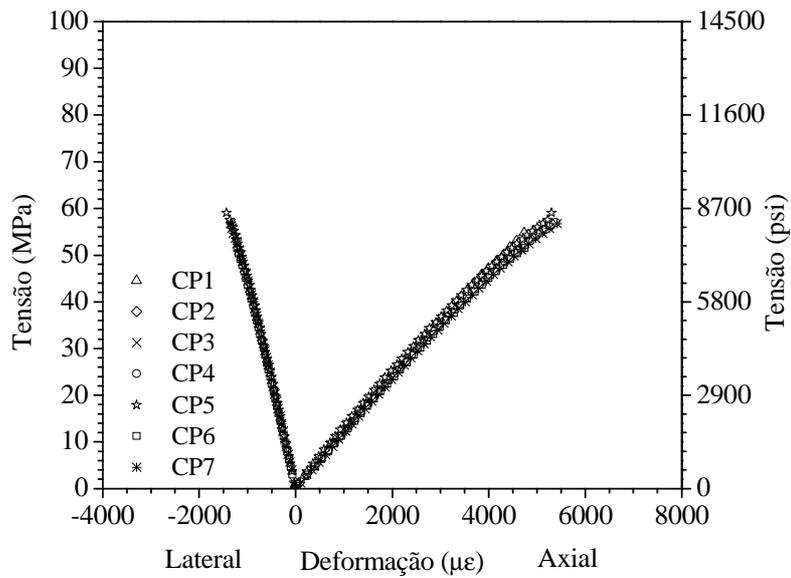


Figura 234 – Curvas tensão x deformação (axial e lateral) da pasta P2G0,30PP0,75.

A4. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO REFERENTES AOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

A4.1. Curvas tensão-deformação da pasta P1

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P1 sob tensões confinantes iguais a 2 MPa e 6 MPa estão apresentadas na Figura 235 e na Figura 236, respectivamente.

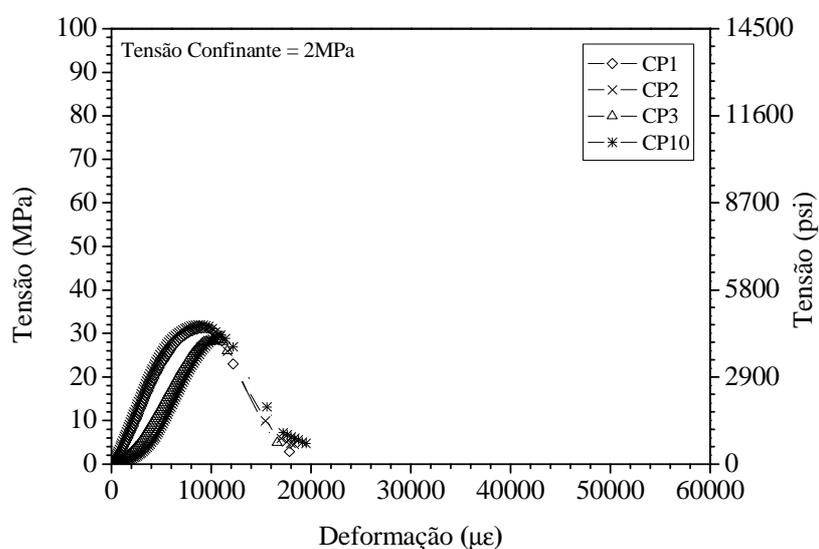


Figura 235 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 com tensão confinante igual a 2MPa.

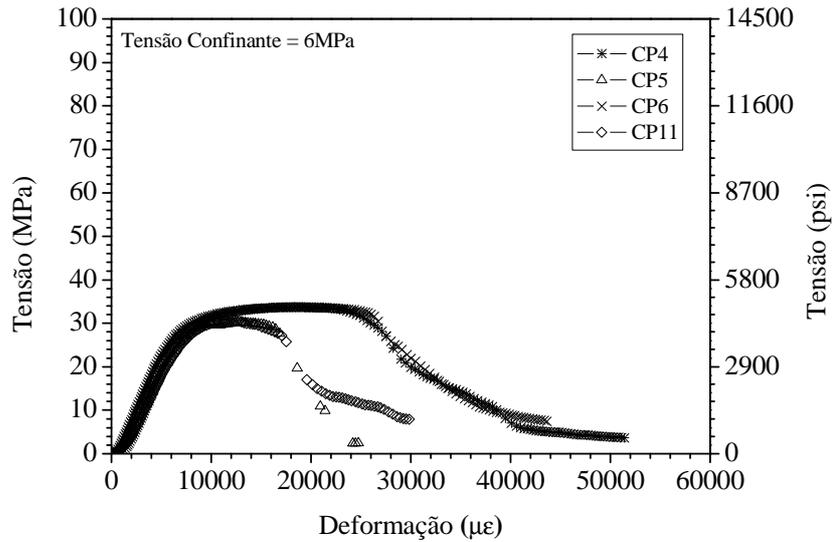


Figura 236 – Curvas tensão x deformação da pasta P1 com tensão confinante igual a 6MPa.

A4.2. Curvas tensão-deformação da pasta P2

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P2 sob tensões de confinamento iguais a 2 MPa e 6 MPa estão apresentadas na Figura 237 e Figura 238, respectivamente.

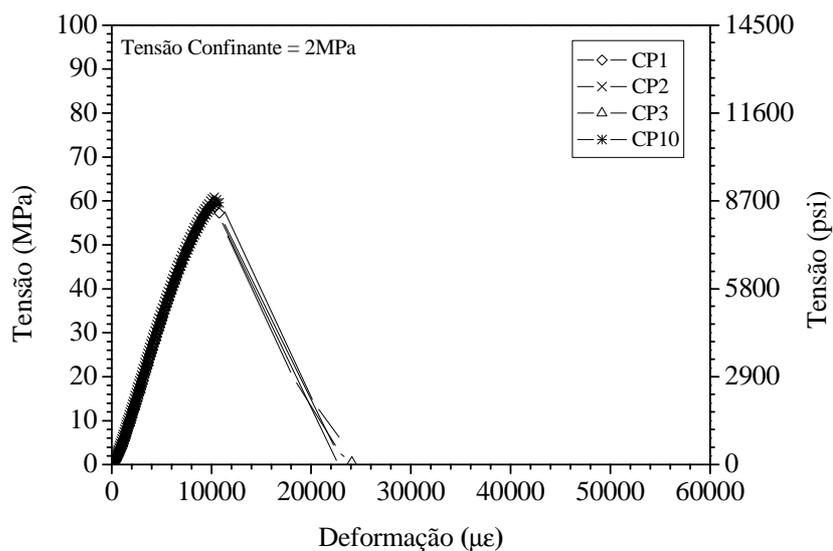


Figura 237 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 com tensão confinante igual a 2MPa.

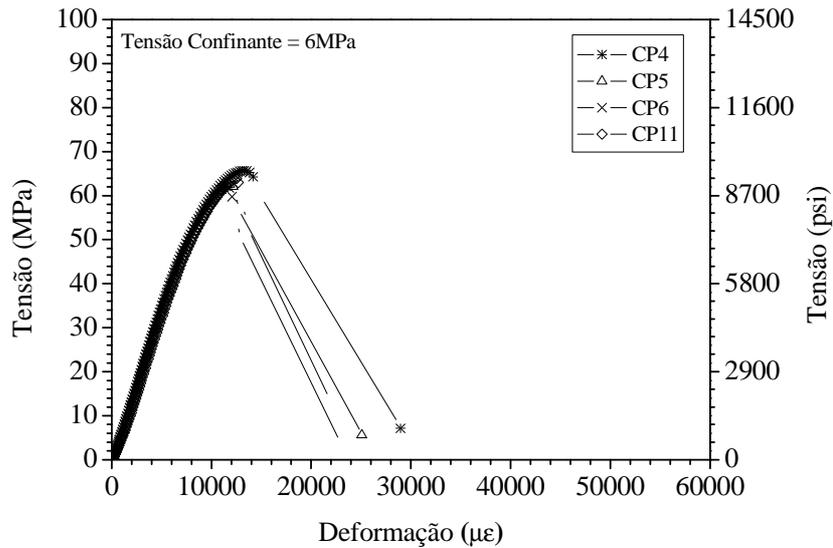


Figura 238 – Curvas tensão x deformação da pasta P2 com tensão confinante igual a 6MPa.

A4.3. Curvas tensão-deformação da pasta P3

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P3 sob tensões de confinamento iguais a 2 MPa e 6 MPa estão apresentadas na Figura 252 e na Figura 253, respectivamente.

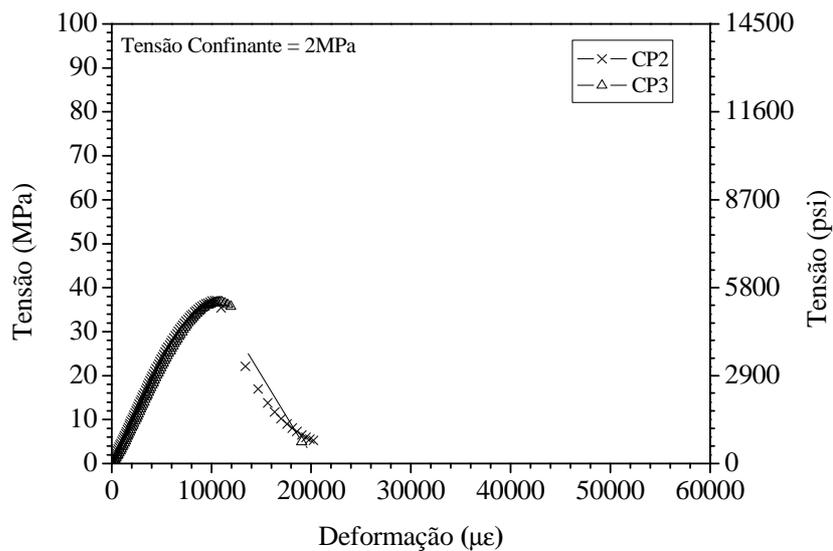


Figura 239 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 com tensão confinante igual a 2MPa.

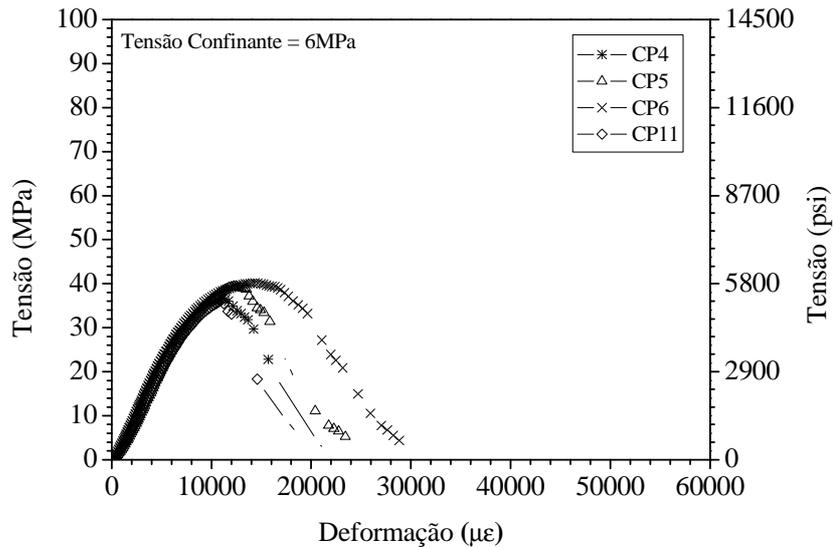


Figura 240 – Curvas tensão x deformação da pasta P3 com tensão confinante igual a 6MPa.

A4.4. Curvas tensão-deformação da pasta P2G0,25

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P2G0,25 sob tensões de confinamento iguais a 4 MPa e 8 MPa estão apresentadas na Figura 241 e na Figura 242, respectivamente.

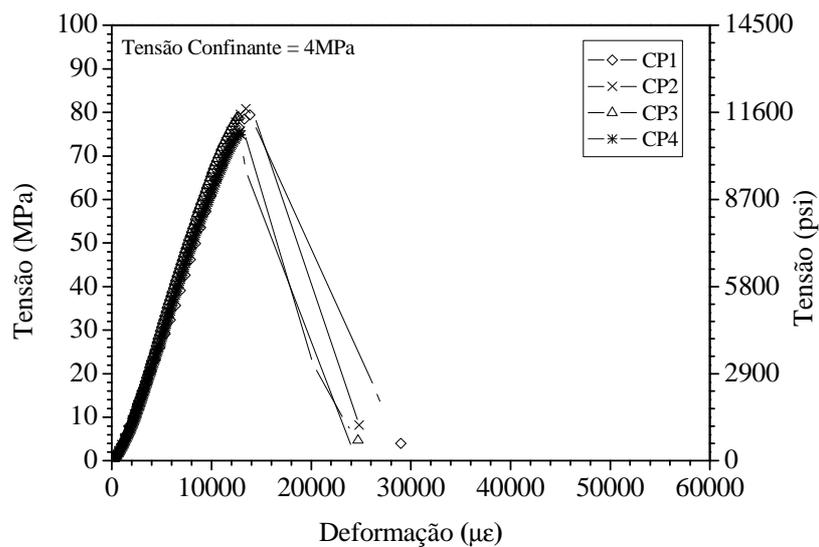


Figura 241 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25 com tensão confinante igual a 4 MPa.

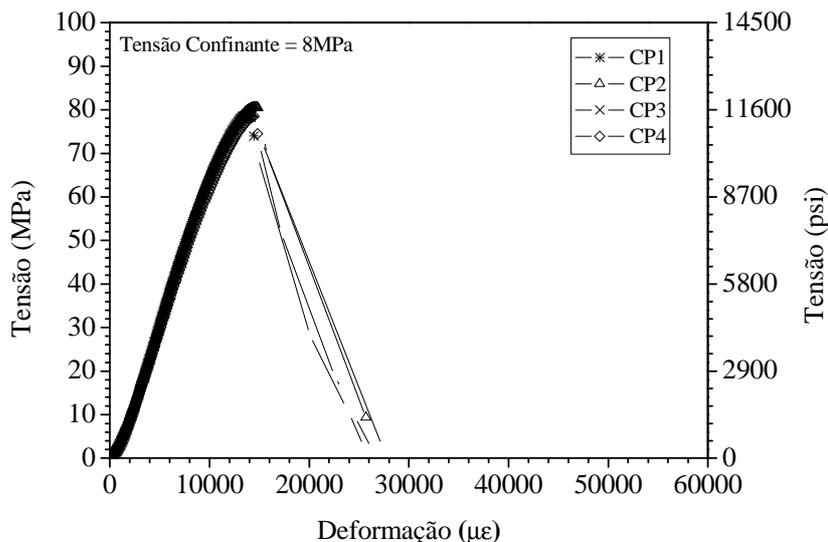


Figura 242 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25 com tensão confinante igual a 8 MPa.

A4.5. Curvas tensão-deformação da pasta P2G0,30V5,0

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P2G0,30V5,0 sob tensões de confinamento iguais a 2 MPa, 4 MPa e 8 MPa estão apresentadas na Figura 243, na Figura 244 e na Figura 245, respectivamente.

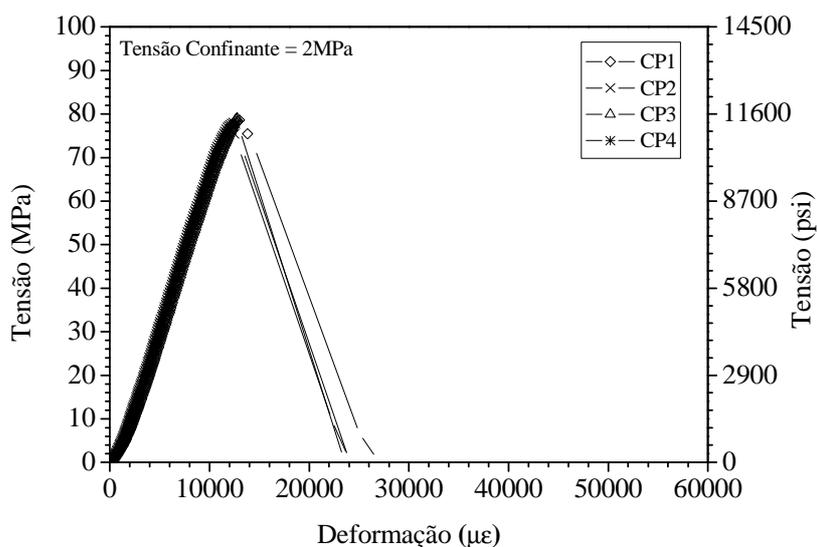


Figura 243 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 2 MPa.

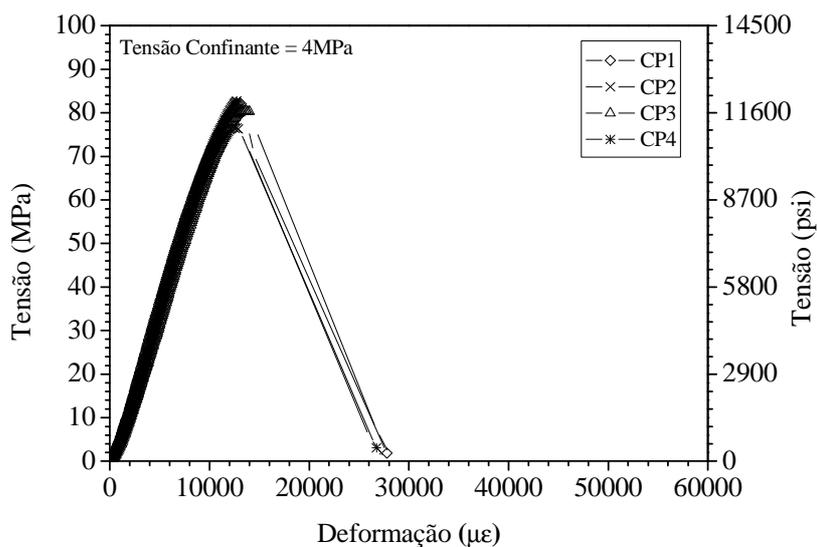


Figura 244 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 4 MPa.

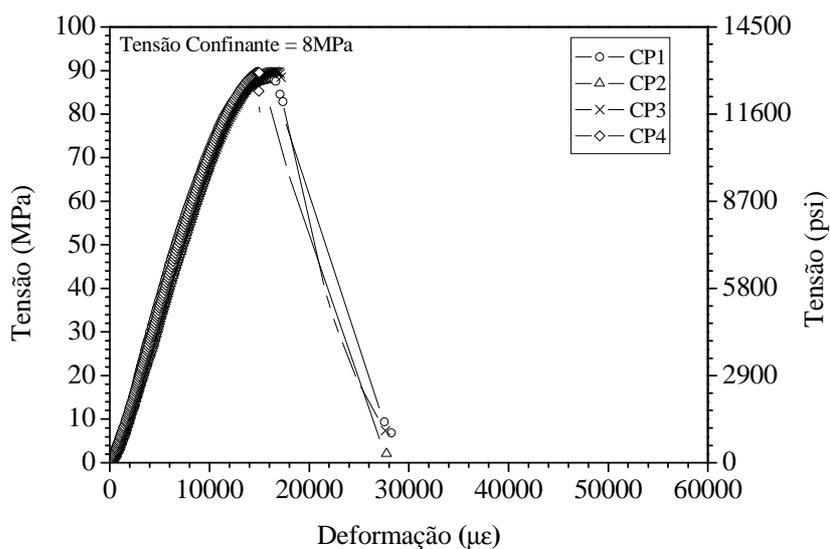


Figura 245 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30V5,0 com tensão confinante igual a 8 MPa.

A4.6. Curvas tensão-deformação da pasta P2G0,25PVA0,50

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P2G0,25PVA0,50 sob tensões de confinamento iguais a 4 MPa e 8 MPa estão apresentadas na Figura 246 e na Figura 247, respectivamente.

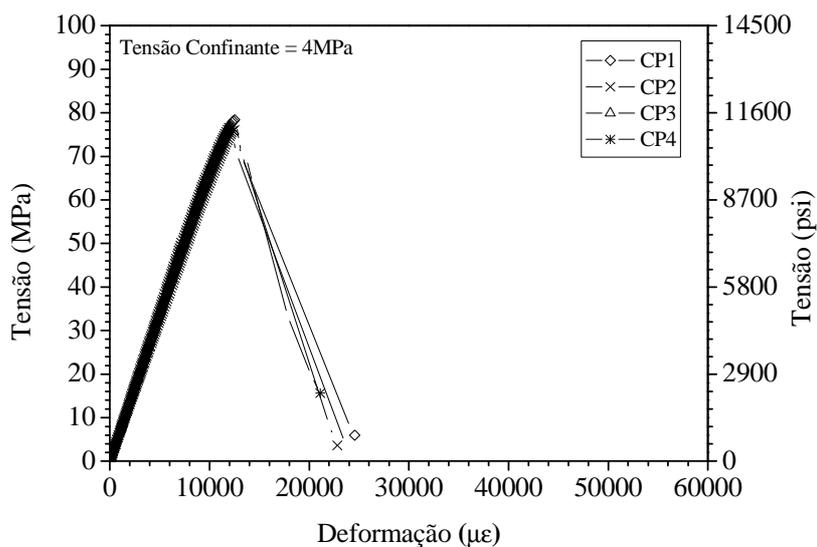


Figura 246 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25PVA0,50 com tensão confinante igual a 4 MPa.

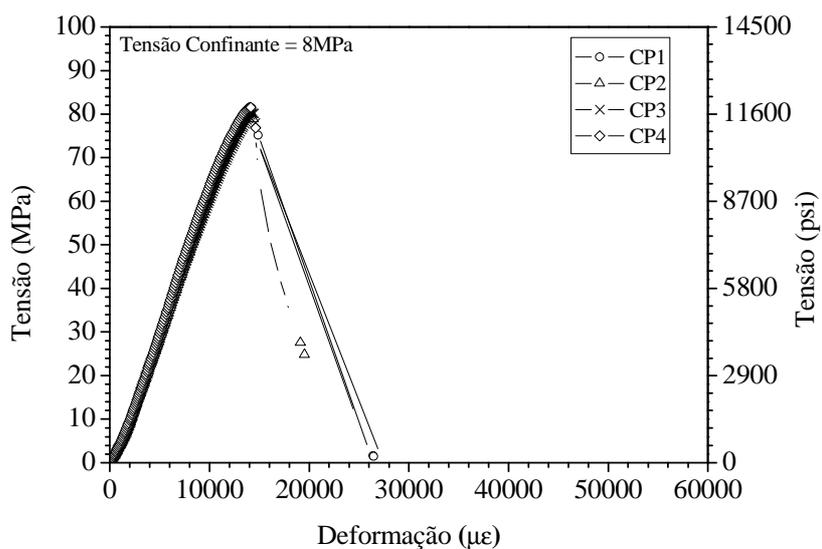


Figura 247 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,25PVA0,50 com tensão confinante igual a 8 MPa.

A4.7. Curvas tensão-deformação da pasta P2G0,30PP0,50

As curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão triaxial da pasta P2G0,30PP0,50 sob tensões de confinamento iguais a 2 MPa, 4 MPa e 8 MPa estão apresentadas na Figura 248, na Figura 249 e na Figura 250, respectivamente.

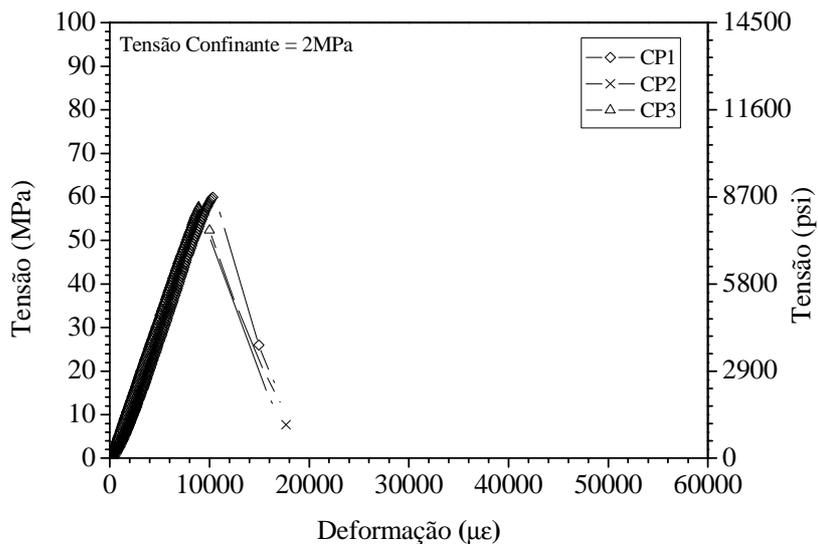


Figura 248 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 2 MPa.

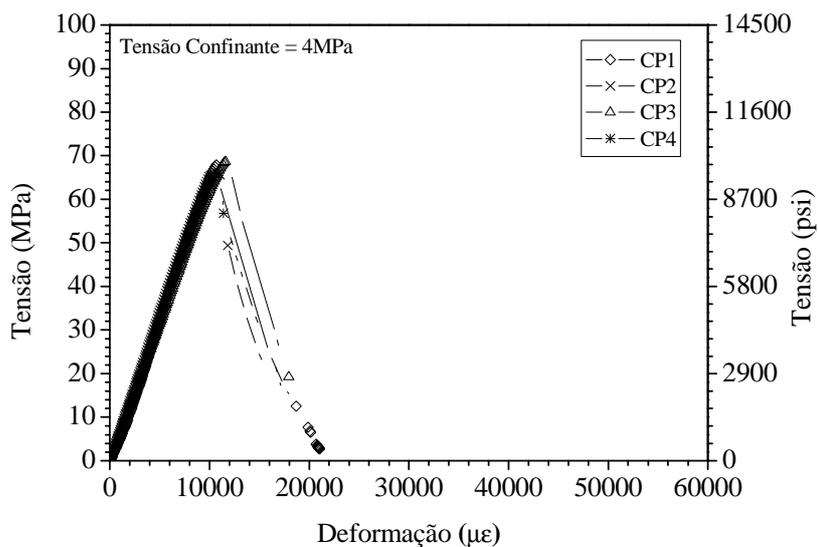


Figura 249 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 4 MPa.

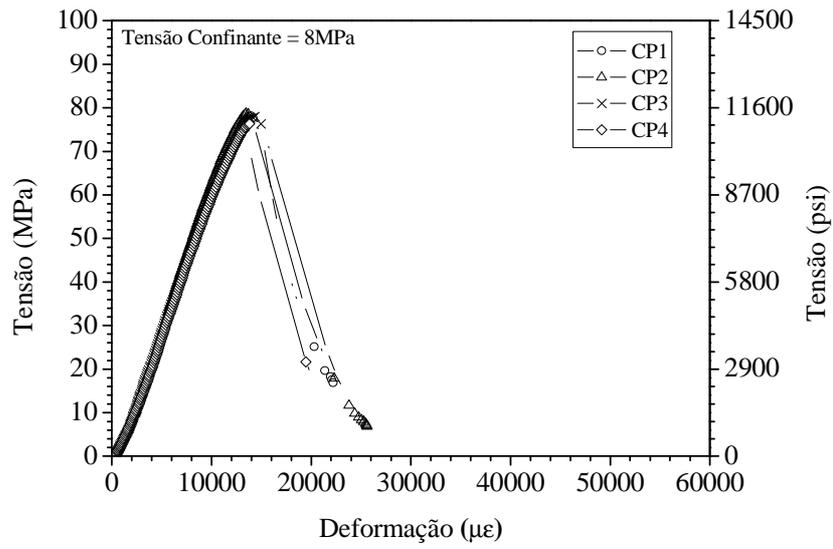


Figura 250 – Curvas tensão x deformação da pasta P2G0,30PP0,50 com tensão confinante igual a 8 MPa.

A5. CURVAS CARGA-DESLOCAMENTO

A5.1. Pastas Leves de Alto Desempenho

As curvas carga *versus* deslocamentos referentes aos ensaios de tração na flexão das pastas P1, P2 e P3 após 28 dias de cura estão apresentadas na Figura 251, na Figura 252 e na Figura 253, respectivamente.

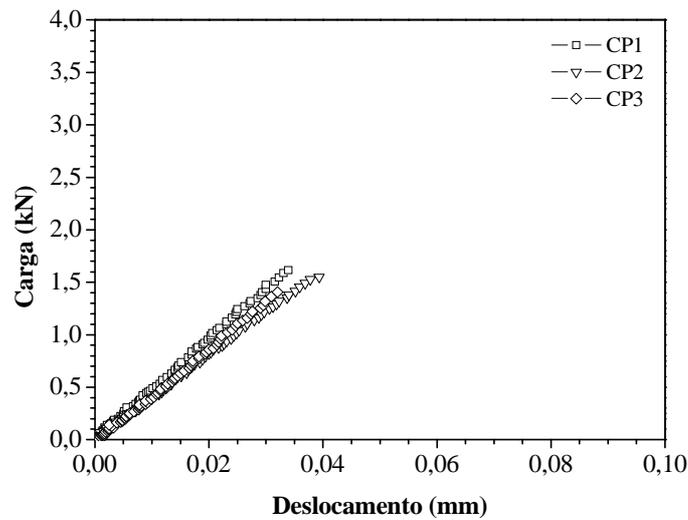


Figura 251 – Curvas carga x deslocamento da pasta P1 na idade de 28 dias.

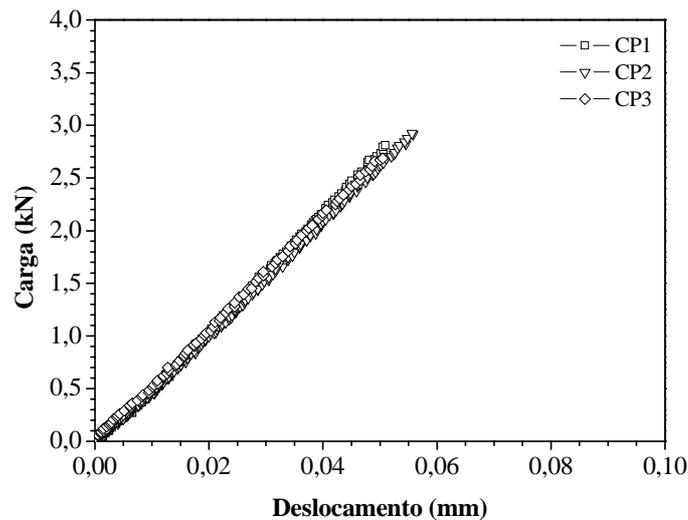


Figura 252 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2 na idade de 28 dias.

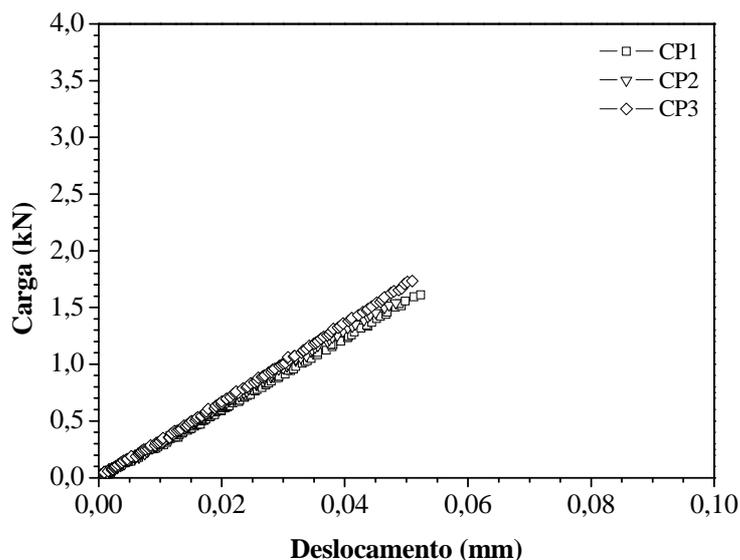


Figura 253 – Curvas carga x deslocamento da pasta P3 na idade de 28 dias.

A5.2. Pastas Leves Fibrosas

A5.2.1. Pasta de Referência

As curvas carga *versus* deslocamentos referentes aos ensaios de tração na flexão da pasta P2G0,25 estão apresentadas na Figura 254.

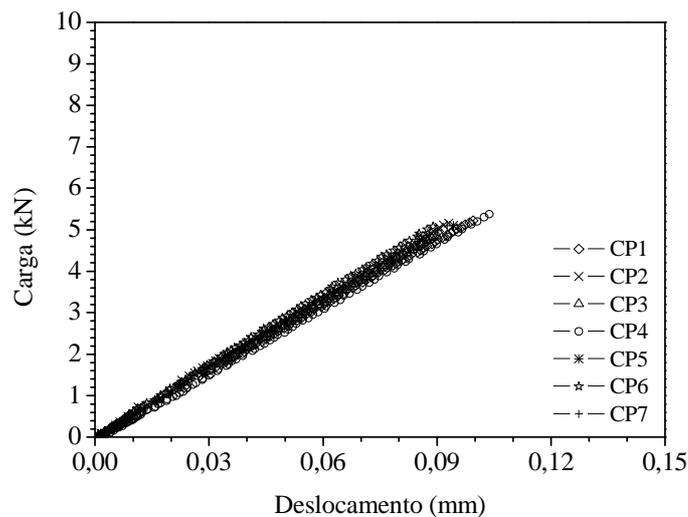


Figura 254 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25.

A5.2.2. Pastas Reforçadas com Volastonita

As curvas carga *versus* deslocamentos referentes aos ensaios de tração na flexão das pastas P2G0,25V2,5, P2G0,30V5,0, P2G0,40V7,5, P2G0,40V10,0, P2G0,25PVA0,50, P2G0,30PVA1,00, P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75 estão apresentadas na Figura 255, na Figura 256, na Figura 257, na Figura 258, na Figura 259, na Figura 260, na Figura 261 e na Figura 262, respectivamente.

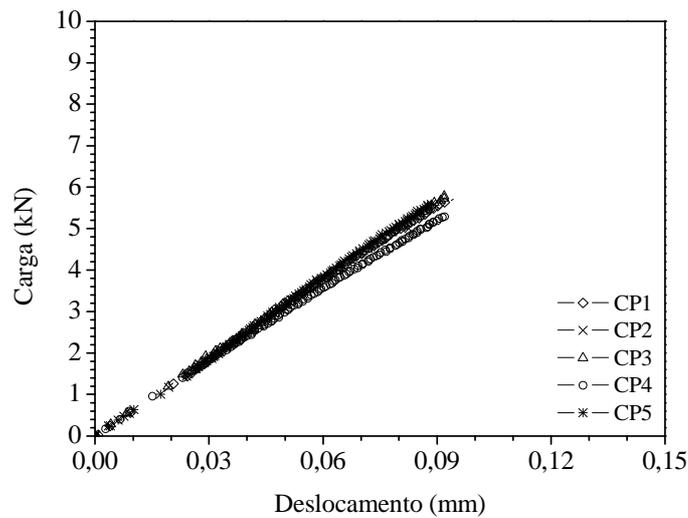


Figura 255 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25V2,5.

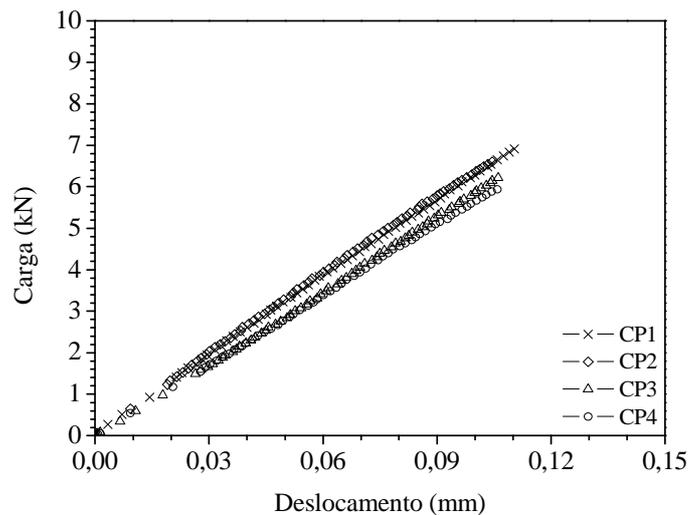


Figura 256 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30V5,0.

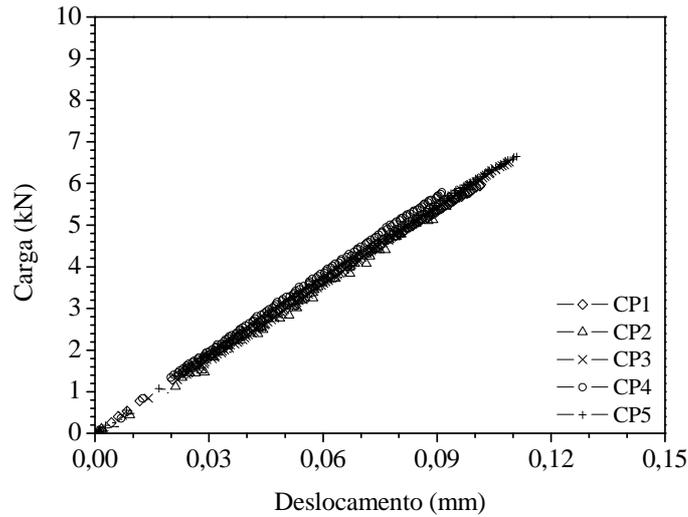


Figura 257 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,40V7,5.

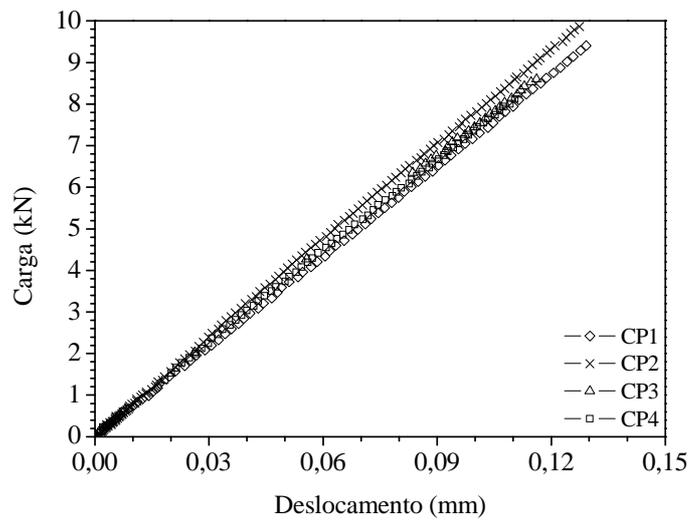


Figura 258 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,40V10,0.

A5.2.3. Pastas Reforçadas com PVA

As curvas carga *versus* deslocamentos referentes aos ensaios de tração na flexão das pastas P2G0,25PVA0,50 e P2G0,30PVA1,00 estão apresentadas na Figura 259 e na Figura 260, respectivamente.

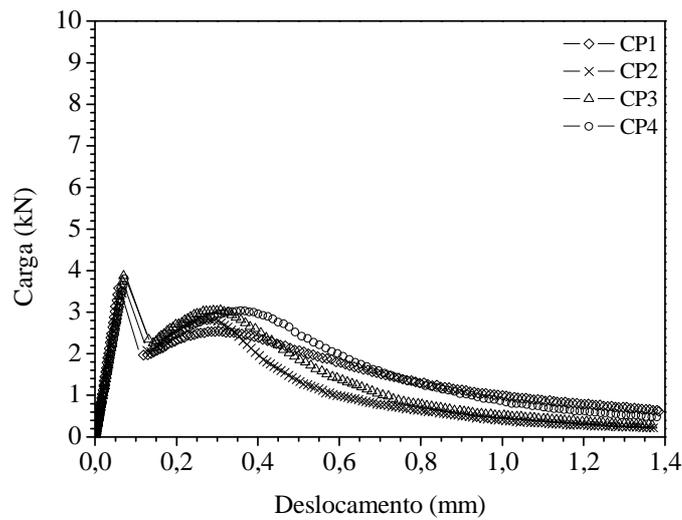


Figura 259 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,25PVA0,50.

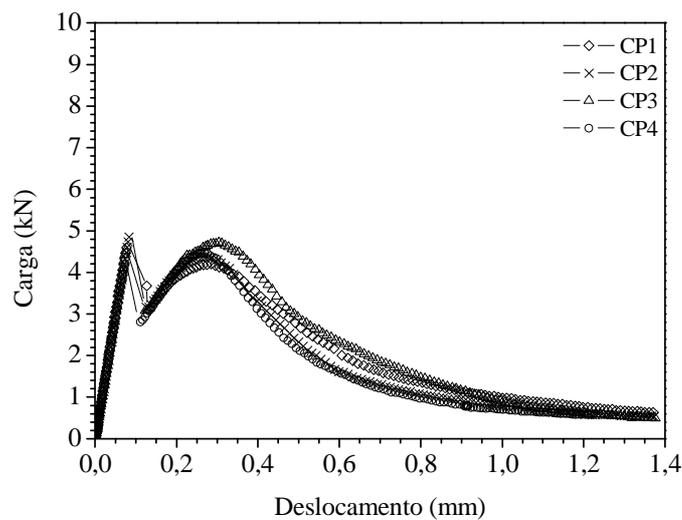


Figura 260 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PVA1,00.

A5.2.4. Pastas Reforçadas com Polipropileno

As curvas carga *versus* deslocamentos referentes aos ensaios de tração na flexão das pastas P2G0,30PP0,50 e P2G0,30PP0,75 estão apresentadas na Figura 261 e na Figura 262, respectivamente.

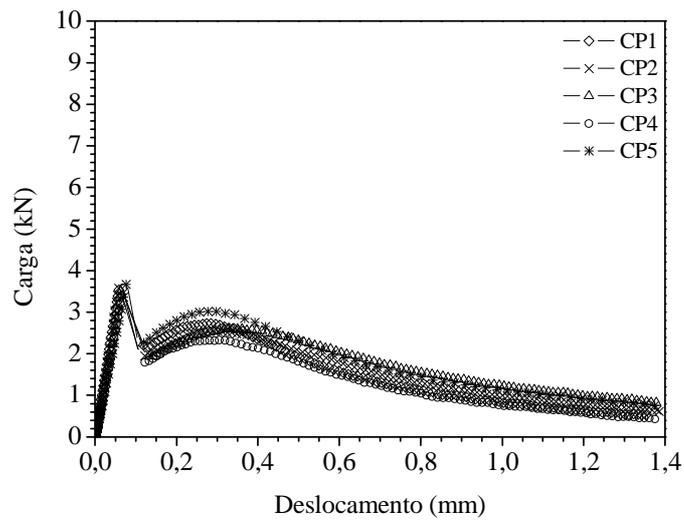


Figura 261 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PP0,50.

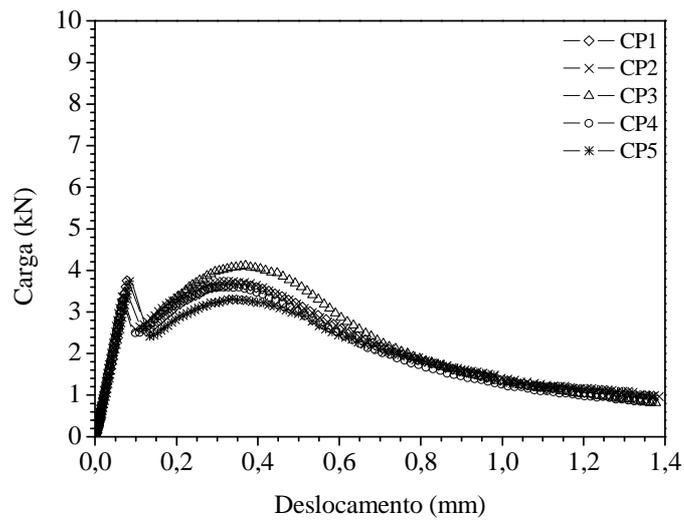


Figura 262 – Curvas carga x deslocamento da pasta P2G0,30PP0,75.

A6. ENSAIO RETRAÇÃO AUTÓGENA

A6.1. Curvas de Retração Autógena

As curvas de retração autógena *versus* tempo das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Figura 263, na Figura 264 e na Figura 265, respectivamente.

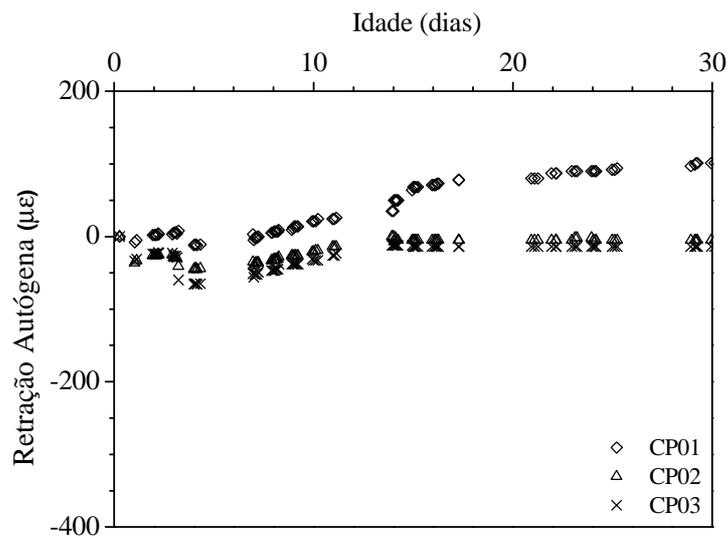


Figura 263 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P1.

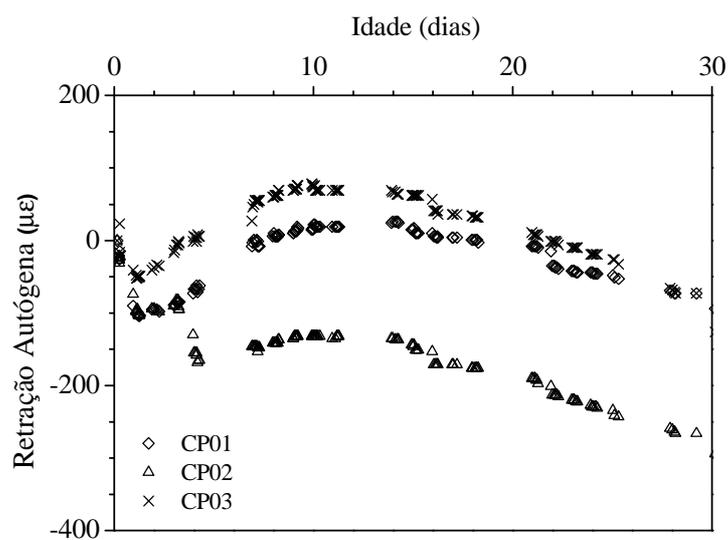


Figura 264 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P2.

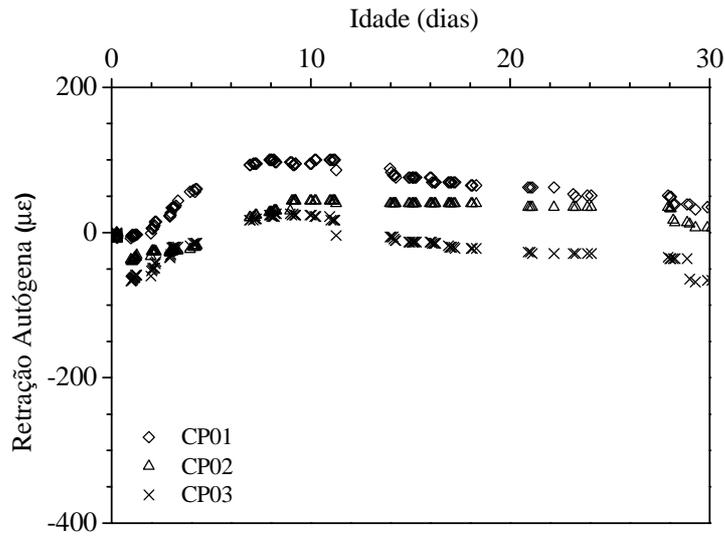


Figura 265 – Curvas de retração autógena x tempo da pasta P3.

A6.2. Curvas de Variação de Temperatura

As curvas de variação de temperatura *versus* tempo das pastas P1, P2 e P3 estão apresentadas na Figura 266, na Figura 267 e na Figura 268, respectivamente.

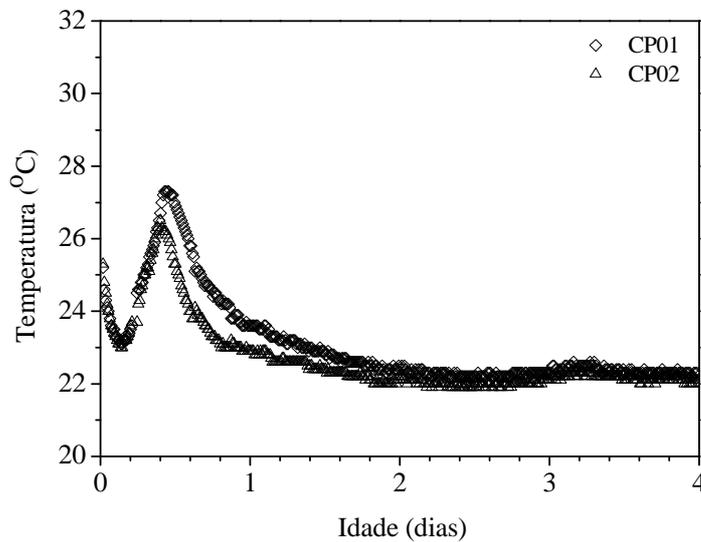


Figura 266 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P1.

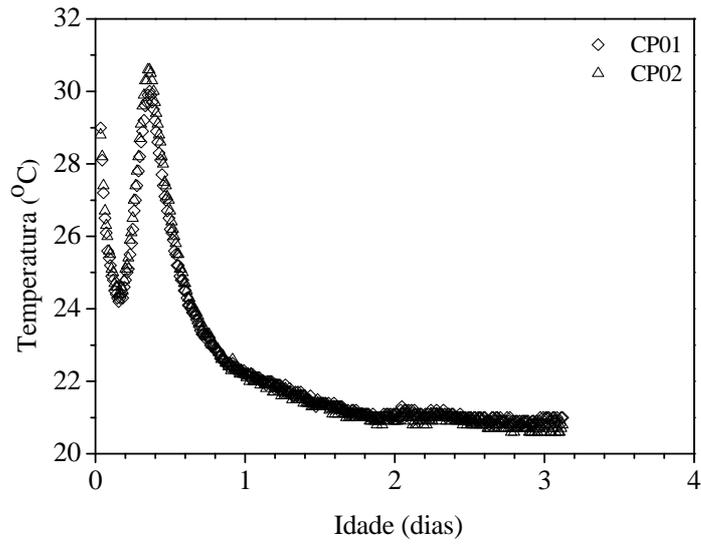


Figura 267 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P2.

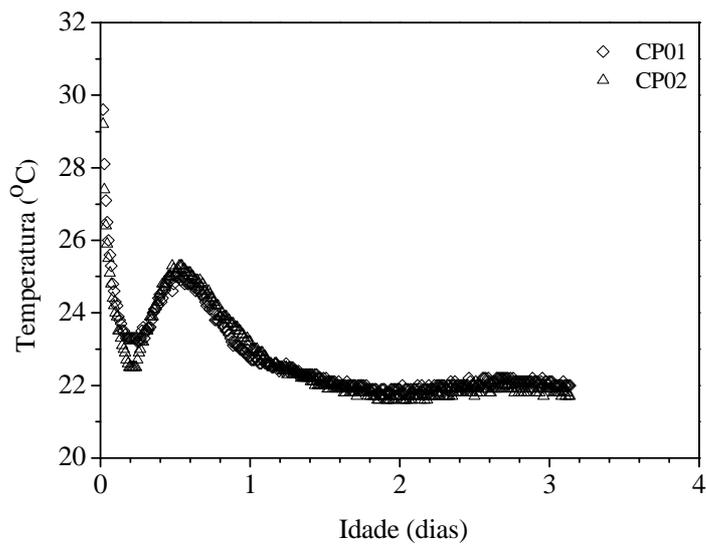


Figura 268 – Curvas de variação de temperatura x tempo da pasta P3.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)