



COPPE/UFRJ

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DE PASTAS CIMENTÍCIAS PARA
POÇOS DE PETRÓLEO SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR**

Rosana de Freitas Correia

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Rio de Janeiro

Julho de 2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

AVALIAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DE PASTAS CIMENTÍCIAS PARA
POÇOS DE PETRÓLEO SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR

Rosana de Freitas Correia

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

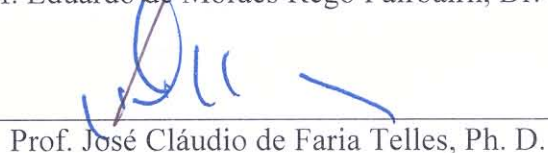
Aprovada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.



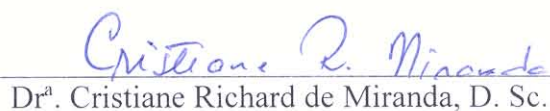
Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr. Ing.



Prof. José Cláudio de Faria Telles, Ph. D.



Prof. Guilherme Cordeiro Chagas, D. Sc.



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

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2009

Correia, Rosana de Freitas

Avaliação mecânica e estrutural de pastas cimentícias para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor/
Rosana de Freitas Correia. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXVI, 168 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 151-156.

1. Pastas de Cimentação. 2. Injeção de Vapor. 3. Poços de Petróleo. 4. Modelo Físico. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Para minha doce mãe Elma de Freitas Correia

*“Disse Jesus: Eu sou a luz do mundo;
quem me segue não andar  em trevas,
mas terá a luz da vida.” (João 8:12)*

Agradecimentos

Ninguém constrói nada sozinho, principalmente quando se sonha! Desta forma gostaria de agradecer às pessoas que foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Ao meu Deus que na sua suprema graça e bondade nos concede a vida. Pela fortaleza nos momentos de desânimo, consolo nos momentos de tristeza, refrigério nos momentos de angústia. A Ti serei sempre e eternamente grata!

A minha mãe exemplo de bondade e perseverança, ao meu pai e ao meu irmão. À distância, na verdade, estreitou os nossos laços de família.

Aos meus orientadores: ao Romildo pelo entusiasmo, incentivo, competência e pelo voto de confiança, ao Dudu pela genialidade, pela paixão a ciência, pelas explicações e deduções de tudo. Enfim, cada um com sua particularidade cooperou para o êxito desse trabalho.

As amigas construídas que foram imprescindíveis. A Graziella Maria, Ábia, a minha turma de mestrado, as meninas queridas: Tamara, Flavinha, Luciene, Aline, Ana, Jessick e em especial a Vanessa. Também não posso me esquecer dos meninos: Diego, Hector, Aloízio, Juan, Aldo, Nelson, Anderson e Bruno.

Aos colegas e amigos do Labest: Reila, Margareth, João, Ederli, Guilherme, Janine, Vivian, Maria Rita, Ana, Ana Lúcia, Patrícia, Lourdes, Camila e Alex pela

experiência passada e pelo companheirismo. A Cíntia pela recepção e acolhida. A Nina pela acessibilidade de informações, ao Silvosso e George pela disposição em tirar minhas dúvidas na modelagem. A Luzidele, Sandra e Amanda pela cordialidade e rapidez no atendimento das nossas solicitações. Aos Técnicos: Clodoaldo, Flávio, Rodrigo, Eduardo, Júlio, Alessandro, Manuel, Arnaldo, Flávio Sarquis, Rosângela e Santiago. Ao Hidekel e sua equipe: Dalton e Sebastião pela montagem do ensaio com o modelo do poço. Ao Serginho da geotecnia pelo apoio na montagem do ensaio triaxial.

Ao professor Fernando Castro da engenharia mecânica pela disposição e presteza nos ensaios com o modelo, emprestando seu tempo e equipamento de aquisição de som.

Ao CENPES/PETROBRAS nas pessoas de Cristiane, Cristina, Aline, Gabriel, Ronaldo, Silvio, Cláudio e demais técnicos, pelo auxílio nos ensaios de caracterização das pastas.

Ao apoio financeiro da FINEP e do CNPq e FAPERJ na concessão da bolsa de mestrado.

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

AVALIAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DE PASTAS CIMENTÍCIAS PARA POÇOS DE PETRÓLEO SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR

Rosana de Freitas Correia

Julho/2009

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn.

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho buscou desenvolver materiais cimentícios modificados com polímero SBR e fibra de volastonita e avaliar seu comportamento mecânico e estrutural para aplicação em poços de petróleo submetidos à injeção de vapor. Foi também desenvolvido um procedimento experimental para avaliação destes materiais submetidos a gradientes térmicos de 250°C, similares aos aplicados em campo. Quatro famílias de pastas foram estudadas: de referência (PREF), com 5% e 10% de polímero SBR (PP5 e PP10), com 2,3% e 4,6% de fibra de volastonita (PW2,3 e PW4,6) e com 10% de polímero SBR e 2% e 4% de fibra de volastonita (PP10W2 e PP10W4). Complementarmente, outro material denominado de SHCC (do inglês *Strain Hardening Cementitious Composites*) também foi estudado por apresentar alta capacidade de deformação e múltipla fissuração quando submetido a esforços de tração. Com exceção do SHCC, todas as pastas estudadas apresentaram reologia adequada à cimentação de poços. De modo geral, as pastas com polímero e fibras de volastonita apresentaram melhor desempenho com relação ao comportamento mecânico que a pasta de referência. Com relação ao gradiente térmico de primeira fissura e a abertura média de fissura, os materiais que apresentaram melhor performance foram o SHCC (131°C e 33µm) e o PP10W4 (98°C e 79µm). Entretanto, o SHCC foi estudado como uma primeira aplicação para poços de petróleo sem a pretensão, neste trabalho, de tornar sua reologia adequada à cimentação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL AND STRUCTURAL EVALUATION OF CEMENT SLURRIES
FOR OIL WELLS SUBMITTED TO STEAM INJECTION

Rosana de Freitas Correia

July/2009

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Eduardo de Moraes Rego Fairbairn.

Department: Civil Engineering

This work aims the development of cementitious materials modified with SBR polymer and the evaluation of its mechanical and structural behavior for application in oil wells submitted to steam injection. It was also established an experimental procedure for the structural evaluation of these materials submitted to thermal gradients of about 250°C, similar to the ones found in the well operation. Four families of slurries have been studied: reference (PREF), with 5% and 10% of SBR polymer (PP5 e PP10), with 2.3% and 4.6% of wollastonite fiber (PW2.3 e PW4.6) and with 10% of SBR polymer together with 2% e 4% of wollastonite fiber (PP10W2 e PP10W4). Complementary, another class of material, named Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC), that presents multiple cracking and high ductility in direct tension, have also been studied. Except for SHCC all the pastes fulfill the rheological requirements for oil well cementation. In what concerns the mechanical behavior, in general, the polymeric and wollastonite slurries presented better performance than the reference paste. Regarding the first crack thermal gradient and crack opening, the better performances were obtained for SHCC (131°C and 33µm) and PP10W4 (98°C and 79µm). However, SHCC has been studied as a first approach for its using as oil well cementation material since its rheological behavior is not yet adequate for such purpose.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Organização da Tese	5
2. ESTADO DE TENSÃO NA BAINHA DE CIMENTO PROVACADO POR GRADIENTES DE TEMPERATURA	7
2.1 Técnica de Injeção de Vapor e análise de tensões na bainha de cimento..	7
2.2 Novas características para a bainha de cimento.....	13
3. MATERIAIS MODIFICADORES DE PROPRIEDADES DE MATRIZES CIMENTÍCIAS	17
3.1 Polímeros Modificadores de Matrizes Cimentícias	17
3.1.1 <i>Hidratação de matrizes cimentícias contendo polímeros modificadores..</i>	<i>19</i>
3.1.2 <i>Comportamento reológico de matrizes cimentícias modificadas com polímeros</i>	<i>23</i>
3.1.3 <i>Influência da adição de polímeros nas propriedades mecânicas de matrizes cimentícias</i>	<i>28</i>
3.2. Fibras.....	31
3.2.1 <i>Influência das fibras na reologia de matrizes cimentícias</i>	<i>32</i>
3.2.2 <i>Influência do reforço fibroso nas propriedades mecânicas de matrizes cimentícias</i>	<i>34</i>
3.2.3 <i>Compósitos Cimentícios com Endurecimento na tração Direta (SHCC) </i>	<i>36</i>
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	39

4.1	Caracterizações físico - químicas dos materiais	42
4.1.1	<i>Distribuição Granulométrica</i>	42
4.1.2	<i>Massa Específica</i>	43
4.1.3	<i>Superfície Específica</i>	43
4.1.4	<i>Composição Química</i>	44
4.1.5	<i>Ponto de Saturação e Compatibilidade</i>	45
4.1.6	<i>Ensaio de demanda d'Água para determinação da compactidade experimental</i>	45
4.2	Dosagem, preparo e cura das formulações propostas	47
4.2.1	<i>Dosagem das formulações propostas</i>	47
4.2.2	<i>Preparo das formulações</i>	49
4.2.3	<i>Cura das amostras</i>	52
4.3	Caracterização das Pastas no Estado Fresco	55
4.3.1	<i>Reologia</i>	55
4.3.2	<i>Água Livre ambiente</i>	58
4.3.3	<i>Filtrado</i>	59
4.3.4	<i>Peso Específico no estado plástico</i>	60
4.3.5	<i>Índice de consistência</i>	61
4.4	Caracterização Física das Pastas	62
4.4.1	<i>Porosidade, absorção e massa específica no estado endurecido</i>	62
4.4.2	<i>Estabilidade</i>	64
4.5	Caracterização Mecânica das Pastas no Estado Endurecido	65
4.5.1	<i>Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade Coeficiente de Poisson</i>	66
4.5.2	<i>Resistência à Tração na Flexão</i>	69
4.6	Modelo de Poço de Petróleo	70
4.7	Análise estatística dos resultados.....	84
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1	Caracterização dos Materiais	85
5.1.1	<i>Cimento Portland Classe G e cimento CP II-F</i>	85
5.1.2	<i>Sílica Ativa e cinza volante</i>	86
5.1.3	<i>Superplastificante</i>	87

5.1.4 Polímero SBR, estabilizador de látex e antiespumante	89
5.1.5 Areia	89
5.1.6 Fibra de Volastonita	90
5.1.7 Fibra de PVA	91
5.1.8 Água	92
5.2 Propriedades das Pastas no Estado Fresco	92
5.2.1 Reologia, filtrado, água livre ambiente e peso específico	92
5.2.1.1 Reologia	92
5.2.1.2 Filtrado, água livre e peso específico normal e pressurizado	95
5.2.2 Índice de consistência	97
5.3 Caracterização Física	98
5.3.1 Porosidade, absorção e massa específica	98
5.3.1.1 Porosidade	98
5.3.1.2 Absorção	99
5.3.1.3 Massa específica	99
5.3.2 Estabilidade	100
5.4 Propriedades Mecânicas das Pastas no Estado Endurecido	101
5.4.1 Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson	101
5.4.2 Resistência à Tração na Flexão	105
5.4.3 Seleção dos materiais a serem ensaiados no modelo do poço	109
5.5 Resultados do Modelo Físico do Poço	111
5.5.1 Temperaturas	111
5.5.2 Força de restrição térmica	115
5.5.3 Deformação Radial	119
5.5.4 Fissuração	123
5.5.4.1 PREF	123
5.5.4.2 PP10	128
5.5.4.3 PW4,6	132
5.5.4.4 PP10W4	135
5.5.4.5 SHCC	139
5.5.4.6 Comparação entre as amostras	142
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	145

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
ANEXO A – CURVAS TENSÃO <i>versus</i> DEFORMAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	157
ANEXO B – CURVAS CARGA <i>versus</i> DESLOCAMENTO DAS AMOSTRAS.....	160
ANEXO C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Esquema de um poço, (b) aplicação da injeção de vapor promovendo a fissuração da bainha de cimento e (c) a produção de óleo + água.....	10
Figura 2.2 - σ_r :Tensão radial e σ_θ : tensão tangencial (Adaptado de Thiercelin <i>et al.</i> , 1997).....	12
Figura 2.3 - Equilíbrio de corpo rígido.....	12
Figura 2.4 – Curvas hipotéticas tensão <i>versus</i> deformação de alguns materiais.....	14
Figura 3.1 – Modelo simplificado da formação da co-matriz de cimento e polímero (Adaptado de OHAMA 1995).....	22
Figura 4.1 – Etapas do Programa experimental.....	41
Figura 4.2 – Organograma dos ensaios realizados.....	41
Figura 4.3 – Equipamento Malvern Mastersizer.....	43
Figura 4.4 – Picnômetro a Gás AccuPyc 1330.....	43
Figura 4.5 – Equipamento Blaine BSAI.....	44
Figura 4.6 – Equipamento de Raios X.....	44
Figura 4.7 – (a) Misturador e (b) Funil de Marsh.....	45
Figura 4.8 – (a) Misturador planetário e (b) Pasta homogênea sem umidade nas paredes.....	46
Figura 4.9 – (a) Misturador de Palhetas Chandler: (a) capacidade de 1 litro e (b) capacidade de 5 litros.....	51
Figura 4.10 – Consistômetro Atmosférico.....	51
Figura 4.11 – (a) Misturador planetário e (b) mesa vibratória.....	52
Figura 4.12 – Cura dos corpos-de-prova durante as primeiras 24h.....	53
Figura 4.13 – (a) Banho utilizado para aquecimento e resfriamento e (b) Banho a 50°C constante.....	53
Figura 4.14 – Rampa de temperatura do período de cura das amostras.....	54
Figura 4.15 - Evolução da resistência da pasta de referência.....	54

Figura 4.16 – Viscosímetro coaxial Chandler	56
Figura 4.17 – (a) Proveta e (b) Repouso das amostras	59
Figura 4.18 – Ensaio de filtrado: (a) Acessórios do filtro, (b) preenchimento do filtro prensa, (c) ensaio em andamento e (d) aspecto final da pasta ensaiada ..	60
Figura 4.19 – Ensaio de Peso Específico: (a) Balança de lama e (b) Balança tipo pressurizada	61
Figura 4.20 – Mesa de espalhamento com molde tronco-cônico	62
Figura 4.21 – Estufa	63
Figura 4.22 – (a) Peso saturado e (b) Peso imerso	63
Figura 4.23 – (a) Tubo decantado e (b) amostras	65
Figura 4.24 – (a) Máquina universal de ensaios Shimadzu UH-F1000 kNI e (b) Detalhe dos transdutores elétricos utilizados no ensaio	67
Figura 4.25 – Faceamento das amostras em torno mecânico	67
Figura 4.26 – (a) <i>Setup</i> de compressão com deformação transversal e (b) Capeamento dos corpos-de-prova.....	68
Figura 4.27 – (a) Máquina Universal de ensaios Shimadzu modelo AGX 100 kN, (b) Ensaio de flexão no prisma.....	70
Figura 4.28 – Perfil típico utilizado com as condições inicial de temperatura.....	71
Figura 4.29 – Perfil típico de poço (ROCHA e AZEVEDO, 2007).....	71
Figura 4.30 – (a) Molde bipartido com formato cilíndrico e (b) molde bipartido com tampa de fundo	72
Figura 4.31 – Tubos de revestimento API 5L	73
Figura 4.32 – Seção transversal do modelo	73
Figura 4.33 – Tampas: (a) tampa inferior e (b) tampa superior	74
Figura 4.34 – Montagem da forma: (a) Acessórios da forma, (b) - montagem do molde bipartido, (c) tubo de revestimento encaixado na tampa de fundo, (d) perfil lateral da forma e (e) forma pronta com haste de içamento.....	75
Figura 4.35 – Modelo de poço pronto para ser ensaiado termicamente	75
Figura 4.36 – Resistência em formato de U	76
Figura 4.37 – Sistema de aquisição de temperatura: (a) dois termopares para acoplar ao modelo, (b) equipamento portátil de medição de temperatura e (c) computador de aquisição	77
Figura 4.38 – (a) Resistência em formato helicoidal e (b) limalhas de aço inoxidável..	77
Figura 4.39 – Seção longitudinal do modelo com as variáveis ΔT e $T_{m\acute{e}dia}$	79

Figura 4.40 – (a) Quadro comando de controle do aquecimento, (b) detalhamento do quadro e (c) termopar tipo J.....	80
Figura 4.41 – (a) Anel de 50.8 mm ou 2” e (b) torquímetro utilizado para apertar os parafusos	80
Figura 4.42 – (a) Shimadzu 300 kN e (b) transdutores elétricos de deslocamento	81
Figura 4.43 – (a) Sistema de aquisição do som, (b) microfone e (c) placa de aquisição de dados	82
Figura 4.44 – Instrumentação do modelo com os microfones.....	83
Figura 4.45 – Sistema de referência do ensaio	84
Figura 4.46 – Fissurometro.....	84
Figura 5.1 – Curva granulométrica do cimento classe G e CP II-F 32.....	86
Figura 5.2 – Curva granulométrica da sílica ativa (VELASCO, 2008) e da cinza volante (MAGALHÃES, 2008).....	87
Figura 5.3 – Curvas de escoamento em cone Marsh para pastas com cimento classe G com diferentes teores de superplastificantes.....	88
Figura 5.4 – Curvas de escoamento em cone Marsh da pasta de referência com diferentes teores de superplastificantes	88
Figura 5.5 – Curva granulométrica da areia (MAGALHÃES, 2008)	90
Figura 5.6 - Fibra de volastonita.....	91
Figura 5.7 – Fibra de PVA.....	91
Figura 5.8 – Curvas típicas tensão de escoamento <i>versus</i> taxa de deformação.....	92
Figura 5.9 – Evolução da viscosidade plástica e limite de escoamento	94
Figura 5.10 – (a) espalhamento da mistura.....	97
Figura 5.11 – Curvas típicas tensão <i>versus</i> deformação na compressão das formulações propostas	101
Figura 5.12 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das pastas	102
Figura 5.13 – Gráfico comparativo do módulo de elasticidade das pastas.....	103
Figura 5.14 – Modo de ruptura na compressão: (a) PREF; (b) PP5; (c) PP10, (d) PW2,3; (e) PW4,6; (f) PP10W2; (g) PP10W4 e (h) SHCC.....	105
Figura 5.15 – Curvas típicas de força <i>versus</i> deslocamento das pastas.....	106
Figura 5.16 – Comparativo das resistências à tração das formulações propostas	107
Figura 5.17 – Curva típica de tensão <i>versus</i> deslocamento do SHCC	108
Figura 5.18 – Modo de ruptura na flexão: (a) PREF, (b) PP5, (c) PP10, (d) PW2.3, (e) PW4.6, (f) PP10W2, (g) PP10W4 e (h) SHCC	109

Figura 5.19 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PREF111	
Figura 5.20 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PP10	112
Figura 5.21 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PW4,6	112
Figura 5.22 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PP10W4	112
Figura 5.23 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com SHCC	113
Figura 5.24 – Força de Restrição <i>versus</i> temperatura média do corpo-de-prova com PREF	115
Figura 5.25 – Força de Restrição <i>versus</i> temperatura média do corpo-de-prova com PP10	116
Figura 5.26 – Força de Restrição <i>versus</i> temperatura média do corpo-de-prova com PW4,6	116
Figura 5.27 – Força de Restrição <i>versus</i> temperatura média do corpo-de-prova com PP10W4	116
Figura 5.28 – Força de Restrição <i>versus</i> temperatura média do corpo-de-prova com SHCC	117
Figura 5.29 – Fluxo de água livre nas fissuras durante o ensaio do 1º ciclo	119
Figura 5.30 – Deformação radial <i>versus</i> temperatura média PREF: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo	120
Figura 5.31 – Deformação radial <i>versus</i> temperatura média PP10: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo	120
Figura 5.32 – Deformação radial <i>versus</i> temperatura média PW4,6: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo	120
Figura 5.33 – Deformação radial <i>versus</i> temperatura média PP10W4: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo	121
Figura 5.34 – Deformação radial <i>versus</i> temperatura média SHCC: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo	121
Figura 5.35 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PREF – Microfone 01	124
Figura 5.36 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PREF – Microfone 02	124

Figura 5.37 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PREF: (a) Visto de topo, (b) lateral e (c) vista final.....	126
Figura 5.38 – Mapa de fissuração Final do corpo-de-prova com o material PREF sem os anéis: (a) frente e (b) fundo	126
Figura 5.39 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PREF: (a) frente e (b) fundo.....	127
Figura 5.40 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PP10 – Microfone 01	128
Figura 5.41 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PP10 – Microfone 02	129
Figura 5.42 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PP10: (a) visto de topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final	130
Figura 5.43 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PP10 sem os anéis: (a) frente e (b) fundo	131
Figura 5.44 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PP10: (a) frente e (b) fundo.....	132
Figura 5.45 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PW4,6 – Microfone 01	132
Figura 5.46 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PW4,6 – Microfone 02	133
Figura 5.47 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PW4,6: (a) Topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final.....	134
Figura 5.48 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PW4,6 sem os anéis: (a) frente e (b) fundo	134
Figura 5.49 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PW4,6: (a) frente e (b) fundo	135
Figura 5.50 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PP10W4 – Microfone 01	136
Figura 5.51 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com PP10W4 – Microfone 02	136
Figura 5.52 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PP10W4: (a) topo, (b) detalhe lateral e (c)vista final.....	137
Figura 5.53 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PP10W4 sem os anéis: (a) frente e (b) fundo.....	138

Figura 5.54 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PP10W4: (a) frente e (b) fundo	139
Figura 5.55 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com SHCC – Microfone 01	139
Figura 5.56 – Pressão Sonora <i>versus</i> Tempo do corpo-de-prova com SHCC – Microfone 02	140
Figura 5.57 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material SHCC: (a) topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final.....	141
Figura 5.58 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material SHCC sem os anéis: (a) frente e (b) fundo	141
Figura 5.59 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o SHCC: (a) frente e (b) fundo	142
Figura 5.60 – Abertura de fissura média	144
Figura A.01 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão - PREF.....	157
Figura A.02 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão - PP5.....	157
Figura A.03 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão - PP10.....	158
Figura A.04 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão – PW2,3	158
Figura A.05 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão – PW4,6	158
Figura A.06 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão – PP10W2	159
Figura A.07 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão – PP10W4	159
Figura A.08 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação na compressão – SHCC	159
Figura B.01 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PREF	160
Figura B.02 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PP5.....	160
Figura B.03 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PP10.....	161
Figura B.04 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PW2,3	161
Figura B.05 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PW4,6.....	161
Figura B.06 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PP10W2.....	162
Figura B.07 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – PP10W4.....	162
Figura B.08 – Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento - tração na flexão – SHCC	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores da temperatura de transição vítrea (T _g) de alguns polímeros	30
Tabela 4.1 – Nomenclatura das pastas.....	40
Tabela 4.2 – Traço unitário das pastas propostas em kg/m ³	49
Tabela 4.3 – Traço unitário do SHCC em kg/m ³	49
Tabela 4.4 – Fatores de tensão cisalhante e constante da mola do viscosímetro	58
Tabela 5.1 – Composição química em óxidos do cimento classe G e do CII-F.....	85
Tabela 5.2 – Características físicas do cimento classe G e do CII-F	86
Tabela 5.3 – Características físicas da sílica ativa e cinza volante.....	86
Tabela 5.4 – Características físicas do superplastificante	88
Tabela 5.5 – Características físicas do Látex SBR.....	89
Tabela 5.6 – Características físicas do Estabilizador de Látex SBR.....	89
Tabela 5.7 – Características físicas do Antiespumante	89
Tabela 5.8 – Características físicas da areia	89
Tabela 5.9 – Características físicas da fibra de volastonita JG	90
Tabela 5.10 – Características físicas da fibra de PVA	91
Tabela 5.11 – Propriedades no estado fresco - Reologia.....	93
Tabela 5.12 – Resultados de filtrado, água livre e peso específico normal e pressurizado	95
Tabela 5.13 – Propriedade do estado fresco do SHCC.....	97
Tabela 5.14 – Propriedades físicas dos materiais: Porosidade, absorção e massa específica com respectivos coeficientes de variação	98
Tabela 5.15 – Resultados de estabilidade das formulações propostas	100
Tabela 5.16 – Resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação de pico na compressão e coeficiente de Poisson com os respectivos coeficientes de variação	101

Tabela 5.17 – Resultados da Resistência à tração na flexão com os respectivos coeficientes de variação (% entre parênteses) das pastas	105
Tabela 5.18 – Resultados da Resistência à tração na flexão com os respectivos coeficientes de variação (% entre parênteses) do SHCC.....	108
Tabela 5.19 – Critérios utilizados para a seleção dos materiais para o modelo de poço	110
Tabela 5.20 – Resumo das curvas típicas de aquecimento dos modelos ensaiados para o 1º Ciclo.....	113
Tabela 5.21 – Resumo das curvas típicas de aquecimento dos modelos ensaiados para o 2º Ciclo.....	113
Tabela 5.22 – Temperatura média máxima, máxima força de restrição do ensaio e máxima força de restrição teórica do 1º e 2º ciclo	118
Tabela 5.23 – Deformação Máxima no 1º e 2º ciclo	122
Tabela 5.24 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PREF: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo	125
Tabela 5.25 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PP10: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo	129
Tabela 5.26 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PW4,6: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo	133
Tabela 5.27 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PP10W4: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo	137
Tabela 5.28 – Relação geral da 1º fissura do arquivo sonoro, temperaturas interna e externa do modelo e respectivos gradientes.....	143
Tabela 5.29 – Abertura média de fissura	144
Tabela C.01 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da Reologia	163
Tabela C.02 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Viscosidade Plástica).....	163
Tabela C.03 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Limite de escoamento)	163
Tabela C.04 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Gel Inicial).....	164
Tabela C.05 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Gel Final).....	164
Tabela C.06 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise do estado fresco.....	164
Tabela C.07 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Filtrado)	164

Tabela C.08 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Peso específico normal).....	165
Tabela C.09 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Peso específico pressurizado).....	165
Tabela C.10 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise de massa específica, absorção e porosidade	165
Tabela C.11 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (massa específica)	165
Tabela C.12 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (absorção)	166
Tabela C.13 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Porosidade).....	166
Tabela C.14 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da resistência à compressão	166
Tabela C.15 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (resistência à compressão)	166
Tabela C.16 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (módulo de elasticidade)	167
Tabela C.17 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (deformação máxima na compressão).....	167
Tabela C.18 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Coeficiente de Poisson).....	167
Tabela C.19 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da resistência à tração	167
Tabela C.20 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (resistência à tração na flexão)	168
Tabela C.021 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (deslocamento máximo na flexão)	168

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Absorção

AA – Absorção de água

API – *American Petroleum Institute*

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA - Análise de variância

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

c - Compacidade

C – Compacidade experimental

C₂S - Silicato dicálcico

C₃A - Aluminato tricálcico

C₃S - Silicato tricálcico

C₄AF - Ferroaluminato tetracálcico

Ca⁺²- Íons de cálcio

Ca(OH)₂ ou CH - Hidróxido de cálcio (portlandita)

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello
(Petrobras)

CP – Concreto polimérico

CIP – Concreto impregnado com polímero

CPCP – Concreto polimérico de cimento Portland

CPR – Concreto de Pós Reativos

CO₂ – Gás carbônico

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação

CV – Coeficiente de Variação

d - Diâmetro

D₈₀- Tamanho abaixo do qual se encontra 80% da massa de material

E - Módulo de elasticidade

E_{ci} – Módulo de Elasticidade secante

ECC - *Engineered Cementitious Composites*

EVA - Etileno/Acetato de Vinila

F_τ – Fator de tensão cisalhante

F_m – Coeficiente de mola de torção

F_c – Força de ruptura

f_t – Resistência à tração na flexão

f_c – Resistência à compressão

FRCC - *Fibre Reinforced Cement Composites*

HEC - Hidroxietil-Celulose

HPFRCC – *High performance Fiber Reinforced Cement Composites*

l - comprimento

LABEST – Laboratório de estruturas

m_a - Massa da água

m – massa de material

m_i – Massa imersa

m_s – Massa seca

m_{Sat} – Massa saturada

MEC – Método do Empacotamento Compressível

NBR - Norma Brasileira Registrada

NM - Norma Mercosul

NUCAT - Núcleo de Catálise (COPPE/UFRJ)

P – Carga aplicada

PVA – Acetato de polivinila

PET - Polietileno Tereftalato

PE – Polietileno

PROCELAB – Procedimentos e Métodos de Laboratório destinados á Cimentação de Poços Petrolíferos

PT- Porosidade total

PS – Poliestireno

PVDC - Policloreto de Vinilideno

P_t – Porosidade

P_{ar} – Massa da seção ao ar

P_{imerso} – Massa da seção imersa

Q_{30} – Perda de fluido em 30 minutos

Q_t – Volume de fluido coletado

RPC – *Reactive Powder Cement*

rps – Rotação por segundo

rpm – Rotação por minuto

R_o – Raio interno do rotor

R_1 – Raio externo do “bob”

SBR – Copolímero Butadieno-Estireno

SHCC – *Strain hardening Cementitious Composites*

t – Tempo

T - Tenacidade

T_g - Temperatura de transição vítrea

t_v – Temperatura do vapor aquecido

t_i – Temperatura inicial

ρ - Massa específica do material

τ - Tensão cisalhante

η - Viscosidade plástica;

$\dot{\gamma}$ - Taxa de deformação ou Gradiente de velocidade de deformação.

τ₀ - Tensão cisalhante crítica ou limite de escoamento (L.E.), em Pa;

θ - Leitura do viscosímetro em graus

ρ_s – Massa específica

γ_{seção} – Massa específica da seção

σ_a – Tensão maior (σ_a = 0,30F_c)

σ_b – Tensão básica (σ_b = 0,5 MPa)

σ_{cr} – Tensão de 1º fissura

σ_u – Tensão de ruptura

ε_a – Deformação específica longitudinal da tensão maior

ε_b – Deformação específica longitudinal da tensão básica

ν - Coeficiente de Poisson

Δl – Deslocamento máximo

ΔT – Gradiente de temperatura (t_v – t_i)

δ_{cr} – Deslocamento de 1º fissura

1. INTRODUÇÃO

A cimentação de poços de petróleo é uma das etapas do processo de completção que visa tanto conferir suporte mecânico ao poço quanto promover a vedação hidráulica dos diversos intervalos permeáveis entre a parede do poço e seu tubo de revestimento. A integridade da cimentação é muito importante, pois o prosseguimento das operações, sem o devido isolamento hidráulico, ocasiona a produção de fluidos indesejáveis, como água. A produção excessiva de água onera os custos com tratamento e descarte, acarretando riscos ambientais, além de implicar na perda de energia do reservatório gerando dispêndios com sistemas de elevação artificial (THOMAS, 2001).

Recentes descobertas de óleo e gás em grandes profundidades proporcionaram novos cenários aos poços submetendo-os a altas pressões e temperatura. Não obstante, a necessidade de aumentar o fator de recuperação de reservatórios depletados ou de óleos pesados incentivou a utilização de técnicas de injeção de água, gás e vapor. Desta forma, esse novo panorama vem impondo novos desafios à tecnologia de completção no que diz respeito às características das pastas de cimentação (HERNÁNDEZ, 2006).

No caso específico de poços sujeitos à injeção de vapor, técnica mais utilizada na recuperação de reservatórios de óleos pesados, sua aplicação causa grandes danos à

bainha de cimento devido ao elevado gradiente térmico que impõe ao material grandes deformações (COELHO *et al.*, 2003). Assim, seria de interesse que a capacidade de deformação da bainha de cimento, que em pastas convencionais é baixa, fosse aumentada para que não ocorresse a perda da integridade do revestimento devido ao aparecimento de fissuras que ocasionam danos ao poço.

Diante do exposto, pesquisas têm sido conduzidas por diversos institutos de pesquisa e pesquisadores de companhias de serviço tais como Halliburton, BJ Services, Schlumberger e ExxonMobil visando produzir pastas de cimentação com maior tenacidade e menores módulos de elasticidade, que proporcionem maior capacidade de absorver as deformações produzidas pela variação térmica (THIERCELIN *et al.*, 1997; DEAN e TORRES, 2002; PEDERSEN *et al.*, 2006; STILES, 2006; MYERS *et al.*, 2005 e BOSMA *et al.*, 2000). Para se obter um material cimentício com tais características é necessária a incorporação de materiais que modificam substancialmente as propriedades das pastas convencionais de cimentação.

No presente estudo foram utilizados materiais como copolímero Butadieno-Estireno (SBR) e fibras de volastonita com o intuito de aumentar a capacidade de deformação das pastas de cimentação. Para tanto, tomou-se como referência uma pasta de cimentação contendo materiais cimentícios (cimento Portland classe G e sílica ativa), aditivo superplastificante e água. Foram incorporadas na pasta de referência teores de SBR variando de 5% a 10% em relação à massa de materiais cimentícios, frações volumétricas de fibra de volastonita nos teores de 2,3% e 4,6% e a combinação desses dois materiais em formulações contendo 10% de SBR com frações de 2% e 4% de fibra de volastonita, perfazendo quatro famílias de materiais.

O programa experimental para caracterização das pastas abrangeu o comportamento reológico, estabilidade, filtrado e água livre, além dos ensaios de caracterização mecânica (compressão uniaxial e tração na flexão) e física com intuito de obter as leis constitutivas dos materiais.

Além das pastas de cimentação desenvolvidas, foi estudada a aplicação de um material compósito denominado SHCC (do inglês *Strain Hardening Cementitious Composites*) que apresenta grande capacidade de deformação (3% - 7%) e múltipla fissuração na tração direta. Tal material encontra-se em estudo na COPPE/UFRJ no que se refere ao comportamento a altas temperaturas e a sua estabilidade térmica (MAGALHÃES, 2008).

Vale ressaltar que apesar do SHCC ser um material autoadensável, o mesmo não apresenta as características reológicas requeridas para poços de petróleo. Desta forma, não se pretendeu no presente estudo adequar a reologia do material às de pastas de cimentação de poços, mas explorar a potencialidade de um material que possui elevada capacidade de deformação na solução do problema em estudo.

Após a caracterização reológica e mecânica dos materiais foram escolhidas cinco formulações para serem ensaiadas em um modelo físico de poço de petróleo. O modelo de poço foi desenvolvido com semelhança geométrica em formato anular contendo um tubo de aço similar aos tubos de revestimentos de poço e o material cimentício.

Para a realização do ensaio termomecânico buscou-se reproduzir as condições de confinamento de um poço, ou seja, foi imposta uma restrição longitudinal através de uma máquina de ensaios universal com capacidade de realizar ensaios a altas temperaturas. A restrição transversal foi obtida através de cinco anéis de aço igualmente

espaçados. O aquecimento dentro do tubo foi reproduzido com o uso de uma serpentina elétrica e para a distribuição mais eficiente do calor foram utilizadas limalhas de aço inoxidável que preenchem os espaços vazios entre a serpentina e o tubo de revestimento. O gradiente aplicado foi o que normalmente é encontrado nas aplicações em campo de $250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Dentre as formulações estudadas as selecionadas foram a pasta de referência, com 10% de polímero SBR, com 4,6% de fibra de volastonita, com 10% de polímero SBR e 4% de fibra de volastonita e o material compósito SHCC.

Durante os ensaios termomecânicos foram realizadas algumas medições: a força de restrição térmica através da prensa universal, os deslocamentos transversais através de transdutores elétricos de deslocamento e identificação das fissuras de forma visual e através de um sistema de aquisição de som que captou a pressão sonora emitida pela abertura das fissuras. Através dos dados medidos buscou-se identificar o comportamento estrutural dos materiais estudados quando submetidos a elevados gradientes de temperatura, visando propor soluções para o problema em estudo.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo principal avaliar o desempenho mecânico e estrutural de pastas de cimentação com polímero SBR, fibra de volastonita, um compósito com esses dois materiais combinados (polímero SBR e fibra de volastonita) e o SHCC para aplicação de poços de petróleo submetidos à técnica de injeção de vapor.

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa são definidos cinco objetivos específicos:

- Realização de um estudo de dosagem de uma pasta de referência com base em critérios de reologia e de estabilidade que atendam as características apresentadas por pastas de cimentação;
- Caracterização das formulações no estado fresco, determinação das propriedades físicas de massa específica, porosidade e absorção d'água e caracterização mecânica com ensaios de compressão uniaxial e tração na flexão;
- Desenvolvimento de um modelo físico de poço, com semelhança geométrica e física a um poço genérico de petróleo submetido à injeção de vapor;
- Escolha dos melhores teores de polímero SBR e fibra de volastonita, dentre as formulações propostas com base no desempenho mecânico através das propriedades de deformação, módulo de elasticidade e resistência à tração;
- Realização de ensaio termomecânico no modelo físico para simular a aplicação da injeção de vapor em poço com um gradiente de $250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$;

1.2 Organização da Tese

O trabalho encontra-se organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta o tema do trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados no desenvolvimento da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a contextualização do problema em estudo e as principais linhas de pesquisa que estão sendo desenvolvidas. O terceiro capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre materiais modificadores de matrizes cimentícias: látex poliméricos e fibras.

No quarto capítulo são apresentadas as metodologias adotadas no programa experimental, tanto para a caracterização dos materiais, quanto para a caracterização no estado fresco e endurecido das formulações propostas. São apresentadas também as hipóteses adotadas no projeto do modelo de poço e na simulação da injeção de vapor no modelo confeccionado.

Os resultados obtidos no programa experimental são apresentados no quinto capítulo, bem como as discussões pertinentes. No sexto capítulo são apresentadas as considerações e conclusões do trabalho com propostas para pesquisas futuras.

Por fim, estão apresentados, em anexo, as curvas tensão *versus* deformação das amostras (ANEXO A), as curvas carga *versus* deslocamento (ANEXO B) e as tabelas com a análises estatísticas (ANEXO C).

2. ESTADO DE TENSÃO NA BAINHA DE CIMENTO PROVACADO POR GRADIENTES DE TEMPERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a técnica de injeção de vapor e sobre as solicitações mecânicas geradas na bainha de cimento devido a sua aplicação. Da mesma forma, apresenta-se um panorama geral de como a análise destas solicitações tem servido para propor novas formulações de materiais destinados à cimentação.

2.1 Técnica de Injeção de Vapor e análise de tensões na bainha de cimento

O termo mecanismo é empregado na engenharia de reservatório para descrever o deslocamento do óleo e/ou gás para fora do poro da rocha até o poço, pela ação de uma fonte de energia. Quando os mecanismos naturais do reservatório se tornam ineficientes para estimular a produção de hidrocarbonetos são empregados métodos de recuperação, que visam introduzir no poço a energia necessária para estimular a produção.

Os métodos de recuperação são classificados, segundo Thomas (2001), em convencionais e especiais. Os métodos convencionais utilizam um fluido de deslocamento (água ou gás) que empurra o hidrocarboneto, sendo que sua ação é apenas mecânica. Os métodos especiais são aplicados quando houver fracasso no emprego do método convencional, devido à alta viscosidade do hidrocarboneto e às elevadas tensões interfaciais entre o fluido injetado e óleo. Dentre os métodos de recuperação especiais podem-se citar os químicos, os miscíveis e, em especial, os térmicos.

Os métodos térmicos são empregados em reservatórios que apresentam óleos com elevada viscosidade e são diferenciados na maneira como é feito o aquecimento do fluido no reservatório. Em um deles, o aquecimento do óleo do reservatório é realizado por meio da combustão. É injetado no reservatório ar aquecido, que promove o processo de oxidação do óleo ali presente, gerando assim o calor que por sua vez intensifica a oxidação até a temperatura de “ponto de ignição”, temperatura em que ocorre a combustão. Posteriormente, se injeta ar frio, dando continuidade ao processo. Na outra metodologia, o calor é gerado na superfície sendo em seguida, transportado para o interior da formação, utilizando-se um fluido, geralmente água, que é injetada na forma de vapor, técnica denominada de injeção de vapor (THOMAS, 2001).

Quando o vapor aquecido é injetado no reservatório, ocorrem dois fenômenos, além da redução da viscosidade do óleo, que são mecanismos chaves no processo de produção. O primeiro é a expansão térmica dos minerais da rocha que tendem a diminuir o espaço poroso da rocha, conjuntamente com a expansão do hidrocarboneto. Estes dois efeitos combinados redundam na expulsão do fluido da rocha. O outro mecanismo é a produção de CO₂, que é formado por reações químicas da água presente no vapor com a rocha do reservatório, que também ao ser aquecida se expande auxiliando na expulsão do óleo (HERNÁNDEZ, 2006).

Segundo Hernández (2006) a injeção contínua de vapor começou a ser utilizada no século passado, na década de 30, quando se injetou vapor por 235 dias em um reservatório arenítico de 6 m de espessura, a uma profundidade de 125 m no Texas (Estados Unidos). Vale ressaltar que a utilização de aquecedores de fundo de poço, outra concepção de aquecimento, foi utilizada por volta de 1865.

A injeção cíclica de vapor foi descoberta por acaso, durante um teste piloto no Campo de Mene Grande na Venezuela em 1959 (HERNÁNDEZ, 2006). A técnica compreende a aplicação de vapor aquecido em temperaturas que chegam até 315 °C (600°F) por um período de dias ininterruptos, seguindo do fechamento e confinamento do poço sob uma pressão preestabelecida, por uma quantidade determinada de dias, visando à dissipação do calor ao longo do reservatório. A repetição desse procedimento depende dos resultados obtidos no primeiro ciclo e do incremento da produção alcançado (PAIVA, 2008).

A determinação das temperaturas e tempos de aplicação estão intimamente relacionados com as características do reservatório e variam também conforme os procedimentos das empresas que aplicam esta técnica para estimular a produção dos seus poços. Segundo Paiva (2008), a PETROBRAS estabelece como procedimento para poços no nordeste a aplicação da injeção de vapor entre 260°C a 320°C (500°F a 608°F) sob pressão de 0,97 MPa a 6,3 MPa (140 psi a 920 psi) por um período de 20 dias ininterruptos, com o fechamento do poço por 10 dias, sendo o ciclo repetido, em média, uma vez por ano.

Apesar dos benefícios comprovados na recuperação de reservatórios de óleo pesado, foi verificado que após os poços serem submetidos a ciclos de injeção de vapor, havia um incremento na produção tanto de óleo quanto de água oriunda de aquíferos perto da zona de produção. Estudos apresentados na literatura (DEAN e TORRES,

2002, PEDERSEN *et al.*, 2006, STILES, 2006) têm mostrado que a perda do isolamento hidráulico na zona de produção é devido ao surgimento de fissuras na bainha de cimento, oriundas do estado de tensão que é imposto pela aplicação de vapor e também pela variação de pressão dentro do poço.

A figura 2.1 apresenta um esquema de um poço quando aplicado vapor aquecido. A parte (a) apresenta um poço com sua bainha íntegra, a parte (b) com a aplicação de injeção de vapor, proporcionando fissuras ao longo da bainha de cimento e a parte (c) o poço produzindo óleo + água.

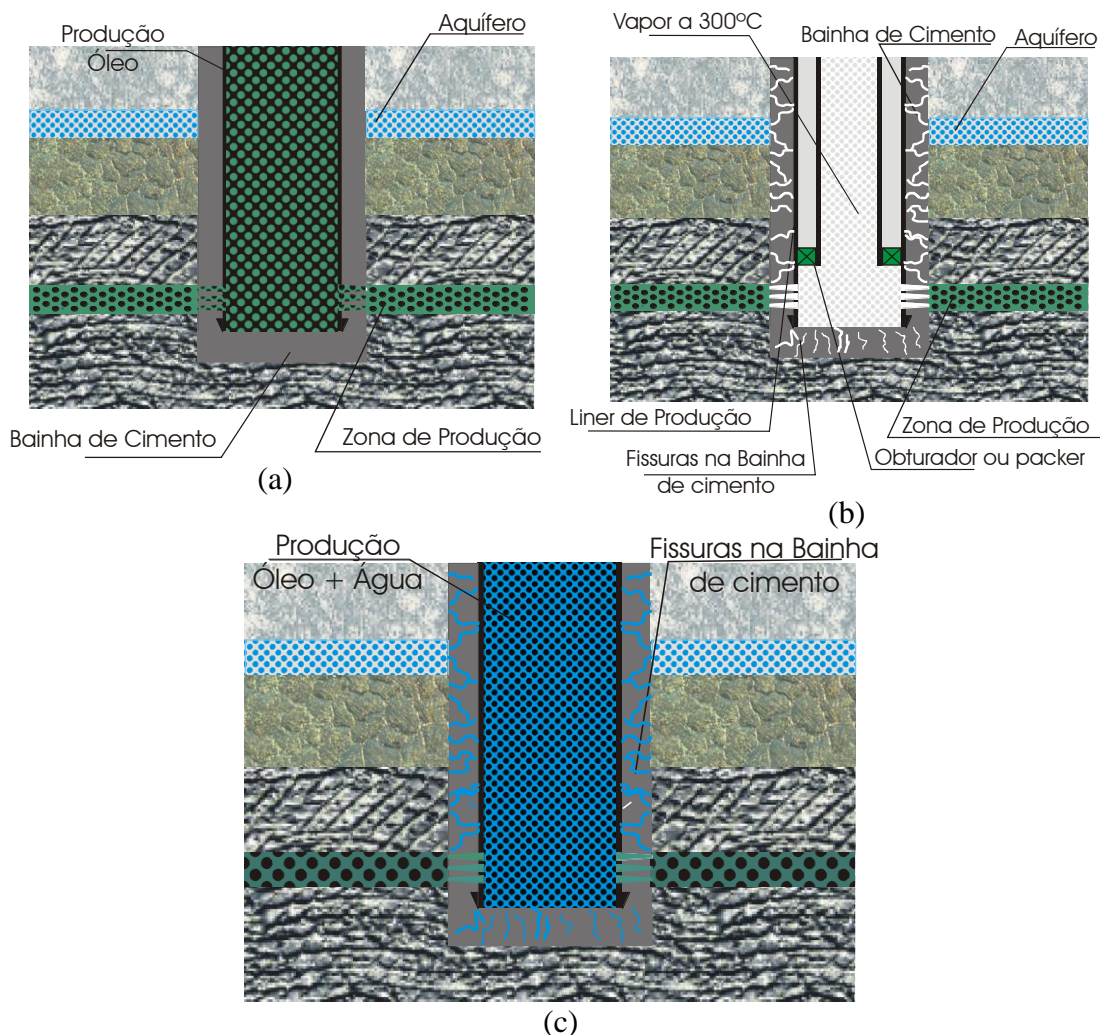


Figura 2.1 – (a) Esquema de um poço, (b) aplicação da injeção de vapor promovendo a fissuração da bainha de cimento e (c) a produção de óleo + água

Goodin *et al.* (1992) analisaram as principais causas que levam a bainha de cimento a perder sua integridade. Foi identificado que a aplicação do vapor aquecido gera um elevado gradiente de temperatura no revestimento. Este gradiente induz a expansão térmica, que acarreta elevadas tensões na bainha de cimento. Vale salientar que, além dos gradientes de temperaturas, os gradientes de pressão também contribuem para o colapso da bainha de cimento.

A figura 2.2 apresenta a seção transversal de poço e as três tensões atuantes: tensão radial σ_r , tensão tangencial σ_θ e tensão vertical σ_z . O trabalho apresentado por Thiercelin *et al.* (1997) analisou, dentre outros fatores, a influência da elevação da temperatura em um poço de petróleo e as conseqüências na bainha de cimento. Foi constatado que quando a temperatura é crescente a tensão radial sempre será de compressão e a tensão tangencial será de compressão próxima à interface revestimento/bainha de cimento e de tração na interface bainha de cimento/formação.

A figura 2.3 apresenta o diagrama de corpo livre de uma seção transversal de poço. A carga térmica aplicada no tubo de revestimento provoca sua expansão, que por sua vez impõe à bainha de cimento a transferência desses esforços.

Na bainha, com o decorrer do tempo, também ocorre a transferência de calor. Surgem nas partes mais interiores (próximo a interface com o tubo de revestimento) solicitações oriundas dos esforços de dilatação térmica (F), entretanto as partes mais exteriores, por não estarem ainda na mesma temperatura, tendem a permanecer no formato original. Um momento restaurador (M) é instaurado tanto para manter o formato de corpo rígido em virtude da expansão térmica, como para resistir aos esforços gerados pela expansão do tubo de revestimento. Com isso surgem tensões de tração na parte mais exterior da bainha e de compressão na parte mais interior.

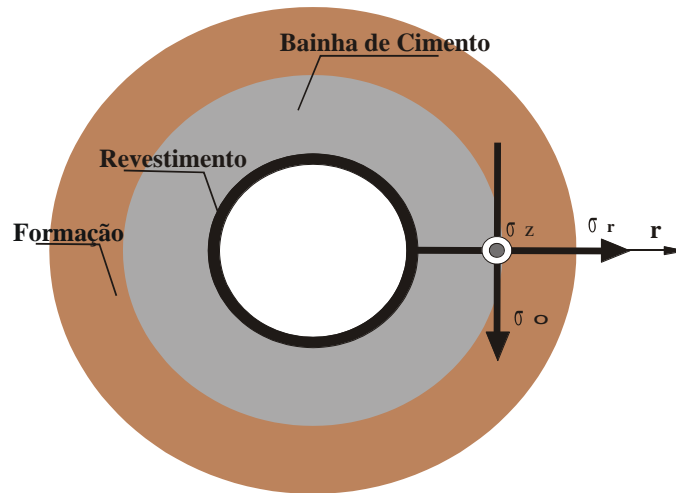


Figura 2.2 - σ_r : Tensão radial e σ_θ : tensão tangencial (Adaptado de Thiercelin *et al.*, 1997)

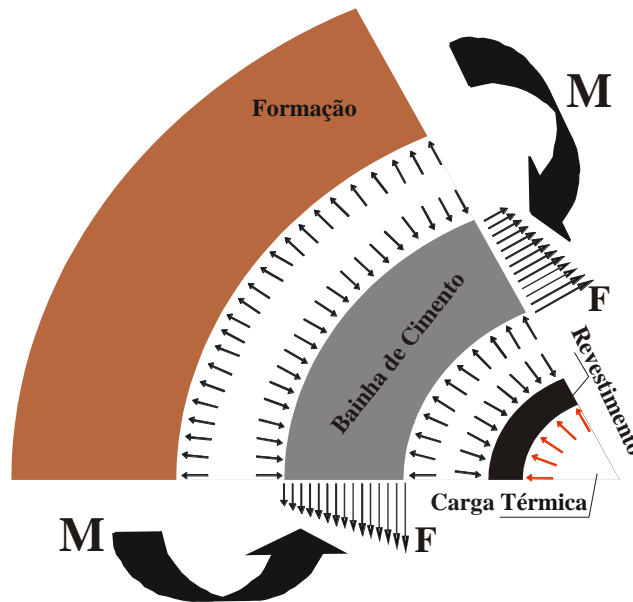


Figura 2.3 - Equilíbrio de corpo rígido

Alguns outros trabalhos, dentre eles o de Dean e Torres (2002), também identificaram que as tensões tangenciais de tração causadas pela expansão do tubo de revestimento são as principais causas da perda da integridade da bainha de cimento, com o aparecimento de fissuras radiais. Desta forma, uma série de pesquisas vêm buscando propor novos materiais que melhor se adequem a estas solicitações impostas. A seguir serão apresentadas as tendências que estas pesquisas sugerem.

2.2 Novas características para a bainha de cimento

Quando se projeta um poço, dentre suas etapas, escolhe-se o tipo de pasta que será aplicada na cimentação. Parâmetros como profundidade, tipo de fluido do reservatório, pressão de poros, pressão de fratura são ponderados para determinar a densidade da pasta, por exemplo. Parâmetros do estado fresco como reologia, filtrado, tempo de espessamento e características físicas como estabilidade são usados para escolher os aditivos e materiais para sua confecção.

A única propriedade mecânica especificada nas normas vigentes para poços de petróleo é a resistência à compressão (API Spec 10A, 2000 (a); API Spec 10B, 2000 (b) e NBR 9831, 2006). Durante muito tempo vigorou a concepção de que quanto maior a resistência à compressão da pasta, melhor o seu desempenho estrutural no poço. Todavia, essa premissa tem sido questionada mediante aos trabalhos de análise de tensões apresentados por diversos grupos de pesquisa.

Um dos primeiros trabalhos a questionar a resistência à compressão como único critério mecânico para seleção de uma pasta foi o de Thiercelin *et al.* (1997). Neste trabalho, propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, além da resistência à compressão foram obtidos da bainha e utilizados para analisar o seu comportamento. A resistência à tração na flexão também foi determinada, sendo que este parâmetro foi minorado pelo fator 0,5; devido às considerações indicadas na bibliografia utilizada. Observou-se que materiais mais flexíveis, com baixo módulo de elasticidade, porém sem redução expressiva da resistência, são mais indicados para situações em que o poço é submetido às variações de pressão e temperatura, evitando assim, os colapsos da bainha pela fissuração ou pela perda de aderência com o revestimento.

A análise mais detalhada do problema, conforme apresentado na seção anterior, demonstra ser este um caso típico de deformação imposta devido ao carregamento térmico. Ou seja, as solicitações impõem ao material uma deformação preestabelecida pela magnitude do gradiente térmico.

Para que um material, quando submetido a tais solicitações, resista sem perder sua integridade é necessário que suas relações constitutivas sejam diferentes dos materiais convencionais. A figura 2.4 apresenta curvas hipotéticas tensão *versus* deformação na tração direta de três materiais diferentes.

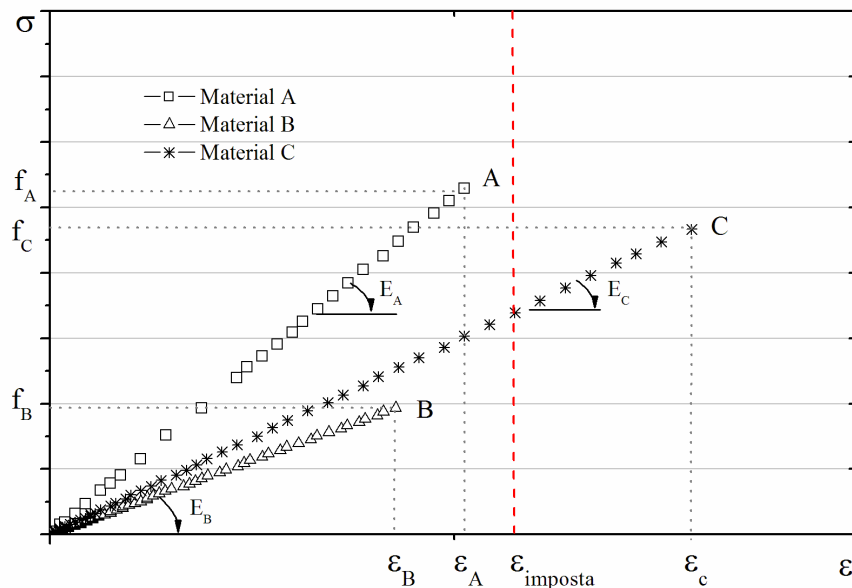


Figura 2.4 – Curvas hipotéticas tensão *versus* deformação de alguns materiais

Com relação à resistência à tração e ao módulo de elasticidade o material A apresenta os maiores valores, seguido do material C e material B (figura 2.4). Como mencionado anteriormente, o problema dado corresponde a uma deformação imposta ($\epsilon_{\text{imposta}}$). O material com maior capacidade de deformação é o C, que inclusive apresenta uma relação $\epsilon_c > \epsilon_{\text{imposta}}$, ou seja, a máxima deformação que o material é capaz de suportar é superior a deformação requerida no problema. Desta forma, o

material C resiste aos esforços requeridos sem sofrer danos. Em contrapartida os materiais A e B apresentam deformação máxima inferior à solicitada no problema, logo o seu uso implica a ruptura do material.

Desta forma, pela natureza do problema a capacidade de deformação do material é uma propriedade que interfere de forma decisiva no seu comportamento estrutural. O módulo de elasticidade também atua no problema interferindo na tensão solicitante. Assim materiais com baixo módulo proporcionam menores tensões solicitantes de tração. Adicionalmente, se o material possuir maior resistência à tração, o mesmo será capaz de resistir a tais esforços sem perder a sua integridade. Percebe-se então que essas três propriedades em conjunto determinam o comportamento estrutural do material.

Além das propriedades citadas acima, outros parâmetros como coeficiente de expansão térmica, propriedades de variações volumétricas como retração e resistência ao cisalhamento são apontadas por Bosma *et al.* (2000) como variáveis para a seleção de pastas para poços HPHT (alta pressão e altas temperaturas).

Mediante as considerações apresentadas, diversas pesquisas têm buscado utilizar materiais poliméricos como o látex, geopolímeros, adições de fibras minerais, tais como volastonita e fibras sintéticas, como as de polipropileno e PVA, para melhorar o comportamento mecânico da bainha. A seguir apresentam-se os principais resultados obtidos até o momento.

Dean e Torres (2002) realizaram estudos em poços localizados no Rio Grande do Norte (Brasil), que foram submetidos à injeção de vapor cíclica. Foram utilizados em suas formulações o látex de SBR e fibra de volastonita na proporção de 12-100% sob a massa de cimento. Os resultados apontaram que as pastas com fibra de volastonita

apresentaram melhor resistência à flexão, mantendo o isolamento hidráulico do poço durante os primeiros nove meses após o primeiro ciclo de vapor.

Pedersen *et al.* (2006) também apresentaram estudos realizados no mar do Norte na Noruega em que foi utilizado um material denominado de HPFE (*High Performance Flexible Expandable*), que foi projetado sob o conceito de otimização do tamanho das partículas, com materiais flexíveis e expansíveis. Os resultados do comportamento mecânico deste material demonstram seu elevado desempenho sob ciclos de temperatura e pressão.

O Brasil também tem avançado neste cenário contribuindo com trabalhos sobre aplicação de geopolímeros, compacidade de materiais e pastas com fibras. Paiva (2008) avaliou o desempenho mecânico de pastas geopoliméricas com adições de sílica ativa e fibra de volastonita, comparando-as às pastas convencionais com látex utilizadas na prática em poços com injeção de vapor. Verificou-se o melhor desempenho mecânico e estrutural através de simulações em software de elementos finitos das pastas geopoliméricas.

Sob o panorama apresentado depreende-se que há um consenso com relação às propriedades mecânicas que devem ser medidas além da resistência à compressão, tais como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e resistência à tração. Desta forma, para problemas de deformações impostas, como o caso de injeção de vapor, as pastas cimentícias devem apresentar características peculiares com relação às convencionais, como maior deformabilidade e capacidade de absorver energia, além de maior resistência à tração.

3. MATERIAIS MODIFICADORES DE PROPRIEDADES DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

No presente capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a influência de materiais modificadores de matrizes cimentícias nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade. Dois tipos de materiais estão sendo utilizados para aumentar a capacidade de absorver energia das matrizes: polímeros e fibras.

3.1 Polímeros Modificadores de Matrizes Cimentícias

Polímeros são macromoléculas caracterizadas pela sua geometria, estrutura química e pelas interações intra e intermoleculares. Formam cadeias com unidades repetidas, denominadas de meros e ligadas por covalência. Podem ainda se apresentar sob a forma de micromoléculas denominadas de monômeros que ao sofrerem processos de polimerização se transformam em polímeros (MANO, 2005).

Os polímeros são utilizados em concretos de três formas distintas e esta classificação pode ser estendida a argamassas e pastas cimentícias (MEHTA e MONTEIRO, 1994):

- Concreto polimérico (CP) – formados a partir da polimerização de misturas de monômeros e agregados, não sendo utilizados aglomerantes hidráulicos;
- Concreto polimérico de cimento Portland (CPCP) – é o concreto convencional adicionado com emulsões poliméricas em substituição parcial à água de amassamento ou na forma de pós como adição de finos. Ohama (1995) também classifica este tipo de material como concretos e argamassas modificadas com polímeros;
- Concreto impregnado com polímero (CIP) – são produzidos impregnando-se ou infiltrando-se misturas de monômeros no material endurecido e posteriormente realizando a polimerização do monômero “in loco”.

Os polímeros utilizados como modificadores de materiais cimentícios em geral conferem ao material melhores propriedades físicas e mecânicas como deformabilidade, impermeabilidade, durabilidade e adesão. Sua principal aplicação têm sido em argamassas colantes para revestimento cerâmicos, argamassas de reparo e em matrizes cimentícias para compósitos com adição de fibras.

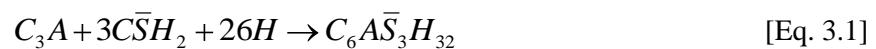
Os trabalhos apresentados na literatura demonstram que os polímeros modificadores, além de melhorarem as propriedades dos materiais no estado endurecido, modificam as interações e a cinética de hidratação dos compostos cimentícios sem proporcionarem grandes danos ao material. A seguir serão apresentadas as principais alterações em matrizes cimentícias decorrentes da utilização dos polímeros modificadores.

3.1.1 Hidratação de matrizes cimentícias contendo polímeros modificadores

Para entender a ação polimérica na hidratação de matrizes cimentícias será apresentada, primeiramente, uma pequena revisão bibliográfica sobre a hidratação do cimento Portland.

A hidratação é o fenômeno que ocorre com o cimento anidro a partir do seu contato com a água, em que se iniciam as reações químicas entre seus compostos, que irão conferir as principais propriedades do material no estado endurecido.

Cada composto contido no cimento Portland reage diferentemente em contato com a água, o que implica em velocidades de hidratação diferenciadas. O aluminato tricálcico (C_3A^1) tem reação imediata formando hidratos cristalinos, que contribuem para a resistência nas primeiras idades. Para retardar a velocidade de reação do C_3A adiciona-se a gipsita (gesso) no processo de produção do cimento, que contribui para a redução da sua solubilidade. Em contrapartida, a gipsita contribui com os íons de cálcio para a formação do sulfoaluminato de cálcio também conhecido como etringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$). A equação 3.1 apresenta a reação de formação da etringita (MEHTA e MONTEIRO, 1994).



A etringita é o primeiro hidrato a se formar, o que contribui para o enrijecimento e resistência inicial. Com o avanço da hidratação do C_3A a etringita se torna instável e é gradativamente convertida em monossulfoaluminatos, produtos finais da hidratação do C_3A . Contudo, em situações de cura com aquecimento ocorre retardo

¹ Notação da química do cimento Portland

C – CaO

A – Al₂O₃

H – H₂O

S – SiO₂

F – Fe₂O₃

\bar{S} – SO₃

na formação da etringita, que pode aparecer no material de forma expansiva quando este já está endurecido.

Os ferroaluminatos tetracálcicos (C_4AF) apresentam reatividade menor que o C_3A . Contudo, os produtos formados apresentam a mesma estrutura e, dependendo da concentração de sulfato em sua hidratação, dois tipos de compostos são formados o $C_6A(F)\bar{S}_3H_{32}$ ou $C_4A(F)\bar{S}H_{18}$, que apesar de possuírem composições químicas variáveis, possuem a mesma estrutura da etringita (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A hidratação do silicato tricálcico (C_3S - Alita) e silicato dicálcico (C_2S - Belita) produzem uma família de Silicatos de Cálcio conhecidos com C-S-H, que representam cerca de 50 a 60% da massa do cimento Portland. O C-S-H é um composto sem estrutura bem definida, formando um sólido poroso que apresenta características de um gel rígido. Alguns modelos propostos apresentam a estrutura do C-S-H como sendo composto por camadas em um arranjo irregular e são justamente nos espaços entre as camadas que se encontra a água interlamelar retida por pontes de hidrogênio, que contribuem para a retração por secagem e para a fluência (NEVILLE, 1997).

Outro produto também formado na hidratação dos silicatos é o hidróxido de cálcio (também chamado de portlandita ou CH) que apresenta estrutura bem definida sob a forma de cristais. O CH, se comparado ao C-S-H, contribui muito pouco para a resistência, além de ter efeito desfavorável quando em quantidades excessivas pela sua alta solubilidade a soluções ácidas. As equações 3.2 e 3.3 apresentam as reações dos silicatos quando hidratados.



Em todo o processo de hidratação do cimento, as reações entre os compostos geram grande quantidade de calor chamado calor de hidratação, e a energia liberada pode chegar a 500 J/g, ou seja, estas reações são exotérmicas. Segundo Neville (1997), não é a quantidade de calor gerado que acarreta problemas, mas a velocidade com que o calor se desprende, pois pode gerar um gradiente de temperatura que poderá levar à fissuração do material. Contudo, em algumas circunstâncias, o calor de hidratação é favorável, como no caso de aplicações em climas frios ou no inverno, em que o calor liberado evita o congelamento da água nos capilares e ativa as reações de hidratação.

As matrizes cimentícias são caracterizadas pela capacidade de resistir de forma eficiente aos esforços de compressão e em contrapartida, apresentam baixa resistência aos esforços de tração. Com intuito de melhorar as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias são adicionadas fibras, aditivos minerais e químicos em concretos, argamassas e pastas, que visam conferir ao material o incremento na capacidade de deformação e, conseqüentemente, maior resistência à tração.

Em especial os polímeros modificadores são utilizados com esta finalidade por apresentarem composições químicas diversas podendo interagir de forma distinta nos materiais à base de cimento, alterando ou não a cinética de hidratação dos compostos e modificando as propriedades do material no estado fresco e endurecido.

Segundo Silva (2001) a principal interação que ocorre entre os polímeros e os grãos de cimento é de ordem física ocorrendo ainda algumas interações químicas entre grupos reativos do polímero e íons presentes na fase aquosa da mistura com cimento.

A interação física ocorre a partir do contato dos grãos do cimento com o polímero e a água da mistura, iniciando-se o processo de hidratação que precede a ação do polímero. Segundo Ohama (1995), subsequentemente a hidratação do cimento há uma polimerização dos grãos do cimento em fase de hidratação pelo polímero,

formando um filme. Este conjunto é denominado de co-matriz. A formação da co-matriz pelo cimento Portland hidratado e o filme polimérico ocorre em três estágios distintos, como indicado na figura 3.1.

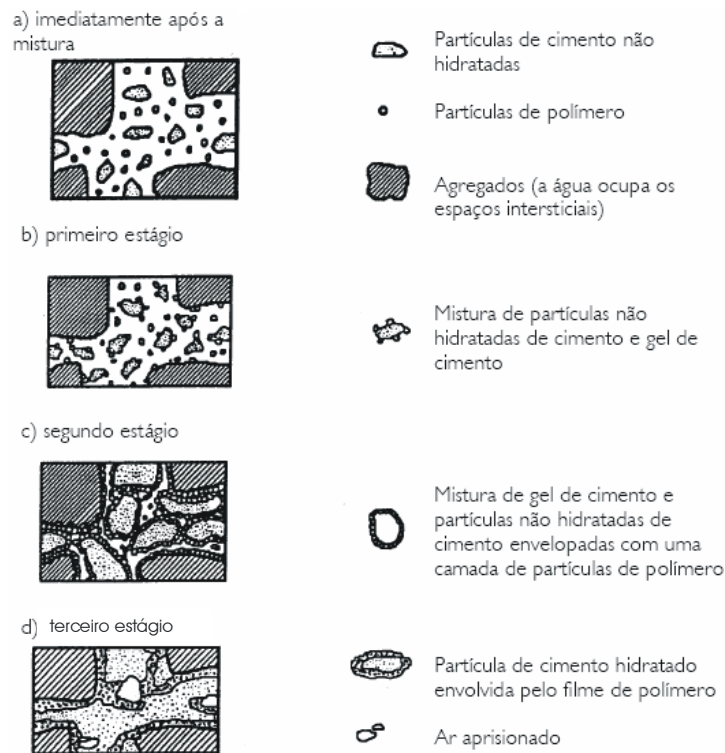


Figura 3.1 – Modelo simplificado da formação da co-matriz de cimento e polímero (Adaptado de OHAMA 1995)

O primeiro estágio consiste na dispersão das partículas do polímero na mistura, em que gradativamente vão se depositando nos grãos do cimento em fase de hidratação, grãos de cimento anidros e nos grãos dos agregados presentes.

Com o avanço da hidratação do cimento se inicia o segundo estágio em que as partículas do polímero são confinadas nos poros capilares dos produtos de hidratação do cimento. Com a redução da água na mistura, as partículas dos polímeros são floculadas e condensadas em uma estrutura compacta nestas superfícies. Simultaneamente ocorrem reações químicas entre as partículas dos polímeros, os íons de cálcio (Ca^{+2}) e o

hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) do cimento e os silicatos dos agregados, que geram produtos que conferem adesão e a ligação entre polímero-cimento-agregado.

Por fim, no terceiro estágio, com o avanço do processo de hidratação, a estrutura densa formada coalesce em um filme ou membrana de ligação formando uma estrutura monolítica entre os compostos do cimento hidratado e o polímero. O filme formado age como um selo na microestrutura com partículas de C-S-H, CH e etringita doravante porosa, impedindo a penetração de íons, como por exemplo, de cloreto, que tem ação deletéria sobre o material. Este fechamento dos poros contribui para impermeabilidade tornando o material mais coeso e conseqüentemente mais durável (OHAMA, 1995).

Sakai e Sugita (1995) analisaram o comportamento do látex e do pó redispersável do co-polímero Etileno/Acetato de Vinila – EVA. As amostras foram analisadas em microscopia eletrônica imediatamente após a mistura, bem como após o seu endurecimento. Ambos os materiais apresentaram a formação de um filme na interface entre as partículas de cimento e de agregado no estado fresco como apresentado no modelo descrito por Ohama (1995). Também foi comprovado que a adição de polímeros melhora a adesão da matriz com outros materiais e que a resistência à compressão decresce com o aumento da relação polímero/cimento.

3.1.2 Comportamento reológico de matrizes cimentícias modificadas com polímeros

A ciência que estuda o comportamento da fluidez dos materiais sob a ação de escoamentos e deformações no tempo é a reologia e seus conceitos são utilizados para explicar o comportamento dos concretos, argamassas e pastas no estado fresco.

O modelo reológico básico adota duas placas (uma fixa e outra móvel) preenchidas com um fluido (figura 3.2). Se aplicada uma força F na placa móvel a ponto de fazer com que esta se mova e provoque a deformação do fluido, a resistência de atrito entre as camadas do fluido, que quando vencida provoca o seu deslocamento, é denominada de tensão cisalhante τ . Quando a tensão cisalhante é proporcional ao gradiente de velocidade de deformação $\dot{\gamma}$, o fluido obedece à lei de Newton e é denominado de fluido newtoniano. A equação matemática que discretiza o modelo é dada em 3.4 (BANFILL, 1990).

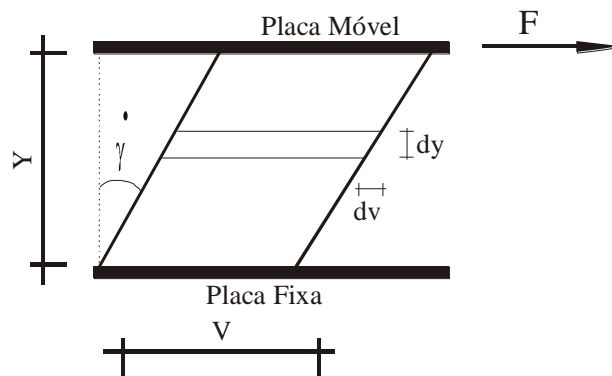


Figura 3.2 – Modelo de placas paralelas (adaptado de CAMÔES, 2005)

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

Onde:

τ : Tensão cisalhante;

η : Viscosidade plástica;

$\dot{\gamma}$: Taxa de deformação ou Gradiente de velocidade de deformação.

A viscosidade plástica é a constante de proporcionalidade e representa o atrito entre as camadas internas dentro do fluido que o impõe à resistência em fluir. Quando a

velocidade de deformação não é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento o fluido é dito não-newtoniano (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

Os fluidos não-newtonianos são subdivididos em relação ao seu comportamento no tempo. São ditos dependentes do tempo quando sob condições de taxa de cisalhamento constante apresentam mudança de viscosidade. Quando a viscosidade não depende do tempo, mas da taxa de cisalhamento aplicada são denominados de não-newtonianos independentes do tempo e podem ser classificados, segundo Tattersall e Banfill (1983), em pseudoplásticos, dilatantes e plásticos. Em especial, os fluidos plásticos comportam-se como sólido em condições estáticas ou de repouso e após a aplicação de uma força com certa magnitude começam a fluir. Entretanto, quando o material apresenta uma tensão de cisalhamento crítica, somente após este valor ser excedido o fluido entra em escoamento (assumindo um comportamento newtoniano), ele é classificado como fluido de Bingham. Modelo matemático apresentado na equação 3.5 descreve os fluidos de Bingham.

$$\tau = \tau_o + \eta \dot{\gamma}, \text{ para } \tau > \tau_o \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

Onde:

τ : Tensão atuante, em Pa;

τ_o : Tensão cisalhante crítica ou limite de escoamento (L.E.), em Pa;

η : Viscosidade plástica (V. P), em Pa.s;

$\dot{\gamma}$: Taxa de deformação ou Gradiente de velocidade de deformação, em s⁻¹.

Uma outra adaptação do modelo de Bingham foi proposta por Herschel e Bulkley chamada também de modelo de Bingham modificado (equação 3.6), em que o parâmetro gradiente de velocidade de deformação é elevado um expoente que está

relacionado ao comportamento do fluido sob escoamento (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

$$\tau = \tau_o + \eta \left(\dot{\gamma} \right)^n, \text{ para } \tau > \tau_o \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

Onde:

$n > 1$: Comportamento pseudoplástico;

$n = 1$: Comportamento de Bingham;

$n < 1$: Comportamento dilatante.

Pode-se perceber que na equação 3.6 quando $n = 1$ tem-se a equação de Bingham, sendo esta um caso particular da equação de Herschel e Bulkley. A figura 3.3 apresenta o gráfico da relação entre a tensão cisalhante (τ) e o taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) para a equação 3.6.

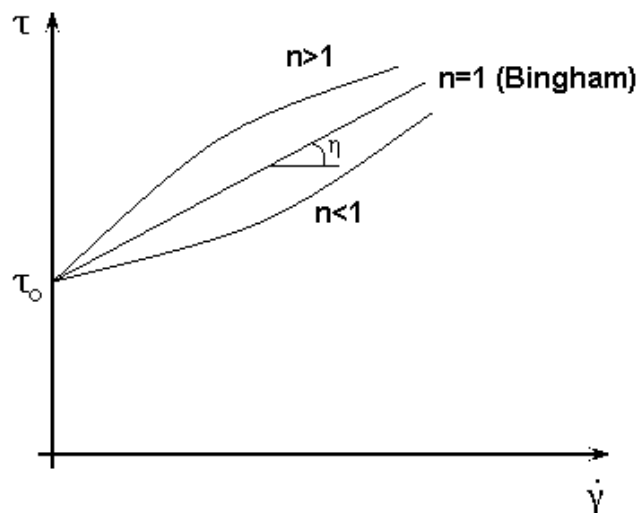


Figura 3.3 – Gráfico Tensão Cisalhante x taxa de cisalhamento

A determinação dos parâmetros viscosidade plástica e limite de escoamento é feita através de ensaios realizados em reômetros. Os reômetros, a princípio, foram utilizados pela indústria química na caracterização de emulsões, contudo sua utilização

tem sido adaptada para concretos, argamassas e pastas. Vale salientar que para na indústria do petróleo os reômetros são chamados de viscosímetros.

As matrizes cimentícias modificadas com polímeros apresentam melhor trabalhabilidade se comparadas às matrizes convencionais (sem adição de polímero), em decorrência a ação de rolamento das partículas dos polímeros, da incorporação de ar no processo de mistura e do efeito dispersante dos surfactantes do polímero (OHAMA, 1995).

Barluenga e Hernández-Olivares (2004) avaliaram a influência do látex de SBR na reologia de argamassas e verificaram que as propriedades reológicas dependem diretamente da relação água/cimento (a/c) utilizada. O látex de SBR foi utilizado em termos de porcentagem do polímero nas proporções de 0%, 1,9%; 3,8%; 5,7%; 7,6% e 9,5%; respectivamente, em relação à massa de cimento. Verificou-se que o polímero age como um incorporador de ar na misturas, além melhorar a reologia das misturas com os maiores teores de SBR (BARLUENGA e HÉRNANDEZ-OLIVARES, 2004).

Por fim, as matrizes cimentícias modificadas com polímeros apresentam maior retenção de água que matrizes convencionais. Esta retenção depende da relação polímero/cimento, e é explicada pelas propriedades hidrofílicas do látex que inibem a evaporação da água devido aos efeitos de preenchimento e selagem dos filmes poliméricos que são formados. Para a maioria dos sistemas modificados com látex é preferível cura seca em vez de cura úmida ou por imersão em água. Em geral, a retenção de água aumenta com o aumento da relação polímero/cimento, e torna-se praticamente constante para relações polímero/cimento variando de 5% a 10% (OHAMA, 1995). Não obstante, a propriedade hidrofílica e o efeito de incorporação de ar favorecem a diminuição dos efeitos de segregação e exsudação das matrizes cimentícias modificadas com polímeros.

3.1.3 Influência da adição de polímeros nas propriedades mecânicas de matrizes cimentícias

A adição de polímeros nas matrizes cimentícias modifica a reologia e a cinética de hidratação dos compostos dos cimentos. Da mesma forma, as propriedades mecânicas também são alteradas.

Segundo Ohama (1995), em comparação às matrizes convencionais, as matrizes modificadas com polímeros apresentam maiores resistência à tração e à flexão, porém este comportamento não é verificado na resistência à compressão. Esta característica deve-se à maior resistência à tração do próprio polímero e ao aumento da aderência cimento-agregado. São vários fatores que influenciam as propriedades de resistência, assim como a interação entre estes fatores, dentre eles têm-se: natureza do polímero formador do látex, tipo de cimento e agregados; concentração da mistura; método de cura; e métodos de ensaios.

As propriedades do látex como estabilidade química e mecânica, formação de bolhas, e coalescência na secagem dependem dos tipos e quantidade de surfactantes e anti-espumante, e ainda do tamanho e dispersão das partículas do polímero. A natureza do polímero depende da proporção do monômero no copolímero e do tipo e quantidade de plastificante. A proporção do monômero influencia a resistência da matriz cimentícia modificada com polímero da mesma forma que a relação polímero/cimento também pode influenciar (OHAMA, 1995).

Em geral, a estabilidade química e mecânica do látex aumenta com o aumento do teor de surfactante selecionado com estabilizantes. Porém, o excesso de surfactante pode apresentar um efeito adverso na resistência devido à redução da resistência do filme formado pelo látex, e também pelo retardo na hidratação do cimento e excesso de ar incorporado (OHAMA, 1995).

A dimensão das partículas dispersas dos polímeros no látex pode também influenciar a resistência. Ohama (1995) observou que, em argamassas com SBR, a redução da dimensão das partículas influenciou na redução da permeabilidade a íons cloretos principalmente nas idades iniciais, onde as partículas de menor dimensão apresentam coalescência mais rápida do que as de maior dimensão. No entanto, esta diferença em relação à permeabilidade deixa de ser significativa em idades maiores (maior tempo de cura).

A relação polímero/cimento tem uma influência mais significativa do que a relação água/cimento nas propriedades de resistência de matrizes modificadas com polímeros, embora esta influência também dependa do tipo de polímero, teor de ar e condições de cura, etc. De um modo geral, a maioria dos concretos e argamassas modificados com polímeros e curados sob condições favoráveis apresentam resistência significativa para relação polímero/cimento de 20% a 30%. Acima desta faixa, podem ocorrer discontinuidades na microestrutura que diminuem a resistência do concreto (OHAMA, 1995).

As condições de cura ideal necessárias para matrizes cimentícias modificadas com polímeros diferem daquelas adotadas para matrizes convencionais, devido às duas fases ligantes que consistem na hidratação do cimento e na formação do filme polimérico. O desenvolvimento da resistência proveniente da hidratação do cimento é favorecido na condição úmida, enquanto que na fase látex para promover a formação do filme polimérico é preciso estar na condição seca. Desta forma, a cura úmida nas idades iniciais para hidratação do cimento é mais apropriada, seguida da condição seca que favorece a coalescência das partículas dos polímeros no látex (OHAMA, 1995).

O módulo de elasticidade é outra propriedade que sofre alteração nas matrizes cimentícias modificadas com polímero. Barluenga *et al.* (2004) avaliaram o módulo de

elasticidade através de ultrassom nas primeiras idades (1, 7, 28 e 56 dias) de argamassas modificadas com látex de SBR e verificaram que quanto maior o teor de látex adicionado, menor é o módulo de elasticidade. De forma inversa, foi verificado que com o avanço da idade há um crescimento no módulo, o que é justificado pelo avanço das reações de hidratação dos compostos do cimento.

Segundo Ohama (1995) a resistência de matrizes modificadas com polímeros depende diretamente da temperatura à qual o material está submetido. Esta dependência está correlacionada à propriedade de transição vítrea (Tg) apresentada pelos polímeros e que indica a temperatura de passagem do estado vítreo para um estado “maleável”, sem ocorrência de mudança estrutural (CANEVAROLO, 2006). O módulo de elasticidade, coeficiente de expansão e calor específico são exemplos de algumas propriedades dos polímeros que mudam com a Tg. Vale salientar também que cada polímero possui uma Tg específica. A tabela 3.1 apresenta a Tg de alguns tipos de polímeros.

Tabela 3.1 – Valores da temperatura de transição vítrea (Tg) de alguns polímeros

Polímeros	Tg (°C)
Polietileno Adipato	-46
Polietileno Tereftalato (PET)	69
Poli-Hexametileno Adipamida (Nylon)	75
Polietileno (PE)	-100
Policloreto de Vinila	87
Poliestireno (PS)	100
Policloreto de Vinilideno (PVDC)	-19
Acetato de Vinila/Etileno (EVA)	11,2
Hidroxietil-Celulose (HEC)	-5,34
Butadieno-Estireno (SBR)	-50
PVA	256

Fonte: SILVA (2001), MANO (2005) e MAGALHÃES (2008)

Ohama (1995) avaliou a influência da temperatura (de -50 °C a 150 °C) em argamassas com SBR, EVA e PAE para relações polímero/cimento de 0%, 5%, 10% e 20%. Foi verificado que quanto maior a relação polímero/cimento maior a resistência à flexão. A resistência térmica destas argamassas também foi avaliada e foi constatado que as relações resistência flexão e exposição à temperatura são governadas pela

natureza da Tg do polímero utilizado, pela relação polímero/cimento e pelas condições de calor as quais o material é submetido que está diretamente relacionado às questões de degradação do polímero. Já a incombustibilidade do material depende diretamente da composição química do polímero e da relação polímero/cimento.

A estrutura porosa de matrizes cimentícias modificadas com polímero é influenciada pelo tipo de polímero e pela relação polímero/cimento. Em estudos com argamassas e concretos contendo SBR, EVA, PVCA e PAE, Ohama (1995) afirma que a porosidade ou volume de poros nessas matrizes tende a decrescer com o aumento da relação polímero/cimento, o que, segundo o autor, justifica a melhoria da impermeabilidade de íons de cloreto.

Entretanto, Silva (2001) em seu estudo com pastas contendo EVA e HEC observou um aumento de 40% na porosidade com relação às pastas sem o polímero, fato que é justificado, segundo a autora, pelo efeito de incorporação de ar durante o processo de mistura. Todavia, nesse mesmo estudo foi observado que, apesar do aumento da concentração de poros capilares e aumento do volume total de poros, há redução da permeabilidade. Tal fato é atribuído à capacidade de formação do efeito de filme polimérico que recobre parcialmente as fases hidratadas de cimento e as paredes dos poros e vazios restringindo assim a interconexão entre os poros.

3.2. Fibras

Os materiais cimentícios em geral apresentam como principal característica a elevada capacidade de resistência a esforços de compressão, em contrapartida à baixa resistência aos esforços de tração. São também solicitados a esforços oriundos da

variação de temperatura, umidade, retrações por secagem ou autógena, dentre outros, que produzem nas peças uma tendência à fissuração, comprometendo suas condições de serviço em médio e em longo prazo. Para atenuar tais deficiências e melhorar as propriedades mecânicas são adicionadas fibras ao material cimentício. As fibras podem ser naturais, minerais, sintéticas, de vidro e de aço. A seguir serão apresentadas as principais alterações que a sua utilização implica no material.

3.2.1 Influência das fibras na reologia de matrizes cimentícias

A incorporação de fibras em concretos afeta bruscamente a trabalhabilidade, pois suas dimensões e formatos promovem a descontinuidade da mistura formada pelos agregados e pela pasta (água + cimento). Desta forma, o tipo de fibra, relação de aspecto (l/d – razão entre comprimento e diâmetro da fibra), além do diâmetro máximo do agregado são parâmetros importantes que devem ser considerados a fim de não prejudicar a trabalhabilidade da mistura no estado fresco.

O tipo de fibra deve, por exemplo, ser adequado ao tipo de processo de produção, pois a depender deste e da fragilidade das fibras, estas poderão ser danificadas durante a mistura e modificar a relação de aspecto, devido a sua fratura, e por fim, comprometer as propriedades mecânicas do material. Outro aspecto importante é que as fibras podem se agrupar formando novelos que promoverão no concreto endurecido o aparecimento de vazios, que formam zonas de concentrações de tensões.

O diâmetro máximo ($d_{m\acute{a}x}$) do agregado também interfere diretamente na trabalhabilidade devido ao aumento da área específica. Vale ressaltar também, que é preciso otimizar as características da fibra como o $d_{m\acute{a}x}$, comprimento (l_f) e volume (V_f). A figura 3.4 apresenta um esquema da influência de fibras flexíveis e rígidas em concretos. O tamanho das fibras quanto sua rigidez pode ocasionar vazios no material

endurecido, o que pode ser mitigado com o uso de fibras flexíveis. Desta forma, quando se utilizam fibras deve-se realizar estudos de dosagem buscando condições que viabilizem o melhor empacotamento dos componentes da mistura, o que irá proporcionar maior trabalhabilidade no estado fresco.

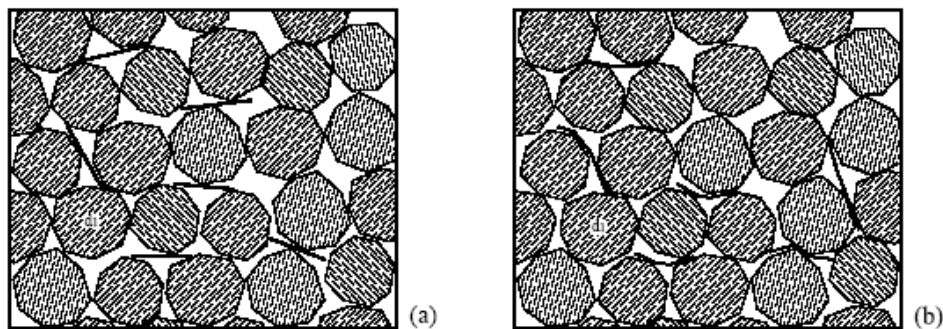


Figura 3.4 – Efeito da perturbação exercido pelas fibras: (a) rígidas e (b) flexíveis (FORMAGINI, 2005)

Apesar da influência das fibras na reologia de concretos ser apresentada em diversos trabalhos na literatura (DE LARRARD *et al.*, 1999; VELASCO, 2008 e MARANGON, 2006), a influência das fibras em pastas ainda é incipiente. Poucos são os trabalhos apresentados na literatura sobre o tema (BERNDT e PHILIPPACOPOULOS, 2002; ROMERO *et al.*, 2006 e BALTHAR, 2008). Os principais desafios são criar instrumentos que meçam ou determinem variáveis indiretas dos parâmetros de Bingham (viscosidade plástica e limite de escoamento), uma vez que os viscosímetros coaxiais disponíveis no mercado não são adaptáveis às pastas com fibras.

Um recente trabalho apresentado por Kuder *et al.* (2007) avaliou a reologia de pastas de cimento com a/c de 0,30 e 0,35; bem com a influência de fibras de aço (6 mm de comprimento e 0,16 mm de diâmetro) nas frações de 1%, 2% e 4%. Neste trabalho, foi projetado um reômetro de placas paralelas adaptável às pastas contendo fibras. Os resultados apontam que o aumento do volume de fibras produz a redução da viscosidade

plástica e que para fração volumétrica crítica de 2% há redução do limite de escoamento. Este estudo foi relevante por avaliar a influência das fibras na reologia, podendo ser reproduzidos em novos trabalhos visando à caracterização mais detalhada e pastas com fibras.

3.2.2 Influência do reforço fibroso nas propriedades mecânicas de matrizes cimentícias

A adição de fibras possibilita um melhor comportamento mecânico do material, principalmente na fase de pós-fissuração. As propriedades como resistência à compressão, flexão e tração são fortemente influenciadas pelo tipo de fibra, geometria da fibra, fração volumétrica, relação módulo de elasticidade entre fibra e matriz e principalmente comprimento da fibra.

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras, denominados de FRCC (*Fibre Reinforced Cement Composites*), são constituídos de matrizes cimentícias combinadas com fibras. Essa família de compósitos apresenta comportamento de amolecimento após fissuração (*Strain Softening*) sob tração. A figura 3.5 apresenta um gráfico típico tensão *versus* deformação/abertura de fissuras desse material.

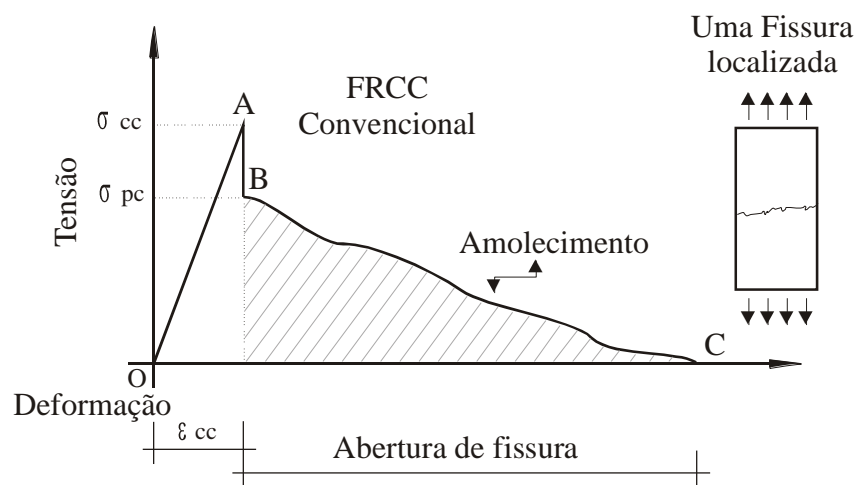


Figura 3.5 – Gráfico Tensão *versus* Deformação na tração do FRCC (adaptado de NAAMAN, 2003)

Através da figura 3.5 é possível observar um ramo elástico (OA) extremizado por σ_{cc} que corresponde à tensão de primeira fissura. O intervalo (AB) é extremizado por σ_{pc} que corresponde à máxima tensão de pós-fissuração e por fim o intervalo (BC) é caracterizado por uma região descendente também conhecida como ramo de amolecimento ou “*softening branch*” em que ocorre o aumento da fissura com a diminuição da tensão.

Basicamente o FRCC convencional é caracterizado pela relação $\sigma_{cc} > \sigma_{pc}$. O significado mecânico destas relações está relacionado à interação da fibra-matriz. Antes do surgimento da primeira fissura há uma transferência homogênea de tensões entre a fibra e a matriz. A primeira fissura surge quando é alcançada a máxima resistência do conjunto fibra-matriz. Devido à presença das fibras não há uma ruptura brusca do compósito, e sim um decréscimo da tensão e um incremento da deformação devido às fibras formarem um elo entre as partes que foram fissuradas. Nesta região ocorre a abertura de fissura e à medida que as resistências de ligação entre a fibra-matriz são vencidas ocorre o fenômeno de arrancamento e/ou ruptura de fibras até a ruptura do material.

Tradicionalmente, as fibras têm sido utilizadas em concreto e em virtude dos benefícios mencionados pesquisas estão sendo desenvolvidas buscando adaptar esta tecnologia às pastas de cimentação de poços de petróleo.

As pastas de cimentação, que poderiam ser classificadas como microconcretos, são compostas de cimento, água além de aditivos líquidos como anti-espumante, superplastificante, controlador de filtrado, dentre outros, conjuntamente com aditivos minerais como sílica ativa, microesfera, quartzo moído etc. Esses materiais apresentam granulometria na faixa de 0,5 – 350 μm . Desta forma, quando se pensa em utilizar fibras

como reforço em pastas de cimentação, deve-se escolher fibras com dimensões compatíveis aos sistemas de cimentação

Berndt e Philippacopoulos (2002) desenvolveram um estudo da aplicação de fibras em pastas de cimentação. Foram avaliadas em uma matriz composta por cimento classe G e 40% de sílica ativa a influência das seguintes fibras: aço, microfibras de aço, carbono, basalto e vidro. Vale ressaltar também que foram avaliados neste estudo o látex de SBR e agentes estendedores como microesfera e perlita em conjunto com as fibras.

Os resultados mostraram que as pastas com fibra de aço (13 mm de comprimento e 0,16 mm de diâmetro) incrementaram a resistência à tração com relação à pasta sem fibra. Tal desempenho foi atribuído à elevada relação de aspecto (81) da fibra utilizada com relação às demais.

3.2.3 Compósitos Cimentícios com Endurecimento na tração Direta (SHCC)

Além dos FRCC, foram desenvolvidas outras famílias de compósitos como os HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*) e os SHCC (*Strain Hardening Cementitious Composites*) que apresentam múltipla fissuração sob carregamento de tração.

Remetendo-se ao gráfico da figura 3.5, quando o material compósito apresenta um comportamento diferenciado no intervalo (AB) ele é denominado de compósito cimentício de alta performance reforçado com fibras ou HPFRCC (figura 3.6).

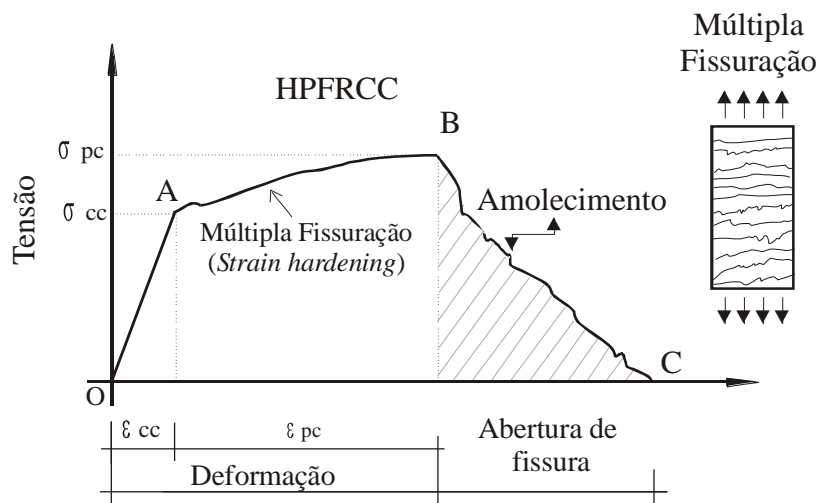


Figura 3.6 – Gráfico Tensão *versus* Deformação na tração do HPFRCC (Adaptado de NAAMAN, 2003)

O SHCC (originado do inglês *Strain Hardening Cementitious Composites*) é um material compósito da família do HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*) que também apresenta um comportamento de múltipla fissuração e “*strain hardening*” na tração direta até deformação de cerca de 5%.

O termo “*strain hardening*” ou endurecimento é utilizado para descrever o comportamento do compósito sob tração direta, quando após o surgimento da primeira fissura há tanto um acréscimo de tensão quanto um incremento da deformação, apresentando ainda múltipla fissuração.

O professor Vitor Li e seus colaboradores (LI, 2003), na Universidade de Michigan (Estados Unidos), desenvolveram um tipo de SHCC denominado de ECC (*Engineered Cementitious Composites*) sob modelos micro-mecânicos baseados na mecânica da fratura e mecanismos de deformação. Os materiais constituintes do ECC se caracterizam por uma matriz composta por cimento, areia fina, aditivos minerais e aditivos químicos e fibras sintéticas e flexíveis.

O ECC quando submetido a esforços de tração uniaxial apresenta endurecimento com alta ductilidade, o que implica na capacidade de deformação em até 7% (LI, 2003).

Sua tenacidade à fratura é na ordem de 30 KJ/m^2 , similar a do alumínio, apresentando também múltiplas microfissuras na ordem de $60 \mu\text{m}$ de abertura, com espaçamento entre si de 2 mm (MAALEJ e LI, 1995). A figura 3.7 apresenta o comportamento do ECC na tração direta.

Devido às propriedades de alta tenacidade e ductilidade na tração, o ECC tem sido utilizado em diversos fins estruturais. No Japão foi utilizado em reparos de represas e pontes, bem como nos Estados Unidos (LI, 2004). Vale salientar também, que devido às características de flexibilidade das fibras utilizadas, o ECC ainda pode ser aplicado em elementos pré-moldados ou utilizando em técnicas de moldagem por extrusão (STANG, LI, 1999), “Sprayable” (KIM *et al.*, 2003) e pelo processo de “Wet Mix Shotcreting” (KIM *et al.*, 2004).

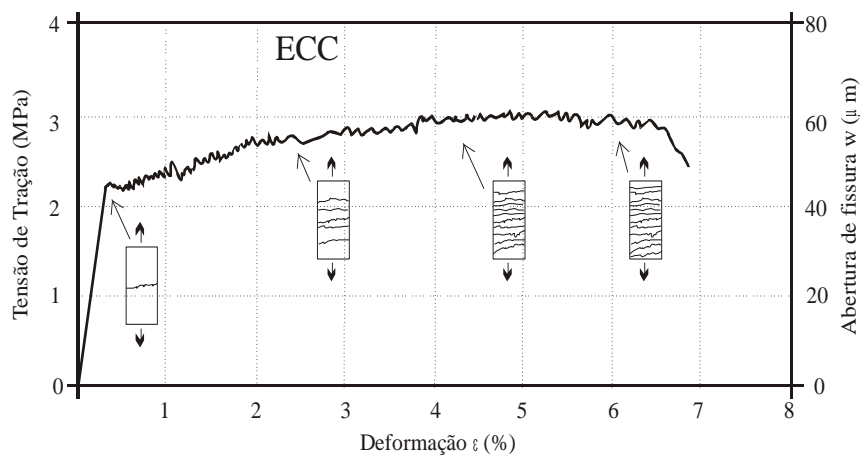


Figura 3.7 – Gráfico Tensão *versus* Deformação/abertura de fissura típica do ECC (adaptado de LI, 2004)

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi definido visando produzir materiais que atendessem as solicitações mecânicas oriundas da aplicação de injeção de vapor. Para isto, utilizou-se uma pasta de referência, composta por cimento, sílica ativa, água deionizada e superplastificante e outros três grupos de pastas com a incorporação de polímero SBR e fibra de volastonita. Com a utilização desses materiais, buscou-se incrementar a capacidade de deformação dos compósitos no estado endurecido. O quinto material a ser estudada foi o SHCC. A seguir estão apresentadas as descrições de cada formulação adotada e na tabela 4.1 a nomenclatura utilizada.

- O primeiro material utilizou em sua composição cimento, sílica ativa na proporção em massa de 40% do cimento, aditivo superplastificante e água;
- Uma segunda família de pastas utilizou o polímero SBR em sua composição nos teores de 5% e 10% em massa em relação à massa total de materiais cimentícios (cimento + sílica), aditivo superplastificante, antiespumante, sistema estabilizador de látex e água;
- Uma terceira família de pastas utilizou fibra de volastonita como reforço com volumes de fibras (V_f) de 2,3% e 4,6%, além de aditivo superplastificante e água;

- Uma quarta família de pastas utilizou uma formulação híbrida com polímero e volastonita. O teor de polímero adotado foi 10% de sólidos de SBR em relação à massa total de materiais cimentícios com a incorporação de fibras de volastonita nos teores 2% e 4%, além de aditivo superplastificante, antiespumante, sistema estabilizador de látex e água.
- Por fim, o quinto material utilizado foi o SHCC, com uma formulação que se encontra em estudo na COPPE/UFRJ (MAGALHÃES, 2008) com os seguintes materiais: areia, cinza volante, fibra de PVA e água. Vale salientar que a reologia da mistura não foi alterada para o presente estudo.

Tabela 4.1 – Nomenclatura das pastas

Descrição das Formulações	Nomeclatura
Pasta de Referência	PREF
Pasta Polimérica com 5% de SBR	PP5
Pasta Polimérica com 10% de SBR	PP10
Pasta com 2,3% de fibra de volastonita	PW2,3
Pasta com 4,6% de fibra de volastonita	PW4,6
Pasta com 10% de polímero SBR e 2% de fibra de volastonita	PP10W2
Pasta com 10% de polímero SBR e 4% de fibra de volastonita	PP10W4
SHCC com 2% de fibra de PVA	SHCC

Foram realizadas caracterizações físicas dos materiais utilizados, sendo que estes resultados alimentaram o banco de dados do programa MEC_COPPE 1.0 que foi utilizado para verificar a compacidade da mistura da pasta de referência proposta. Foram também realizados levantamentos das propriedades das pastas no estado fresco e endurecido. Um modelo físico experimental de poço foi confeccionado visando aferir o comportamento estrutural das pastas quando submetidas a gradientes de temperatura similares aos da injeção de vapor. A figura 4.1 apresenta as etapas do programa experimental e a figura 4.2 o organograma dos ensaios realizados.

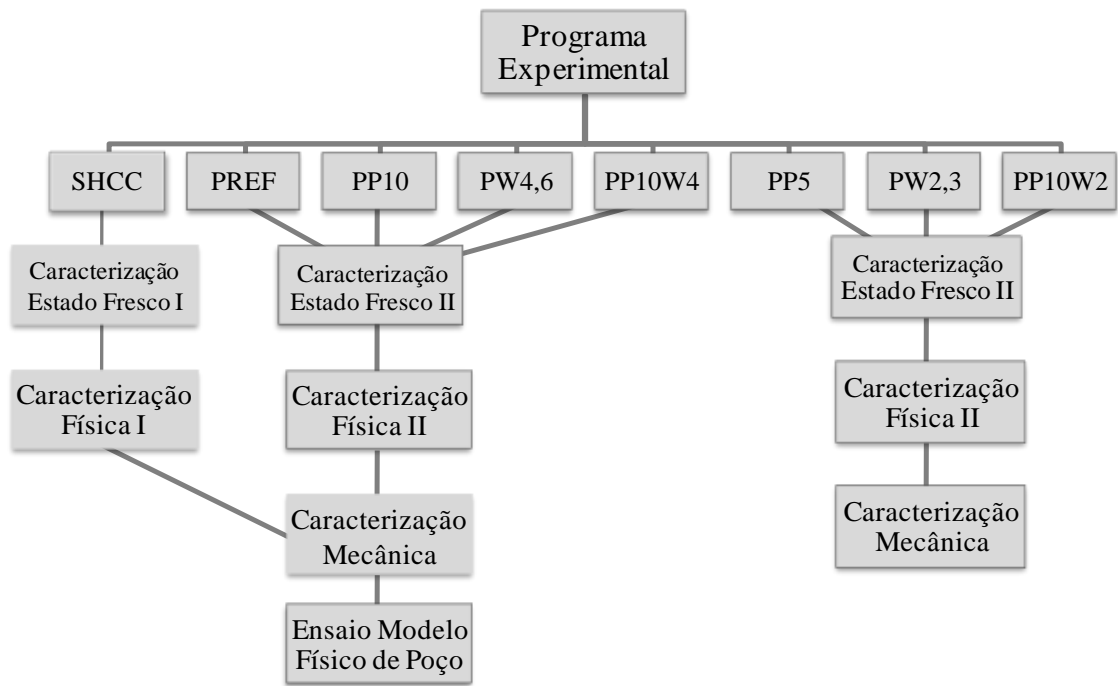


Figura 4.1 – Etapas do Programa experimental

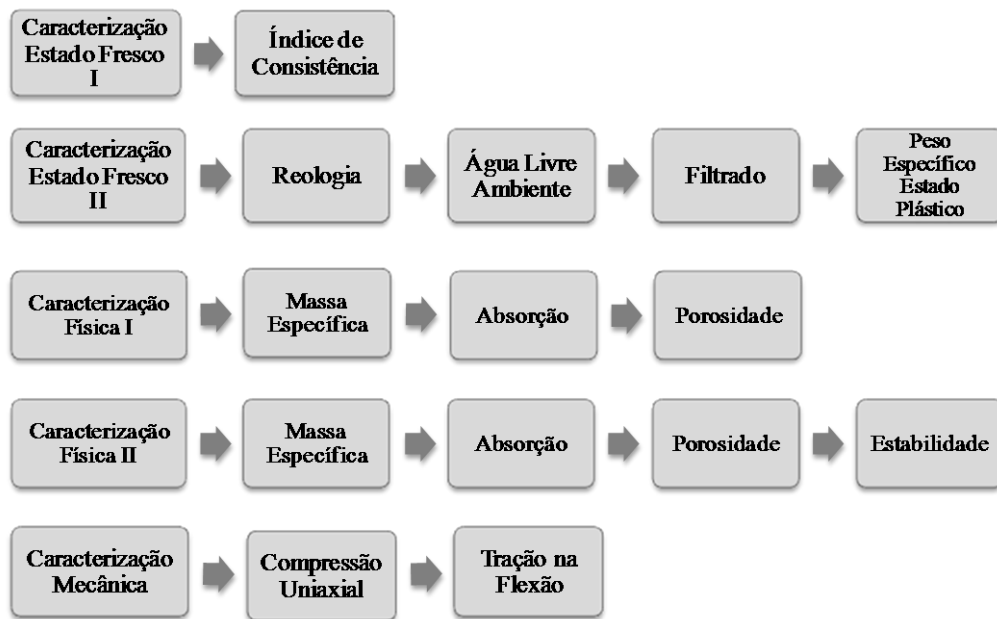


Figura 4.2 – Organograma dos ensaios realizados

4.1 Caracterizações físico - químicas dos materiais

Os materiais utilizados na produção das pastas foram: cimento Portland Classe G fornecido pela *cimentos Holcim*, sílica ativa *Silmix* fornecida pela Camargo Corrêa Cimentos, fibras de volastonita JG comercializada pela Energyarc, superplastificante Glenium 51, látex polimérico de SBR, estabilizador de látex e antiespumante.

Para a produção do compósito SHCC foi utilizado: cimento Portland CP II - F, cinza volante produzida e comercializada pela Pozo Fly, areia fina passante na peneira de malha 0,212 mm; proveniente da cidade de Maricá, município do Rio de Janeiro, e fibra de PVA fabricada pela Kuraray no Japão, além do aditivo superplastificante Glenium 51. Estes materiais foram caracterizados de acordo com as metodologias descritas a seguir.

4.1.1 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica do cimento classe G foi realizada no LABEST em um granulômetro à laser Malvern Mastersizer (figura 4.3). O fluido dispersante utilizado foi o álcool etílico absoluto P.A, sendo aplicado ultrassom durante 60 segundos na amostra. Para o cimento CP II – F 32 e a cinza volante foi adotada a mesma metodologia, no entanto, o equipamento utilizado foi o do laboratório de cimentação do CENPES/PETROBRAS (MAGALHÃES, 2008). A distribuição granulométrica da sílica ativa foi obtida através do ensaio de sedigrafia realizado em um aparelho Sedigraph 5100 da Micrometrics do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) (VELASCO, 2008).

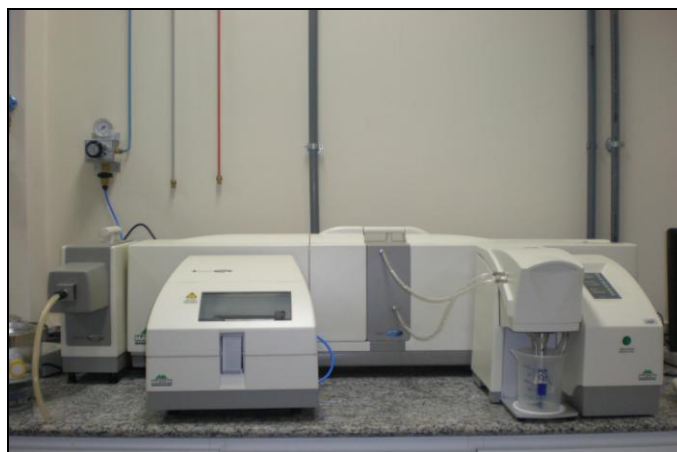


Figura 4.3 – Equipamento Malvern Mastersizer

4.1.2 Massa Específica

A massa específica do cimento foi determinada pelo método de picnometria a hélio, que consiste em determinar o volume de uma massa conhecida da amostra através da variação de pressão do gás em um volume calibrado. O equipamento utilizado foi o Picnômetro a Gás AccuPyc 1330 (Micrometrics) do Laboratório de Cimentação do CENPES/ PETROBRAS (figura 4.4).



Figura 4.4 – Picnômetro a Gás AccuPyc 1330

4.1.3 Superfície Específica

A técnica utilizada para a determinação desta propriedade foi o método desenvolvido por Blaine (ABNT NBR NM 76, 1998), que é comumente aplicado a materiais cimentícios, em que certa quantidade de ar atravessa uma camada compactada

do material analisado com porosidade padrão. O equipamento utilizado para a determinação desta propriedade foi um Blaine Automático BSAI (Acmel) (figura 4.5) do Laboratório de Cimentação do CENPES/ PETROBRAS.



Figura 4.5 – Equipamento Blaine BSAI

4.1.4 Composição Química

A composição química do cimento classe G foi determinada através da técnica semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X, em equipamento da Shimadzu EDX 720, do LABEST (figura 4.6). A composição da sílica ativa, cimento CII-F e cinza volante foram retiradas dos trabalhos de Velasco (2008) e Magalhães (2008).



Figura 4.6 – Equipamento de Raios X

4.1.5 Ponto de Saturação e Compatibilidade

O método utilizado para verificar a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante foi o Método do Funil de Marsh. Vale salientar, que este ensaio foi também realizado para a mistura de cimento e sílica ativa nas proporções em que foram empregadas no traço das pastas.

De forma sucinta, o ensaio consistiu em preparar pastas em um misturador de capacidade de 2 litros (figura 4.7 a) com relação água-cimento de 0,35 e com teores variáveis de superplastificante (0,1 - 1%), com relação à massa de materiais cimentícios. Posteriormente, a mistura de aproximadamente 1200 ml foi vertida no funil de Marsh (figura 4.7 b), medindo-se o tempo de escoamento necessário para preencher uma proveta com capacidade de um litro. Os tempos utilizados para estas medições foram de 10 min, 30 min e 60 min respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Misturador e (b) Funil de Marsh

4.1.6 Ensaio de demanda d'Água para determinação da compacidade experimental

O ensaio de Demanda d'água é sugerido por De LARRARD (1999) para determinar a compacidade experimental de materiais finos. O ensaio consiste em

adicionar progressivamente teores de água à massa seca de 350 g do material ensaiado em um misturador planetário de dois litros (ABNT NBR 7215, 1996) (figura 4.8 a). Inicialmente é adicionada uma pequena quantidade de água em velocidade baixa por um minuto, posteriormente é acrescentado mais água à mistura que passa a ser misturada em velocidade alta. É então observada após cada adição de água a formação de uma pasta homogênea sem a presença de umidade nas paredes da cuba do misturador figura 4.8 (b). O ensaio deve ser realizado em temperatura de $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. O valor encontrado da massa de água correspondente ao estado anteriormente descrito é o necessário para preencher os espaços vazios contidos na massa ensaiada. Assim, a compacidade experimental é determinada pela equação 4.1.

$$c = \frac{1}{1 + \delta \frac{m_a}{m}} \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Onde:

C: compacidade experimental

δ : massa específica do material

m_a : massa da água

m : massa de material



(a)



(b)

Figura 4.8 – (a) Misturador planetário e (b) Pasta homogênea sem umidade nas paredes

4.2 Dosagem, preparo e cura das formulações propostas

4.2.1 Dosagem das formulações propostas

A pasta de referência foi dosada utilizando as recomendações usuais das pastas comerciais para poços de injeção de vapor que consideram:

- 35% a 40% em massa de sílica ativa em relação ao cimento, sendo que neste trabalho optou-se pelo teor de 40%,
- massa específica da pasta no estado fresco em torno de 1,8 g/cm³ (15 lb/gl) e
- alta compactidade.

As pastas destinadas a poços que são submetidos à injeção de vapor devem levar em sua composição sílica para evitar o fenômeno do decremento da resistência compressiva ou retrogressão. Os benefícios da inclusão da sílica em pastas de cimentação foi outrora estudado por Nelson (1990), que verificou que em ambientes acima de 110°C as pastas contendo 30 - 40% de sílica 325 mesh (45 µm) estabilizam as reações ativadas pela temperatura não ocorrendo o decaimento da resistência à compressão. A sílica ativa por apresentar partículas de tamanho menor do que a sílica 325 mesh é mais reativa.

O teor de superplastificante e a relação água/materiais cimentícios foram estabelecidos através do binômio reologia e estabilidade das misturas, parâmetros obtidos através de ensaios descritos nos itens 4.3.1 e 4.3.2, considerando ainda o peso específico da pastas no estado fresco.

Com relação à reologia, buscou-se uma pasta de referência que tivesse a maior fluidez possível e que, após a incorporação de aditivos minerais e/ou poliméricos,

permanecesse com o padrão aceitável de reologia, sendo verificada a não segregação de materiais sólidos através do ensaio de estabilidade.

Para avaliar a compactidade da mistura proposta foi utilizado o software MEC_COPPE 1.0, que utiliza o Modelo do Empacotamento Compressível de partículas (MEC) proposto por De Larrard (1999). Este modelo analisa as misturas granulares visando maior compactidade possível e considerando ainda as propriedades reológicas e mecânicas do material a ser dosado.

O conceito de maior compactidade, aplicado a princípio em concretos, tem sido ultimamente empregado em pastas de cimentação (PAIVA, 2008; MIRANDA, 2008 e BALTHAR, 2008). Um dos primeiros trabalhos a utilizarem este conceito foi o de Noik *et al.* (1998), em que foi proposta uma mistura de cimento classe G, areia com diâmetro médio de 30 μm (20-35% em relação à massa de cimento) e sílica ativa com diâmetro médio de 0,1 μm (10 - 30% em relação à massa de cimento). Cada um destes materiais foi proporcionado em função da maior compactidade da mistura seca, curados nas temperaturas de 90°C e 140°C. Neste estudo os resultados mostram que pastas com maiores compactidades apresentam melhor desempenho com relação aos critérios mecânicos e de durabilidade.

Foram realizadas duas simulações no MEC_COPPE 1.0. A primeira considerando 40% de sílica ativa com relação à massa de cimento, em que foi obtida uma compactidade 0,698. Na outra simulação o programa estabeleceu a proporção dos materiais visando à otimização da mistura obtendo a compactidade de 0,784. Vale ressaltar que a compactidade da mistura proposta é cerca de 90% do que seria a da mistura com compactidade máxima, que não foi utilizada por apresentar proporção de sílica ativa em relação à massa de cimento de 24%. Estão apresentadas na tabela 4.2 as formulações das pastas propostas e na tabela 4.3 a formulação do SHCC.

Tabela 4.2 – Traço unitário das pastas propostas em kg/m³

Materiais	PREF	PP5	PP10	PW2,3	PW4,6	PP10W2	PP10W4
Cimento	832,08	775,60	727,16	812,45	793,13	712,4	697,5
Sílica Ativa	332,83	310,24	290,87	324,98	317,25	284,96	279
Materiais Cimentícios	1164,91	1085,84	1018,03	1137,43	1110,38	997,36	976,50
Látex*	-	54,29	101,803	-	-	99,74	97,65
Estabilizador de látex	-	10,86	20,36	-	-	19,95	19,53
Antiespumante	-	1,63	3,05	-	-	2,99	2,93
Fibra de Volastonita	-	-	-	67,13	134,51	58,86	118,29
Superplastificante*	2,91	4,34	4,07	3,41	3,33	3,99	3,91
Água**	582,46	542,93	509,01	568,72	555,19	498,68	488,25
Água/materiais cimentícios (a/mc)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

* - Referente ao teor de sólidos

** - Referente a água total (água + água do látex + água do superplastificante)

Tabela 4.3 – Traço unitário do SHCC em kg/m³

Materiais	Traço Unitário (Kg/m ³)
Cimento	550,00
Cinza Volante	650,00
Materiais Cimentícios	1200,00
Areia	550,00
Fibra de PVA	26,00
Superplastificante*	1,23
Água	398,90
Água/materiais cimentícios (a/mc)	0,33

* - Referente ao teor de sólidos

4.2.2 Preparo das formulações

Foram utilizados dois misturadores de palhetas para o preparo das pastas, um com capacidade de um litro – modelo 30-60 Chandler (figura 4.9 a) para as formulações dos ensaios de caracterização do estado fresco e outro com capacidade de quatro litros, modelo 30-70 também da Chandler (figura 4.9 b) para o preparo das amostras destinadas aos ensaios mecânicos e ao modelo físico de poço. Vale salientar, que ambos misturados são dotados de temporizador e tacômetro para indicação da velocidade de rotação durante o processamento das pastas.

Para os ensaios de caracterização do estado fresco (reologia, estabilidade, filtrado, água livre e peso específico) foram seguidos os procedimentos descritos no manual da PETROBRAS de Procedimento e Métodos de Laboratório Destinados à

Cimentação de Poços Petrolíferos (PROCELAB, 2005). A sequência de mistura está apresentada abaixo:

- Pesagem dos materiais secos: cimento, sílica ativa e fibra de volastonita, em um único recipiente para facilitar sua homogeneização;
- Pesagem dos materiais líquidos, sendo posteriormente vertidos no copo do misturador;
- Processamento da mistura em velocidade baixa, 4000 ± 200 rpm durante 15 s, sendo neste tempo adicionada a mistura de materiais secos;
- Após o término dos 15s, velocidade alterada para 12000 ± 500 rpm, permanecendo assim por 35s, o que totalizava um tempo de 50s de mistura;
- A pasta produzida era levada ao consistômetro atmosférico (figura 4.10) modelo 1200 Chandler, onde permanecia por 20 minutos na temperatura de 27°C ou 80°F , sendo posteriormente utilizada para os ensaios já mencionados.

As moldagens dos corpos-de-prova dos ensaios mecânicos e do modelo físico seguiram a mesma metodologia descrita acima com a alteração dos tempos nas velocidades de mistura. Devido o volume de moldagem (3000 ml) para esses ensaios ser superior aos dos ensaios de caracterização no estado fresco e sendo o tempo de 15 segundos insuficiente para adição dos materiais secos, adotou-se um critério de proporcionalidade entre os tempos e o volume com referência ao volume padrão de 600 ml, sendo utilizados 75 segundos na velocidade de 4000 rpm e 175 segundos na velocidade de 12000 rpm.



(a)



(b)

Figura 4.9 – (a) Misturador de Palhetas Chandler: (a) capacidade de 1 litro e (b) capacidade de 5 litros



Figura 4.10 – Consistômetro Atmosférico

Os materiais secos (cimento CP II-F, cinza volante e areia) para o preparo do SHCC foram lançados no misturador planetário (figura 4.11 a) e homogeneizados durante 5 minutos na velocidade de 30 rpm. Posteriormente foram adicionados água e superplastificante, sendo misturados na mesma velocidade por 8 minutos. A partir desse instante foram adicionadas progressivamente as fibras de PVA,

finalizando esse processo em 13 minutos a contar da adição d'água na mistura. Em seguida a velocidade foi alterada 54 rpm permanecendo nesse estágio por mais 3 minutos. Posteriormente o material foi lançado nos moldes em três camadas, sendo que ao final de cada camada o material era adensado em uma mesa vibratória durante 30 segundos (figura 4.11 b).



(a)



(b)

Figura 4.11 – (a) Misturador planetário e (b) mesa vibratória

4.2.3 Cura das amostras

Após a produção das pastas e do SHCC, foram moldados os corpos-de-prova que permaneciam nos moldes e envolvidos com panos úmidos por período de 24 h (figura 4.12). Este procedimento foi realizado com intuito de evitar a secagem indesejada das amostras. Em seguida os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos à cura térmica em banho. Este procedimento foi adotado visando representar as condições iniciais do poço típico utilizado no modelo físico (ver item 4.6).

Foram utilizados dois tanques para a cura térmica. No primeiro (figura 4.13 a) as amostras eram tanto aquecidas da temperatura ambiente de 22 ± 1 °C a 50 ± 1 °C numa rampa de $0,33^\circ\text{C}/\text{min}$, quanto resfriadas de 50°C à temperatura ambiente. O segundo (figura 4.13 b) foi mantido de forma constante na temperatura de 50 ± 1 °C,

sendo utilizado pelo período determinado de residência em cura quente das amostras. A figura 4.14 apresenta as rampas de temperaturas adotadas para a cura das amostras.

Para determinar o tempo de residência foi realizado um estudo para avaliação da resistência à compressão na pasta de referência após 1, 5, 7, 12, 19 e 26 dias no banho a 50°C. A figura 4.15 apresenta a evolução da resistência da pasta de referência ao longo das idades referidas.



Figura 4.12 – Cura dos corpos-de-prova durante as primeiras 24h



(a)



(b)

Figura 4.13 – (a) Banho utilizado para aquecimento e resfriamento e (b) Banho a 50°C constante

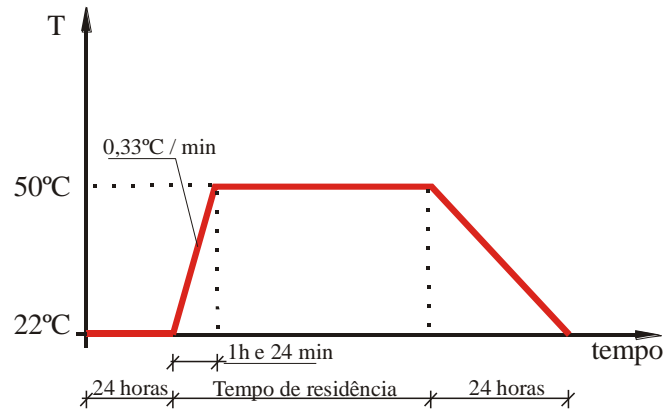


Figura 4.14 – Rampa de temperatura do período de cura das amostras

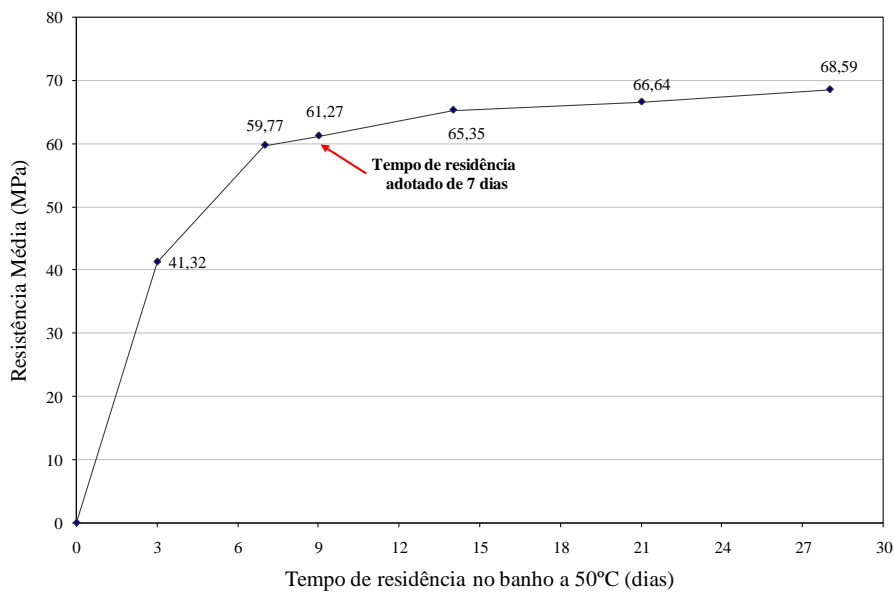


Figura 4.15 - Evolução da resistência da pasta de referência

Com um dia de tempo de residência a resistência alcançada foi de 41,32 MPa; cerca de 60% do valor alcançado aos 26 dias com 68,59 MPa. Para as idades de 5, 7, 12 e 19 dias as resistências foram de 59,77 MPa; 61,27 MPa; 65,35 MPa e 66,64 MPa que equivalem a 87%, 90%, 95% e 97% da resistência aos 26 dias, respectivamente.

Assim, com intuito de acelerar o tempo de execução dos ensaios do programa experimental e tendo a idade de 7 dias apresentado 90% da resistência à compressão referente aos 26 dias, a mesma foi adotada como o tempo de residência na

cura térmica a 50°C das amostras a serem ensaiadas mecanicamente e do modelo de poço, sendo então a idade final de 9 dias (24 h de cura ambiente + 7 dias de residência + 24h de resfriamento).

4.3 Caracterização das Pastas no Estado Fresco

Os requisitos que as pastas cimentícias para poços de petróleo devem apresentar no estado fresco são mais complexos que os demais materiais cimentícios. Enquanto estes últimos são caracterizados apenas nos critérios de reologia, e ar incorporado, as pastas são submetidas a diferentes ensaios além da reologia, como água livre ambiente, água livre aquecida, filtrado, filtrado sob agitação, tempo de espessamento, compatibilidade com outros fluidos, peso específico, dentre outros. Estes ensaios são realizados sob diversas temperaturas e pressões objetivando reproduzir as condições do poço a ser cimentado. A seguir são apresentados alguns dos ensaios mencionados que foram utilizados neste estudo para a caracterização das pastas no estado fresco.

4.3.1 Reologia

Os parâmetros limite de escoamento e viscosidade plástica foram determinados através do ensaio de reologia descrito pela NBR 9830 (1993) na temperatura de 27°C (80°F). Foi utilizado um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais da Chandler modelo 3506 do LABEST (figura 4.16), sendo realizadas duas determinações para cada tipo de pasta. A sequência de execução do ensaio encontra-se descrita a seguir:

- As pastas são preparadas e homogeneizadas na temperatura de 27°C (80°F) conforme item 4.2.2 e posteriormente vertidas no copo do viscosímetro mantido na mesma temperatura;
- O copo do viscosímetro é levantado na velocidade de 300 rpm, permanecendo assim por 1 minuto e, ao final deste tempo, é registrada a leitura inicial da deflexão no mostrador;
- Duas leituras posteriores são realizadas em velocidades decrescentes de 200 rpm e 100 rpm ao final de cada 20 s de mistura;
- Em seguida, a velocidade é alterada para 600 rpm permanecendo nesse estágio por mais 60 s;
- O motor do equipamento é desligado durante 10 s, e posteriormente religado na velocidade de 3 rpm, quando é registrada a quarta leitura referente a deflexão máxima observada. Essa leitura é anotada para o cálculo do gel inicial;
- Mais uma vez o motor é desligado por um período de 10 min, quando então é religado na velocidade de 3 rpm, sendo anotada a deflexão máxima para o cálculo do gel final.



Figura 4.16 – Viscosímetro coaxial Chandler

Através das equações 4.2 e 4.3 foram calculadas as taxas de deformação para o tipo de rotor utilizado no viscosímetro. A tensão cisalhante foi calculada através da equação 4.4 com os dados aferidos no ensaio descrito. Com os dados de taxa de deformação e tensão cisalhante os parâmetros de viscosidade plástica e limite de escoamento foram calculados com base no modelo matemático de Bingham (equação 3.5) apresentado na seção 3.2.3.

$$\varpi = \frac{2\pi\Omega}{60} \quad [\text{Eq. 4.2}]$$

$$\gamma = \frac{2\varpi R_o^2}{(R_o^2 - R_1^2)} \quad [\text{Eq. 4.3}]$$

Onde:

ϖ : Velocidade angular, s^{-1} ;

γ : Taxa de deformação, s^{-1} ;

Ω : Velocidade de rotação do viscosímetro, rpm;

R_o : Raio interno do rotor, cm;

R_1 : Raio externo do “bob”, cm;

$$\tau = F_\tau F_m \theta \quad [\text{Eq. 4.4}]$$

Onde:

τ : Tensão de cisalhamento, lbf/100 pés² ou Pa;

F_τ : Fator de tensão de cisalhamento do viscosímetro para uma dada combinação de “rotor-bob” (ver tabela 4.4);

F_m : Coeficiente da mola de torção do instrumento (ver tabela 4.4);

θ : Leitura do viscosímetro em graus nas velocidades de 300 rpm, 200 rpm e 100 rpm;

Tabela 4.4 – Fatores de tensão cisalhante e constante da mola do viscosímetro

Bob	Fτ (lbf/100 pés ²)	Fτ (Pa)	Tipo de mola	F_m
P1	1,07	0,51	F1	1

4.3.2 Água Livre ambiente

O objetivo deste ensaio é determinar o percentual de volume sobrenadante, sem característica cimentante, na pasta após 2 horas em repouso à temperatura ambiente. O ensaio foi realizado no laboratório de cimentação do CENPES/PETROBRAS segundo o procedimento descrito no PROCELAB (2005), sendo realizada uma determinação para cada tipo de pasta. A pasta foi preparada e homogeneizada, conforme item 4.2.2, sendo novamente processada na velocidade de 4000 rpm por 50 segundos. Um volume de 250 ml de pasta foi vertido em uma proveta graduada (figura 4.17 a) que, após selada, foi mantida em um ambiente livre de vibrações por 2 horas (figura 4.17 b). O teor de água livre é calculado pela equação 4.5

$$T = \frac{V_a}{V_p} \times 100 \quad [\text{Eq. 4.5}]$$

Onde:

T: Teor de água livre (%);

V_a: Volume de água livre medido (ml);

V_p: Volume da pasta (ml).

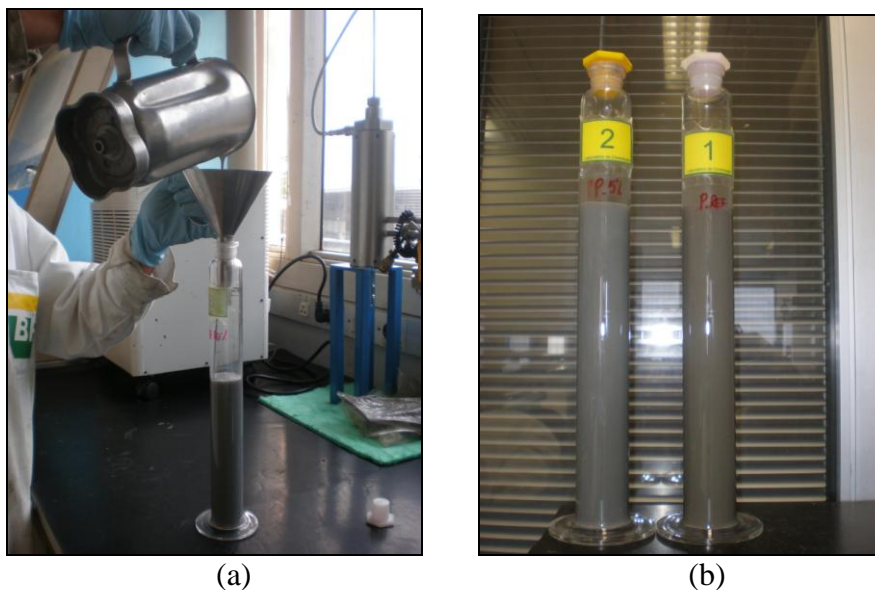


Figura 4.17 – (a) Proveta e (b) Repouso das amostras

4.3.3 Filtrado

O ensaio de filtrado, também chamado de perda de fluido, tem como objetivo medir a taxa de desidratação da pasta quando submetida a condições de temperatura e pressão. O ensaio foi realizado no laboratório de cimentação do CENPES/PETROBRAS conforme o procedimento descrito no PROCELAB (2005), sendo realizadas duas determinações para cada tipo de pasta. Após o procedimento de preparo e homogeneização na temperatura de 27°C (80°F) a pasta foi vertida em um filtro-prensa API (figura 4.18) e a perda da fase líquida ocorreu através de um elemento filtrante com tela de aço ABNT - 325 mesh (45 µm), suportada por outra tela igualmente de aço ABNT - 60 mesh (250 µm), sendo submetido a uma pressão de 1000 psi. Ao fim do ensaio o tempo e o volume foram medidos e para os casos em que a pasta se desidratava no tempo inferior a 30 minutos o volume estipulado foi calculado conforme equação 4.6.

$$Q_{30} = \frac{2 \cdot Q_t \cdot 5,477}{\sqrt{t}} \quad [\text{Eq. 4.6}]$$

Onde:

Q_{30} : Perda de fluido estipulado a um tempo de 30 minutos, cm^3 ;

Q_t : Volume de fluido coletado até o momento “t” de desidratação, cm^3 ;

t: Tempo em que ocorreu a desidratação, minutos;



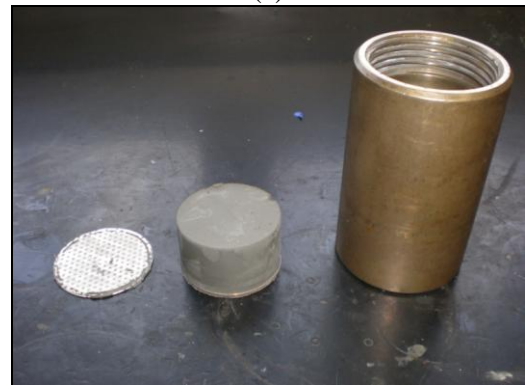
(b)



(c)



(a)



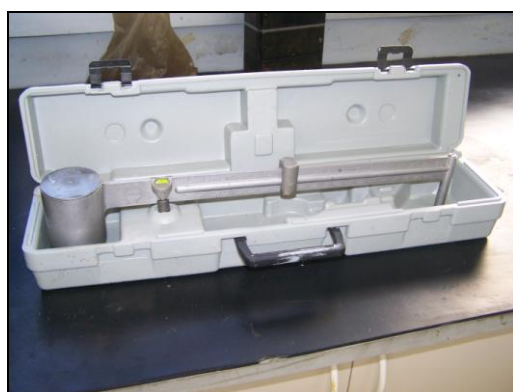
(d)

Figura 4.18 – Ensaio de filtrado: (a) Acessórios do filtro, (b) preenchimento do filtro prensa, (c) ensaio em andamento e (d) aspecto final da pasta ensaiada

4.3.4 Peso Específico no estado plástico

Para a determinação da propriedade peso específico foi adotado o procedimento descrito no PROCELAB (2005) que preconiza dois tipos de peso específicos: aparente (contendo ar aprisionado) e real (quantidade de ar é desprezível). Foram aferidos os dois tipos acima descritos no laboratório de cimentação do CENPES/PETROBRAS, sendo realizadas duas determinações para cada tipo de pasta.

Na balança de lama para determinação do peso específico aparente (figura 4.19 a) o fluido é colocado e equilibrado por contrapesos posicionados na extremidade oposta e por um cursor que se move livremente ao longo de uma escala graduada. Para o peso específico real é utilizado o mesmo princípio (figura 4.19 b). Contudo, é posicionado um acessório, uma tampa que possui uma válvula, que permite a pressurização do fluido contido no copo através de um êmbolo, retirando assim, o ar aprisionado da mistura.



(a)



(b)

Figura 4.19 – Ensaio de Peso Específico: (a) Balança de lama e (b) Balança tipo pressurizada

4.3.5 Índice de consistência

O ensaio de índice de consistência, obtido através da mesa de espalhamento (NBR 13276, 2005), foi utilizado para medir a propriedade no estado fresco do SHCC. A metodologia utilizado compreendeu o enchimento do molde tronco-cônico (figura 5.20 a) em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, aplicando em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com um soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. Posteriormente ao arrasamento do material com espátula metálica, o molde foi levantado e a manivela da mesa para índice de consistência foi acionada manualmente com 30 rotações durante 30s. O espalhamento do material foi obtido através da média de três medidas do diâmetro do espalhamento.



Figura 4.20 – Mesa de espalhamento com molde tronco-cônico

4.4 Caracterização Física das Pastas

A caracterização física constou dos ensaios de massa específica no estado endurecido, porosidade, absorção e estabilidade. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a realização destes ensaios.

4.4.1 Porosidade, absorção e massa específica no estado endurecido

A porosidade, absorção e massa específica foram determinadas segundo a NBR 97 78 (2005), em amostras cilíndricas com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. As amostras, após o período de 9 dias de cura permaneceram durante 24 h em temperatura ambiente ($22 \pm 1^\circ\text{C}$), sendo posteriormente levadas à estufa na temperatura de $38 \pm 2^\circ\text{C}$ (figura 4.21) até adquirirem massa seca constante (m_s), sendo imersas em água até adquirirem constância de massa. As amostras então eram secas com papel absorvente e pesadas em um béquer contendo água (figura 4.22 a) na condição de saturada superfície seca (m_{sat}). Em seguida, eram pesadas em uma balança hidrostática, figura 4.22 (b), na condição de imersa (m_i). Os valores de massa específica (ρ_s),

porosidade (P_t) e absorção (A) são apresentados pelas equações 4.7, 4.8 e 4.9, respectivamente.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad [\text{Eq. 4.7}]$$

$$P_t = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad [\text{Eq. 4.8}]$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad [\text{Eq. 4.9}]$$



Figura 4.21 – Estufa



(a)



(b)

Figura 4.22 – (a) Peso saturado e (b) Peso imerso

4.4.2 Estabilidade

O ensaio de estabilidade foi realizado segundo as prescrições do PROCELAB (2005), sendo realizada uma determinação para cada tipo de pasta. As pastas após serem preparadas e homogeneizadas conforme item 4.2.2. Posteriormente vertidas em um tubo decantador (figura 4.23 a) e levadas a um banho térmico na temperatura de 27°C (80°F) por 24h. Ao término deste período, as amostras foram desmoldadas e identificadas em: topo, intermediária (I e II) e fundo (figura 4.23 b) permanecendo em água a temperatura ambiente por 30 minutos. Vale ressaltar que foi verificado o rebaixamento do topo de cada amostra, tendo como valor limite 5 mm para a amostra ser aprovada.

Ao fim do procedimento descrito, as amostras foram secas com papel absorvente e pesadas na condição ao ar e, em seguida, foram imersas em um béquer com água e pesadas nesta condição. A massa específica de cada seção foi calculada pela equação 4.10. A diferença entre as massas específicas de cada seção deve ser menor que 0,06 g/cm³ (0,5 lb/gal) para que não haja a segregação.

$$\gamma_{Seção} = \frac{P_{ar}}{P_{imerso}} \quad [Eq. 4.10]$$

Onde:

$\gamma_{Seção}$: Massa específica da seção (g/cm³);

P_{ar} : Massa da seção ao ar (g);

P_{imerso} : Massa da seção imersa (g).



Figura 4.23 – (a) Tubo decantado e (b) amostras

4.5 Caracterização Mecânica das Pastas no Estado Endurecido

Com já apresentado no segundo capítulo, as solicitações mecânicas às quais pastas cimentícias são submetidas estão além do parâmetro de resistência à compressão solicitada pelas normas e procedimentos desenvolvidos pela indústria do petróleo. Para obter valores da resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson realizou-se o ensaio de compressão axial com aquisição das deformações longitudinais e transversais, para a resistência à tração optou-se pelo ensaio de tração na flexão. Desta forma, desenvolveu-se um programa experimental que contemplou os ensaios acima mencionados. A seguir estão apresentados os métodos utilizados nesses ensaios.

4.5.1 Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade Coeficiente de Poisson

A resistência à compressão foi determinada através de amostras cilíndricas (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) em uma máquina de ensaios universal Shimadzu modelo UH-F1000 kNI (figura 4.24 a) com célula de carga de 1000 kN. Seguiu-se a metodologia prescrita NBR 5739 (1994) com a ressalva de ser utilizada a velocidade de carregamento de 0,2mm/min. No total para cada mistura foram ensaiados seis corpos-de-prova e a deformação longitudinal obtida através de dois transdutores elétricos para medição de deslocamentos (figura 4.24 b). Vale salientar ainda, que para os cálculos foram utilizados apenas os valores de quatro corpos-de-prova, sendo descartados o maior e o menor valor. Os corpos-de-prova, antes de serem rompidos, foram faceados em um torno mecânico no LABEST, figura 4.25. O módulo de elasticidade foi calculado conforme procedimento descrito na NBR 8522 (2003) através da equação 4.11.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad [\text{Eq. 4.11}]$$

Onde:

E_{ci} : Módulo de Elasticidade secante, GPa;

σ_a : Tensão maior ($\sigma_a = 0,3F_c$), MPa;

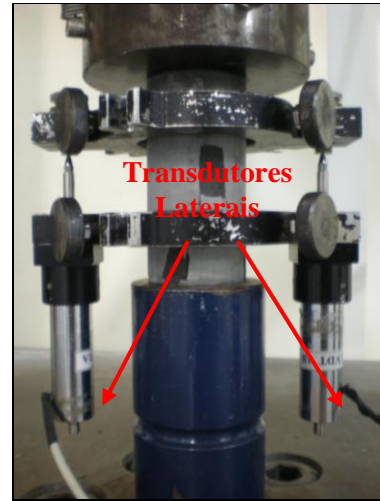
σ_b : Tensão básica ($\sigma_b = 0,5$ MPa);

ε_a : Deformação específica longitudinal média dos corpos-de-prova ensaiados sob tensão maior;

ε_b : Deformação específica longitudinal média dos corpos-de-prova ensaiados sob tensão básica.



(a)



(b)

Figura 4.24 – (a) Máquina universal de ensaios Shimadzu UH-F1000 kNI e (b) Detalhe dos transdutores elétricos utilizados no ensaio



Figura 4.25 – Faceamento das amostras em torno mecânico

O coeficiente de Poisson também foi determinado pelo ensaio de compressão. Entretanto os corpos-de-prova utilizados foram cilíndricos com dimensões diferentes (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) devido ao dispositivo utilizado para determinação dessa propriedade (figura 4.26 a). Além dos dois transdutores elétricos para a medida da deformação longitudinal, foi utilizado um terceiro transdutor elétrico para a medida da deformação transversal. Para cada mistura foram ensaiados três corpos-de-prova que, antes de serem rompidos, foram capeados com uma mistura de enxofre e quartzo moído (relação 1:3 em massa) (figura 4.26 b), com o objetivo de garantir o paralelismo e planificação entre suas faces. Para ambos os ensaios: com

corpos-de-prova de 50x100 mm e 100x200mm foi utilizado um sistema de aquisição de dados composto por um condicionador ADS 200, de 16 bits e um programa AQDados versão 7.02.08 da empresa Lynx. O coeficiente de Poisson foi determinado pela equação 4.12.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lb} - \varepsilon_{la}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad [\text{Eq. 4.12}]$$

Onde:

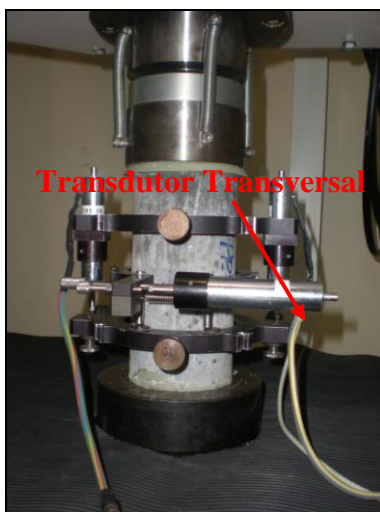
ν : Coeficiente de Poisson;

ε_{la} : Deformação transversal a meia altura do corpo-de-prova produzido pela Tensão maior ($\sigma_a = 0,3F_c$), MPa;

ε_{lb} : Deformação transversal a meia altura do corpo de prova produzida pela Tensão básica ($\sigma_b = 0,5$ MPa);

ε_a : Deformação específica longitudinal média dos corpos-de-prova ensaiados sob tensão maior;

ε_b : Deformação específica longitudinal média dos corpos-de-prova ensaiados sob tensão básica;



(a)



(b)

Figura 4.26 – (a) *Setup* de compressão com deformação transversal e (b) Capeamento dos corpos-de-prova

4.5.2 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração foi obtida pelo ensaio de tração na flexão (quatro pontos) conforme a NBR 12142 (1993). Os corpos-de-prova para as pastas foram prismáticos com 50 mm de largura, 50 mm de altura e 228 mm de comprimento. Para o SHCC foram utilizadas placas de 57 mm de largura, 12,5 mm de espessura e 400 mm de comprimento. O carregamento foi aplicado em dos terços do vão livre com a taxa de 0,1 mm/min de deslocamento do travessão. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios Shimadzu AGX 100 kN (figura 4.27), com célula de carga de 100 kN e um transdutor elétrico de deslocamento que mediu a flexa no vão central do corpo-de-prova. Com o valor da carga máxima a resistência à tração na flexão foi obtida através da equação 4.13. Foram ensaiados seis corpos-de-prova para cada tipo de material, sendo descartados na análise dos resultados o maior e o menor valor de cada mistura.

$$f_t = \frac{Pl}{bd^2} \quad [\text{Eq. 4.13}]$$

Onde:

f_t : Resistência à tração na flexão, MPa;

P : Carga máxima aplicada, N;

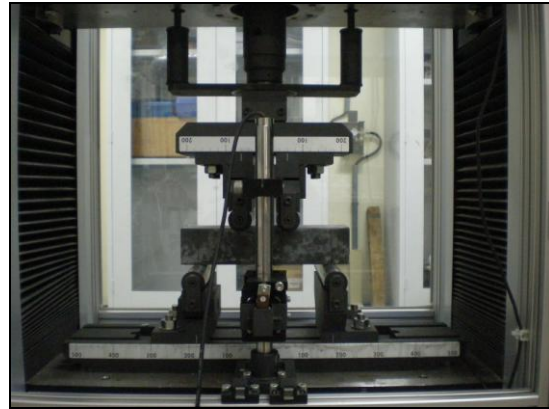
l : Comprimento do vão livre, mm;

b : Largura média do corpo-de-prova, mm;

d : Altura média do corpo-de-prova, mm.



(a)



(b)

Figura 4.27 – (a) Máquina Universal de ensaios Shimadzu modelo AGX 100 kN, (b) Ensaio de flexão no prisma

4.6 Modelo de Poço de Petróleo

O modelo físico desenvolvido no presente estudo, mediante aos aspectos apresentados no segundo capítulo sobre poços de petróleo, foi projetado de forma a representar geometricamente as dimensões e formato de um poço de petróleo que estivesse submetido às mesmas condições de carregamento que são aplicadas aos poços nas situações de campo.

No perfil do poço típico adotado (figura 4.28) a formação encontra-se na situação de campo com temperatura inicial de 50°C (122°F). O desenvolvimento geométrico do modelo teve por base um perfil composto por 4 fases (figura 4.29): 30''(36''), 13 3/8''(17 1/2''), 9 5/8'' (12 1/4'') e 7'' (8 1/2''), sendo que os números entre

parênteses representam o diâmetro do poço e os demais o diâmetro do revestimento (ROCHA e AZEVEDO, 2007).

Vale ressaltar que a parte a ser reproduzida no modelo físico se localiza na porção final do poço com a dimensão de 7”(8 ½”) conhecida como *liner* de produção. O *liner* de produção é uma coluna de revestimento que é descida no poço visando apenas cobrir sua parte inferior, permanecendo ancorado um pouco acima da extremidade inferior do revestimento anterior, sendo independente do sistema de cabeça de poço (THOMAS, 2001).

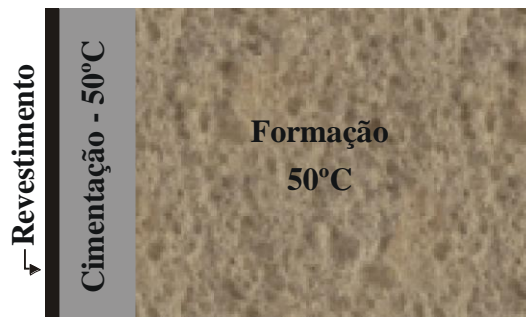


Figura 4.28 – Perfil típico utilizado com as condições inicial de temperatura

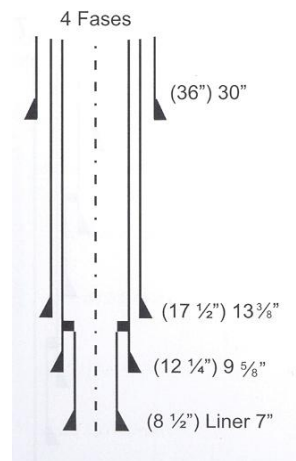


Figura 4.29 – Perfil típico de poço (ROCHA e AZEVEDO, 2007)

Definida a seção a ser representada fisicamente, foi confeccionada uma forma especial com formato cilíndrico contendo em seu interior um tubo que garantiu o

formato anular do molde. A escala utilizada pelo modelo físico com relação ao poço típico foi 1:2.

Alguns cuidados foram tomados com relação ao material para a confecção da forma. O molde cilíndrico (figura 4.30 a), foi confeccionado em aço carbono tendo diâmetro externo de 127 mm (5”), altura de 440mm e espessura de 10 mm. Optou-se pela confecção em forma bipartida (figura 4.30 b) visando facilitar o processo de desmoldagem, sendo que as partes foram unidas por meio de sete parafusos distribuídos em cada lado.

Utilizou-se um tubo interno com características de tubos de revestimentos de poços de petróleo, visando garantir assim, as mesmas condições de aderência entre a pasta e o tubo, bem como, as mesmas propriedades físicas do material. Foram então confeccionados nove tubos de 60.3 mm (2 3/8”) de diâmetro externo, espessura de 5.54 mm e 440 mm de altura, figura 4.31. Os tubos são em aço sem costura com especificação API 5L/line pipe/ PSL 1 schedule 80. É importante ressaltar que esse tubo é considerado como perdido, uma vez que após ser cimentado permanece aderido à pasta (figura 4.32).

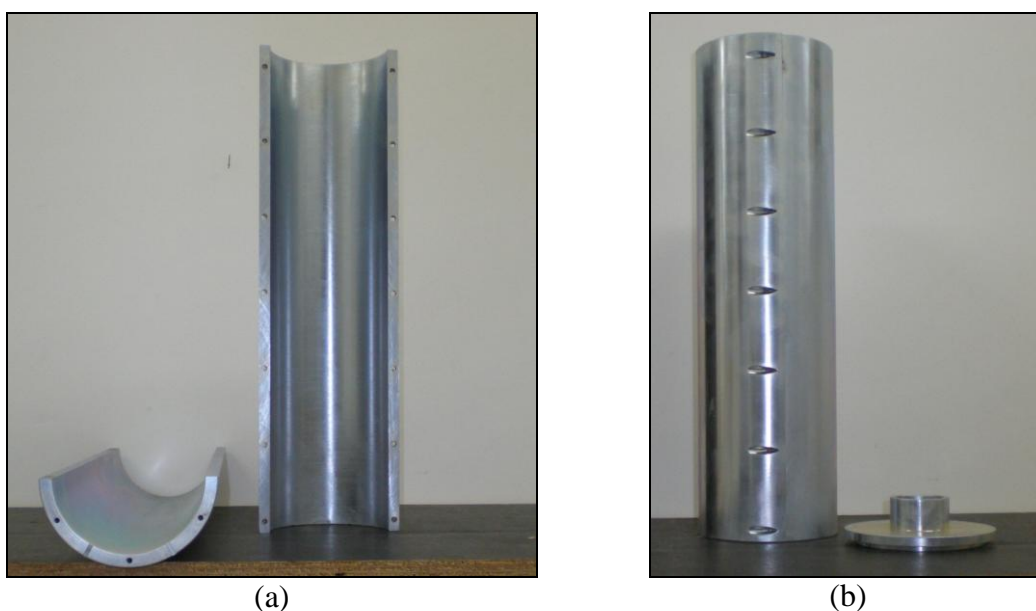


Figura 4.30 – (a) Molde bipartido com formato cilíndrico e (b) molde bipartido com tampa de fundo



Figura 4.31 – Tubos de revestimento API 5L



Figura 4.32 – Seção transversal do modelo

A forma ainda apresenta uma tampa de fundo (figura 4.33 a) e uma tampa de topo (figura 4.33 b), tendo ambas as funções de vedação e uma haste de içamento. A seqüência de montagem da forma está apresentada na figura 4.34. Na parte (a) são apresentados todos os componentes da forma; o molde bipartido, parte (b), é lubrificado e parafusado, em seguida a tampa inferior é acoplada ao tubo de revestimento, parte (c), para então unir-se ao molde bipartido, parte (d). Em (e) é apresentado uma seção longitudinal da forma semimontada e em (f) a forma pronta com a tampa superior e a haste de içamento.

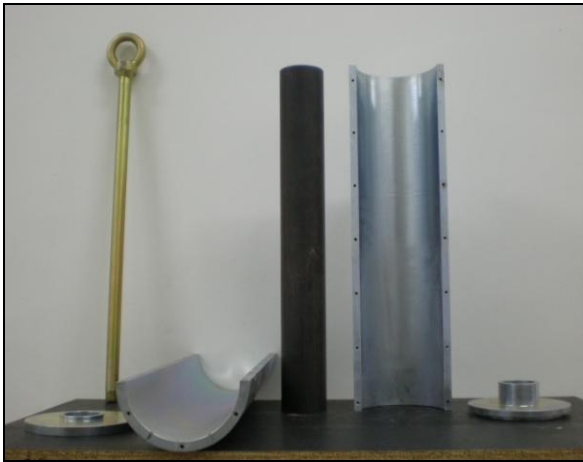


(a)

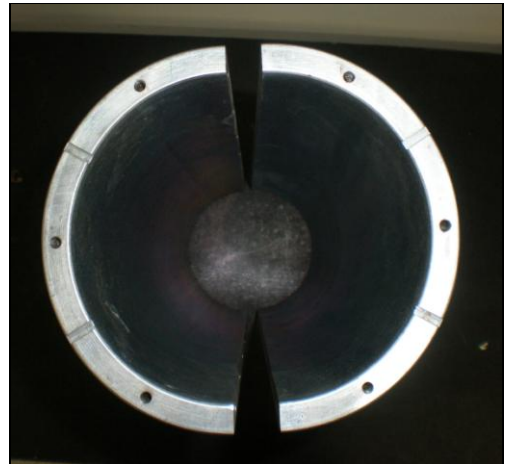


(b)

Figura 4.33 – Tampas: (a) tampa inferior e (b) tampa superior



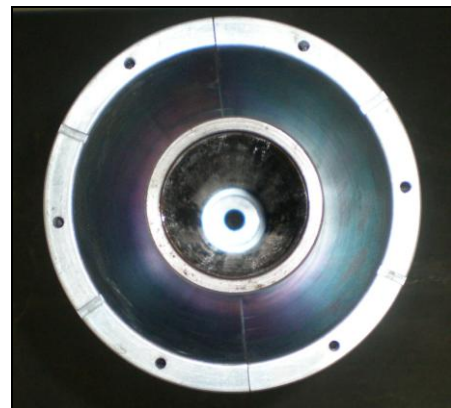
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.34 – Montagem da forma: (a) Acessórios da forma, (b) - montagem do molde bipartido, (c) tubo de revestimento encaixado na tampa de fundo, (d) perfil lateral da forma e (e) forma pronta com haste de içamento

Após a montagem do molde a pasta foi preparada e curada conforme os procedimentos descritos nos itens 4.2.2 e 4.2.3. A figura 4.35 apresenta o modelo de poço pronto para ser ensaiado termicamente.



(a)



(b)

Figura 4.35 – Modelo de poço pronto para ser ensaiado termicamente

O ensaio de carregamento térmico simulou a aplicação de uma carga térmica produzida pela injeção de vapor dentro do tubo de revestimento do modelo. Foi considerado que carga térmica seria aplicada em dois ciclos. Conforme figura 4.28 a condição inicial de temperatura do poço típico é de 50°C, considerando ainda que a temperatura do vapor superaquecido seja de 300°C o gradiente a ser aplicado no carregamento térmico é de 250°C. Entretanto, como a temperatura da sala onde foi realizado o ensaio era de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ e acrescentando a carga térmica de $\Delta T = 250^\circ\text{C}$ obteve-se a temperatura final do ensaio de $272 \pm 10^\circ\text{C}$.

Para a aplicação do gradiente mencionado acima, fez-se necessário aquecer o tubo de revestimento utilizado no modelo. Para o aquecimento foram utilizadas resistências elétricas. Testes iniciais foram realizados com duas resistências em formato U de 1500 W cada (figura 4.36). As resistências foram introduzidas dentro do tubo de revestimento e para monitorar a temperatura foi utilizado um sistema com dois termopares (figura 4.37 a), ligados a um computador (figura 4.37 c) e monitorados através do *software MypcLab* e um equipamento portátil de medição de temperatura a laser (figura 4.37 b). Os termopares foram fixados um na superfície interna dentro do tubo e outro na sua superfície externa do modelo, tal procedimento visou medir e controlar a temperatura que era transferida da resistência para o tubo. O termômetro a laser foi utilizado para medir a distribuição da temperatura ao longo do comprimento do tubo.



Figura 4.36 – Resistência em formato de U



(a)



(c)



(b)

Figura 4.37 – Sistema de aquisição de temperatura: (a) dois termopares para acoplar ao modelo, (b) equipamento portátil de medição de temperatura e (c) computador de aquisição

A não homogeneidade na distribuição da temperatura ao longo do tubo foi verificada para as resistências em formato de U. Para resolver este problema, pensou-se em uma resistência em formato helicoidal, que foi confeccionada com uma capacidade de 2000W (figura 4.38 a). Para acelerar o aquecimento foram introduzidas limalhas de aço inoxidável nos espaços vazios entre o tubo interno e a resistência (figura 4.38 b).



(a)



(b)

Figura 4.38 – (a) Resistência em formato helicoidal e (b) limalhas de aço inoxidável

Utilizando o mesmo método de monitoramento descrito para as resistências em U, foi verificado que para a resistência helicoidal a temperatura permaneceu uniformemente distribuída e o tempo de alcance da temperatura final ($272 \pm 10^\circ\text{C}$) do ensaio foi de no máximo 10 minutos ou 600 segundos.

Desta forma, foi estabelecido que o modelo físico seria submetido ao aquecimento por um período de 2 h (7200 s), sendo posteriormente desligada a resistência e iniciando-se o período de resfriamento. Vale salientar ainda que após 24h (a partir do início do ensaio do primeiro ciclo) o segundo ciclo era realizado sob as mesmas condições de carregamento térmico.

A instrumentação final para aquisição da temperatura compreendeu o posicionamento dos dois termopares no comprimento médio longitudinal do corpo-de-prova, sendo que um termopar foi posicionado na face interior do tubo de revestimento e o outro na face externa do material cimentício a ser ensaiado. Para a análise dos resultados obtidos no ensaio foi estabelecida a variável gradiente transversal de temperatura (equação 4.14) e de temperatura média (equação 4.15). A figura 4.39 indica, numa seção longitudinal do modelo, as variáveis mencionadas.

$$\Delta T = T_{iP} - T_{eP} \quad [\text{Eq. 4.14}]$$

Onde:

ΔT – Gradiente transversal de temperatura ($^\circ\text{C}$);

T_{iP} - Temperatura interna do tubo de revestimento ($^\circ\text{C}$);

T_{eP} - Temperatura externa no modelo físico ($^\circ\text{C}$).

$$T_{\text{média}} = (T_{ip} + T_{ie}) / 2 \quad [\text{Eq. 4.15}]$$

Onde:

$T_{\text{média}}$ – Temperatura média ($^\circ\text{C}$);

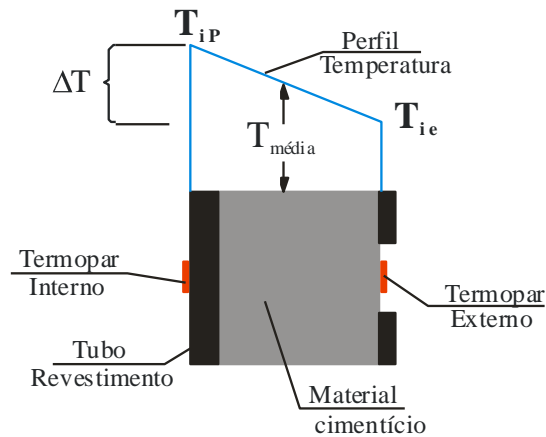


Figura 4.39 – Seção longitudinal do modelo com as variáveis ΔT e $T_{m\u00e9dia}$

A alimentação da resistência elétrica foi realizada através de um quadro de comando e controle (figura 4.40). O quadro é composto por um disjuntor geral que alimenta todo o sistema, um disjuntor parcial específico para a resistência de 2000W e o sistema de alimentação do controlador, além do próprio controlador (figura 4.40 b). O controlador, modelo N 1200 da *Novus*, tem a função de monitorar a alimentação elétrica da resistência, atuando sobre um relé de estado sólido que faz o acionamento e desligamento da resistência em torno da temperatura definida pelo usuário (*set point*). Para informar a temperatura da resistência ao controlador é acoplado junto à resistência um termopar tipo J (figura 4.40 c).

A formação exerce uma ação de confinamento lateral na cimentação ao longo do comprimento longitudinal do poço. Essa ação no modelo foi reproduzida pelo uso de cinco anéis de 50,8 mm (2") com parafusos de 3/4" (figura 4.41 a), espaçados simetricamente no comprimento longitudinal do tubo, apertados com um torquímetro (figura 4.41 b), com 16,9 N.m.

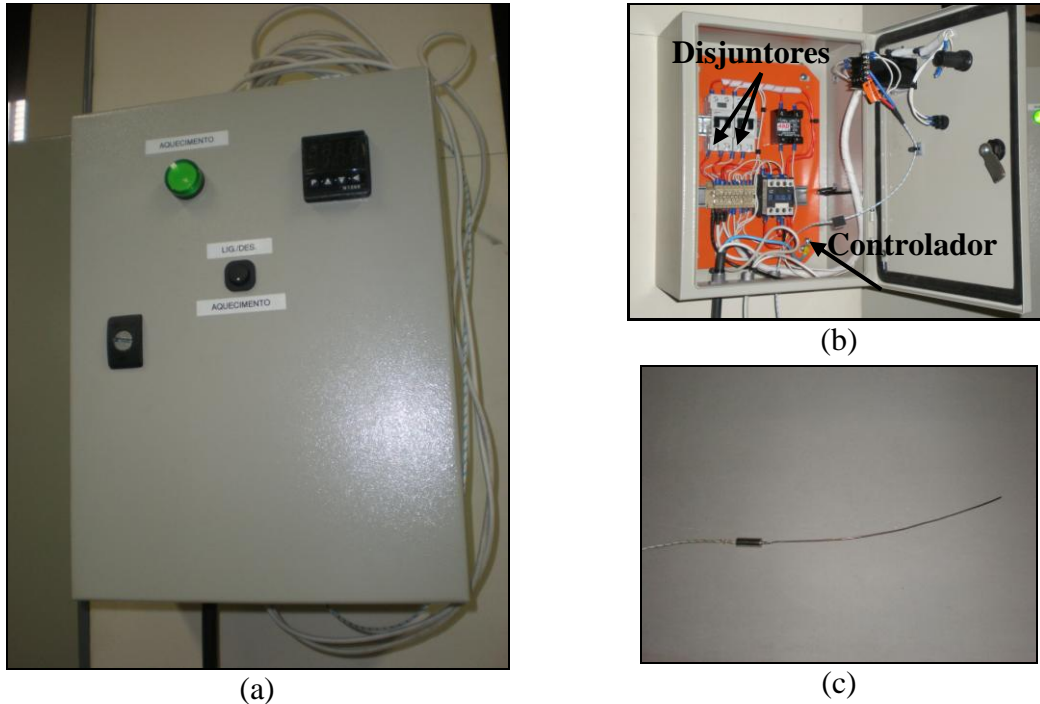


Figura 4.40 – (a) Quadro comando de controle do aquecimento, (b) detalhamento do quadro e (c) termopar tipo J

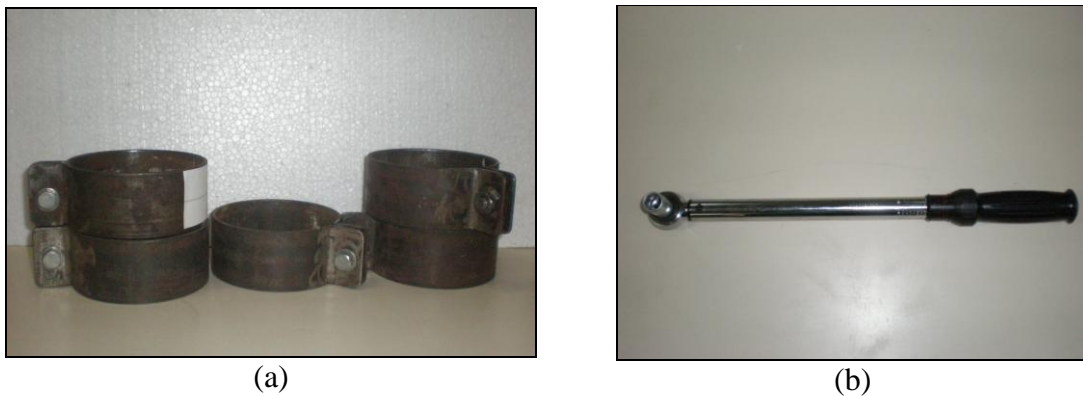


Figura 4.41 – (a) Anel de 50.8 mm ou 2” e (b) torquímetro utilizado para apertar os parafusos

A última ação a ser reproduzida no modelo com relação ao poço típico é a restrição longitudinal exercida pelo próprio peso da coluna do poço. Essa ação foi reproduzida por meio da utilização de uma prensa servo hidráulica da Shimadzu AFG 300 kN (figura 4.42 a), que restringiu o deslocamento vertical. Assim, durante o ensaio de carregamento térmico, a reação de restrição longitudinal foi registrada através do *software Gluon System*, bem como os deslocamentos transversais do modelo, aquisitados através de 2 transdutores elétricos de deslocamento (figura 4.42 b). Os

deslocamentos transversais foram utilizados para o cálculo das deformações radiais dos corpos-de-prova (equação 4.16).

$$\varepsilon_{Radial} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{r} \times 1000000 \quad [\text{Eq. 4.16}]$$

Onde:

ε_{Radial} – Deformação Radial (μStr);

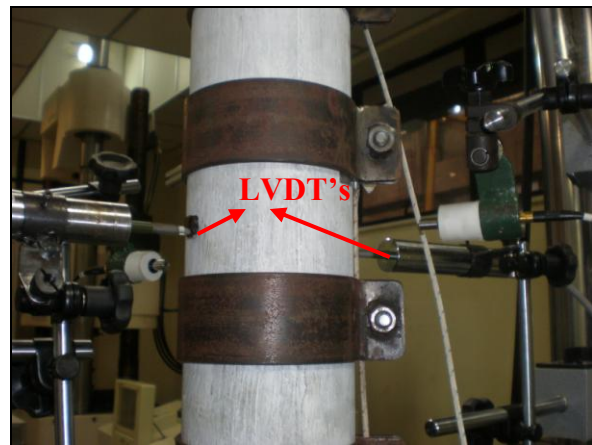
Δl_1 – Leitura do LVDT 01 (mm);

Δl_2 – Leitura do LVDT 02 (mm);

r – Raio inicial do modelo ($r = 107 \text{ mm}$).



(a)



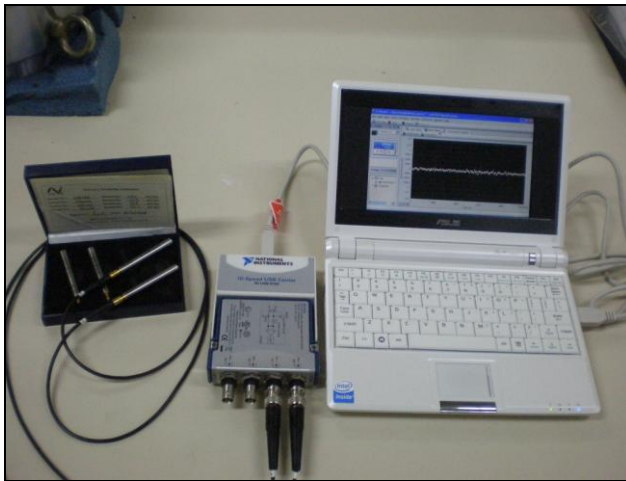
(b)

Figura 4.42 – (a) Shimadzu 300 kN e (b) transdutores elétricos de deslocamento

A aplicação da carga térmica promove a expansão do tubo de revestimento que impõe à bainha de cimento esforços de tração, que ao excederem a resistência do material provocam o aparecimento de fissuras. Para identificar o instante do aparecimento das fissuras foi utilizado um sistema de aquisição de ruídos sonoros fornecido pelo Laboratório de Sinais e Vibrações da Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ.

O sistema de aquisição de som (figura 4.43 a) foi composto por dois microfones de ¼” Eletreto ICP, modelo BSWA PMA 416, com nº de série 462164 e 462046, respectivamente (figura 4.43 b). Os microfones foram instalados a 25 mm de distância do modelo e diametralmente opostos, um no lado direito e outro no lado esquerdo, figura 4.44. Foi utilizado também uma placa da *National Instruments* NI 9234, nos canais 0 e 1 (figura 4.40 c), um berço USB NI 9162, um computador, além do software *Signal Express* LE para processamento dos dados.

Uma rotina no *software Matlab* foi elaborada para tratamento dos dados obtidos durante o ensaio, visando eliminar o ruído de fundo. Com os dados obtidos foram gerados gráficos que forneciam a pressão sonora *versus* tempo de cada fissura medida e um arquivo de áudio. As fissuras foram identificadas no gráfico através da inspeção visual, onde as mesmas se configuravam através de picos, sendo também correlacionadas no tempo através do arquivo de áudio.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.43 – (a) Sistema de aquisição do som, (b) microfone e (c) placa de aquisição de dados

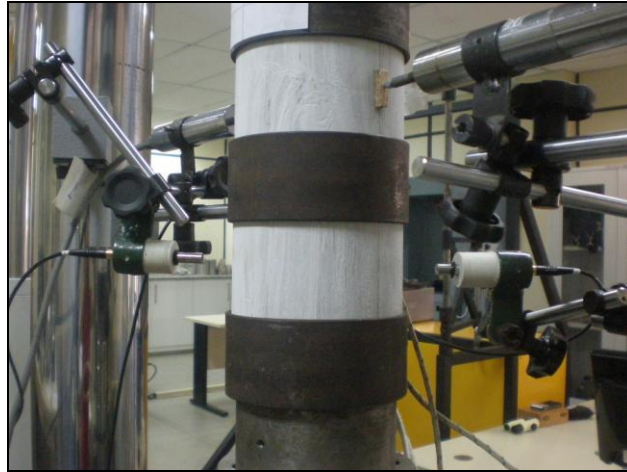


Figura 4.44 – Instrumentação do modelo com os microfones

A pressão sonora captada pelos microfones é influenciada pela magnitude da onda sonora que intercepta o microfone, que por sua vez depende do ponto onde a onda sonora é gerada. Como os microfones encontravam-se dispostos em lados opostos, a diferença da pressão sonora entre eles é dada pela proximidade, ou não, do local onde ocorreu a fissura, não sendo possível correlacionar a pressão sonora ao tamanho da abertura de fissura.

Como houve a cronometragem entre o início de aquisição do som com o sistema de aquisição de temperatura, as fissuras identificadas foram correlacionadas à temperatura interna no tubo de revestimento, à temperatura externa do corpo-de-prova e conseqüentemente ao gradiente transversal de temperatura.

Considerando a disposição dos anéis de restrição, o corpo-de-prova do modelo foi dividido em quatro regiões e referenciado em frente e fundo com relação à máquina de ensaio (figura 4.45). Após o término do aquecimento e resfriamento do 1º ciclo, uma fissura de cada região foi escolhida de forma aleatória e as aberturas das fissuras foram medidas com auxílio de um fissurômetro. O fissurômetro (figura 4.46) utilizado apresenta fundo de escala de 0,2 mm. Tal procedimento foi repetido ao final

do 2º ciclo de carregamento térmico. Por fim, os anéis de restrição eram retirados e realizados os mapeamentos finais das fissuras.

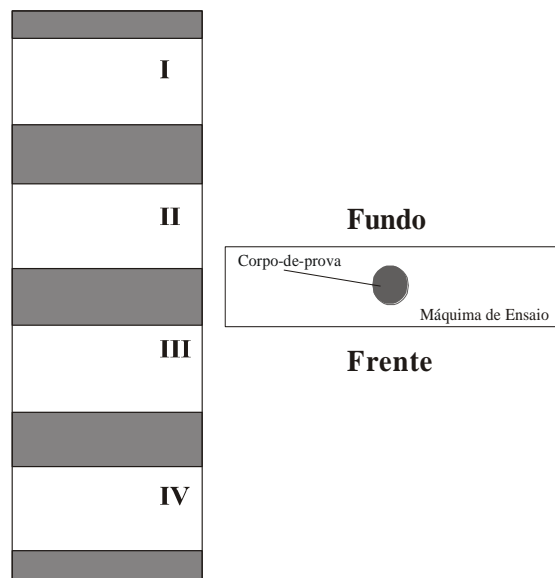


Figura 4.45 – Sistema de referência do ensaio

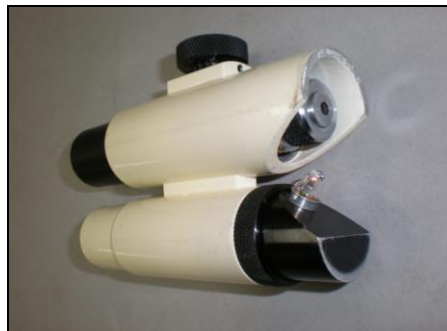


Figura 4.46 – Fissurometro

4.7 Análise estatística dos resultados

A metodologia adotada para análise estatística dos resultados de caracterização no estado fresco, caracterização física e mecânica foi a Análise de Variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade, seguidos pelo teste de comparação das médias de Tukey, sendo utilizado o programa *Origin*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos Materiais

5.1.1 Cimento Portland Classe G e cimento CP II-F

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam a composição química, em termos de óxidos, e as principais características físicas do cimento classe G e do cimento CII-F. Na figura 5.1 está apresentada a curva granulométrica dos dois cimentos. Os valores de D_{80} para o cimento classe G e o CP II-F são 45,7 e 40,0 μm respectivamente.

Tabela 5.1 – Composição química em óxidos do cimento classe G e do CII-F

Composto	Composição (%)	
	Classe G	CII - F*
CaO	65,22	71,48
SiO₂	18,99	15,33
Fe₂O₃	5,43	3,77
SO₃	5,15	3,33
K₂O	0,69	0,19
TiO₂	0,25	-
SrO	0,23	0,26
MnO	0,08	0,05
ZnO	0,05	0,03
Na₂O	-	0,331
MgO	-	1,344
Al₂O₃	-	3,706
P₂O₅	-	0,101
Cl	-	0,086

* Fonte: MAGALHÃES (2008)

Tabela 5.2 –Características físicas do cimento classe G e do CII-F

Características físicas	Classe G	CII - F*
Massa Específica	3,15 g/cm ³	3,08 g/cm ³
Compacidade	0,56	-
Superfície Específica (Blaine)	223 m ² /kg	-

* Fonte: MAGALHÃES (2008)

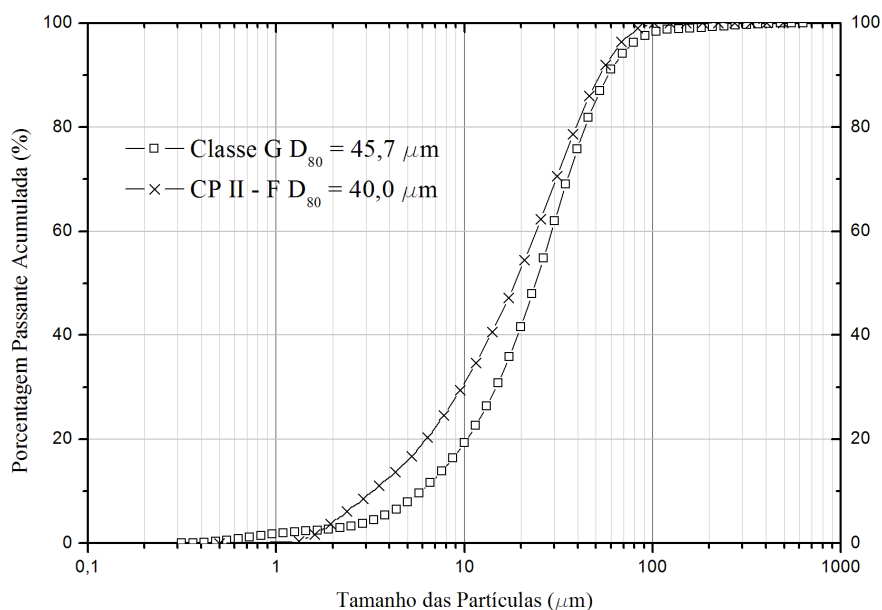


Figura 5.1 – Curva granulométrica do cimento classe G e CP II-F 32

5.1.2 Sílica Ativa e cinza volante

A tabela 5.3 apresenta as principais características físicas da sílica ativa e da cinza volante e a figuras 5.2 suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 5.3 – Características físicas da sílica ativa e cinza volante

Composto	Composição (%)	
	Cinza Volante**	
SiO₂	57,78	
Al₂O₃	28,24	
Fe₂O₃	4,76	
CaO	1,26	
Na₂O	0,26	
K₂O	2,54	
MnO	0,03	
TiO₂	0,95	
MgO	0,5	
BaO	<0,16	
P₂O₅	0,06	

Características físicas	Sílica Ativa	Cinza Volante**
Massa Específica*	2,28 g/cm ³	2,35 g/cm ³
Compacidade*	0,55	-

*Fonte: VELASCO (2008) e ** MAGALHÃES (2008)

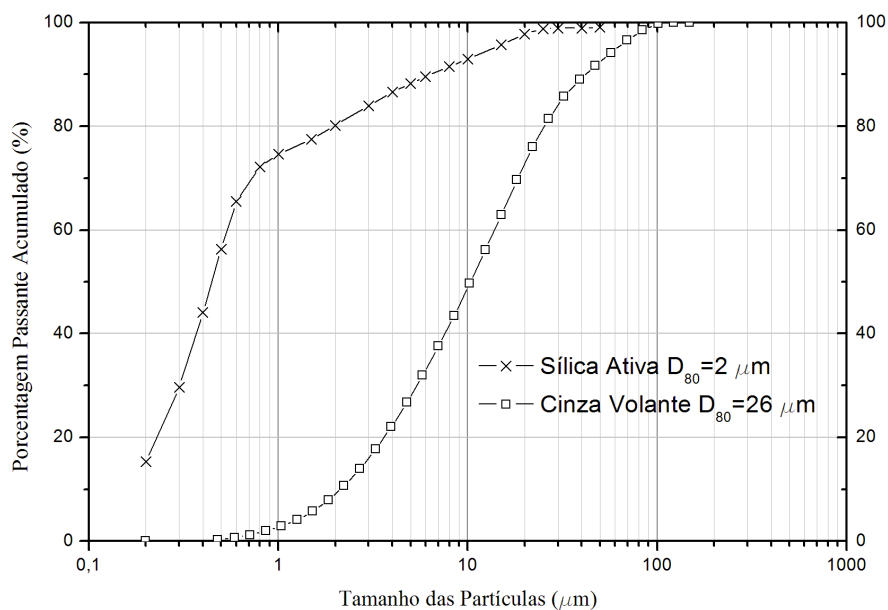


Figura 5.2 – Curva granulométrica da sílica ativa (VELASCO, 2008) e da cinza volante (MAGALHÃES, 2008)

O D_{80} da sílica ativa e da cinza volante utilizados valem $2 \mu\text{m}$ e $26 \mu\text{m}$ respectivamente. Tais valores encontram-se de acordo com os dados encontrados na bibliografia que indicam o D_{80} da sílica ativa em torno de $1 \mu\text{m}$ e da cinza volante em torno de $20 \mu\text{m}$ (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

5.1.3 Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi do tipo poliacrilato e suas características físicas encontram-se apresentadas na tabela 5.4. Foi também verificado a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento classe G através do ensaio de cone de Marsh. A figura 5.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio, é possível observar que o ponto de saturação ocorre no teor de 0,2% de superplastificante em relação à massa do cimento. Vale ressaltar ainda, que para a pasta de referência (cimento classe G + sílica ativa) foi também realizado o ensaio de ponto de saturação,

figura 5.4, sendo que o valor encontrado foi de 0,8% de superplastificante em relação à massa de materiais cimentícios.

Tabela 5.4 – Características físicas do superplastificante

Características físicas	
Tipo	Poliacrilato
Massa Específica	1,072 kg/m³
Teor de Sólidos	29,8
pH	6,2

Fonte: Dados do fabricante

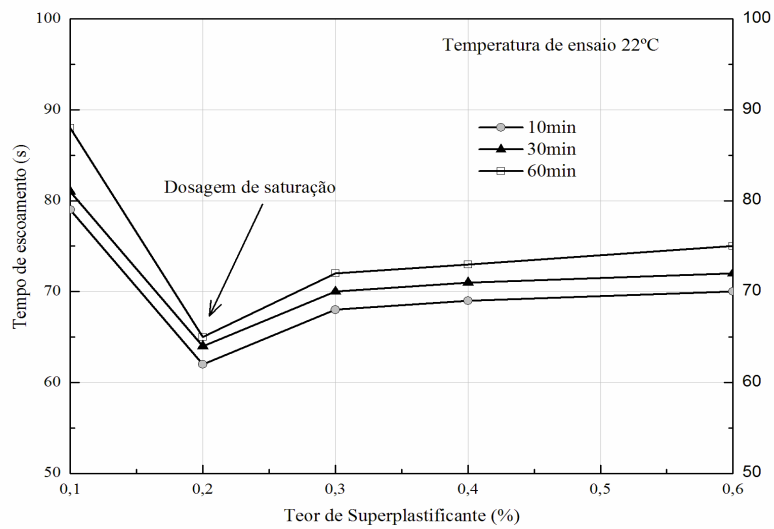


Figura 5.3 – Curvas de escoamento em cone Marsh para pastas com cimento classe G com diferentes teores de superplastificantes

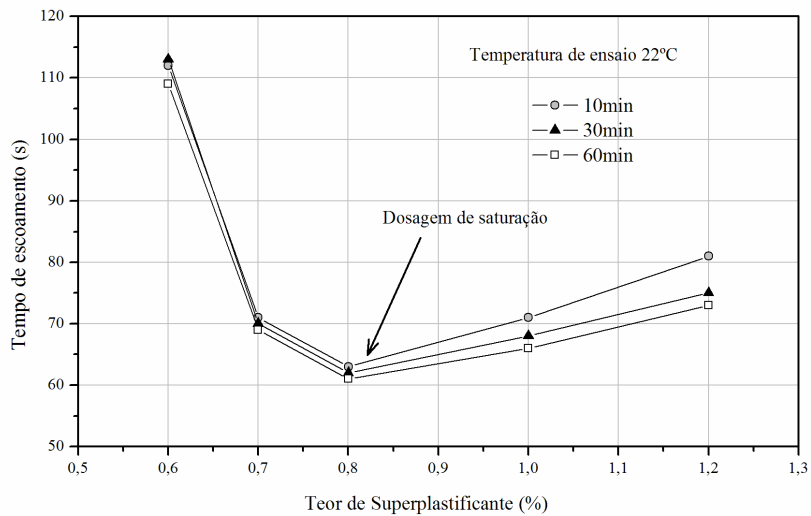


Figura 5.4 – Curvas de escoamento em cone Marsh da pasta de referência com diferentes teores de superplastificantes

5.1.4 Polímero SBR, estabilizador de látex e antiespumante

Os dados de caracterização física do polímero SBR, estabilizador de látex e antiespumante estão apresentados nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente.

Tabela 5.5 – Características físicas do Látex SBR

Características físicas	
Componente	Copolímero Butadieno-Estireno (SBR)
Massa Específica	0,997 g/cm³
Teor de Sólidos	> 50%
pH	8,7

Fonte: Dados do fabricante

Tabela 5.6 – Características físicas do Estabilizador de Látex SBR

Características físicas	
Componente	Alquil Fenólico
Massa Específica	1,060 g/cm³
Teor de Sólidos	> 50%
pH	7,5 - 8,5

Fonte: Dados do fabricante

Tabela 5.7 – Características físicas do Antiespumante

Características físicas	
Componentes	Precipitado amorfo de Sílica 10 - 30% Alquenos 30 - 60%
Massa Específica	0,930 g/cm³

Fonte: Dados do fabricante

5.1.5 Areia

Os dados referentes à caracterização da areia foram obtidos do trabalho de Magalhães (2008) e estão apresentados na tabela 5.8 e a curva granulométrica na figura 5.5.

Tabela 5.8 – Características físicas da areia

Características físicas	
Massa Específica	2,60 g/cm³
Modulo de finura	1,69
D_{médio}	0,18 mm

Fonte: MAGALHÃES (2008)

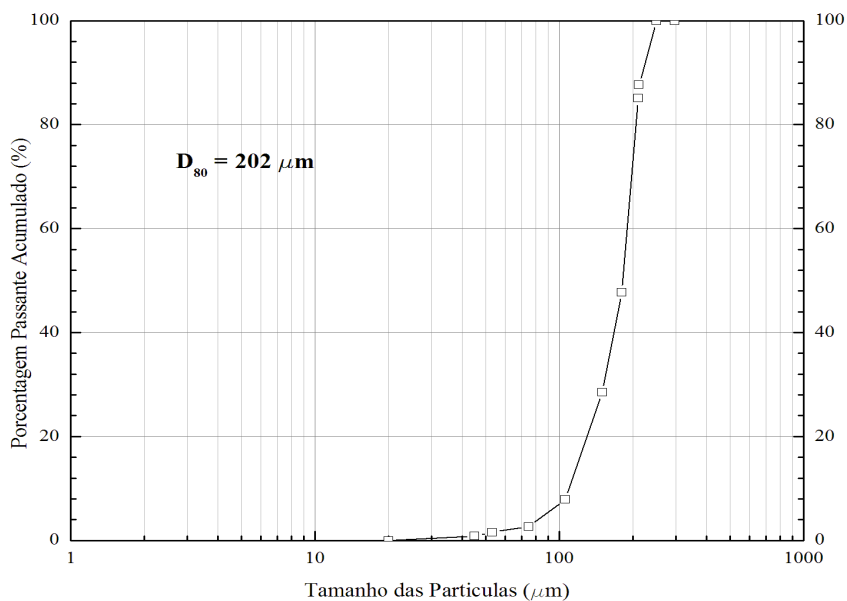


Figura 5.5 – Curva granulométrica da areia (MAGALHÃES, 2008)

5.1.6 Fibra de Volastonita

A fibra de volastonita, figura 5.6, é um mineral cristalino sólido, que devido a sua composição química composta predominantemente por óxidos de cálcio e silício, torna-se compatível com os sistemas cimentícios. Suas dimensões transversais variam de 5μm a 100μm e longitudinais de 50μm a 2 mm. A tabela 5.9 apresenta suas principais características físico-químicas.

Tabela 5.9 – Características físicas da fibra de volastonita JG

Composto	Composição (%)	Características físicas	
Óxido de Ferro III (Fe ₂ O ₃)	0,40	Massa Específica	2,90 g/cm ³
Óxido de Cálcio (CaO)	47,50	pH (10% diluída)	9,90
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,20	Coefficiente de expansão térmica	6,5 x 10 ⁻⁶ mm/mm/°C
Óxido de Silício (SiO ₂)	51,00	Ponto de fusão	1540 °C
Óxido de Magnésio (MgO)	0,10	Relação de aspecto (l/d)	15
Óxido de Titânio II (TiO ₂)	0,02	módulo de Elasticidade	120 GPa
Teor de perda ao fogo	0,68		

Fonte: FORMAGINI (2005)



Figura 5.6 - Fibra de volastonita

5.1.7 Fibra de PVA

As características físicas da fibra de PVA, figura 5.7, estão apresentadas na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Características físicas da fibra de PVA

Características físicas	
Comprimento	12,0 mm
Diâmetro	0,04 mm
Relação de aspecto (l/d)	300
Resistência à tração	1600 MPa
Módulo de Elasticidade	40 GPa
Alongamento	7,00%
Densidade	1,30 g/cm ³

Fonte: Dados do fabricante



Figura 5.7 – Fibra de PVA

5.1.8 Água

A água utilizada no preparo das formulações foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, sendo submetida a um processo deionização tendo pH de 6,94.

5.2 Propriedades das Pastas no Estado Fresco

5.2.1 Reologia, filtrado, água livre ambiente e peso específico

5.2.1.1 Reologia

A figura 5.8 apresenta o gráfico com as curvas típicas tensão de escoamento *versus* taxa de deformação das pastas em estudo e a tabela 5.11 apresenta os valores de viscosidade plástica, limite de escoamento, gel inicial e final.

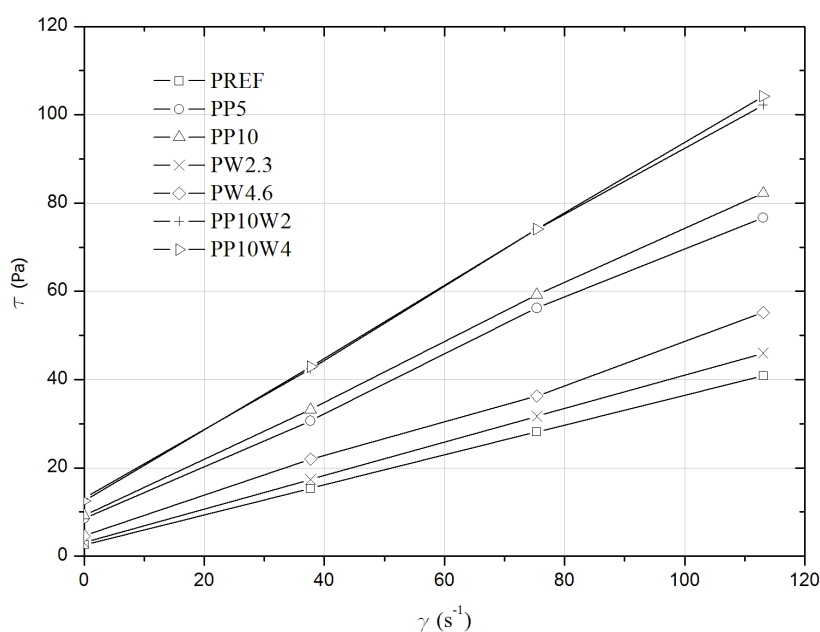


Figura 5.8 – Curvas típicas tensão de escoamento *versus* taxa de deformação

Tabela 5.11 – Propriedades no estado fresco - Reologia

Formulações	Viscosidade Plástica (Pa.s) - CV(%)	Limite de Escoamento (Pa) - CV(%)	Gel Inicial (Pa.s) - CV(%)	Gel Final (Pa.s) - CV(%)
PREF	0,33 - 4,18	2,72 - 8,98	2,30 - 15,71	5,62 - 12,86
PP5	0,63 - 3,82	8,09 - 7,44	1,79 - 20,20	8,94 - 12,12
PP10	0,69 - 11,75	8,94 - 4,04	3,32 - 10,88	9,71 - 7,44
PW2,3	0,39 - 3,52	2,81 - 12,86	1,79 - 20,20	5,11 - 14,14
PW4,6	0,43 - 2,12	4,51 - 2,67	2,30 - 15,71	5,62 - 12,86
PP10W2	0,82 - 4,11	11,84 - 15,23	3,32 - 10,88	10,73 - 6,73
PP10W4	0,80 - 2,89	13,37 - 9,93	3,83 - 9,43	12,01 - 9,03

A análise estatística dos dados apresentados na tabela 5.11 mostra que a viscosidade plástica é afetada significativamente pela incorporação do polímero SBR. Com relação à PREF, a utilização do polímero provocou um aumento da viscosidade em 91%, 109%, 148% e 142% para PP5, PP10, PP10W2 e PP10W4, respectivamente. A análise dos dados entre as formulações PP5 e PP10 mostra que o aumento no teor do polímero não afetou significativamente a viscosidade.

As formulações PW2,3 e PW4,6 não foram significativamente diferentes de PREF com relação à viscosidade, também não apresentando diferenças significativas entre si. Da mesma forma, ao comparar PP10W2 e PP10W4 não foi verificada diferença significativa entre as mesmas. Tais fatos indicam que, com relação à viscosidade a ação do polímero SBR é preponderante sobre a influência das fibras de volastonita.

Estatisticamente, todas as formulações analisadas apresentaram diferenças significativas nos valores de limite de escoamento, com exceção de PW2,3 com relação à pasta da referência. A incorporação de polímero e de fibras de volastonita aumentaram o limite de escoamento em 197%, 230%, 66%, 335% e 392% para as formulações PP5; PP10; PW4,6; PP10W2 e PP10W4, respectivamente.

Comparadas as pastas estatisticamente, PP5 e PP10 apresentaram diferença significativa em torno de 10%, o que indica que o aumento do teor de polímero causa incremento no limite de escoamento. Comportamento semelhante foi

verificado para PW2,3 e PW4,6; em que o aumento do teor de fibra resultou num aumento do limite de escoamento em cerca de 60%.

As formulações PP10W2 e PP10W4 não apresentaram diferença significativa entre si. No entanto, foram diferentes significativamente de PP10, indicando que a incorporação das fibras de volastonita afetou o limite de escoamento em 29% e 49%, respectivamente. A figura 5.9 apresenta um gráfico com valores da viscosidade plástica e limite de escoamento das formulações estudadas em que é possível verificar tais tendências.

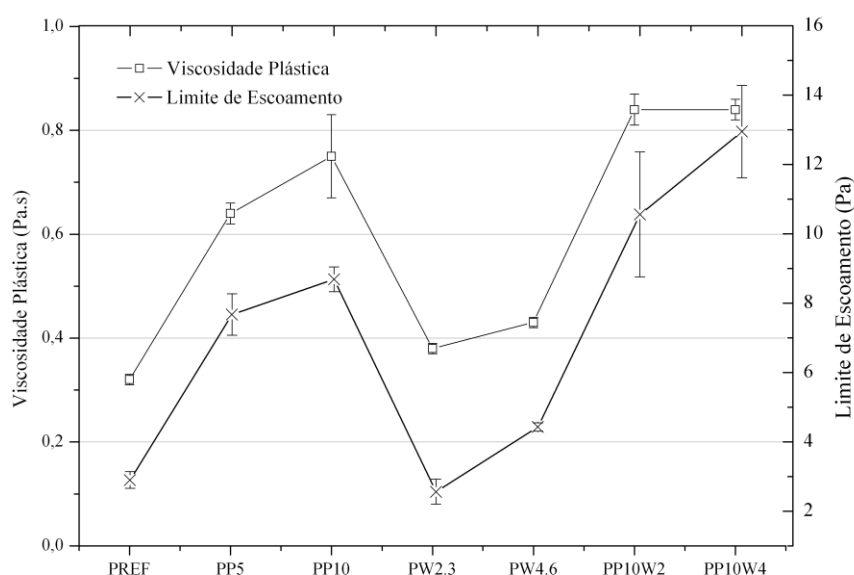


Figura 5.9 – Evolução da viscosidade plástica e limite de escoamento

Com relação aos valores de gel inicial, verificou-se que apenas PP10, PP10W2 e PP10W4 foram diferentes significativamente com relação à PREF, existindo uma variação de 44% para as duas primeiras e 67% para a última. As formulações PP5 e PP10 apresentam diferença significativa entre si em cerca de 86%, o que não foi verificado quando comparadas PW2,3 e PW4,6; como também PP10W2 e PP10W4.

Com relação ao gel final, todas as formulações que continham polímero foram estatisticamente diferentes quando comparadas a PREF. Tais diferenças foram de

59%, 73%, 91% e 114% para as formulações PP5, PP10, PP10W2 e PP10W4, respectivamente. As formulações com fibra de volastonita PW2,3 e PW4,6 não foram estatisticamente diferentes de PREF nem entre si.

As formulações PP5 e PP10, assim como PP10 e PP10W2 não foram estatisticamente diferentes entre si. Desta forma, no que concerne ao gel inicial e ao gel final observa-se que o polímero SBR afeta esses dois parâmetros de forma a incrementar seus valores e que a incorporação dos teores de fibras de volastonita utilizados não causa alterações representativas.

5.2.1.2 Filtrado, água livre e peso específico normal e pressurizado

A tabela 5.12 apresenta os resultados dos ensaios de filtrado, água livre e peso específico normal e pressurizado.

Tabela 5.12 – Resultados de filtrado, água livre e peso específico normal e pressurizado

Formulações	Filtrado (mm) - CV(%)	Água Livre ambiente (%) - CV(%)	Peso Especifico Normal (g/cm ³ / lb/gal) - CV(%)	Peso Especifico Pressurizado (g/cm ³ / lb/gal) - CV(%)
PREF	227 - 0,9	0	1,74/14,5 - 1,6	1,74/14,5 - 0,8
PP5	96 - 1,5	0	1,70/14,2 - 0,8	1,70/14,2 - 0,4
PP10	34 - 2,1	0	1,61/13,4 - 0,45	1,66/13,8 - 0,5
PW2,3	208 - 0,3	0	1,76/14,7 - 0,8	1,79/14,9 - 0,8
PW4,6	183 - 0,4	0	1,79/14,9 - 0,8	1,79/14,9 - 1,2
PP10W2	34 - 4,2	0	1,63/13,6 - 0,9	1,64/13,7 - 2,6
PP10W4	36 - 3,9	0	1,68/14,0 - 1,7	1,72/14,3 - 0,8

Com relação ao filtrado, todas as formulações propostas foram estatisticamente diferentes de PREF, apresentando bom desempenho no controle dessa propriedade com reduções significativas de 58%, 85%, 8%, 19%, 85% e 84% para as formulações PP5; PP10; PW2,3; PW4,6; PP10W2 e PP10W4, respectivamente.

Ao comparar PP5 e PP10, verifica-se diferença significativa com o aumento do teor de polímero, implicando na redução do filtrado em torno de 65%. Considerando ainda PW2,3 e PW4,6; verifica-se que com o aumento do teor das fibras

de volastonita há redução significativa do volume de filtrado em 13%. As formulações PP10W2 e PP10W4 não foram estatisticamente diferentes entre si e quando comparadas a PP10 também não apresentam diferenças significativas. A fibra de volastonita atuou de forma significativa no controle do filtrado, contudo quando em conjunto com o polímero a ação deste foi mais preponderante. Vale salientar que todas as formulações estudadas não apresentaram água sobrenadante no ensaio de água livre ambiente.

Conforme os dados de peso específico normal da tabela 5.12, as formulações PP10, PP10W2 e PP10W4 apresentaram reduções significativas, na análise estatística, do peso específico normal quando comparadas a PREF em torno de 7%, 6% e 3%, respectivamente.

A incorporação de fibras aumentou significativamente o peso específico normal em 3% para PW4,6 em relação a PREF. Todavia, não foram verificadas diferenças significativas em PP5 e PW2.3 com relação a PREF.

Comparadas entre si, PP5 e PP10 são diferentes estatisticamente, indicando que com o aumento do teor de polímero há uma redução significativa no peso específico normal, o que é justificado pela capacidade de incorporação de ar proporcionado pelo polímero SBR. Da mesma forma, PP10W2 e PP10W4 apresentaram diferenças significativas entre si e também quando comparadas a PP10, o que indica a ação significativa das fibras aumentando em cerca de 2% essa propriedade. No entanto, PW2,3 e PW4,6 não apresentam diferença significativa entre si.

Com relação ao peso específico pressurizado, apenas as formulações PP10 e PP10W2 apresentaram diferenças significativas com relação a PREF, o que indica a eficiência da pressurização na retirada do ar incorporado da mistura. Quando comparadas entre si PP5 e PP10 são estatisticamente diferentes, indicando que o aumento do teor de polímero tende a reduzir o peso específico pressurizado da pasta. De

forma inversa, verificou-se que o aumento da fração volumétrica de fibra de volastonita em PW2,3 e PW4,6 aumentou de forma significativa essa propriedade. Encontram-se no anexo C as tabelas contendo a análise estatística dos resultados.

5.2.2 Índice de consistência

A tabela 5.13 apresenta o resultado do espalhamento do SHCC no ensaio de índice de consistência (figura 5.10).

Tabela 5.13 – Propriedade do estado fresco do SHCC

Formulação	Consistência (mm) - CV(%)
SHCC	303,0 - 1,2



Figura 5.10 – (a) espalhamento da mistura

A consistência apresentada pelo SHCC está adequada com os dados encontrados na bibliografia, que apresentam valores de espalhamento entre 300 a 305 mm (MAGALHÃES, 2008).

5.3 Caracterização Física

5.3.1 Porosidade, absorção e massa específica

A tabela 5.14 apresenta os resultados de porosidade, absorção e massa específica dos materiais estudados.

Tabela 5.14 – Propriedades físicas dos materiais: Porosidade, absorção e massa específica com respectivos coeficientes de variação

Formulação	Porosidade Total	Absorção de Água	Massa Específica
	PT (%) - CV (%)	AA (%) - CV (%)	ρ (g/cm ³ / lb/gal) - CV (%)
PREF	5,58 - 0,76	3,23 - 0,81	1,73 / 14,41 - 0,82
PP5	5,65 - 3,75	3,45 - 4,92	1,60 / 13,33 - 0,87
PP10	6,77 - 1,04	4,40 - 1,61	1,54 / 12,83 - 0,46
PW2,3	5,13 - 3,45	2,87 - 0,74	1,76 / 14,66 - 2,14
PW4,6	4,63 - 2,29	2,65 - 2,67	1,77 / 14,74 - 0,80
PP10W2	6,36 - 2,22	4,17 - 2,71	1,52 / 12,66 - 1,86
PP10W4	5,96 - 1,54	3,85 - 2,02	1,54 / 12,83 - 1,84
SHCC	5,93 - 2,03	3,18 - 2,22	1,87 / 15,58 - 1,90

5.3.1.1 Porosidade

Todos os materiais, com exceção de PP5, foram estatisticamente diferentes de PREF com relação à porosidade. O material PP10 apresentou incremento na porosidade de 21%, PW2,3 e PW4,6 um decréscimo de 8%, e 17% respectivamente, PP10W2 e PP10W4 um incremento de 14% e 7%, respectivamente.

A capacidade de incorporação de ar na mistura fresca proporcionada pelo polímero interferiu de forma mais significativa na porosidade apresentada por PP10. Vale salientar que PP5 e PP10 são estatisticamente diferentes entre si. Em contrapartida o aumento do teor de fibra de volastonita reduziu a porosidade de PW2,3 e PW4,6; sendo que esses materiais também são estatisticamente diferentes entre si. Além de PP10W2 e PP10W4 serem estatisticamente diferentes entre si, verifica-se que a fibra de

volastonita atuou na redução da porosidade nesses materiais atenuando o efeito da incorporação de ar proporcionado pelo polímero.

5.3.1.2 Absorção

Com exceção do SHCC, os demais materiais estudados apresentaram valores de absorção estatisticamente diferentes de PREF. Os materiais PP5 e PP10 apresentaram aumento de 7% e 36%, respectivamente na absorção, sendo estatisticamente diferentes entre si. Da mesma forma, os materiais PW2,3 e PW4,6 também são estatisticamente diferentes entre si, contudo se comportaram de forma inversa aos materiais com polímero em sua composição. O aumento da fração volumétrica da fibra reduziu em 7% a absorção de PW4,6 em relação a PW2,3. Os materiais PP10W2 e PP10W4 apresentaram redução significativa da absorção com relação a PP10 de 5% e 12%, respectivamente, sendo que os mesmos são estatisticamente diferentes entre si.

5.3.1.3 Massa específica

As massas específicas de PP5, PP10, PP10W2 e PP10W4 foram estatisticamente diferentes de PREF com reduções significativas de 8%, 11%, 12% e 11%, respectivamente. Comparado a influência do polímero verifica-se que o aumento do teor de PP5 para PP10 reduz significativamente a massa específica em 4%. Não foi verificada diferença significativa entre PW2,3 e PW4,6 com relação a PREF nem entre si. PP10W2 e PP10W4 quando comparados entre si também não apresentaram diferenças significativas.

O SHCC, por apresentar composição diferenciada dos demais materiais, não foi comparado aos mesmos. Contudo os resultados de massa específica, porosidade,

e absorção encontram-se dentro do especificado para os materiais da família do SHCC (MAGALHÃES, 2008). As tabelas contendo a análise estatística dos resultados encontram-se no anexo C.

5.3.2 Estabilidade

Os resultados do ensaio de estabilidade das formulações em estudo encontram-se na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Resultados de estabilidade das formulações propostas

Formulação / Seção	Peso específico da seção ρ (g/cm ³ - lb/gal)						
	PREF	PP5	PP10	PW2,3	PW4,6	PP10W2	PP10W4
T	2,26 - 18,84	2,49 - 20,73	2,56 - 21,33	2,26 - 18,83	2,32 - 19,30	2,47 - 20,59	2,40 - 20,02
1	2,27 - 1,87	2,49 - 20,77	2,58 - 21,45	2,28 - 18,96	2,34 - 19,50	2,48 - 20,68	2,41 - 20,05
2	2,27 - 18,87	2,52 - 21,00	2,59 - 21,60	2,28 - 18,98	2,36 - 19,65	2,49 - 10,74	2,42 - 20,20
F	2,29 - 19,08	2,55 - 21,20	2,62 - 21,81	2,30 - 19,19	2,37 - 19,76	2,53 - 21,06	2,46 - 20,51
Maior Diferença (g/cm³ - lb/gal)	0,03 - 0,24	0,06 - 0,47	0,06 - 0,48	0,04 - 0,36	0,06 - 0,46	0,06 - 0,47	0,06 - 0,49
Rebaixamento do Topo (mm)	0	2,04	3,01	2,04	2,04	4,07	4,48
Rebaixamento do Topo (%)*	0	1,02	1,51	1,02	1,02	2,04	2,24

* - Considerando altura do corpo-de-prova de 200mm

De acordo com o manual do PROCELAB (2005), a maior diferença entre as seções deve ser inferior a 0,06 g/cm³ (0,5 lb/gal) e o rebaixamento menor que 5 mm. Desta forma, todas as pastas ensaiadas encontram-se dentro dos limites acima prescritos.

5.4 Propriedades Mecânicas das Pastas no Estado Endurecido

5.4.1 Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

A tabela 5.16 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos no ensaio de compressão uniaxial dos materiais avaliados e do SHCC, com os respectivos coeficientes de variação e a figura 5.11 apresenta as respectivas curvas típicas de tensão *versus* deformação.

Tabela 5.16 – Resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação de pico na compressão e coeficiente de Poisson com os respectivos coeficientes de variação

Formulações	F_c - CV (MPa) - (%)	E - CV (GPa) - (%)	ϵ_a - CV (mStr) - (%)	ν - CV(%)
PREF	61,3 / 8.890,9 - 2,6	13,2 - 2,9	5383 - 5,8	0,21 - 12,6
PP5	40,6 / 5.888,6 - 6,2	9,7 - 1,5	5002 - 6,3	0,23 - 10,8
PP10	31,1 / 4.510,7 - 2,1	8,4 - 2,7	4435 - 5,4	0,23 - 6,8
PW2,3	67,1 / 9.732,2 - 4,9	14,5 - 2,8	5444 - 6,6	0,22 - 8,7
PW4,6	69,9 / 10.138,3 - 2,2	15,4 - 2,9	5458 - 6,6	0,20 - 3,6
PP10W2	33,9 / 4.916,9 - 6,3	8,7 - 5,7	4779 - 4,6	0,22 - 9,4
PP10W4	34,6 / 5.018,4 - 2,7	9,3 - 2,3	4579 - 6,5	0,23 - 0,9
SHCC	45,9 / 6.657,3 - 3,2	21,4 - 5,2	3381 - 9,5	0,20 - 8,5

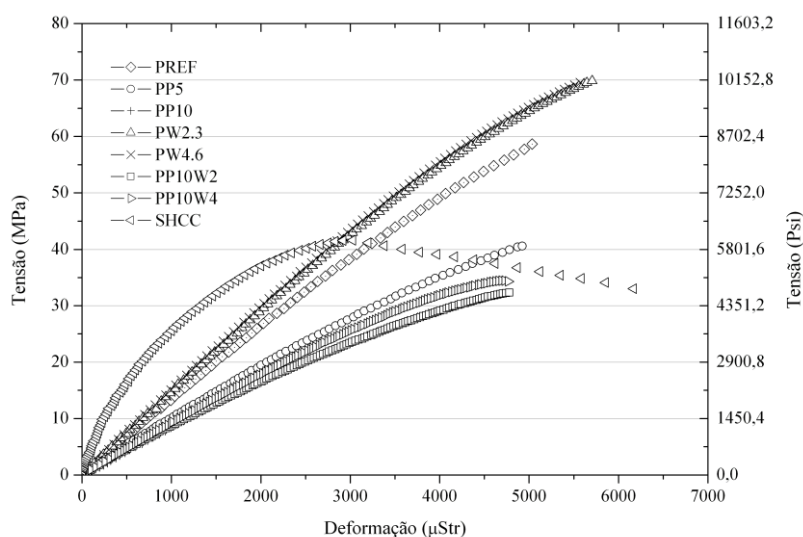


Figura 5.11 – Curvas típicas tensão *versus* deformação na compressão das formulações propostas

A análise dos resultados demonstrou que todos os materiais estudados foram estatisticamente diferentes de PREF com relação à resistência à compressão. Os materiais PP5, PP10, PP10W2 e PP10W4 apresentaram redução de 34%, 49%, 45% e 44%, respectivamente. Entretanto PW2,3 e PW4,6 apresentaram incremento da resistência com relação a PREF de 10% e 14%, respectivamente.

Quando analisada a influência do polímero SBR na resistência à compressão, verifica-se que com o aumento do teor de polímero ocorreu uma redução significativa de 23% em PP10 com relação a PP5. Os materiais PW2,3 e PW4,6 não apresentaram diferença significativa entre si. Da mesma forma, não foi verificado que a incorporação de fibras de volastonita tenha afetado significativamente a resistência à compressão de PP10W2 e PP10W4, uma vez que as mesmas não foram estatisticamente diferentes de PP10. A figura 5.12 apresenta um gráfico comparativo das resistências à compressão dos materiais estudados.

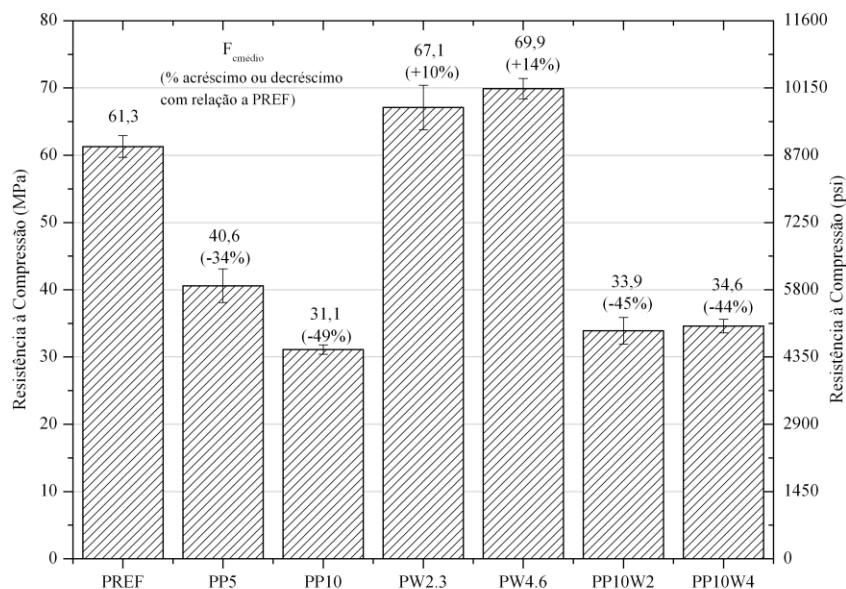


Figura 5.12 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das pastas

Semelhante ao comportamento da resistência à compressão foi o comportamento do módulo de elasticidade, todos os materiais estudados foram

estatisticamente diferentes de PREF. PP5, PP10, PP10W2 e PP10W4 apresentaram reduções de 27%, 36%, 34% e 30%, respectivamente com relação a PREF. No entanto, PW2,3 e PW4,6 apresentaram incrementos nos valores do módulo de elasticidade de 10% e 17% com relação a PREF.

Ao comparar PP5 e PP10 verifica-se diferença significativa com 13% de redução no módulo de elasticidade com o aumento do teor de polímero. PW2,3 e PW4,6 não apresentaram diferença significativa entre si. Verificou-se também que a incorporação de fibra de volastonita não afetou significativamente o módulo de elasticidade nos materiais PP10W2 e PP10W4 quando comparados a PP10. A figura 5.13 apresenta um gráfico comparativo com os módulos de elasticidade dos materiais estudados.

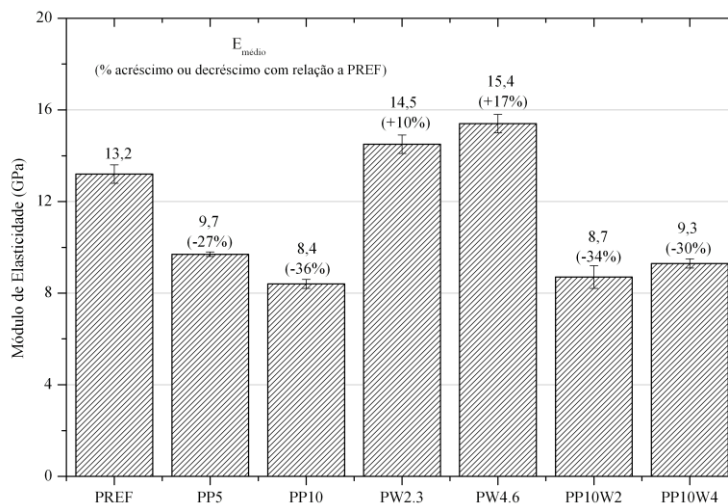


Figura 5.13 – Gráfico comparativo do módulo de elasticidade das pastas

Com relação à deformação máxima os materiais PP5; PW2,3; PW4,6 e PP10W2 não apresentaram diferença significativa com relação a PREF. Apenas os materiais PP10 e PP10W4 foram diferentes estatisticamente de PREF com redução da deformação máxima em 17% e 14%, respectivamente. Com relação ao coeficiente de Poisson, os materiais estudados não apresentaram diferença significativa entre si.

Em virtude da composição diferenciada do SHCC, seus resultados não foram plotados nas figuras 5.12 e 5.13. No entanto, a figura 5.11 apresenta as curvas típicas de tensão *versus* deformação dos materiais estudados em que é possível observar o comportamento pós-pico do SHCC ratificando sua maior capacidade de absorver energia em relação aos outros materiais.

O modo de ruptura dos materiais estão apresentados na figura 5.14 e as tabelas contendo a análise estatística dos resultados encontram-se no anexo C.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 5.14 – Modo de ruptura na compressão: (a) PREF; (b) PP5; (c) PP10, (d) PW2,3; (e) PW4,6; (f) PP10W2; (g) PP10W4 e (h) SHCC

Conforme observado na figura 5.14 (a), o material PREF apresenta ruptura brusca com fragmentação total das amostras, características do comportamento frágil de um material, enquanto as demais, inclusive o SHCC (figuras 5.14 b a h) apresentaram parcial fragmentação em função do agente modificador introduzido na matriz.

5.4.2 Resistência à Tração na Flexão

A tabela 5.17 apresenta a carga de ruptura, a resistência à tração na flexão e o deslocamento máximo dos materiais ensaiados com os respectivos coeficientes de variação. A figura 5.15 apresenta as curvas típicas carga *versus* deslocamento.

Tabela 5.17 – Resultados da Resistência à tração na flexão com os respectivos coeficientes de variação (% entre parênteses) das pastas

Formulações	Carga - CV	f_t - CV	DI - CV
	(kN/lbf) - (%)	(MPa /psi) - (%)	(mm) - (%)
PREF	4,5 / 1.011,7 - 5,8	6,5 / 942,8 - 5,8	0,09 - 11,9
PP5	3,2 / 719,4 - 4,6	4,6 / 667,2 - 4,6	0,08 - 8,6
PP10	3,7 / 831,8 - 7,7	5,3 / 768,7 - 7,7	0,11 - 6,6
PW2,3	5,1 / 1.146,6 - 6,3	7,2 / 1.044,3 - 6,4	0,08 - 3,0
PW4,6	5,7 / 1.281,5 - 11,4	8,2 / 1.189,3 - 11,4	0,09 - 7,0
PP10W2	4,5 / 1.011,7 - 15,6	6,4 / 928,3 - 15,6	0,12 - 15,9
PP10W4	4,8 / 1.079,1 - 15,9	7,0 / 1.018,3 - 15,9	0,13 - 13,8

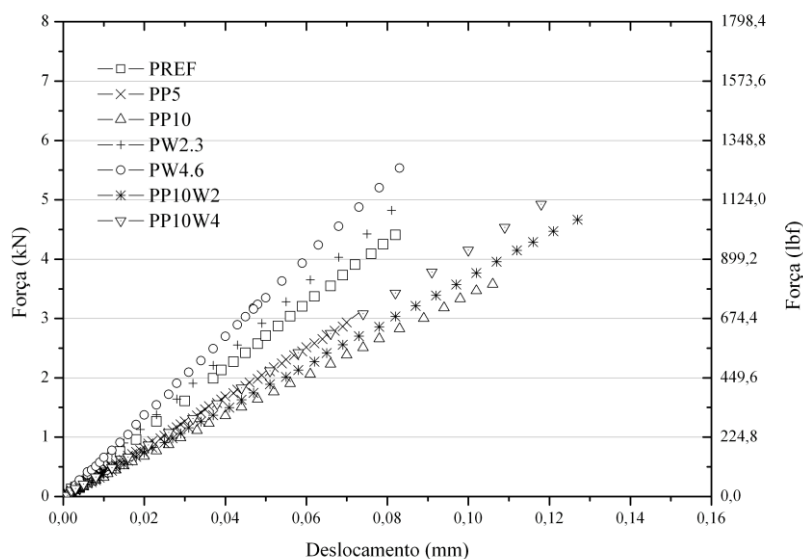


Figura 5.15 – Curvas típicas de força *versus* deslocamento das pastas

Com relação à resistência à tração, a análise dos resultados mostrou que apenas os materiais PP5 e PW4,6 são estatisticamente diferentes de PREF, sendo que PP5 apresentou resistência inferior de 29% e PW4,6 com comportamento inverso tendo incremento na resistência à tração de 26%.

Com o aumento do teor de polímero foi verificado o incremento na resistência à tração de 13% de PP10 com relação a PP5. Quando comparadas entre si as resistências à tração dos materiais PW2,3 e PW4,6 não foram estatisticamente diferentes, bem como PP10W2 e PP10W4. Analisando a influência da incorporação de fibras de volastonita nos materiais PP10W2 e PP10W4, verificou-se que apenas PP10W4 foi diferente estatisticamente de PP10, com incremento na resistência à tração de 32%. A figura 5.16 apresenta um gráfico comparativo da resistência à tração dos materiais estudados.

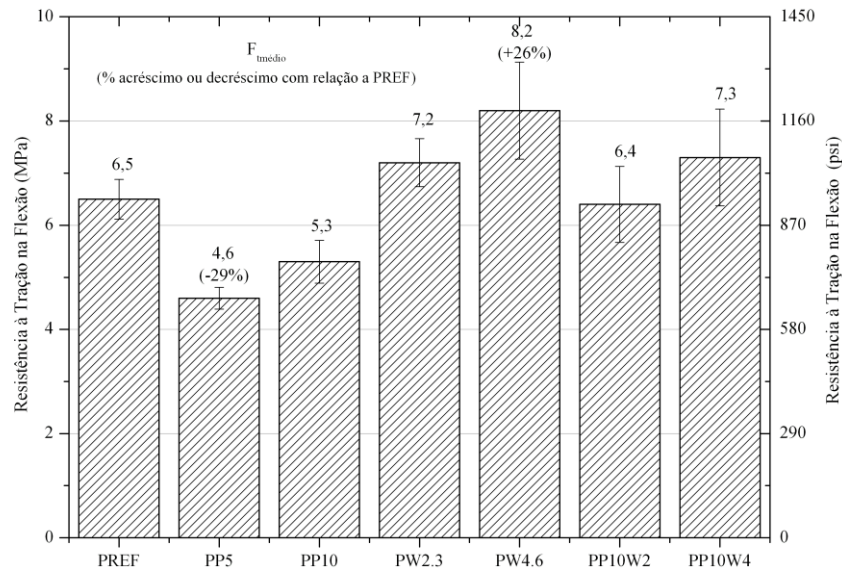


Figura 5.16 – Comparativo das resistências à tração das formulações propostas

A análise dos deslocamentos apresentou que apenas os materiais PP10, PP10W2 e PP10W4 são estatisticamente diferentes de PREFER com incremento de 22%, 33% e 44%, respectivamente. Analisados entre si os materiais PP5 e PP10 são estatisticamente diferentes, ou seja, o aumento do teor de polímero proporcionou incremento do deslocamento em 38% em PP10.

A incorporação da fibra de volastonita em PP10W2 e PP10W4 não foi estatisticamente significativa no deslocamento com relação a PP10. Vale salientar, ainda, que os materiais PW2,3 e PW4,6 não foram estatisticamente diferentes entre si, assim como PP10W2 e PP10W4. Os modos de ruptura dos materiais ensaiados estão apresentados na figura 5.18, sendo que em todas as amostras houve a ruptura no terço central do vão.

O comportamento na tração sob flexão do SHCC foi analisado separadamente, por o mesmo apresentar pós-pico com endurecimento. A tabela 5.18 apresenta os resultados da resistência à tração na flexão do SHCC e a figura 5.17 apresenta a curva típica tensão *versus* deslocamento.

Tabela 5.18 – Resultados da Resistência à tração na flexão com os respectivos coeficientes de variação (% entre parênteses) do SHCC

Formulação	Primeira Fissura		Tensão Máxima Pós-Pico
	δ_{cr} (mm) - CV (%)	σ_{cr} (Mpa / psi) - CV (%)	σ_u (Mpa / psi) - CV (%)
SHCC	0,48 - 8,04	5,83 / 845,56 - 7,02	7,76 / 1.125,48 - 14,33

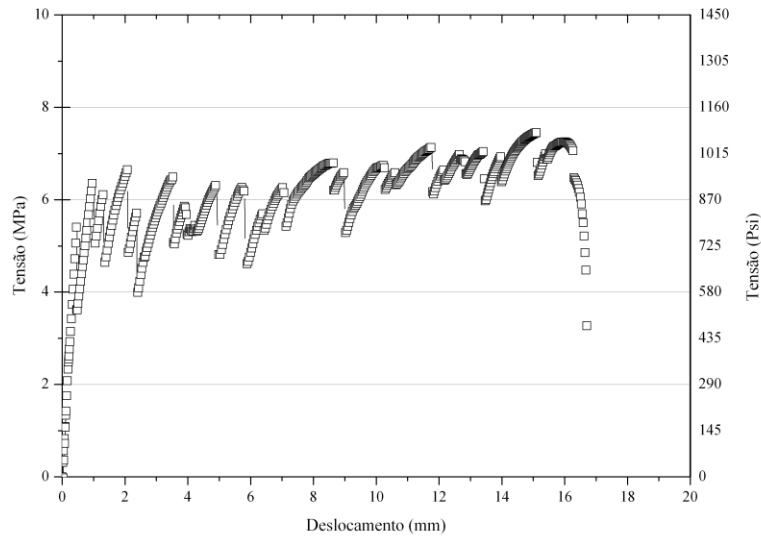


Figura 5.17 – Curva típica de tensão *versus* deslocamento do SHCC

Após o surgimento da primeira fissura houve incremento da carga acompanhado da extensão do deslocamento, comportamento típico dos materiais HPCRCC. É possível observar também na figura 5.18 (h) o modo de ruptura dos SHCC's ensaiados, em que é verificado o comportamento de múltipla fissuração.



(a)



(b)

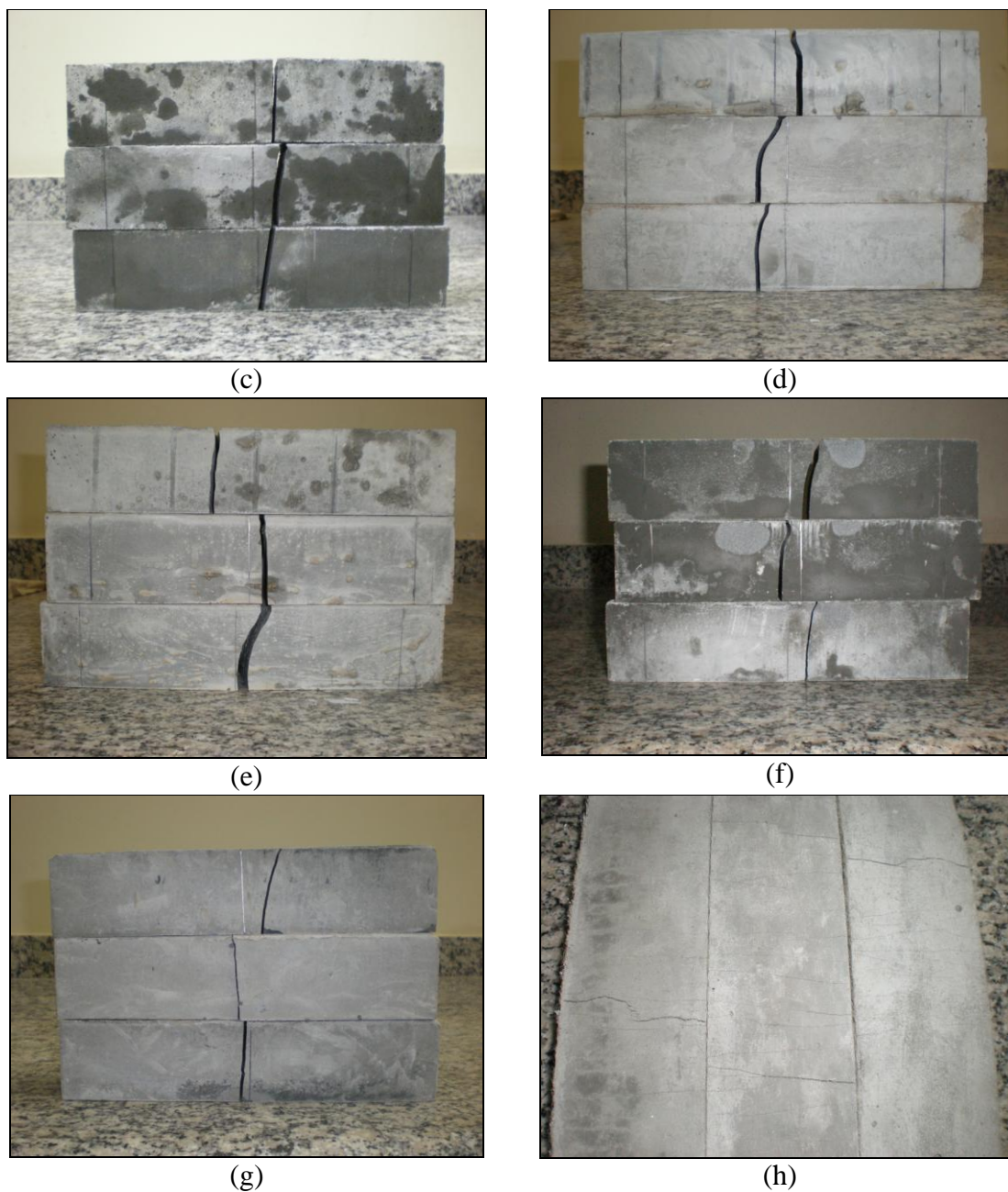


Figura 5.18 – Modo de ruptura na flexão: (a) PREF, (b) PP5, (c) PP10, (d) PW2.3, (e) PW4.6, (f) PP10W2, (g) PP10W4 e (h) SHCC

5.4.3 Seleção dos materiais a serem ensaiados no modelo do poço

As considerações apresentadas no segundo capítulo sobre as propriedades mecânicas que uma pasta de cimentação deve possuir no estado endurecido foram adotadas para a seleção dos materiais a serem ensaiados no modelo físico de poço. Buscou-se dentre os materiais estudados, aqueles que apresentaram

maior deformação na tração, menor módulo de elasticidade e maior resistência à tração. Com relação à deformação na tração, o ensaio utilizado para medir tal propriedade foi de flexão. Assim sendo, o critério utilizado para avaliação da deformação foi o deslocamento apresentado no ensaio de tração na flexão. De acordo com os resultados das análises estatísticas apresentadas em 5.4.1 e 5.4.2, os materiais que atenderam a tais requisitos encontram-se apresentados na tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Critérios utilizados para a seleção dos materiais para o modelo de poço

Materiais	Maior deslocamento na tração	Menor Módulo de Elasticidade	Maior Resistência à tração
PP5		X	
PP10	X	X	
PW2,3			
PW4,6			X
PP10W2	X	X	
PP10W4	X	X	

Conforme a tabela 5.19, pelo menos um material de cada grupo estudado atendeu a algum dos critérios estabelecidos. No grupo dos materiais com polímero foi escolhido o material PP10 por apresentar maior deslocamento e menor módulo com relação a PREF. O material PW4,6 foi escolhido por apresentar maior resistência à tração na flexão. Os materiais PP10W2 e PP10W4 atenderam de forma simultânea aos critérios de maior deslocamento e menor módulo com relação a PREF. Contudo, na análise estatística com relação a resistência à tração, apenas PP10W4 apresentou diferença significativa com relação a PP10, sendo então o mesmo selecionado.

Além dos materiais mencionados, PREF foi escolhido para efeito de comparação aos demais, visando avaliar a influência das incorporações realizadas com polímero e fibra de volastonita. Por fim, o SHCC também foi selecionado por ser um material que apresenta alta capacidade de deformação com múltipla fissuração. Desta forma, totalizaram-se cinco materiais para serem ensaiados no modelo físico de poço: PREF; PP10; PW4,6; PP10W4 e SHCC.

5.5 Resultados do Modelo Físico do Poço

As amostras a serem ensaiadas, produzidas com os cinco tipos de materiais selecionados foram preparadas segundo o item 4.6, totalizando o número de cinco amostras que foram ensaiadas no modelo físico de poço. Tendo em vista que para o modelo físico e procedimento de ensaio estavam sendo usados pela primeira vez alguns ensaios foram repetidos, sem aquisição de som, com intuito de verificar a repetibilidade de dados, sobre os quais se verificam algumas dúvidas

5.5.1 Temperaturas

As figuras 5.19 a 5.23 apresentam as curvas de temperaturas medidas na face interna do tubo de revestimento e externa no material ensaiado para os dois ciclos aplicados.

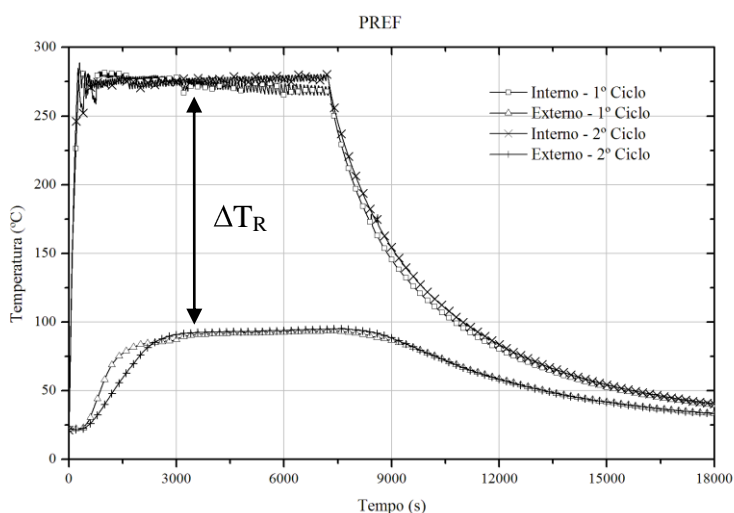


Figura 5.19 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PREF

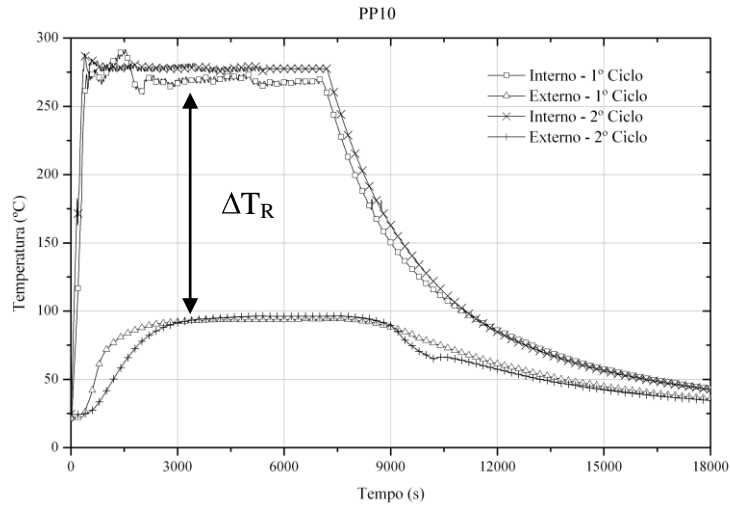


Figura 5.20 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PP10

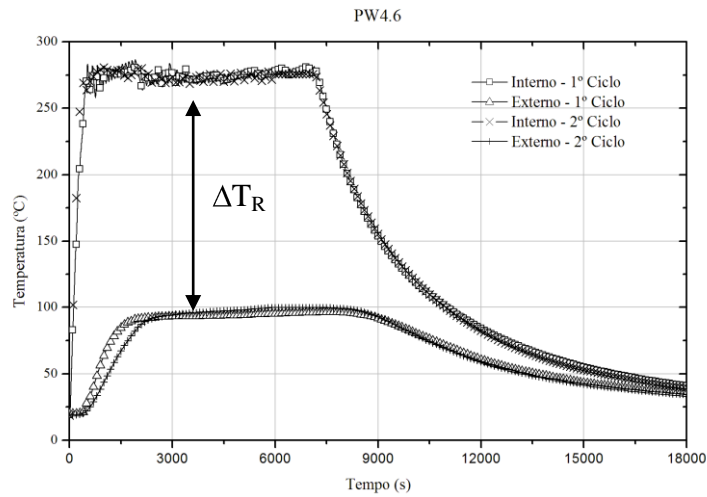


Figura 5.21 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PW4,6

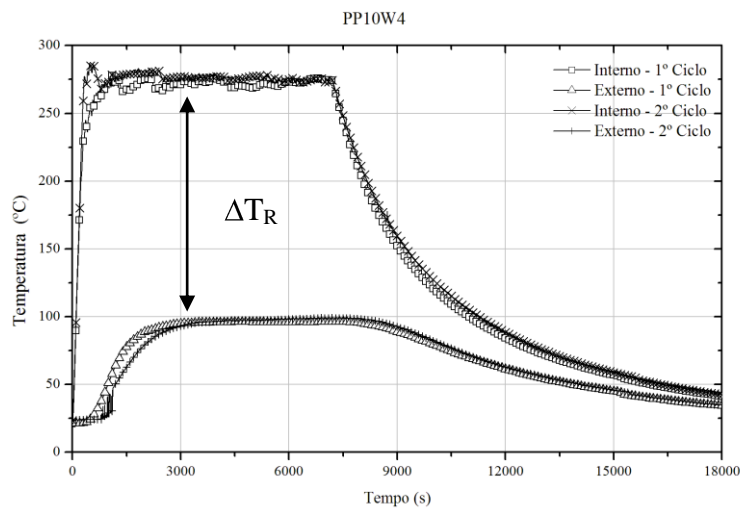


Figura 5.22 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com PP10W4

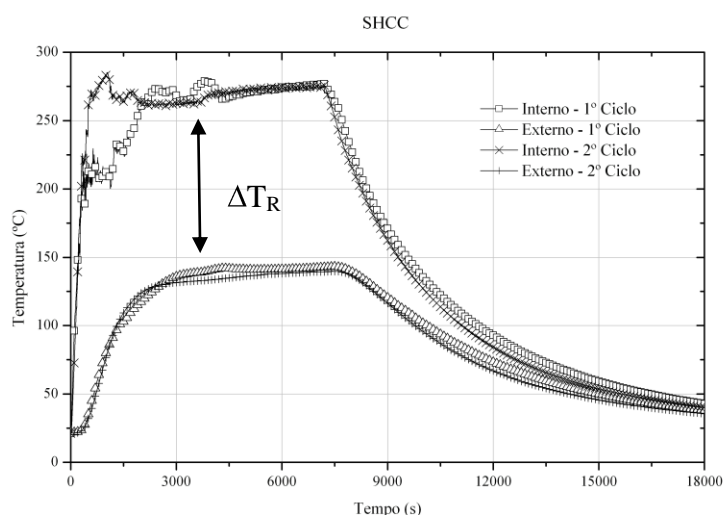


Figura 5.23 – Curvas de temperatura interna e externa no corpo-de-prova com SHCC

Observa-se por meio das figuras acima que as curvas de aquecimento do 1º e 2º ciclos, tanto para o tubo interno quanto para a face externa do corpo-de-prova são semelhantes, o que indica uma boa repetitividade do experimento. As tabelas 5.20 e 5.21 apresentam dados de temperatura e tempo oriundos desses gráficos para o 1º e 2º ciclos.

Tabela 5.20 – Resumo das curvas típicas de aquecimento dos modelos ensaiados para o 1º Ciclo

1º Ciclo	PREF	PP10	PW 4.6	PP10W 4	SHCC
Temperatura Inicial de ensaio (°C)	22,4	21,9	19,9	21,1	21,9
Temperatura média de Regime interna no tubo (°C)	275,0	274,0	273,6	274,5	273,0
Temperatura Máxima Externa no Modelo (°C)	93,0	94,2	96,2	96,3	143,3
Máximo Gradiente transversal de Temperatura em regime ΔT_R (°C)	182,0	179,8	177,4	178,2	129,7
Tempo até temperatura máxima interna no tubo (s)	280	433	500	597	2292

Tabela 5.21 – Resumo das curvas típicas de aquecimento dos modelos ensaiados para o 2º Ciclo

2º Ciclo	PREF	PP10	PW 4.6	PP10W 4	SHCC
Temperatura Inicial de ensaio (°C)	22,0	24,4	19,2	22,4	21,4
Temperatura média de Regime interna no tubo (°C)	274,3	275,6	274,4	274,1	272,5
Temperatura Máxima Externa no Modelo (°C)	95,1	96,4	99,7	109,0	139,1
Máximo Gradiente transversal de Temperatura em regime ΔT_R (°C)	179,2	179,2	174,7	165,1	133,4
Tempo até temperatura máxima interna no tubo (s)	242	340	349	396	571

Observa-se, por meio das tabelas 5.20 e 5.21 que as temperaturas máximas impostas na parte interna do tubo para os corpos-de-prova ensaiados estão dentro da faixa estipulada (272 ± 10 °C). Todavia, o tempo decorrido entre o início do aquecimento e a obtenção desta temperatura foi consideravelmente variável para as amostras ensaiadas no 1º ciclo, sendo tal diferença mais acentuada no modelo com SHCC que apresentou no primeiro ciclo um tempo de 2292 s (38 minutos).

A evolução do aquecimento na parede interna do tubo é influenciada por vários fatores como a capacidade de transferência de calor da serpentina, a distribuição das limalhas dentro do tubo, pelo calor específico (c_e) e a difusividade térmica (a) dos materiais presentes no modelo físico.

Considerando como fixa a potência fornecida pela serpentina e homogênea a distribuição das limalhas dentro do tubo, os principais parâmetros a influenciar a evolução da temperatura interna do tubo de revestimento seriam calor específico e a condutividade térmica (λ) dos materiais que compõem o modelo físico. Essas duas últimas variáveis afetam a difusividade que é uma propriedade que expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno e é dada pela equação 5.1.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_e} \quad [\text{Eq. 5.1}]$$

Onde:

a – Difusividade térmica (m^2/J);

c_e – Calor específico do material ($\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$),

λ – Condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$),

ρ – Massa específica do material (kg/m^3).

Tendo em vista que o aço utilizado para o tubo e para as limalhas é sempre o mesmo, a variabilidade do calor específico e da condutividade é atribuída ao

material cimentício. A influência da condutividade é diretamente observada nas curvas da figuras 5.19 a 5.23 por meio dos distintos gradientes transversais de temperatura em regime (ΔT_R), sendo que os mesmos são função desta variável. Quanto ao calor específico seriam necessários ensaios para sua determinação, mas a variabilidade do tempo para que a temperatura seja atingida indica também que cada material possui calor específico diferente.

5.5.2 Força de restrição térmica

As variações de temperatura originam deformações impostas no corpo-de-prova ensaiado. Entretanto, como o modelo encontrava-se restrito pela ação da máquina hidráulica surgiu uma força de reação denominada, neste trabalho, de força de restrição térmica. As figuras 5.24 a 5.28 apresentam o gráfico da força de restrição térmica *versus* temperatura média, calculada através da equação 4.15, dos cinco corpos-de-prova ensaiados para os dois ciclos de carregamento aplicados.

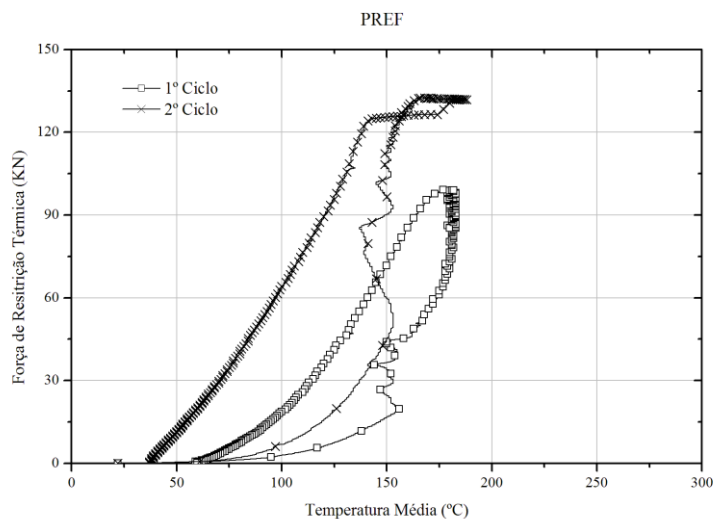


Figura 5.24 – Força de Restrição *versus* temperatura média do corpo-de-prova com PREF

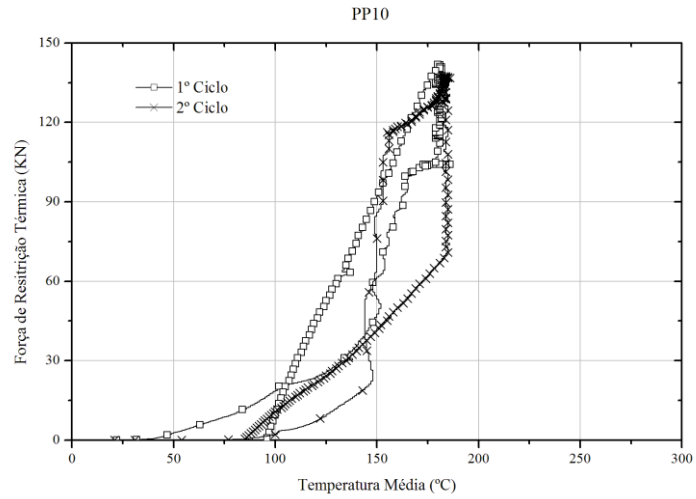


Figura 5.25 – Força de Restrição *versus* temperatura média do corpo-de-prova com PP10

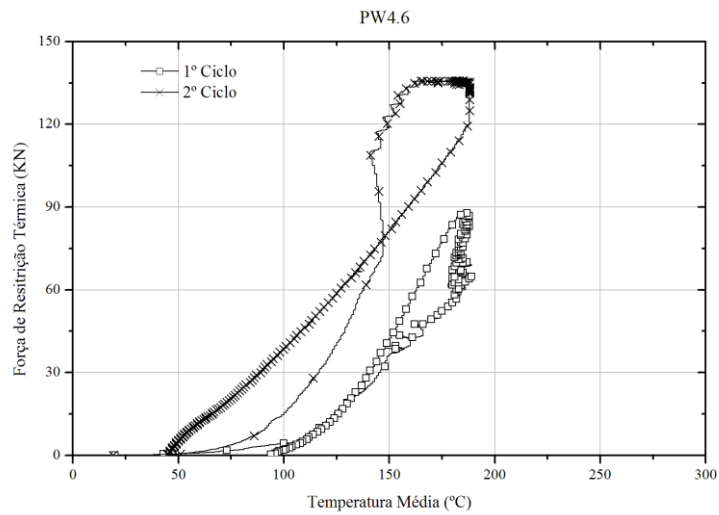


Figura 5.26 – Força de Restrição *versus* temperatura média do corpo-de-prova com PW4,6

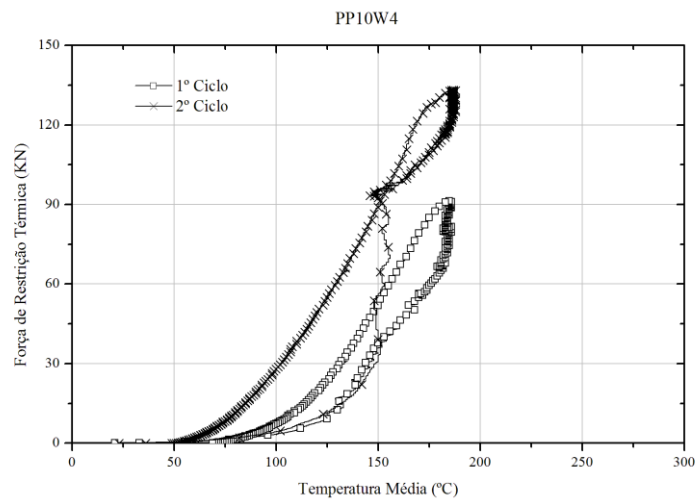


Figura 5.27 – Força de Restrição *versus* temperatura média do corpo-de-prova com PP10W4

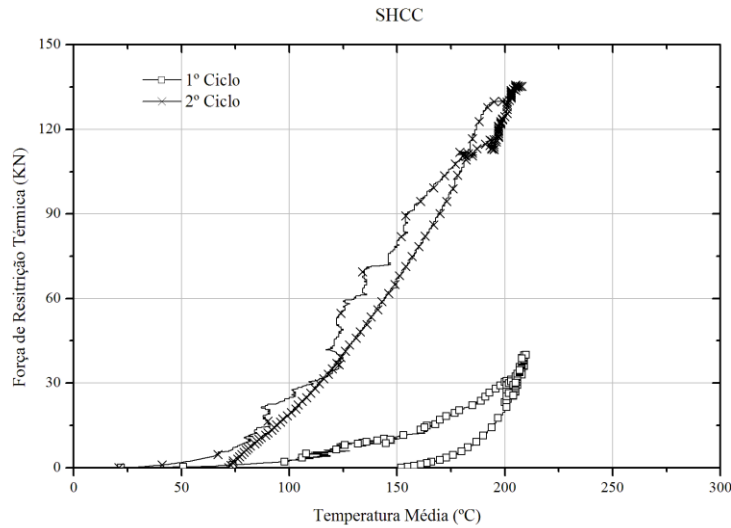


Figura 5.28 – Força de Restrição *versus* temperatura média do corpo-de-prova com SHCC

A força de restrição pode ser calculada dentro da teoria de viscoelasticidade através da equação 5.2.

$$F = A_a E_a \alpha_a T_{\text{médico}} + A_c E_c (\varepsilon - \alpha_c T_{\text{médico}} - \varepsilon^f) \quad [\text{Eq. 5.2}]$$

Onde:

F - Força de restrição térmica teórica em módulo (kN);

E_a - Módulo de elasticidade do aço (GPa);

E_c - Módulo de elasticidade do material cimentício (GPa);

A_a - Área da seção do modelo com o aço de revestimento (mm²);

A_c - Área da seção do modelo com material cimentício (mm²);

α_a - Coeficiente de dilatação térmica do aço (°C⁻¹);

α_c - Coeficiente de dilatação térmica do material cimentício (°C⁻¹);

$T_{\text{médico}}$ - Temperatura média (°C);

ε - Deformação observada caso o corpo não estivesse restrito ($\varepsilon=0$);

ε^f - Deformação devido à fluência.

Na tabela 5.22 estão apresentados os valores para a força de restrição utilizando a equação 5.1 e considerando as seguintes hipóteses:

- $E_a = 0$;
- $\varepsilon = 0$ e $\varepsilon^f = 0$;
- $A_a = 0$;
- $\alpha_a = \alpha_c = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;
- Módulo de elasticidade considerado de cada material conforme tabela 5.16.

Tabela 5.22 – Temperatura média máxima, máxima força de restrição do ensaio e máxima força de restrição teórica do 1º e 2º ciclo

Material	Temperatura Média Máxima ($^{\circ}\text{C}$)		Máxima Força de Restrição Térmica do ensaio (kN)		Força de Restrição Térmica teórica (kN)	
	1º Ciclo	2º Ciclo	1º Ciclo	2º Ciclo	1º Ciclo	2º Ciclo
PREF	184	188	99,24	132,58	149,04	152,28
PP10	188	188	142,17	132,96	96,90	96,90
PW4,6	189	189	87,77	135,81	178,60	178,60
PP10W4	187	188	91,36	133,28	106,72	107,29
SHCC	210	208	40,03	135,72	275,76	273,14

Através da tabela acima observa-se que as forças de restrições teóricas calculadas são maiores nos dois ciclos se comparados aos valores encontrados nos ensaios, sendo que a diferença entre o valor teórico e o ensaiado é menor no 2º ciclo.

Algumas hipóteses foram levantadas para a explicação desse fenômeno. Primeiramente, deveria ter sido considerado o tubo de aço no cálculo da força teórica, contudo, após a desmoldagem dos corpos-de-prova foi verificado um pequeno rebaixamento, que também foi verificado nos ensaios de estabilidade. Para planificar a superfície foi realizado um capeamento com uma pasta de cimento. Todavia observou-se que o capeamento era deficiente na planificação o que tornou a superfície rugosa e sem contato direto entre o tubo e o tarugo da prensa. Desta forma, a restrição imposta foi parcial.

Foi observada também a saída de água pelas fissuras durante o 1º ciclo de carregamento (figura 5.29). A saída da água da estrutura porosa da pasta implica em alguns fenômenos físicos e estruturais, dentre eles a retração por secagem e fluência. Esses dois fenômenos aconteceram de forma simultânea durante o ensaio, todavia, o fato da força de restrição no ensaio do 1º ciclo ser menor que no 2º ciclo evidenciou um caso típico de fluência de curto prazo com relaxação das tensões, que implicou na força de restrição do 1º ciclo menor.

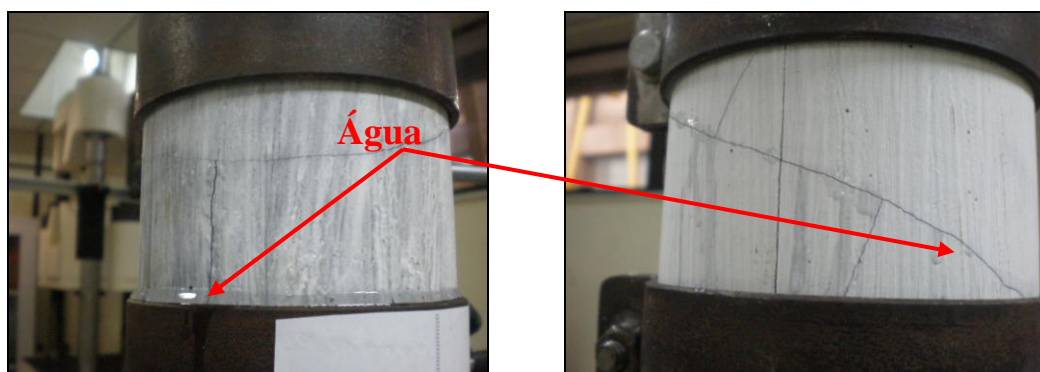


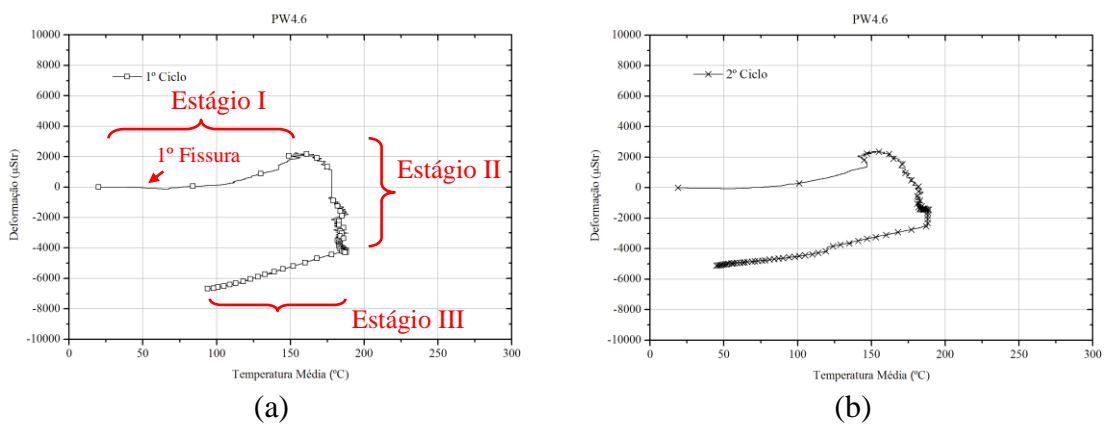
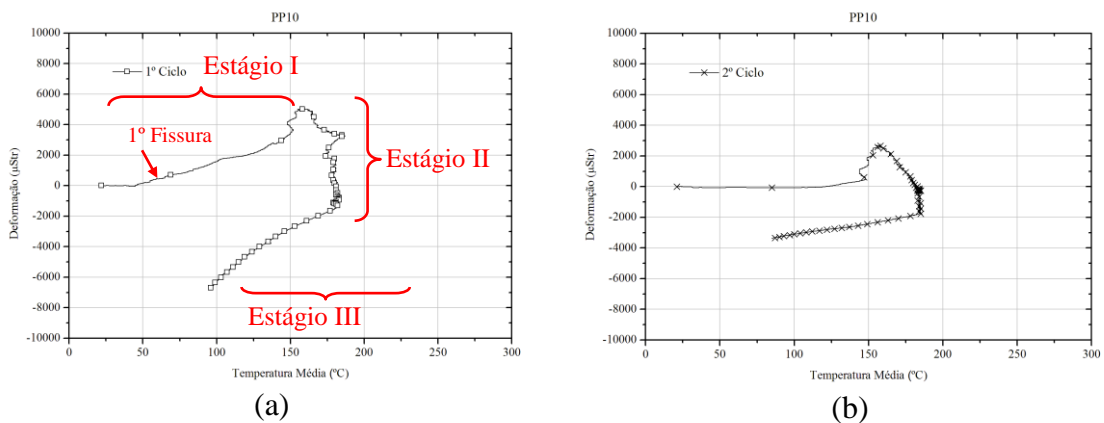
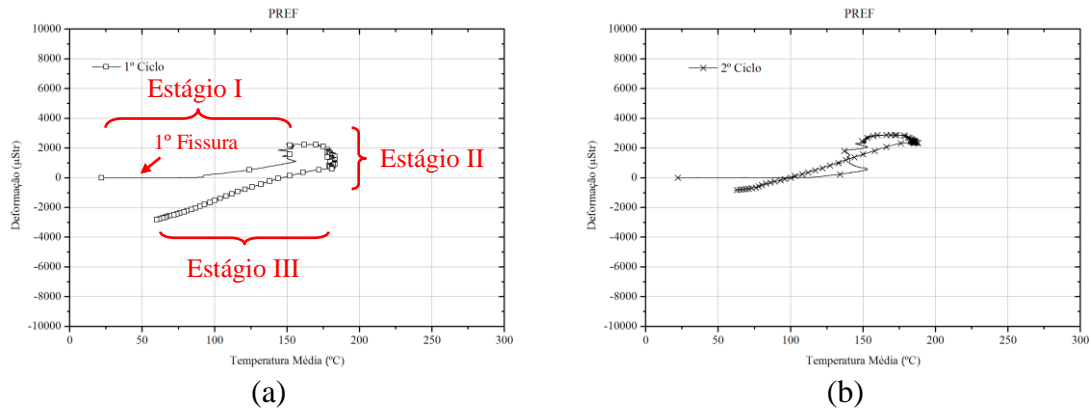
Figura 5.29 – Fluxo de água livre nas fissuras durante o ensaio do 1º ciclo

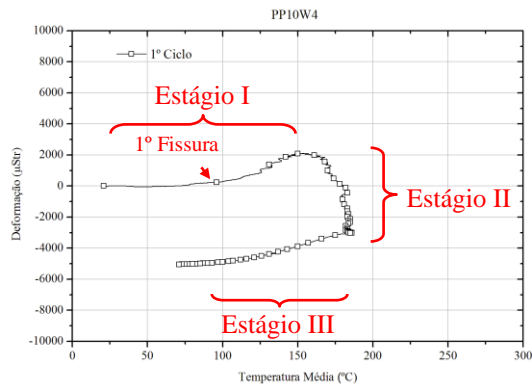
Além do efeito de fluência é possível que tenha ocorrido no 2º ciclo a regularização do contato entre a superfície do corpo-de-prova e o dispositivo da prensa decorrente do ensaio de 1º ciclo. Todavia, é necessário a realização de mais ensaios em que a planificação das amostras sejam asseguradas para poder estabelecer critérios de comparação entre os resultados obtidos.

5.5.3 Deformação Radial

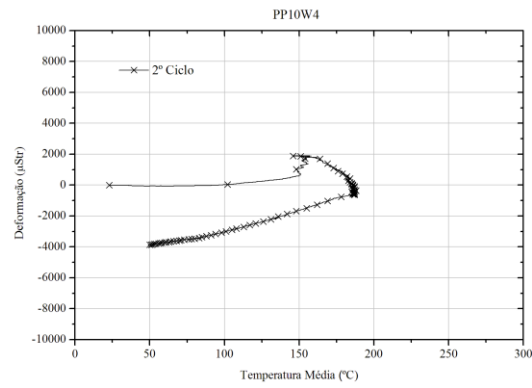
Os resultados obtidos nas leituras do deslocamento transversal foram calculados conforme equação 4.16. As curvas típicas deformação radial *versus* temperatura média para os dois ciclos ensaiados estão apresentadas nos gráficos das figuras 5.30 a 5.34.

As deformações dos cinco tipos de materiais ensaiados apresentaram comportamentos semelhantes com o crescimento e decrescimento da temperatura média e podem ser analisadas em três estágios distintos: estágio I, estágio II e estágio III.



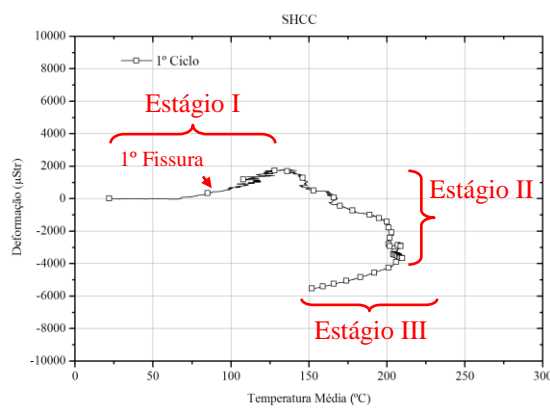


(a)

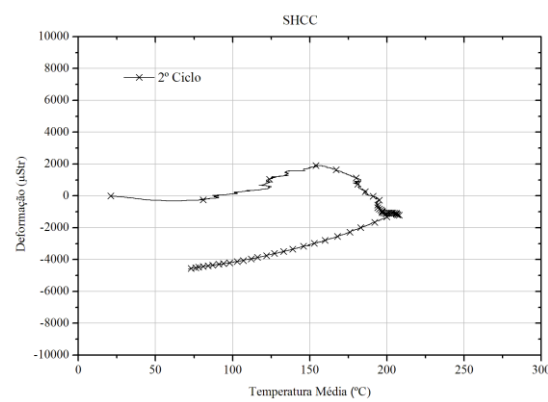


(b)

Figura 5.33 – Deformação radial *versus* temperatura média PP10W4: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo



(a)



(b)

Figura 5.34 – Deformação radial *versus* temperatura média SHCC: (a) 1º ciclo e (b) 2º Ciclo

O estágio I caracteriza-se pela elevação da temperatura dentro do tubo e a manutenção da temperatura inicial externa no corpo-de-prova, com isso há o crescimento da temperatura média. Desta forma, a deformação radial medida é preponderantemente influenciada pela expansão anular do tubo de revestimento. Vale salientar também, que durante o estágio I ocorreu o surgimento das fissuras no material. Observa-se também em cada gráfico (figuras 5.30 (a) a 5.34 (a)) que até o surgimento da 1ª fissura a deformação radial permaneceu nula, ou muito próxima deste valor, implicando numa restrição eficiente dos anéis.

Quando a temperatura externa do corpo-de-prova começa a crescer, a temperatura média tende a diminuir, iniciando assim o estágio II. O crescimento da

temperatura externa do corpo-de-prova propicia a expansão do material cimentício que é restringida de forma parcial pelo efeito de confinamento proporcionado pelos anéis. É importante observar também que nesse estágio a amostra entra em regime permanente, ou seja, o gradiente transversal de temperatura (ΔT) permanece constante.

A redução contínua da temperatura média marca o estágio III, que também é caracterizado pelo desligamento da fonte de calor e o consequente resfriamento do corpo-de-prova. Entretanto a deformação negativa permanece crescente até a força de restrição térmica ser nula. Vale salientar, que ainda nesse estágio o corpo-de-prova não se encontra na temperatura ambiente existindo, portanto, um gradiente residual de temperatura. A tabela 5.23 apresenta um resumo geral das deformações finais dos dois ciclos realizados nas amostras.

Tabela 5.23 – Deformação Máxima no 1º e 2º ciclo

Deformação Máxima (μStr)	PREF	PP10	PW4,6	PP10W4	SHCC
1º Ciclo	-2868	-6715	-6700	-7031	-5548
2º Ciclo	-825	-3382	-5116	-3885	-4591

Através dos dados apresentados na tabela acima é possível observar que as deformações finais são diferentes nos dois ciclos. Na realização do 2º ciclo não há o surgimento de novas fissuras, como no 1º ciclo, considerando ainda que o ensaio não é desmontado é possível que haja uma acomodação do conjunto (tubo + pasta + anéis) promovendo assim, uma menor deformação no 2º ciclo.

Os materiais que apresentaram maiores deformações finais no 1º ciclo foram PP10W4; PP10; PW4,6; SHCC e PREF, respectivamente. Tal comportamento foi condizente com os critérios utilizados para a seleção dos materiais para o ensaio do modelo físico, ou seja, as maiores deformações finais foram alcançadas pelos materiais que apresentaram maiores deformações na tração e menores módulos de elasticidade o PP10W4 e o PP10. Apesar de o SHCC apresentar na tração maiores deformações, seu

comportamento foi inferior aos demais materiais com exceção de PREF, sendo que é possível que devido ao formato anular do corpo-de-prova as fibras de PVA utilizadas nesse compósito tenham restringido a deformação do mesmo. Por fim, os resultados de deformação radial obtidos serão utilizados em análises numéricas em trabalhos futuros.

5.5.4 Fissuração

Os resultados obtidos através do sistema de aquisição de ruído sonoros durante o 1º ciclo de carregamento, sua correlação aos dados de temperatura e a análise dos tamanhos das fissuras medidas estão apresentadas a seguir.

5.5.4.1 PREF

As figuras 5.35 e 5.36 apresentam os gráficos pressão sonora *versus* tempo para os microfones 01 e 02 do modelo com material PREF e a tabela 5.24 apresenta a relação de fissuras pela aquisição de som e as correlacionam à temperatura interna no tubo e externa do corpo-de-prova.

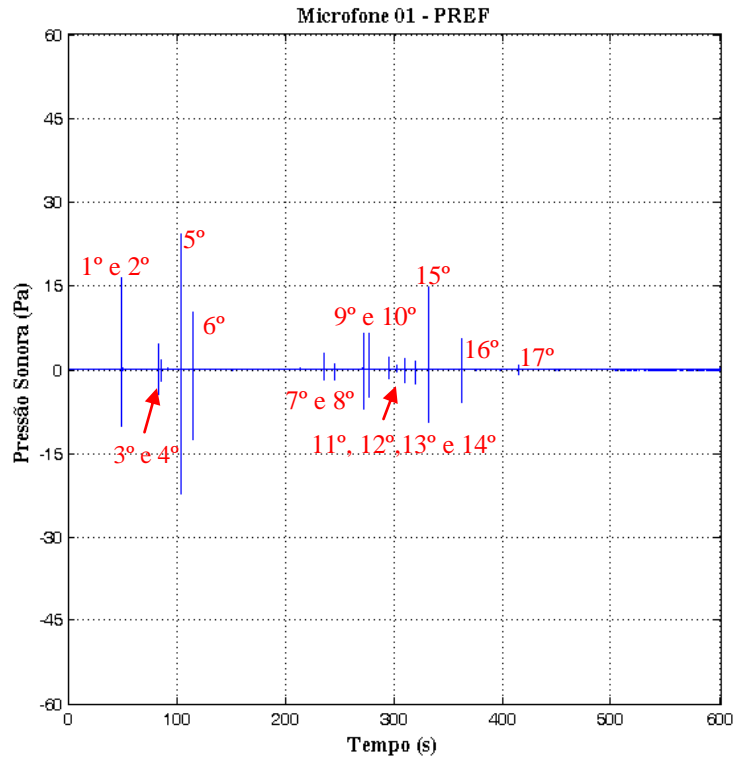


Figura 5.35 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PREF – Microfone 01

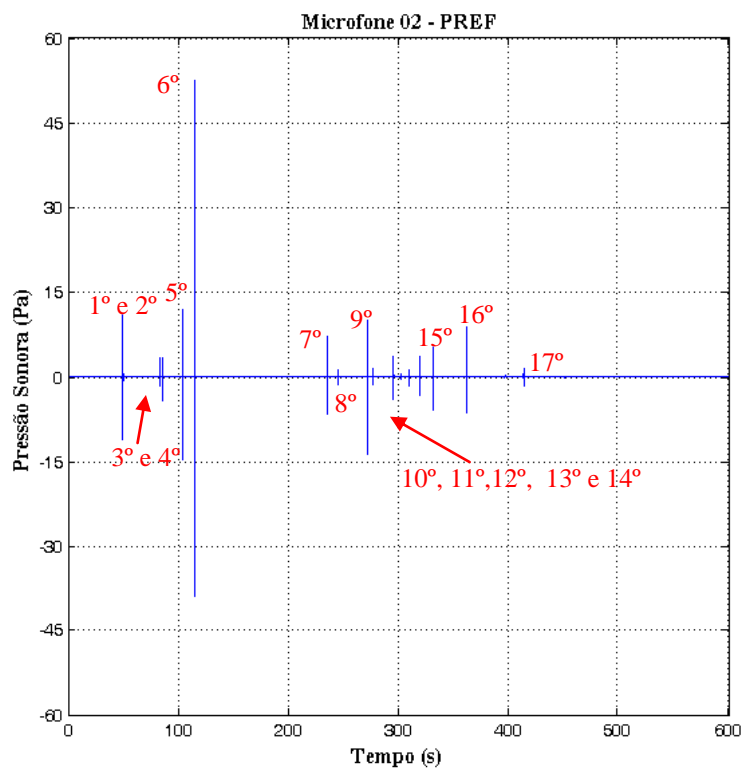


Figura 5.36 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PREF – Microfone 02

Tabela 5.24 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PREF: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo

Nº	Tempo (s)	Pressão Sonora (Pa)		Temperatura (°C)		
	Fissura	Mic 01	Mic 02	Interna Tubo	Externa Modelo	Gradiente
1º	48	10,0	11,0	76	22	54
2º	82	4,5	2,0	124	22	102
3º	85	2,0	5,0	127	22	105
4º	103	22,5	15,0	149	22	127
5º	104	12,0	15,0	150	22	128
6º	114	13,0	39,0	162	22	140
7º	235	2,0	7,0	249	22	227
8º	244	2,0	2,0	255	22	233
9º	271	7,5	14,0	273	22	251
10º	275	5,0	2,0	275	22	253
11º	293	2,0	4,0	286	22	264
12º	294	1,0	2,0	287	22	265
13º	308	3,0	2,0	286	22	264
14º	318	3,0	3,0	281	23	259
15º	330	9,0	7,0	280	23	258
16º	360	6,0	7,0	271	23	248
17º	413	1,0	2,0	280	23	257

Foram identificados o aparecimento de 17 fissuras no corpo-de-prova com PREF. É possível observar que seu surgimento se processa no mesmo instante para os dois microfones, contudo a intensidade da pressão sonora é diferente em ambas.

No corpo-de-prova com PREF a primeira fissura apareceu com um gradiente transversal de temperatura de 54 °C, após 48 segundos de início do aquecimento. As fissuras subsequentes aparecem com gradientes maiores, sendo que a última (17º) ocorreu com gradiente de 257 °C e após 413 segundos do início do ensaio. A figura 5.37 apresenta o aspecto final do corpo-de-prova após ensaio e a figura 5.38 apresenta o mapa de fissuração.

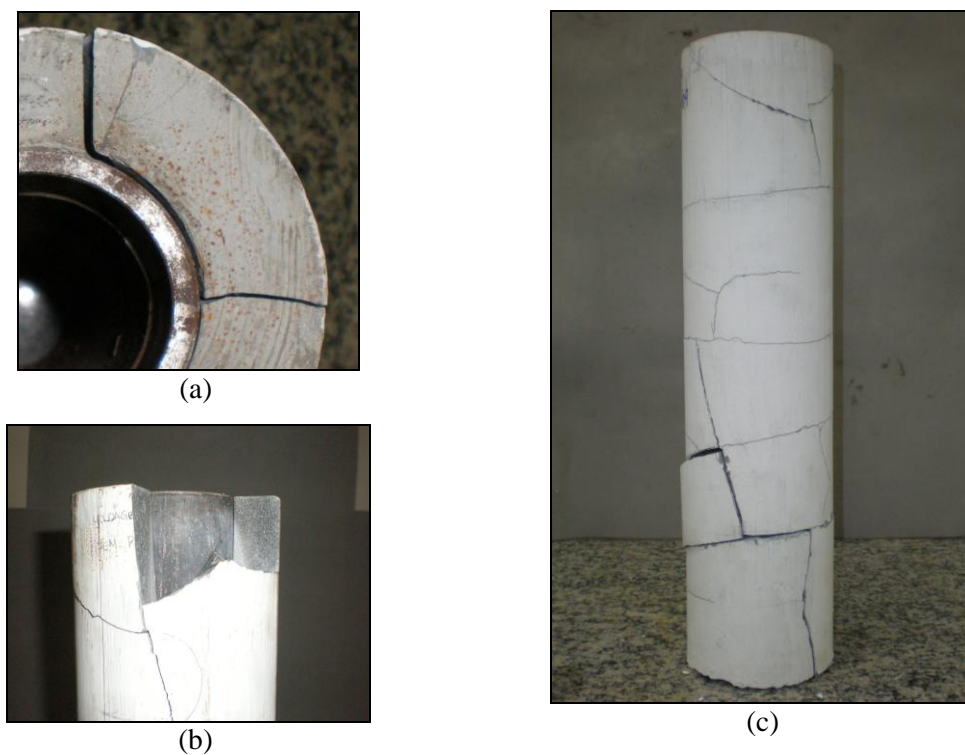


Figura 5.37 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PREF: (a) Visto de topo, (b) lateral e (c) vista final

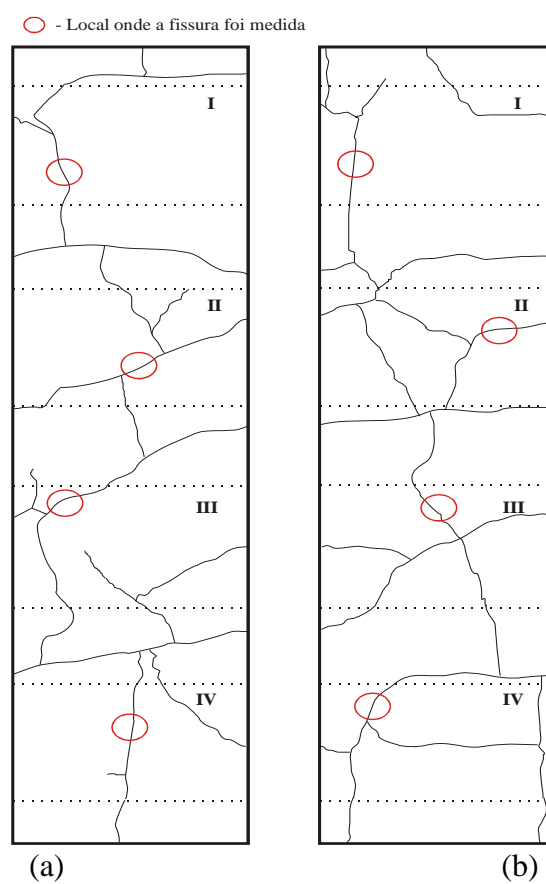


Figura 5.38 – Mapa de fissuração Final do corpo-de-prova com o material PREF sem os anéis: (a) frente e (b) fundo

Na figura 5.37 a parte (a) mostra a vista de topo onde é possível observar o desligamento da pasta ao tubo, fenômeno “*debonding*”. A parte (b) mostra uma vista lateral em que é visível parte do tubo de revestimento e a parte (c) uma vista longitudinal do corpo-de-prova. A figura 5.38 apresenta o mapa de fissuração final em projeção do corpo-de-prova com vista frontal (figura 5.38 a) e de fundo (figura 4.38 b)

As fissuras apresentadas no mapa da figura 5.40 estão bem distribuídas ao longo das quatro regiões consideradas, o que indica uniformidade no processo de aquecimento e confinamento. Da mesma forma, verifica-se que as ações dos anéis e do confinamento longitudinal não impediram o surgimento de fissuras tanto no sentido radial, quando verticais havendo conexão entres as mesmas nas quatro regiões consideradas. É importante mencionar que durante o aquecimento tanto do 1º ciclo quanto do 2º ciclo surgiram microfissuras na ordem de 6µm em todo o corpo-de-prova. Contudo, após o resfriamento não foi possível identificá-las.

A figura 5.39 (a) apresenta as fissuras do corpo-de-prova da parte frontal e a figura 5.39 (b) do fundo. Não foi verificado o surgimento de novas fissuras na amostra com a aplicação do 2º ciclo de carregamento térmico. Entretanto, observou-se após o seu término que as fissuras aumentavam de abertura, variando de 6% a 150% da abertura inicial.

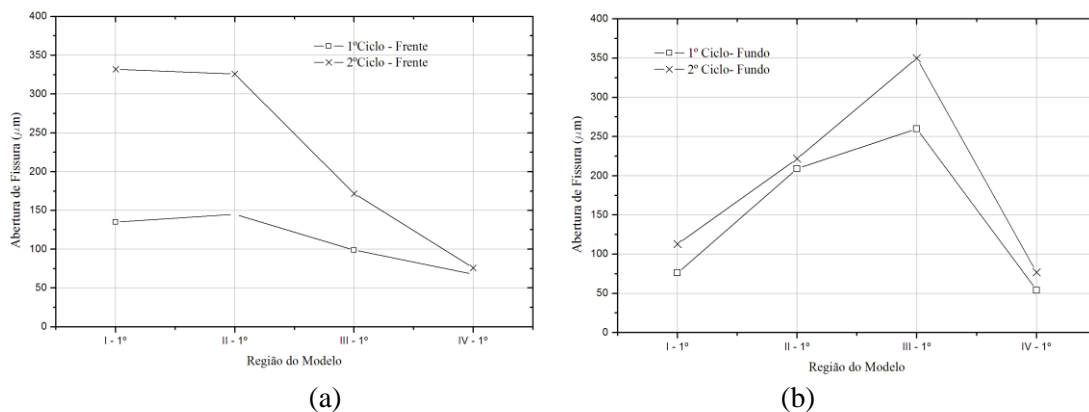


Figura 5.39 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PREF: (a) frente e (b) fundo

5.5.4.2 PP10

As figuras 5.40 e 5.41 apresentam o gráfico pressão sonora *versus* tempo para os microfones 01 e 02 e a tabela 5.25 apresenta a relação de fissuras pela aquisição de som e as correlacionam à temperatura interna no tubo e externa do corpo-de-prova do modelo com o material PP10.

Durante esse ensaio ocorreu um problema com o sistema de aquisição de som. O computador usado acusou memória insuficiente para a aquisição de dados por volta dos 500 segundos do início do ensaio. Todavia, não foi identificada visualmente nenhuma fissura nova após a finalização da aquisição, o que tornou este ensaio válido.

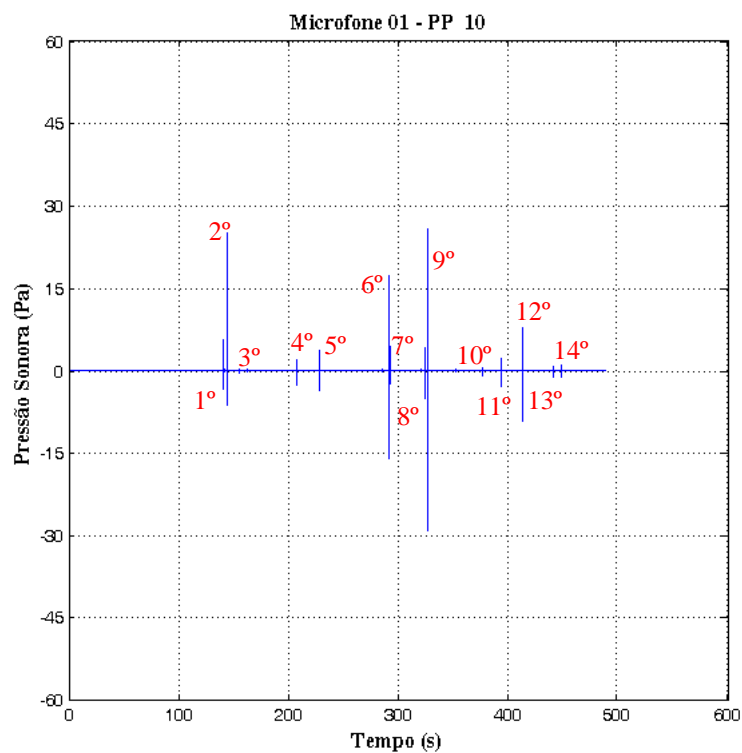


Figura 5.40 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PP10 – Microfone 01

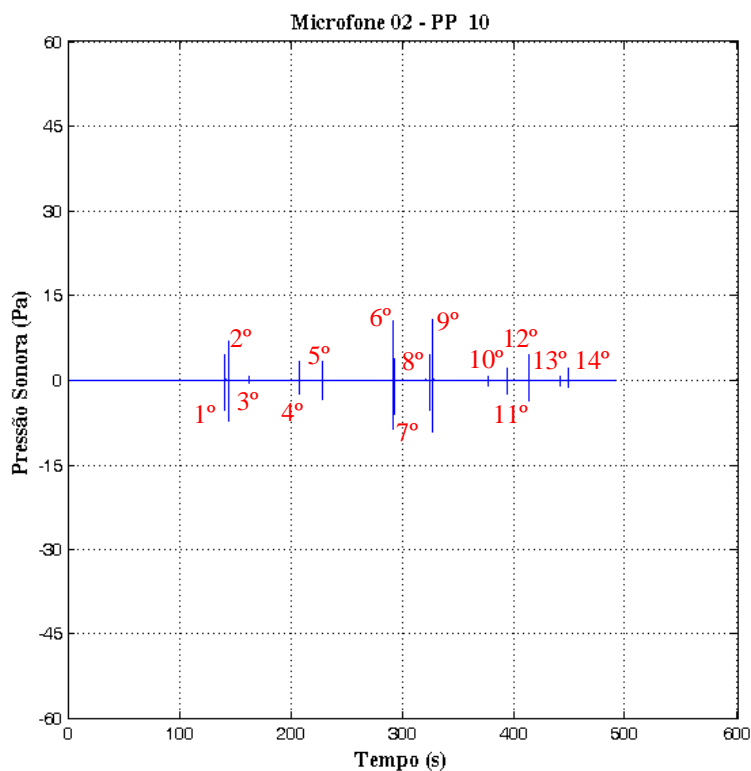


Figura 5.41 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PP10 – Microfone 02

Tabela 5.25 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PP10: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo

Nº	Tempo (s)	Pressão Sonora (Pa)		Temperatura (°C)		
	Fissura	Mic 01	Mic 02	Interna Tubo	Externa Modelo	Gradiente
1º	140	5,0	1,5	82	22	60
2º	143	24,0	2,5	84	22	62
3º	161	0,5	0,5	94	22	72
4º	207	2,0	1,5	122	22	100
5º	227	3,5	1,5	138	22	116
6º	290	17,5	4,0	178	22	156
7º	291	4,5	1,5	179	22	157
8º	323	4,0	2,0	219	23	196
9º	326	24,5	4,0	222	23	199
10º	375	0,5	0,5	251	24	227
11º	392	2,0	1,0	259	26	233
12º	412	7,5	2,0	266	27	239
13º	440	1,0	0,5	274	30	244
14º	447	1,0	1,0	273	31	242

Foram registradas 14 fissuras identificadas através dos gráficos de pressão sonora *versus* tempo e do arquivo de áudio. A primeira fissura ocorreu com 140 segundos com o tubo de revestimento interno na temperatura de 82 °C e temperatura

externa do corpo-de-prova de 22 °C, que se traduz em um gradiente de 60 °C. A última fissura (14º) a ser identificada ocorreu com 447 segundos e com gradiente de 242 °C.

A figura 4.42 apresenta a configuração final da amostra após o término do ensaio sem os anéis. Na parte (a) é apresentada a vista de topo do modelo, não sendo verificado “*debonding*”, ou falta de aderência da pasta em torno do tubo de revestimento. Tal fato é atribuído às propriedades de adesão fornecidas pelo polímero SBR, que já tem sido usado em larga escala na indústria da construção civil na aplicação de argamassas de revestimento. As partes (b) e (c) da figura 4.42 apresentam um detalhe lateral e uma vista final do corpo-de-prova. Na figura 5.43 está apresentado o mapa de fissuração final com as vistas de frente e fundo.

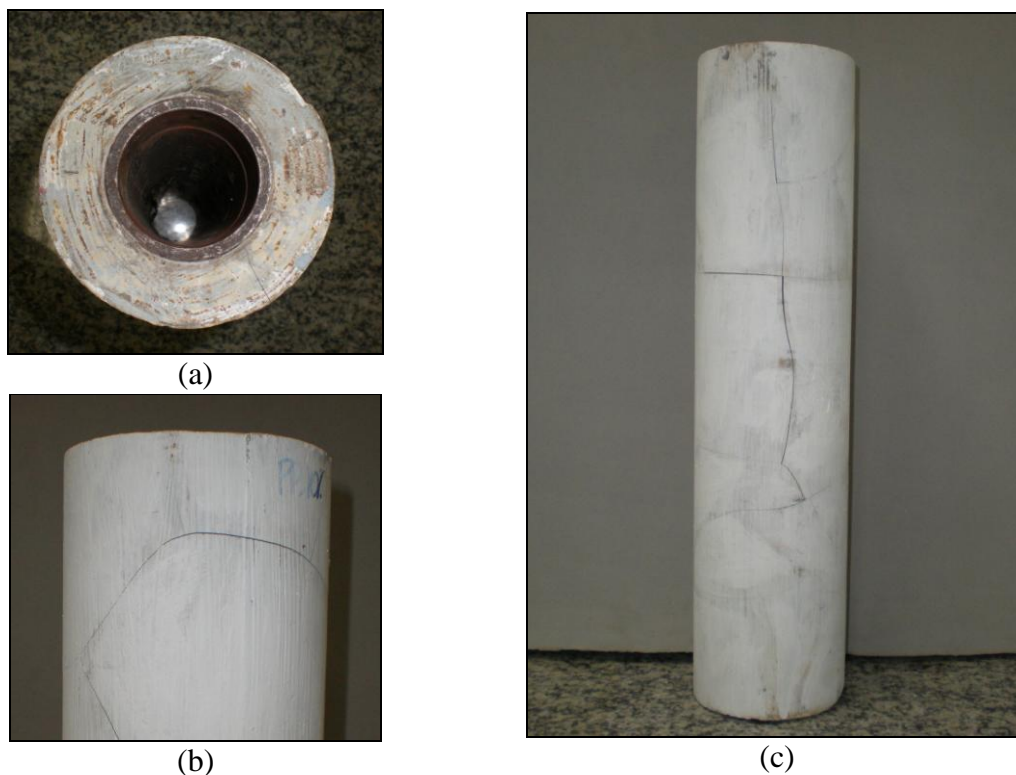


Figura 5.42 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PP10: (a) visto de topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final

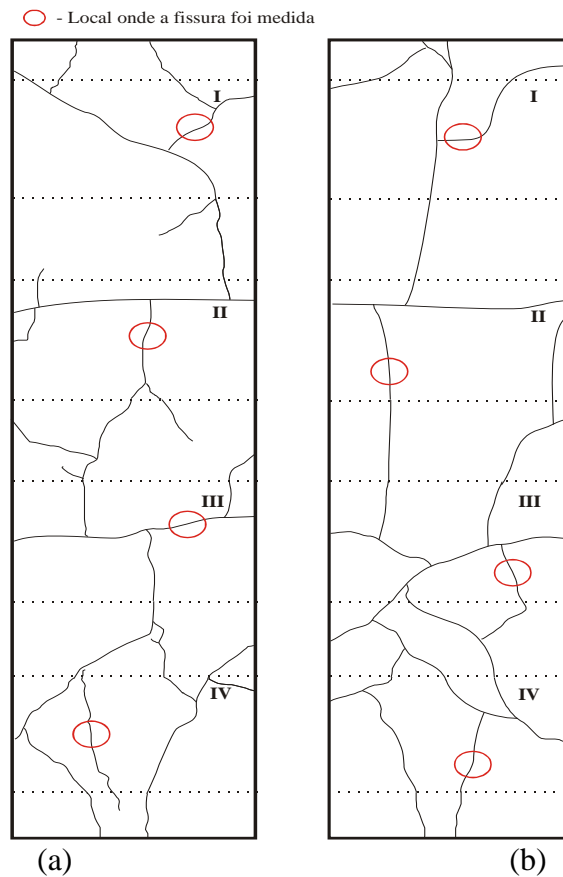


Figura 5.43 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PP10 sem os anéis:
(a) frente e (b) fundo

No mapa de fissuração (figura 5.43) é possível observar a distribuição uniforme das fissuras ao longo da amostra e a interconexão entre as regiões estabelecidas, o que indica mais uma vez que as fissuras se propagaram por entre os anéis de restrição. A figura 5.44 apresenta o gráfico de abertura de fissuras por região do modelo.

As fissuras da frente do modelo no 1º ciclo apresentaram aberturas que variam de 18 μm a 171 μm e no 2º ciclo de 20 μm a 193 μm . No fundo, as fissuras do 1º ciclo variaram de 15 μm a 185 μm e no 2º ciclo de 34 μm a 215 μm . É possível depreender dos dados apresentados que o 2º ciclo promove apenas o alargamento da abertura das fissuras, uma vez que também não foi observado o surgimento de novas fissuras. No entanto, foi observado durante o aquecimento do 1º e 2º ciclo o aparecimento de microfissuras de 6 μm que após o resfriamento não foram identificadas.

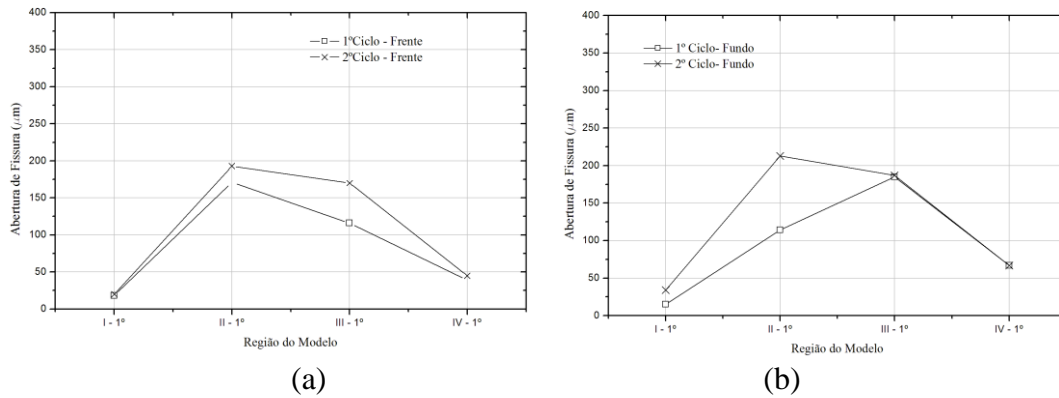


Figura 5.44 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PP10: (a) frente e (b) fundo

5.5.4.3 PW4,6

As figuras 5.45 e 5.46 apresentam os resultados da aquisição sonora do corpo-de-prova com material PW4,6, para os microfones 01 e 02, respectivamente. A tabela 5.26 apresenta um resumo com as fissuras identificadas correlacionado-as às temperaturas interna no tudo de revestimento e externa do corpo-de-prova.

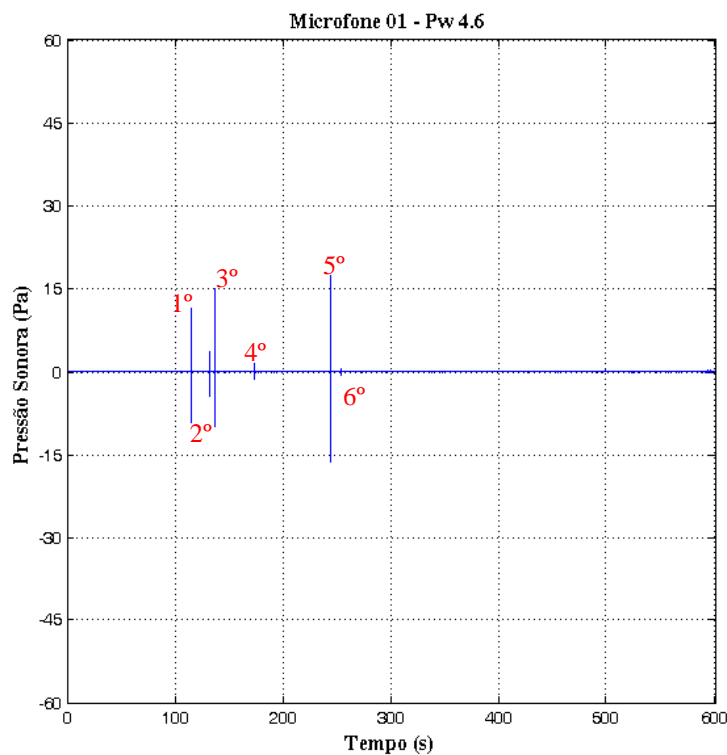


Figura 5.45 – Pressão Sonora versus Tempo do corpo-de-prova com PW4,6 – Microfone 01

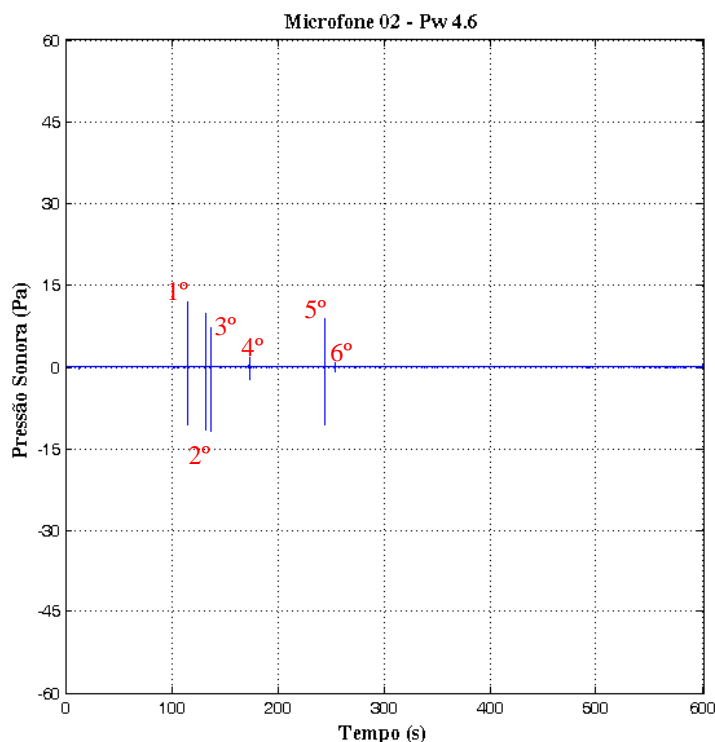


Figura 5.46 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PW4,6 – Microfone 02

Tabela 5.26 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PW4,6: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo

Nº	Tempo (s)	Pressão Sonora (Pa)		Temperatura (°C)		
	Fissura	Mic 01	Mic 02	Interna Tubo	Externa Modelo	Gradiente
1º	104	4,0	4,0	92	20	72
2º	121	1,0	3,5	105	20	85
3º	126	15,0	3,0	109	20	89
4º	163	0,5	1,0	136	20	116
5º	242	6,0	3,0	184	20	164
6º	252	0,2	0,5	193	20	173

Foram identificadas no arquivo de áudio e por meio dos gráficos das figuras 5.45 e 5.45 o surgimento de seis fissuras. A primeira ocorreu com 104 segundos de ensaio num gradiente transversal de temperatura de 72 °C e a última com 252 segundos num gradiente de 173 °C. A figura 5.47 apresenta a configuração final do corpo-de-prova com o material PW4,6. A parte (a) apresenta a vista de topo da amostra em que não foi identificado “*debonding*”, a parte (b) e (c) um detalhe lateral e a vista final, respectivamente. A figura 5.48 apresenta o mapa de fissuração final do corpo-de-prova sem os anéis.

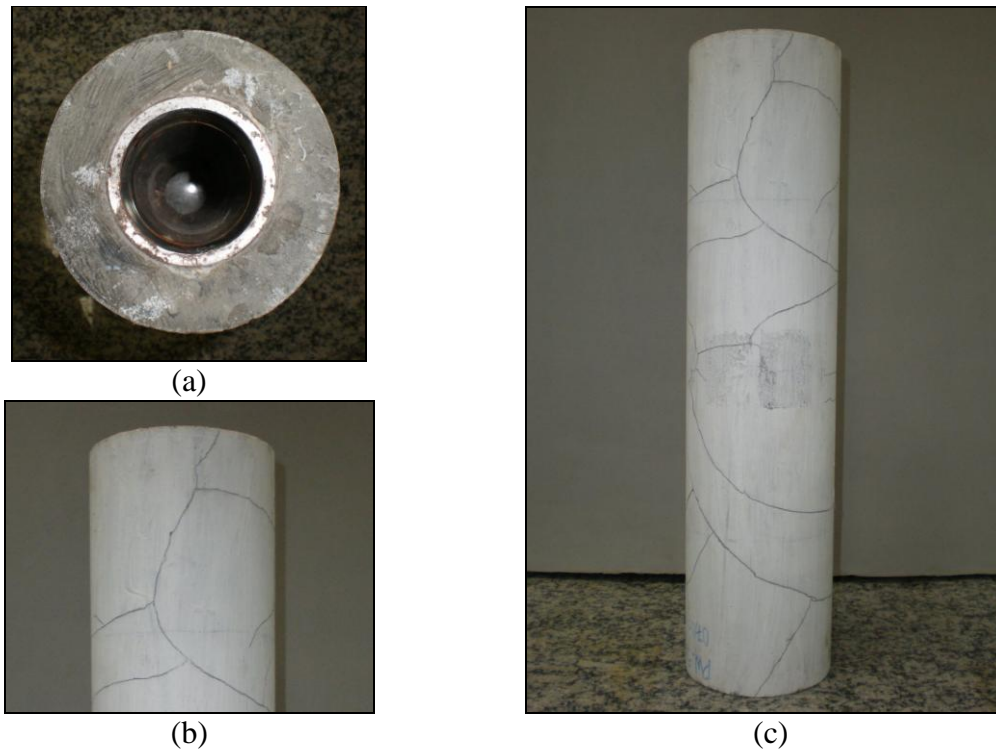


Figura 5.47 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PW4,6: (a) Topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final

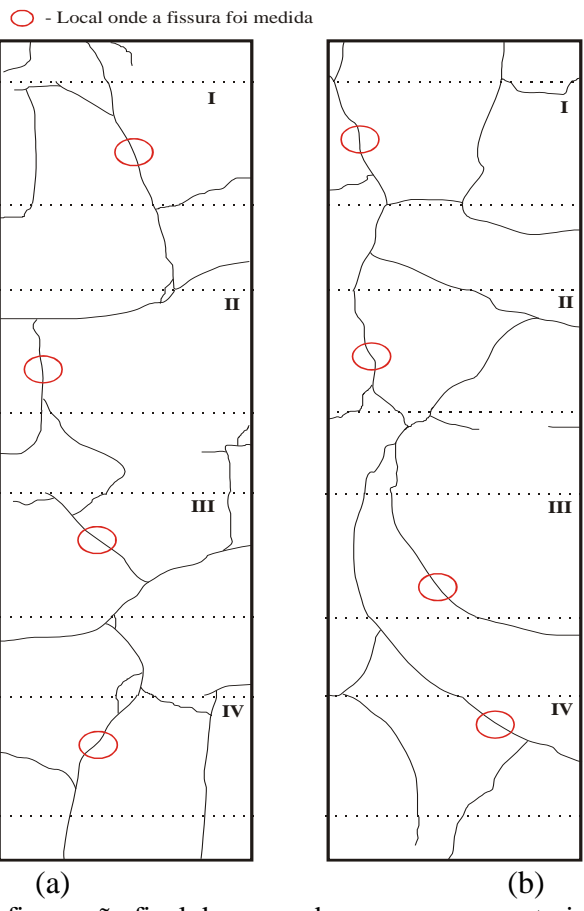


Figura 5.48 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PW4,6 sem os anéis: (a) frente e (b) fundo

Pelo mapa de fissuração é possível observar a distribuição homogênea em todas as regiões das fissuras. A figura 5.49 apresenta o gráfico de abertura de fissura por região. A abertura de fissuras na frente do corpo-de-prova apresentam dimensões variando de 31 μm a 347 μm no 1º ciclo e de 33 μm a 370 no 2º ciclo. A região do fundo apresentou no 1º ciclo abertura de fissuras na ordem de 66 μm a 210 μm e no 2º ciclo de 68 μm a 211 μm . Foi constatado também neste ensaio que a aplicação do 2º ciclo tende a aumentar a abertura das fissuras. Vale salientar que tanto no aquecimento do 1º quanto no 2º ciclo foram verificadas microfissuras na ordem de 8 μm , que após o resfriamento da amostra não foram identificadas.

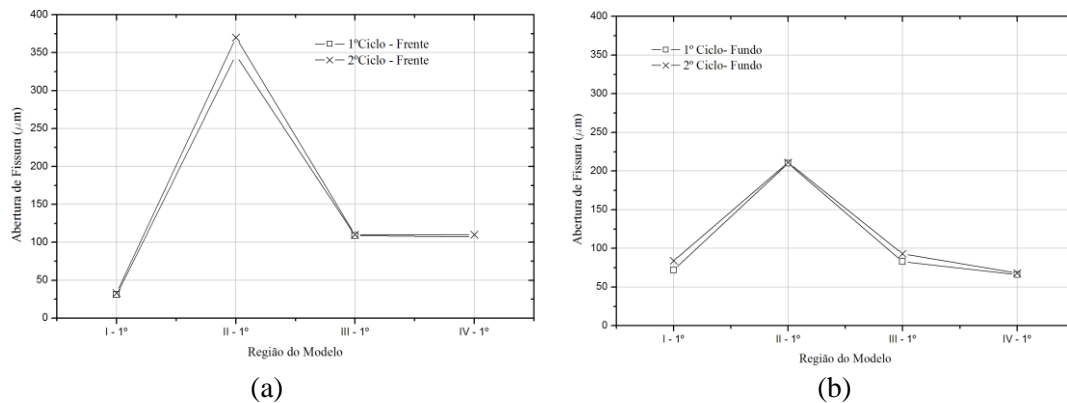


Figura 5.49 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PW4,6: (a) frente e (b) fundo

5.5.4.4 PP10W4

Os resultados do arquivo de aquisição de áudio do corpo-de-prova com o material PP10W4 encontram-se apresentados nas figuras 5.50 e 5.51 através de gráficos pressão sonora *versus* tempo para os microfones 01 e 02. A tabela 5.27 apresenta a relação das fissuras com os respectivos tempos, temperaturas interna no tubo de revestimento e externa no corpo-de-prova e os gradientes.

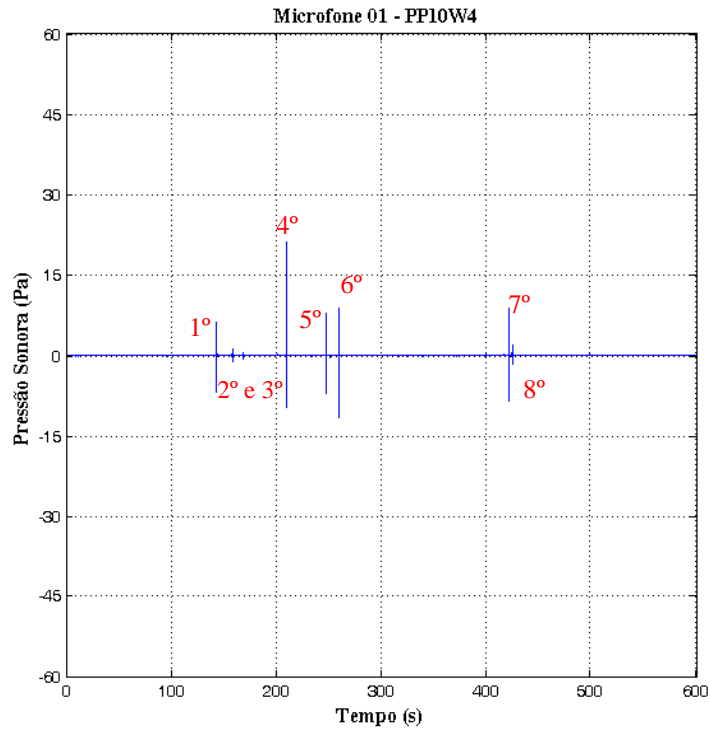


Figura 5.50 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PP10W4 – Microfone 01

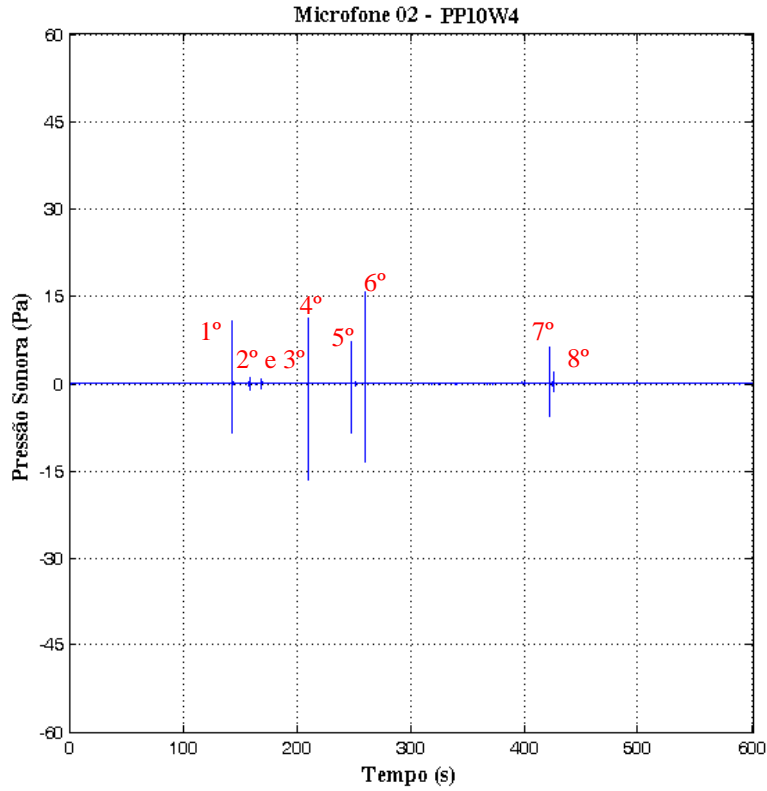


Figura 5.51 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com PP10W4 – Microfone 02

Tabela 5.27 – Relação fissura do arquivo sonoro do material PP10W4: Tempos, Pressão Sonora e temperaturas interna do tubo e externa do modelo

Nº	Tempo (s)	Pressão Sonora (Pa)		Temperatura (°C)		
	Fissura	Mic 01	Mic 02	Interna Tubo	Externa Modelo	Gradiente
1º	142	2,0	3,5	119	21	98
2º	158	0,5	0,5	127	21	106
3º	168	0,3	0,5	135	21	114
4º	208	17,0	5,5	165	21	144
5º	247	2,5	3,0	190	21	169
6º	259	3,0	5,2	197	21	176
7º	421	3,0	2,0	247	23	224
8º	424	0,5	0,5	248	23	225

Foram identificadas oito fissuras, sendo que a 1º ocorreu com 142 segundo e em um gradiente de 98°C e a última com 424 segundos com um gradiente de 225°C. A figura 5.52 apresenta o aspecto final do corpo-de-prova com PP10W4. Na parte (a) uma vista de topo em que não foi identificada a falta de aderência entre a bainha e o tubo de revestimento. Nas partes (b) e (c) são apresentados um detalhe lateral e uma vista final do corpo-de-prova. A figura 5.53 apresenta o mapa de fissuração final do corpo-de-prova com PP10W4, em que é possível verificar a distribuição homogênea das fissuras.

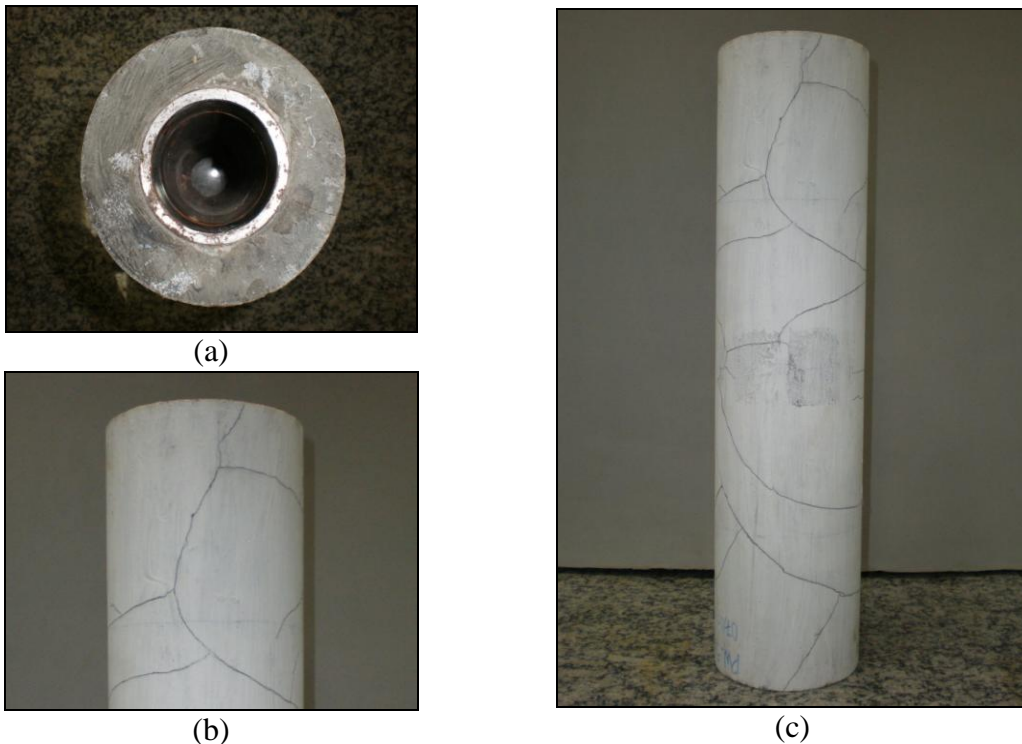


Figura 5.52 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material PP10W4: (a) topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final

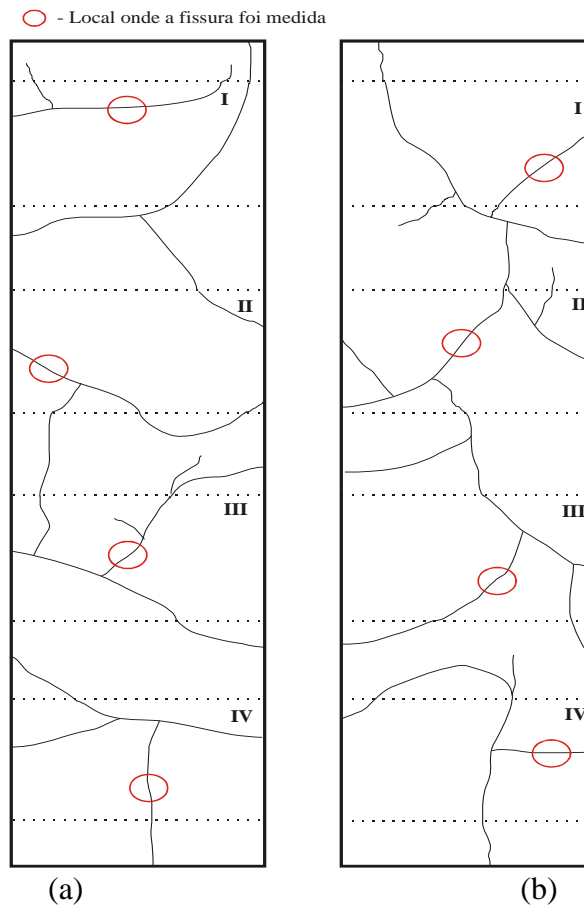


Figura 5.53 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material PP10W4 sem os anéis: (a) frente e (b) fundo

A figura 5.54 apresenta o gráfico abertura de fissura por região do corpo-de-prova. As aberturas das fissuras no 1º ciclo na parte da frente foram na ordem de 49 μm a 116 μm e no 2º ciclo de 93 μm a 229 μm . As fissuras da parte dos fundos ficaram no 1º ciclo variando de 35 μm a 80 μm e no 2º ciclo de 44 μm a 112 μm . Desta forma, observa-se o aumento da abertura das fissuras no 2º ciclo de carregamento térmico. Para o PP10W4 também foi observado o surgimento de microfissuras na ordem de 5 μm durante o aquecimento dos ciclos de carregamento, contudo, após o resfriamento das amostras a identificação dessas microfissuras não foi possível.

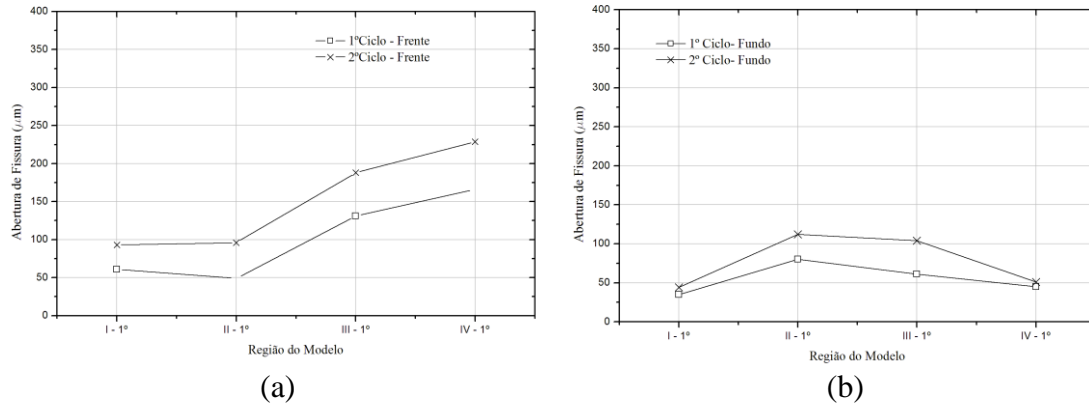


Figura 5.54 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o PP10W4: (a) frente e (b) fundo

5.5.4.5 SHCC

O último ensaio a ser realizado foi com o material SHCC. Durante a realização do ensaio não foram identificados ruídos sonoros de aparecimento de fissuras. As figuras 5.55 e 5.56 apresentam os gráficos pressão sonora *versus* tempo.

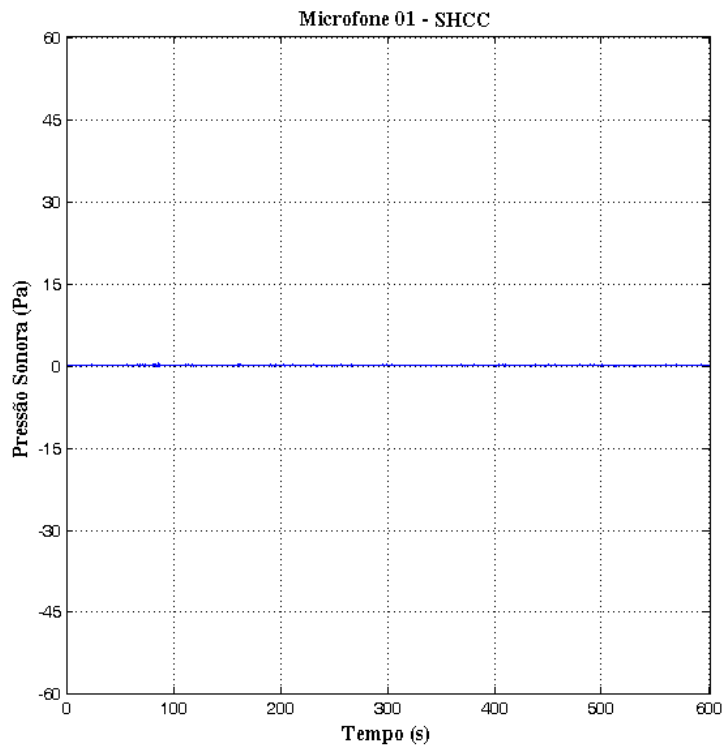


Figura 5.55 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com SHCC – Microfone 01

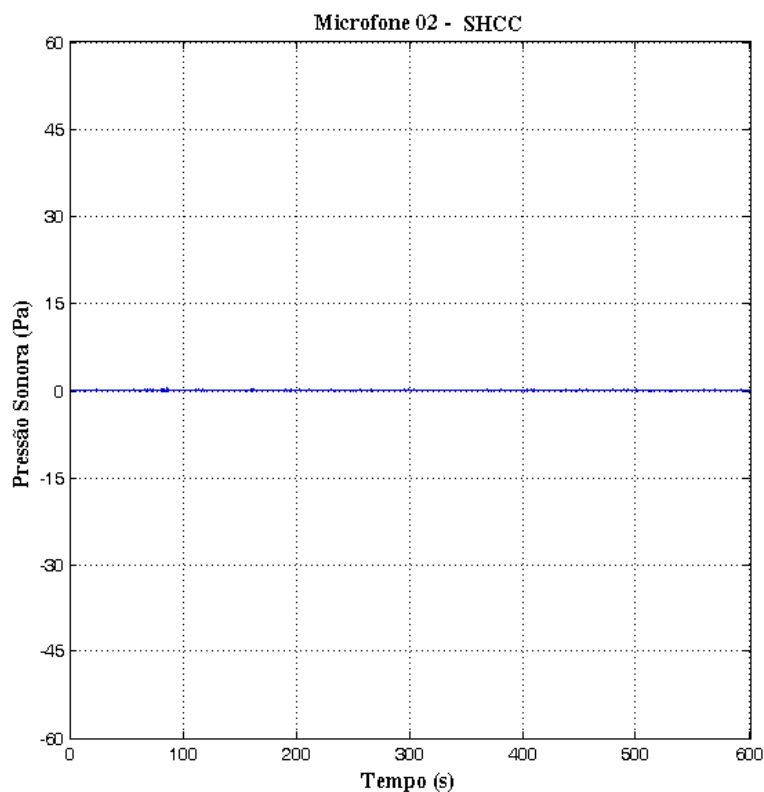


Figura 5.56 – Pressão Sonora *versus* Tempo do corpo-de-prova com SHCC – Microfone 02

Não é possível identificar os picos característicos de eventos de fissuração do material nas figuras acima. Contudo, foi identificado o surgimento de fissuras ao longo dos primeiros minutos de ensaio através da observação visual.

A primeira fissura a ser observada ocorreu com 215 segundos correspondendo a um gradiente de 131°C. Para as demais fissuras não foi possível fazer o acompanhamento devido a imprecisão gerada na observação. A figura 5.57 apresenta a configuração final da amostra após o término do ensaio. A parte (a) apresenta a vista de topo do corpo-de-prova, não sendo identificada a falta de aderência entre o material e o tubo de revestimento. A parte (b) e (c) apresentam um detalhe lateral e uma vista final do corpo-de-prova. A figura 5.58 apresenta o mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o SHCC, em que é possível observar a distribuição das fissuras ao longo de todas as regiões, bem como por entre os anéis.

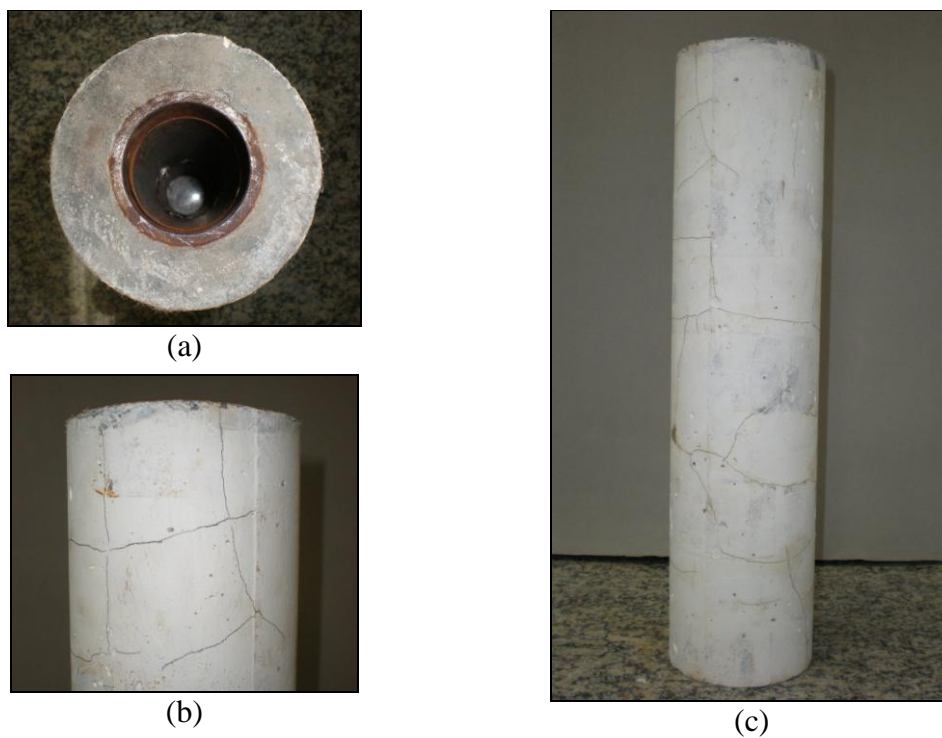


Figura 5.57 – Aspecto final do corpo-de-prova com o material SHCC: (a) topo, (b) detalhe lateral e (c) vista final

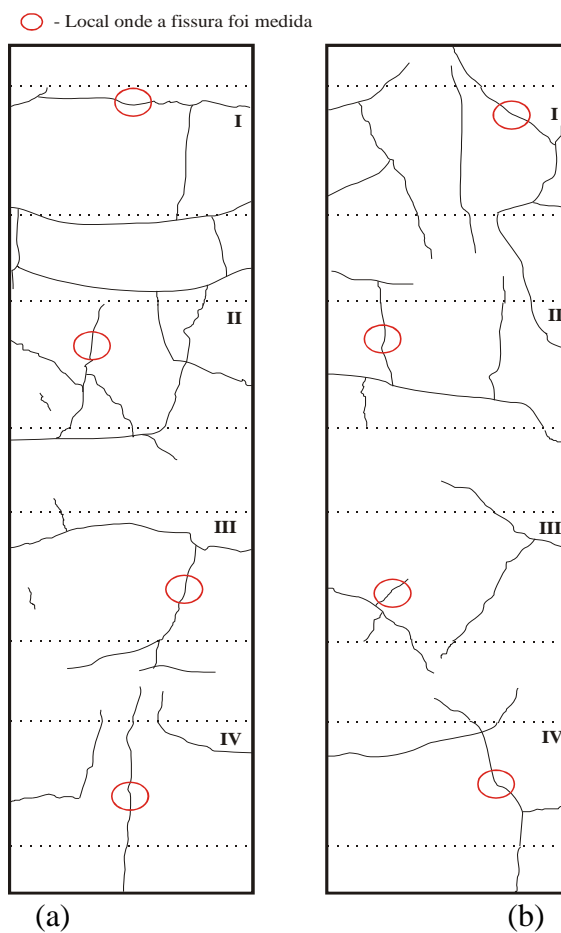


Figura 5.58 – Mapa de fissuração final do corpo-de-prova com o material SHCC sem os anéis: (a) frente e (b) fundo

A abertura de fissuras na vista frontal do corpo-de-prova apresentadas no 1º ciclo variaram de 23 µm a 50 µm, enquanto no 2º ciclo a variação foi de 32 µm a 70 µm. Para a região dos fundos a variação no 1º ciclo foi de 20 µm a 47 µm e no 2º ciclo de 28 µm a 54 µm. A figura 5.59 apresenta a evolução da abertura das fissuras por região nos dois ciclos aplicados.

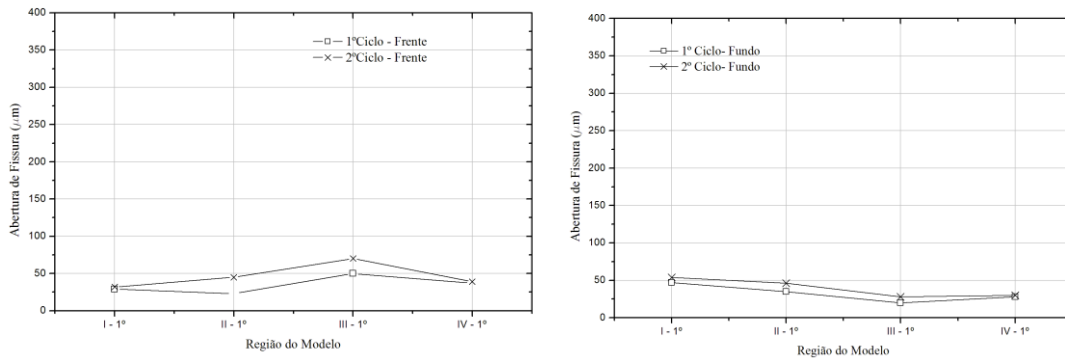


Figura 5.59 – Abertura de Fissuras do corpo-de-prova com o material o SHCC: (a) frente e (b) fundo

5.5.4.6 Comparação entre as amostras

Após apresentados os resultados individuais de cada material, compararemos o desempenho de cada um em relação aos parâmetros de gradientes de fissuração, distribuição e abertura de fissuras.

Com relação ao surgimento da primeira fissura, a tabela 5.28 apresenta a relação de cada evento com as respectivas temperaturas e gradientes. Vale salientar que para o material SHCC o dado apresentado se refere à identificação visual da fissura, diferentemente dos outros materiais em que os dados foram retirados do arquivo de áudio.

Tabela 5.28 – Relação geral da 1º fissura do arquivo sonoro, temperaturas interna e externa do modelo e respectivos gradientes

Material	Tempo (s)	Temperatura (°C)		
	1º Fissura	Interna Tubo	Externa	Gradiente
PREF	48	76	22	54
PP10	140	82	22	60
PW4,6	104	92	20	72
PP10W4	142	119	21	98
SHCC	211*	153	22	131

* - Identificação visual

Ao comparar os materiais com a incorporação de fibra e polímero, o material que apresentou melhor desempenho foi PP10W4 que apresentou a 1º fissura para um gradiente igual a 98 °C. Esse resultado repercutiu a capacidade de deformação do material, salientando que em sua composição constam os máximos teores estudados de polímero SBR e fibra de volastonita. As pastas com cada um desses materiais isoladamente apresentaram melhor desempenho se comparada a pasta de referência, que obteve um gradiente de 1º fissura de 54°C, contra 60°C da PP10 e 72°C da PW4,6.

Entretanto, quando analisado os materiais de forma global, o que obteve o melhor desempenho foi SHCC com um gradiente de 1º fissura de 131°C. O comportamento mecânico do SHCC é caracterizado pela múltipla fissuração quando sob carregamento de tração. A indicação desse material teve como objetivo aproveitar tal característica e avaliar seu comportamento sob esse tipo de carga térmica. Apesar do SHCC não apresentar ainda propriedades reológicas apropriadas para sua utilização em poços de petróleo, sua resposta ao problema proposto é uma motivação para sua adequação à indústria do petróleo.

Para analisar o comportamento conjunto das fissuras dos materiais estudados foi estabelecido o critério abertura média de fissura. Foi calculada a média das fissuras selecionadas consideradas nas quatro regiões estabelecidas. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.29 e na figura 5.60.

Tabela 5.29 – Abertura média de fissura

Material	Abertura média de fissura (μm)	
	1º Ciclo	2º Ciclo
PREF	131	208
PP10	91	117
PW4,6	129	135
PP10W4	79	115
SHCC	33	43

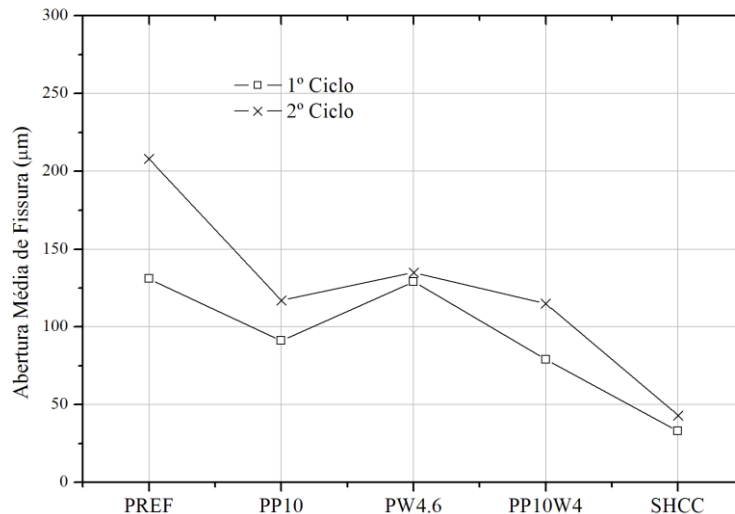


Figura 5.60 – Abertura de fissura média

Através do gráfico da figura 5.60 é possível observar o comportamento do padrão de fissuração dos materiais ensaiados. O material que obteve maiores aberturas de fissuras no 1º ciclo foi PREF com 131 μm , seguido do PW4,6 com 129 μm , PP10 com 91 μm , PP10W4 com 79 μm e SHCC com 33 μm . O 2º ciclo de aplicação de carga térmica provocou o efeito global de aumento da abertura de fissura, o que já tinha sido observado individualmente para cada material analisado.

Em concordância com a análise do gradiente de 1º fissura os materiais que apresentaram melhor desempenho foram o PP10W4 com abertura média cerca de 40% menor e o SHCC com 75% em relação ao PREF.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou desenvolver materiais cimentícios modificados com polímero SBR e fibra de volastonita, além do SHCC, e avaliar seu comportamento mecânico e estrutural para aplicação de poços de petróleo submetidos à injeção de vapor. Foi também proposto, no presente trabalho, o estabelecimento de um procedimento experimental para avaliação destes materiais visando sua aplicação na cimentação de poços.

Uma pasta de referência foi dosada, contendo materiais cimentícios (cimento classe G e 40% em massa de sílica ativa), aditivo superplastificante e água, com base nos critérios reológicos e de estabilidade similares às pastas aplicadas em campo, e a partir dessa formulação de referência foram propostos outros três grupos de pastas: com teores de 5% e 10% de polímero SBR com relação à massa de materiais cimentícios, com 2,3% e 4,6% de frações volumétricas de fibra de volastonita e com os dois materiais em conjunto tendo 10% de polímero SBR e 2% e 4% de fração volumétrica de fibra de volastonita. O quinto grupo de material utilizado foi o SHCC com uma formulação em estudo proposta por Magalhães (2008).

Na caracterização no estado fresco das pastas produzidas, os parâmetros obtidos nos ensaios de reologia, como viscosidade plástica, limite de escoamento, gel inicial e gel final, foram afetados de forma distinta pela incorporação de polímero SBR

e pela fibra de volastonita. A viscosidade plástica, o gel inicial e gel final são afetados de forma dominante pela ação do polímero, não sendo verificada influência significativa das fibras de volastonita. No entanto, o limite de escoamento é afetado tanto pelo polímero quanto pela fibra de volastonita em proporções crescentes aos teores incorporados.

Tanto o polímero SBR quanto a fibra de volastonita apresentaram bom desempenho no controle do filtrado, sendo que a ação mais relevante foi do polímero com redução no volume do filtrado em cerca de 85%. O peso específico normal e pressurizado também foi afetado de forma significativa pelo polímero em PP10 com a redução em seus valores de 8% e 5%, respectivamente com relação a PREF.

As propriedades físicas como porosidade, absorção e massa específica do material SHCC são correspondentes aos valores apresentados na literatura (MAGALHÃES, 2008), da mesma forma que o índice de consistência.

Com relação às propriedades físicas das pastas, verificou-se que o aumento do teor de polímero, tende a aumentar a porosidade do material em 21%, assim como a absorção de água em 35% em PP10, com relação à PREF. No entanto, os materiais com fibra de volastonita apresentaram efeito inverso com a redução da porosidade e da absorção de no máximo 16% e 18%, respectivamente em PW4,6. Tal influência também foi verificada nos materiais com fibra de volastonita e polímero em que o efeito da fibra resultou na redução da porosidade e da absorção de PP10W4 em 11% e 12% respectivamente com relação a PP10. A incorporação de fibra de volastonita não provocou mudança significativa na massa específica. Entretanto, nos materiais com polímero houve uma redução de no máximo 11% nos valores dessa propriedade. Vale salientar, ainda, que os materiais estudados apresentaram valores de rebaixamento de

topo e diferença de peso específico entre seções dentro dos limites estabelecido no PROCELAB (2005).

O teor de polímero afetou a resistência à compressão com reduções de no máximo 49% em PP10, enquanto que a fibra de volastonita proporcionou incrementos de no máximo 14% em PW4,6. O mesmo comportamento foi verificado com relação ao módulo de elasticidade, com reduções de no máximo 36% em PP10 e aumento de no máximo 17% em PW4,6. O SHCC apresentou, na compressão, comportamento diferenciado dos demais materiais com incremento de deformação no pós-pico, o que traduz em sua capacidade de absorver energia de deformação. Os coeficientes de Poisson dos materiais não apresentaram diferenças significativas.

Diferentemente do comportamento na compressão, a resistência à tração aumentou com o aumento do teor de polímero em 13% em PP10 com relação a PP5. A incorporação das fibras de volastonita influenciou o comportamento da resistência à tração, com relação à PREF, incrementando tal propriedade em no máximo 26% em PW4,6; da mesma forma que no material PP10W4 as fibras aumentaram a resistência à tração em 32% com relação a PP10. A ação do polímero influenciou de forma significativa a deformação na tração na flexão, analisada em termos de deslocamento, nos materiais PP10, PP10W2 e PP10W4 incrementando estes valores com relação a PREF.

Os critérios utilizados para a seleção dos materiais a serem ensaiados no modelo do poço consideraram o comportamento mecânico dos materiais com relação ao deslocamento máximo obtido no ensaio da tração na flexão, o menor módulo de elasticidade e a maior resistência à tração. De acordo com tais requisitos, os materiais PP10, PW4,6 e PP10W4 foram selecionados, além da PREF, para efeito de comparação

e o SHCC, o que totalizou cinco tipos de materiais a serem submetidos ao ensaio termomecânico no modelo físico de poço.

As curvas de aquecimento tanto do 1º ciclo, para todos os corpos-de-prova, quanto do 2º ciclo apresentaram boa repetibilidade. No entanto, cada material obteve uma evolução no tempo de aquecimento da parede do tubo de revestimento de forma diferenciada. Tal comportamento foi atribuído as propriedades de calor específico e condutividade do material cimentício ensaiado. Apesar dessas propriedades não terem sido medidas, os diferentes gradientes de temperatura transversal em regime indicam que a condutividade dos materiais cimentícios são diferentes, bem como o calor específico.

A deficiente planificação dos corpos-de-prova resultou em forças de restrição térmicas menores do que aquelas que seriam encontradas devido à temperatura média aplicada, caso a restrição imposta pela máquina de ensaio fosse total. Além da deficiente planificação, as tensões no corpo-de-prova sofreram relaxação devido à fluência. Vale ressaltar, ainda, que por conta da força de restrição térmica do 2º ciclo ser maior que no 1º ciclo supõe-se que tenha ocorrido a regularização do contato entre a superfície dos corpos-de-prova e o *setup* da máquina, além da anulação da relaxação de curto prazo, devido à saída de água pelos vazios deixados pelas fissuras no 1º ciclo.

Os materiais que apresentaram maiores deformações radiais finais no 1º ciclo foram os mesmos que atenderam aos critérios utilizados para seleção do ensaio termomecânico, ou seja, PP10W4, PP10 e PW4,6 o que indica que os critérios utilizados predizem o comportamento estrutural do material.

A aplicação do carregamento térmico induziu a um estado de tensões que promoveu a fissuração de todos os materiais ensaiados durante o 1º ciclo de carregamento térmico. A aquisição do som foi eficiente na identificação das fissuras

ocorridas o que permitiu a correlacioná-las ao gradiente de temperatura transversal. A única exceção foi no ensaio do SHCC em que a identificação da 1º fissura foi realizada de forma visual, por este não apresentar energia sonora de fissuração suficiente para ser captada pelos microfones.

Os materiais que apresentaram maior gradiente de 1º fissura foram SHCC; PP10W4; PW4,6; PP10 e PREF com 131°C, 98°C, 72°C, 60°C e 54°C, respectivamente. Comparando os quatros grupos com polímero e fibra de volastonita verifica-se que o melhor desempenho foi de PP10W4 em que a ação conjunta entre o polímero SBR e as fibras de volastonita proporcionaram melhor comportamento se comparado a PW4,6 e PP10. Todavia, de forma geral, o SHCC apresentou melhor desempenho o que comprova sua capacidade de absorver energia de deformação.

A análise da fissuração do 1º ciclo indicou que o tamanho das fissuras para SHCC; PP10W4; PP10; PW4,6 e PREF foram de 33 µm, 79 µm, 91 µm, 129 µm e 131µm, respectivamente. Verifica-se que a ação conjunta do polímero e da fibra de volastonita proporcionou menor abertura de fissura no PP10W4, se comparado aos materiais dos grupos das pastas. Todavia, analisando o comportamento global da fissuração dos materiais verifica-se que o SHCC apresenta menores fissuras com relação aos demais. Vale salientar ainda, que a aplicação do 2º ciclo de carregamento não proporcionou o surgimento de novas fissuras, apenas aumento das anteriores medidas.

Desta forma, a resposta estrutural obtida dos materiais estudados no ensaio termomecânico foi adequada com os critérios de seleção utilizados, demonstrando que materiais com maior deformação, menor módulo de elasticidade e maior resistência à tração são mais adequados para poços submetidos a carregamento térmico.

Com a experiência do presente trabalho serão realizadas análises numéricas com os dados obtidos dos ensaios termomecânicos. As condições de contorno na modelagem numérica serão estabelecidas de forma a serem as mais próximas possíveis das condições reais de ensaio e os resultados obtidos serão verificados pelas medições experimentais de cargas de fissuração e deslocamentos radiais. Serão, ainda, realizados nos corpos-de-prova do modelo físico cura em autoclave para simular as condições de pressão existentes nos poços em campo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Definitions of terms relating to Concrete and Concrete Agregates*. ASTM C-125. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1993.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Specifications for cements and materials for well cementing*: API Spec 10A. 2000 (a).

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Recommended practice for testing well cements*: API Spec 10B. 2000 (b).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Determinação das propriedades reológicas*: NBR 9830. Rio de Janeiro. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio*: NBR 9831. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*: NBR 9778. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*: NBR 12141. Rio de Janeiro. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Concreto –Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*: NBR5739. Rio de Janeiro. 2007.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio: NBR 7215*. Rio de Janeiro. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: NBR 8522*. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine): NBR NM 76*. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência: NBR 13276*. Rio de Janeiro. 2002.
- BALTHAR, V. K. C.B. L. M., *Caracterização físico-química e mecânica de pastas de cimentação fibrosas*. Exame de qualificação para candidatura ao doutorado. PEC/CCOPPE/UFRJ. pp 168, Rio de Janeiro, 2008.
- BANFIL, P. F. G, *Rheology of fresh cement and concrete*. University of Liverpool, UK, 1990.
- BARLUENGA, G., HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., *SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour*. Cement and Concrete Research, v 34, pp. 527-537, 2004.
- BERNDT, M. L., PHILIPPACOPOULOS, A., *Incorporation of fibres in geothermal well cements*. Geothermics n.31, pp 643–656, 2002.
- BOSMA, M. G. R., CORNELISSEN, E. K., SCHWING, A., *Improved experimental characterization of cement/rubber zonal isolation materials*. SPE 64762. 2000.
- CAMÕES, A., *Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco*. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, n. 24, pp 43-29, 2005.
- PROCELAB, *Procedimentos e Métodos de Laboratório destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2005.

- COELHO, L. C., MENDES, R. B., ALVES, J. L. D., D'ALMEIDA, A. R., CAMPOS, G., *Estudo paramétrico do comportamento termomecânico da bainha de cimento em poços submetidos à injeção de vapor*. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2003.
- DEAN, G. D., TORRES, R. S., *Novel cement system for improved zonal isolation in steam injection wells*. SPE 78995. 2002
- DE LARRARD, F., *Concrete mixture proportioning: a scientific approach, 1º ed.* London: E&FN Spon, 421 p. 1999.
- FERRARIS, C. F., *Measurement off the rheological properties of high performance concrete state of art report*. Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology. v. 104, n. 5, pp 104-461, 1999.
- FORMAGINE, S., *Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, pp. 259, 2005.
- GOODWIN, K. J., CROOK, R. J., *Cement sheath stress failure*. SPEDE pp.291-296. 1992.
- HERNÁNDEZ, J. A. M., *Mecanismos de Recuperação de Óleos Pesados durante a Injeção de Vapor num Reservatório Naturalmente Fraturado*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, pp. 99, 2006.
- KIM, Y. Y., KONG, H. J., LI, V. C., *Development of sprayable engineered cementitious composites*. Proceedings of the HPFRCC-4, Ann Arbor. MI, USA. pp 233-243. 2003.
- KIM, Y. Y., FICHER, G, LIM, Y. M. *et al.*, *Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite (SHCC) using wet-mix shotcreting process for repair*. ACI Materials Journal. Vol.101, nº1. pp 42-49. 2004.
- KUDER, K. G., OZYURT, N., MU., E. B., SHAH, S; P., *Rheology of fiber-reinforced cementitious materials*. Cement and Concrete Research, v 37, pp. 191-199, 2007.

- LI, V. C., *On Engineered Cementitious Composites (SHCC). A review of the material and its applications*. Journal Advanced Concrete Technology. Vol 1 n.3. pp 215-230, 2003.
- LI, V. C., *Strategies for high performance fiber reinforced cementitious composites development*. Proceedings of international workshop on advances in fiber reinforced concrete. Bergamo, Italy. pp. 93-98. 2004
- MAALEJ, M., LI, V. C., *Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members improved durability*. ACI Struct Journal, vol. 2. pp. 167-176. 1995.
- MAGALHÃES, M. S., *Durabilidade sob cargas térmicas de compósitos cimentícios com múltipla fissuração na tração direta*. Exame de qualificação para candidatura ao doutorado. PEC/CCOPPE/UFRJ. pp 112, Rio de Janeiro, 2008.
- MANO, E.B., MENDES, L.C., *Introdução a polímeros*. Rio de Janeiro, 2005.
- MARANGON, E., *Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço*. Dissertação de mestrado. PEC/COPPE/UFRJ. pp 128, Rio de Janeiro, 2006.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, pp 616, 1994.
- MIRANDA, C. R., *Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química*. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. pp 282, Rio de Janeiro, 2008.
- MYERS, S., EL SHAARI, N., DILLENBECK, L., *A new method to evaluate cement systems design requirements for cyclic steam wells*. SPE 93909. 2005.

- NAAMAN, A. E., *Strain Hardening and Deflection Hardening fiber reinforced cement composites: HPFRCC 4 Workshop*, “RILEM, Ann Arbor, USA, pp 95-113, 2003.
- NELSON, E. B., *Well Cementing*. Schlumberger Educational Services. Houston. 1990.
- NEVILLE, A.M. *Propriedades do Concreto*. 2.ed, Trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, pp 828, 1997.
- NOIK, C., RIVERAU, A., *Novel cement material for high-pressure / high temperature well*. SPE 50589. 1998.
- OHAMA, Y. *Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Properties and process technology*. New Jersey: Noyes Publications, pp 235, 1995.
- PEDERSEN, R. O., SCHEIE, A., JOHNSON, C., HOYOS, J. C., THEROND, E. *Cementing of an offshore disposal well using a novel sealant that withstands pressure and temperature cycles*. SPE 98891. 2006.
- PAIVA, M. D. M., *Otimização e análise mecânica de pastas geopoliméricas para uso em poços sujeitos à injeção cíclica de vapor*. Tese de doutorado. Natal, UFRN, 2008.
- ROCHA, L. A., AZEVEDO, C. T., *Projetos de poços de petróleo*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência Petrobras, 2007.
- ROMERO, S. N., MONROY, R. R., JOHNSON, C., CARDENAS, F., ABRAHAM. G. A. T., *Preventing Lost Circulation by Use of Lightweight Slurries With Reticular Systems: Depleted Reservoirs in Southern México*, SPE 92187-PA-P, SPE Drilling & Completion, 2006.
- SAKAI, E.; SUGITA, J. *Composite mechanism of polymer modified cement*. Cement and Concrete Research, v.25, n.1, p.127-135, 1995.
- STANG, H., LI, V. C., 1999, “*Extrusion of SHCC-material.*” in: Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3), Ed. H. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, pp.203-212.

- SILVA, D.A. *Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland*. Tese de Doutorado. Florianópolis: PGMATUFSC, 2001.
- STILES, D., *Effects of long-term exposure to ultrahigh temperature on the mechanical parameters of cement*. SPE 98896. 2006.
- TATTERSALL, G. H., BANFILL, P. F. G., 1983, *The rheology of fresh concrete*, 1 ed. London: Pitman Advanced Publishing Program, 356 p.
- THIERCELIN, M. J., DARGAUD, B., BARET, J. F., RODRIGUEZ, W. J., *Cement design base don cement mechanical response*. SPE 38598. 1997.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petroleo*. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001. pp 271.
- VELASCO, R. V., *Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: Propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas*. Tese de Doutorado. PEC/COPPE/UFRJ. pp. 349. 2008.

ANEXO A – CURVAS TENSÃO *versus* DEFORMAÇÃO DAS AMOSTRAS

As figuras A.01 a A.08 apresentam as curvas tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova ensaiados à compressão uniaxial das formulações propostas.

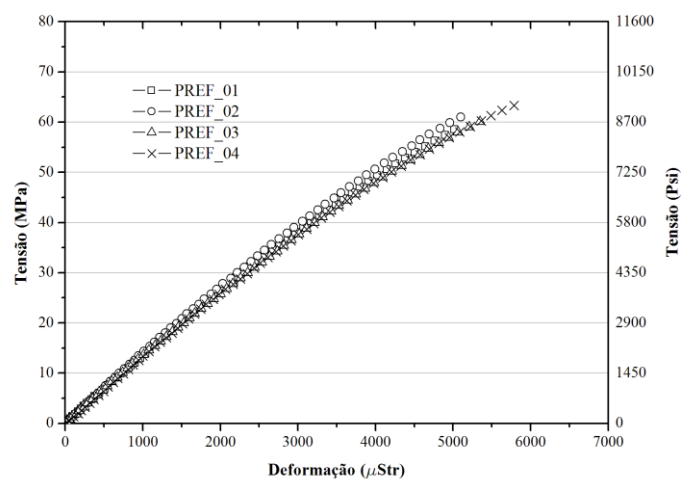


Figura A.01 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão - PREF

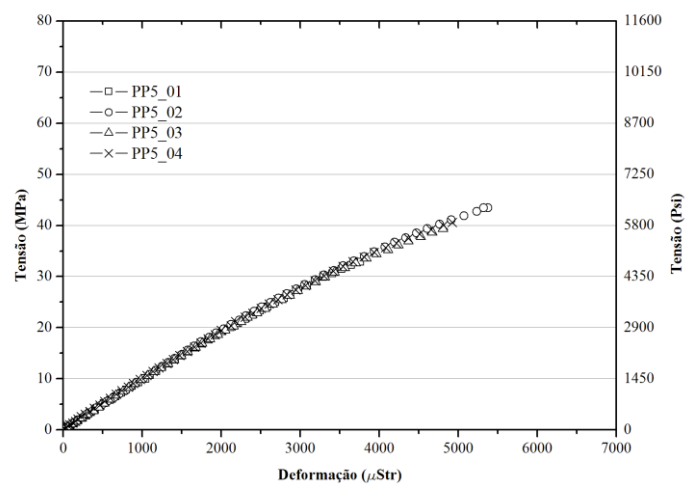


Figura A.02 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão - PP5

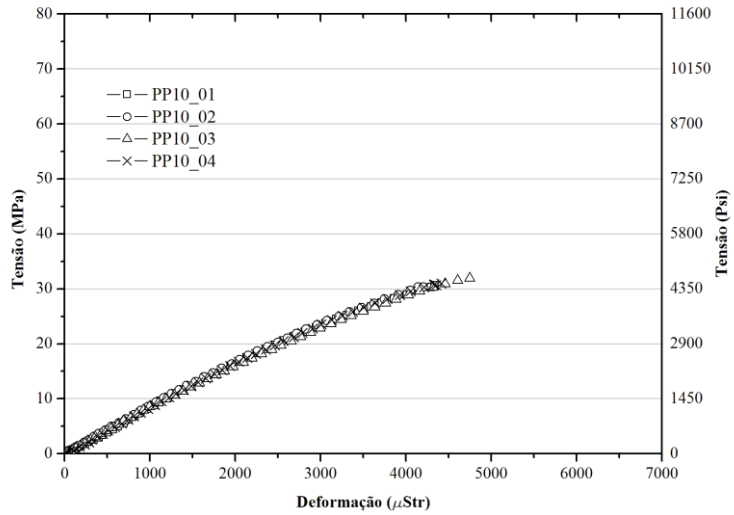


Figura A.03 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão - PP10

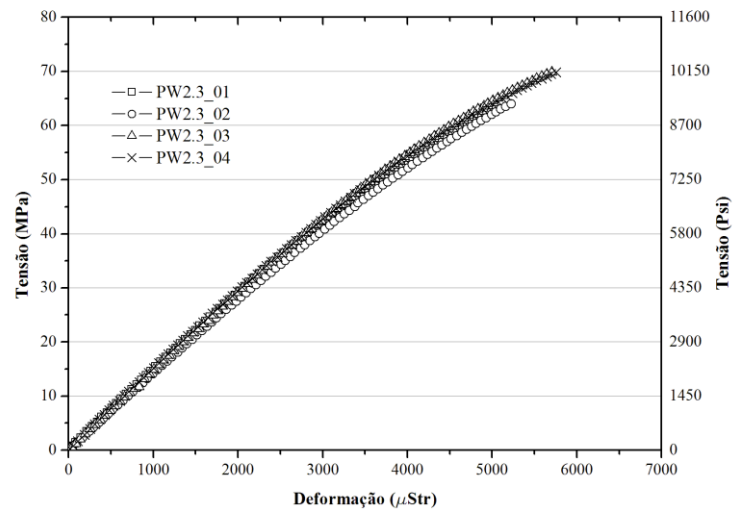


Figura A.04 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão – PW2,3

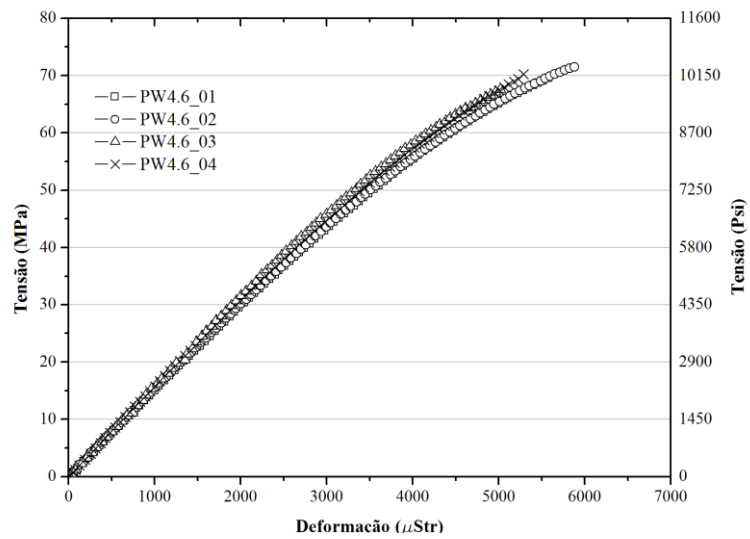


Figura A.05 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão – PW4,6

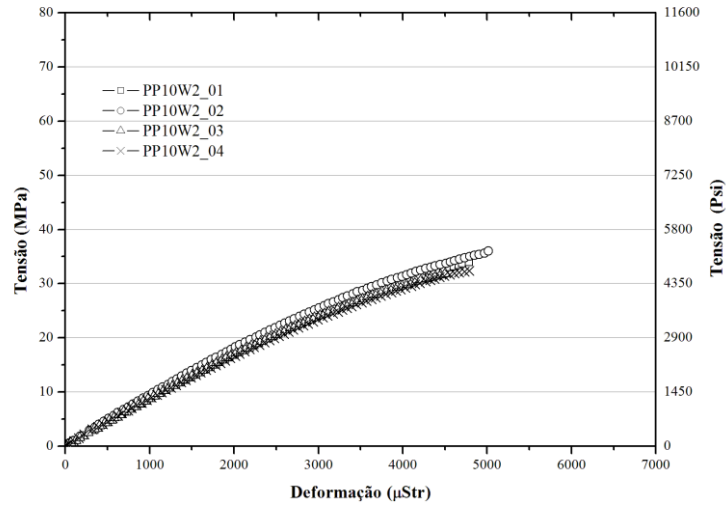


Figura A.06 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão – PP10W2

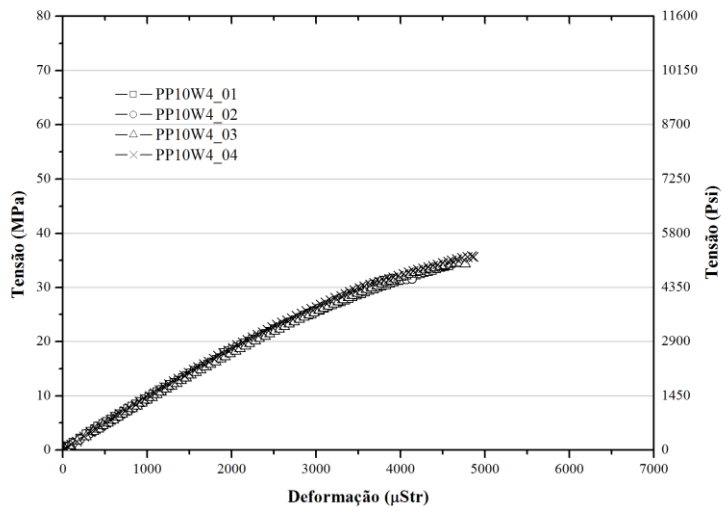


Figura A.07 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão – PP10W4

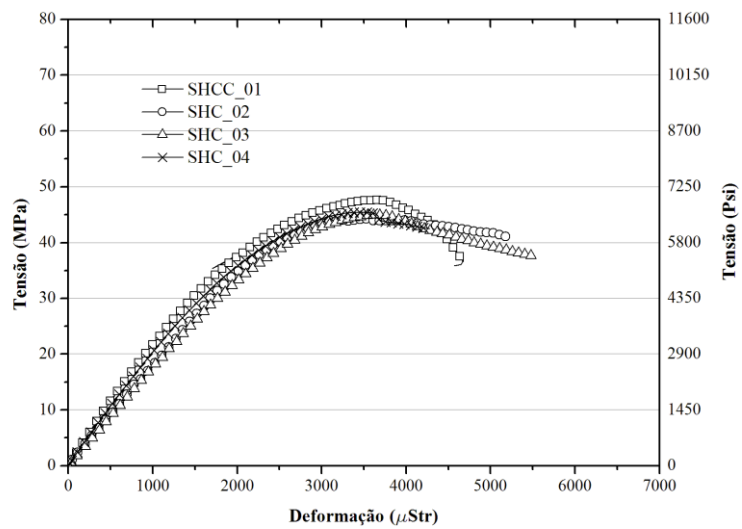


Figura A.08 – Curvas tensão *versus* deformação na compressão – SHCC

ANEXO B – CURVAS CARGA *versus* DESLOCAMENTO DAS AMOSTRAS

As figuras B.01 a B.08 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento dos corpos-de-prova ensaiados à tração na flexão das formulações propostas.

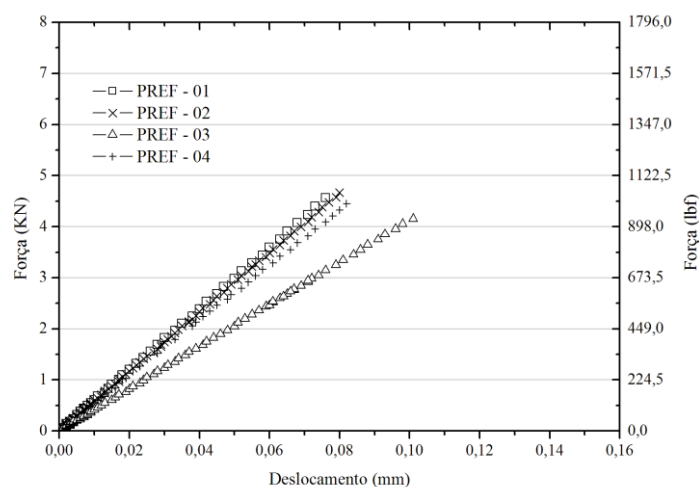


Figura B.01 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PREF

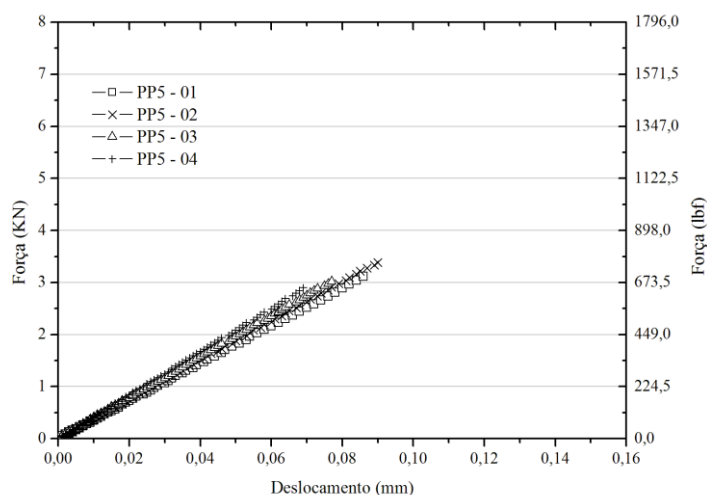


Figura B.02 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PP5

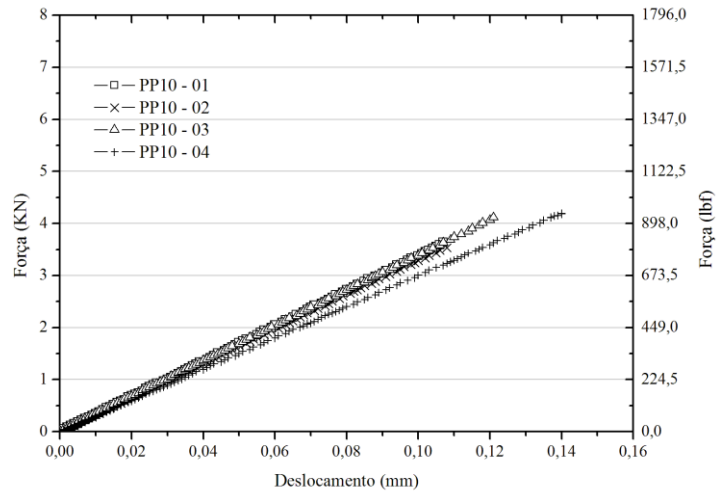


Figura B.03 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PP10

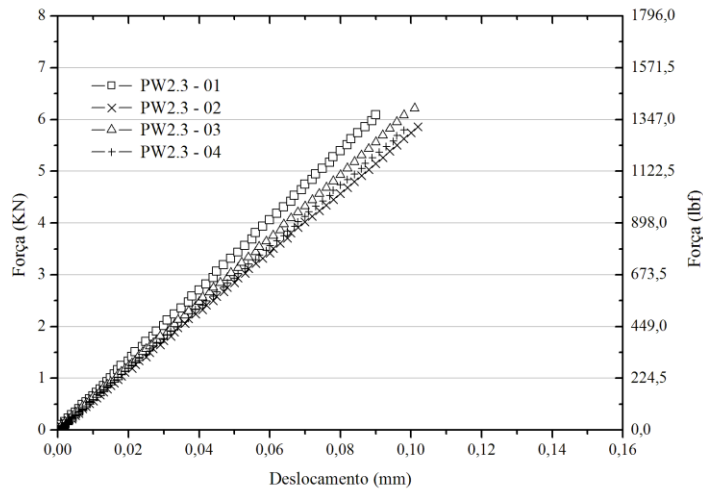


Figura B.04 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PW2,3

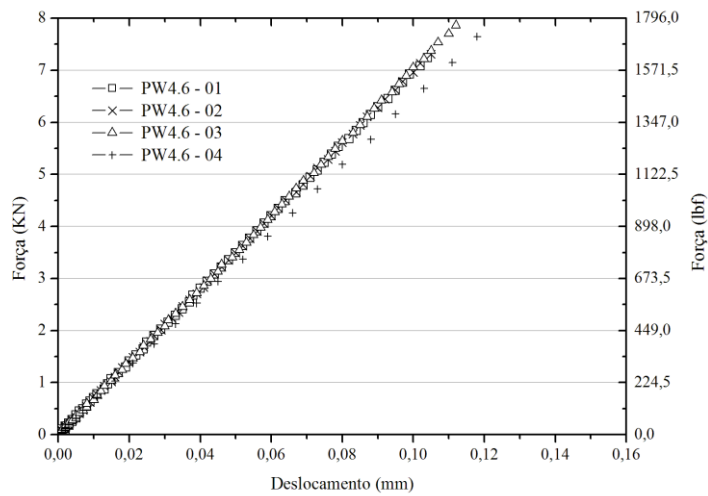


Figura B.05 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PW4,6

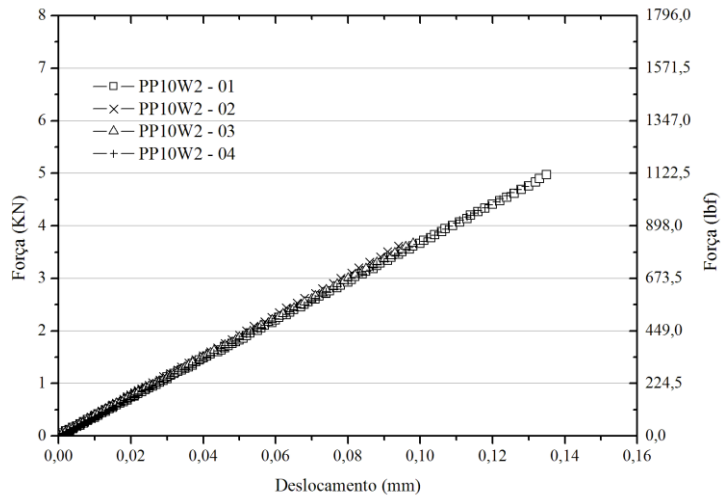


Figura B.06 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PP10W2

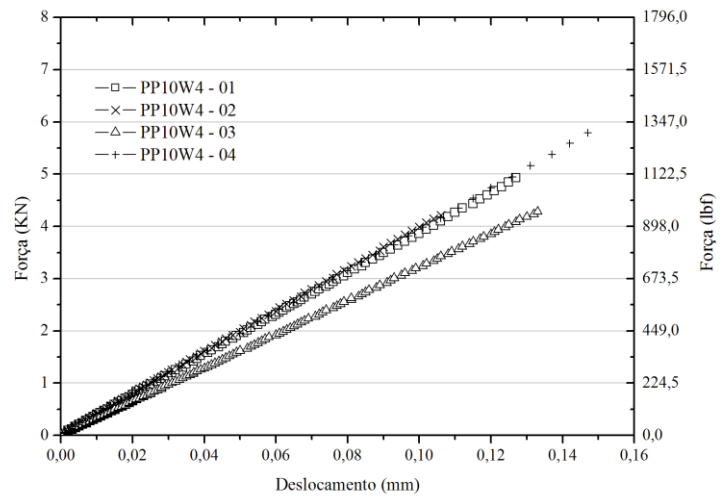


Figura B.07 – Curvas carga *versus* deslocamento - tração na flexão – PP10W4

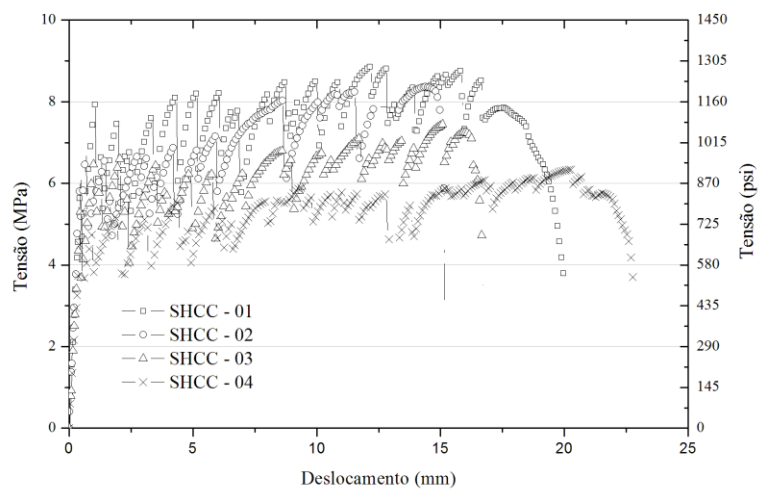


Figura B.08 – Curvas tensão *versus* deslocamento - tração na flexão – SHCC

ANEXO C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

As tabelas C.01 a C.13 apresentam a comparação das médias utilizando o teste de Tukey para os resultados obtidos na caracterização no estado fresco e a caracterização física das formulações estudadas. As tabelas C.14 a C.18 apresentam as análises dos ensaios de compressão. As tabelas C.19 e C.21 apresentam as análises dos ensaios de tração na flexão.

Tabela C.01 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da Reologia

Propriedades	G _L tratamento	G _L resíduo	F Calculado	F tabelado
Viscosidade	6	7	63,72	3,87
Limite de escoamento	6	14	133,97	2,85
Gel inicial	6	14	30,72	2,85
Gel final	6	14	65,79	2,85

Tabela C.02 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Viscosidade Plástica)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	0,33	-	-
PP5	0,63	-0,30	Sim
PP10	0,69	-0,36	Sim
PW2,3	0,39	-0,06	Não
PW4,6	0,43	-0,10	Não
PP10W2	0,82	-0,49	Sim
PP10W4	0,80	-0,47	Sim

Tabela C.03 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Limite de escoamento)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	2,72	-	-
PP5	8,09	-5,37	Sim
PP10	8,94	-6,22	Sim
PW2,3	2,81	-0,09	Não
PW4,6	4,51	-1,79	Sim
PP10W2	11,84	-9,12	Sim
PP10W4	13,37	-10,65	Sim

Tabela C.04 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Gel Inicial)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	2,30	-	-
PP5	1,79	0,51	Não
PP10	3,32	-1,02	Sim
PW2,3	1,79	0,51	Não
PW4,6	2,30	0	Não
PP10W2	3,32	-1,02	Sim
PP10W4	3,83	-1,53	Sim

Tabela C.05 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Gel Final)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	5,62	-	-
PP5	8,94	-3,32	Sim
PP10	9,71	-4,09	Sim
PW2,3	5,11	0,51	Não
PW4,6	5,62	0	Não
PP10W2	10,73	-5,11	Sim
PP10W4	12,01	-6,39	Sim

Tabela C.06 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise do estado fresco

Propriedades	G_L tratamento	G_L resíduo	F Calculado	F tabelado
Filtado	4	14	15930	3,11
Peso Específico Normal	6	14	54,13	2,85
Peso Específico Pressurizado	6	14	30,17	2,85

Tabela C.07 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Filtrado)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	227	-	-
PP5	96	131	Sim
PP10	34	193	Sim
PW2,3	208	19	Sim
PW4,6	183	44	Sim
PP10W2	34	193	Sim
PP10W4	36	191	Sim

Tabela C.08 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Peso específico normal)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	1,74	-	-
PP5	1,70	0,04	Não
PP10	1,61	0,13	Sim
PW2,3	1,76	-0,02	Não
PW4,6	1,79	-0,05	Sim
PP10W2	1,63	0,11	Sim
PP10W4	1,68	0,06	Sim

Tabela C.09 – Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Peso específico pressurizado)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	1,74	-	-
PP5	1,70	0,04	Sim
PP10	1,66	0,08	Sim
PW2,3	1,79	-0,05	Não
PW4,6	1,79	-0,05	Não
PP10W2	1,64	0,1	Sim
PP10W4	1,72	0,02	Sim

Tabela C.10 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise de massa específica, absorção e porosidade

Propriedades	G _L tratamento	G _L resíduo	F calculado	F tabelado
Massa Específica	7	16	157,22	2,66
Absorção	7	16	286,92	2,66
Porosidade	7	16	158,64	3,24

Tabela C.11 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (massa específica)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	1,73	-	-
PP5	1,6	0,13	Sim
PP10	1,54	0,19	Sim
PW2,3	1,76	-0,03	Não
PW4,6	1,77	-0,04	Não
PP10W2	1,52	0,21	Sim
PP10W4	1,54	0,19	Sim
SHCC	1,87	-0,14	Sim

Tabela C.12 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (absorção)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	3,23	-	-
PP5	3,45	-0,22	Sim
PP10	4,4	-1,17	Sim
PW2,3	2,87	0,36	Sim
PW4,6	2,65	0,58	Sim
PP10W2	4,17	-0,94	Sim
PP10W4	3,85	-0,62	Sim
SHCC	3,18	0,05	Não

Tabela C.13 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Porosidade)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	5,58	-	-
PP5	5,65	-0,07	Não
PP10	6,77	-1,19	Sim
PW2,3	5,13	0,45	Sim
PW4,6	4,63	0,95	Sim
PP10W2	6,36	-0,78	Sim
PP10W4	5,96	-0,38	Sim
SHCC	5,93	-0,35	Sim

Tabela C.14 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da resistência à compressão

Propriedades	G _L tratamento	G _L resíduo	F Calculado	F tabelado
Resistência à Compressão	7	24	273,60	2,42
Módulo de Elasticidade	7	24	397,27	2,42
Deformação Pico	7	21	21,15	2,42
Poisson	7	16	2,95	2,66

Tabela C.15 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (resistência à compressão)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	61,3	-	-
PP5	40,6	-20,7	Sim
PP10	31,1	-30,2	Sim
PW2,3	67,1	5,8	Sim
PW4,6	69,9	8,6	Sim
PP10W2	33,9	-27,4	Sim
PP10W4	34,6	-26,7	Sim
SHCC	45,9	-15,4	Sim

Tabela C.16 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (módulo de elasticidade)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	13,2	-	-
PP5	9,7	-3,5	Sim
PP10	8,4	-4,8	Sim
PW2,3	14,5	1,3	Sim
PW4,6	15,4	2,2	Sim
PP10W2	8,7	-4,5	Sim
PP10W4	9,3	-3,9	Sim
SHCC	21,4	8,2	Sim

Tabela C.17 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (deformação máxima na compressão)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	5383	-	-
PP5	5002	-381	Não
PP10	4435	-948	Sim
PW2,3	5455	72	Não
PW4,6	5458	75	Não
PP10W2	4808	-575	Não
PP10W4	4609	-774	Sim
SHCC	3381	-2002	Sim

Tabela C.18 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (Coeficiente de Poisson)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	0,21	-	-
PP5	0,23	0,02	Não
PP10	0,23	0,02	Não
PW2,3	0,22	0,01	Não
PW4,6	0,20	-0,01	Não
PP10W2	0,22	0,01	Não
PP10W4	0,23	0,02	Não
SHCC	0,20	-0,01	Não

Tabela C.19 – Parâmetros estatísticos utilizados na análise da resistência à tração

Propriedades	G_L tratamento	G_L resíduo	F Calculado	F tabelado
Resistência à Tração	6	21	12,035	2,57
Deslocamento	6	21	13,49	2,57

Tabela C.20 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (resistência à tração na flexão)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	6,5	-	
PP5	4,6	-1,9	Sim
PP10	5,3	-1,2	Não
PW2,3	7,2	0,7	Não
PW4,6	8,2	1,7	Sim
PP10W2	6,4	-0,1	Não
PP10W4	7,0	0,5	Não

Tabela C.021 - Comparação das médias utilizando o teste de Tukey (deslocamento máximo na flexão)

Formulações	Médias	Diferença entres as médias	Estatisticamente diferente
PREF	0,09	-	-
PP5	0,08	-0,01	Não
PP10	0,11	0,02	Sim
PW2,3	0,08	-0,01	Não
PW4,6	0,09	0	Não
PP10W2	0,12	0,03	Sim
PP10W4	0,13	0,04	Sim

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](#)