

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA
COM FÍLER DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Marcela Giacometti de Avelar

Vitória - ES
2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CONCRETO
AUTO-ADENSÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA COM FÍLER DE
ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Marcela Giacometti de Avelar

Orientador:
Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

Vitória – ES
2008

Catálogo

Marcela Giacometti de Avelar

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CONCRETO
AUTO-ADENSÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA COM FÍLER DE
ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em _____ por:

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama – Orientador, UFES

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão – Co-orientador, UFES

Prof. Dr. Ing. Marcel Olivier Ferreira de Oliveira – Examinador interno, UFES

Prof. Dr. Washington Almeida Moura – Examinador externo, UEFS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

*Dedico este trabalho à Dr^a. Dionilde Giacometti (in memorian),
minha mãe, e quem, nos momentos de tristeza,
passava as mãos em meus cabelos e me dizia
que sempre existe o dia de amanhã para recomeçar.*

AGRADECIMENTOS

A conclusão dessa pesquisa não foi uma tarefa fácil. A falta de incentivo financeiro e familiar; de recursos materiais e humanos e, principalmente, do meu raso conhecimento em uma área tão específica, tornou por muitas vezes o trabalho insuportável. No entanto, com o fim dessa etapa, pude perceber que meu crescimento intelectual e pessoal foi enorme, graças ao esforço coletivo das inúmeras pessoas que não posso deixar de agradecer.

Em um primeiro grupo, gostaria de agradecer ao professor Calmon, por ter me concedido a honra de sua orientação e amizade, por defendido e brigado, às vezes de forma dura, pela qualidade desse trabalho. Aos professores Fernando Avancini Tristão e Fernando Lordello pela disposição em ajudar na execução dos ensaios e nos demais contratempos do programa experimental. As professoras Livia e Paula Baião do CEFETES, pela amizade e incentivo no início do mestrado.

Em segundo lugar, agradeço ao colega e amigo de longa data, o Eng. Marcelo Meneguelli, cuja inteligência e obstinação foram a verdadeira alma desta pesquisa. Foi uma grande sorte minha o ter reencontrado no mestrado. Aos demais colegas de mestrado, Márcia, Andre, Liliam, Flávia, Leila e, em especial, ao Zé Carlos (Borba), que com sua alegria nordestina, tornou as longas horas de trabalho pesado mais agradáveis. Ao colega e amigo, o Eng. Mirko Moratti, pela sua enorme contribuição ao compilar praticamente todo o estado da arte em Concretos auto-adensáveis e por providenciar a construção dos aparatos para os ensaios reológicos.

Registro também meus eternos agradecimentos aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção – LEMAC, Márcio, Tião, Roger e, especialmente, a Carlos Maria (o Carlinhos), que com sua experiência e dedicação foi uma figura essencial na elaboração dos ensaios de todas as etapas deste trabalho. Agradeço ainda, ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da UFES, a Fundação Ceciliano Abel de Almeida – FCAA e a PETROBRÁS, pela ajuda de custo concedida e a FURNAS Centrais Elétricas pela elaboração de ensaios de grande importância para a pesquisa.

Créditos especiais às empresas que forneceram gratuitamente os materiais para o trabalho, sem os quais, seria impossível financeiramente executar um programa experimental tão extenso. São elas: Siderúrgica Arcelor Mittal, na figura do Eng. Paulo Lana, pelas escórias de aciaria LD; a Cimentos Mizu, pela escória granulada de alto-forno; a Holcim S.A, por nos

fornecer mais de 1 tonelada de cimento CPV – ARI; a Cimento Pozosul, pela cinza volante; a Mineradora NEMER, pela calcita; a BASF, pelo aditivo superplastificante e; a VANTEC – S/A, pelo peneiramento da escória de aciaria.

Finalmente, agradeço a meus familiares, que apesar de não serem grandes incentivadores da minha vocação acadêmica, me deram a oportunidade de estudar nas melhores escolas e universidades desse país. Ao meu “*namorado*”, Marlos, que com seu amor e paciência soube entender os momentos de ausência e agüentar meu mau-humor, principalmente na fase final dessa dissertação.

*“Se quisermos ter menos lixo, precisamos
rever nosso paradigma de felicidade humana.*

*Ter menos lixo significa ter:
mais qualidade, menos quantidade;
mais cultura, menos símbolos de status;
mais esporte, menos material esportivo;
mais tempo para as crianças, menos dinheiro trocado;
mais animação, menos tecnologia;
mais carinho, menos presente.”*

(GRIMBERG E BLAUTH, 1998)

RESUMO

Giacometti, M.A. **Estudo das propriedades reológicas de Concreto Auto-adensável com filer de escória de aciaria LD**. 238p. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, Espírito Santo.

Marcela Giacometti de Avelar¹

O concreto auto-adensável vêm sendo reconhecido pelo meio técnico – científico como uma das maiores inovações na tecnologia do concreto. Entretanto, sua utilização ainda é modesta se forem levadas em consideração todas as vantagens que o material oferece. Um dos motivos para a barreira de aceitação é de ordem econômica. Embora o CAA utilize os mesmos componentes do concreto convencional, o ônus adicional vem da necessidade de caracterização através de ensaios não convencionais e das proporções usadas em sua dosagem, principalmente da grande quantidade de finos. A substituição desses finos por resíduos industriais, tais como: escória de alto forno, cinza volante e, nessa pesquisa, a escória de aciaria LD, são algumas das alternativas que podem minimizar os custos e reduzir o impacto ambiental.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi o de estudar Concretos Auto-Adensáveis de Alta Resistência (CADAR), no estado fresco, produzidos com cimento Portland CP V-ARI, superplastificante de última geração base policarboxilato, agregado graúdo ($DMC \leq 12,5\text{mm}$), agregado miúdo ($DMC \leq 2,4\text{mm}$) e quatro tipos de adições compostas da seguinte forma: 100% de escória de aciaria LD moída (100EALD), 100% de filer calcário (100CAL), 70% de escória de aciaria LD moída e 30% de escória granulada de alto-forno (70EALD30EGAF), e uma composição de 85% de escória de aciaria LD moída com 15% de cinza volante (85EALD15CV), por meio dos principais ensaios reológicos propostos pela literatura.

A relação água/cimento estabelecida foi de 0,35 e os concretos foram dosados de acordo com a metodologia proposta pelo professor Paulo César Gomes, em 2002. A pesquisa desenvolveu-se em cinco etapas, a saber: seleção e caracterização dos materiais, estudo de finos, estudo das pastas, estudo em argamassas e por fim, o desenvolvimento dos concretos. Na primeira etapa, os materiais foram selecionados de acordo com os requisitos técnicos e com sua disponibilidade no mercado local. Para análise dos finos foram realizados os ensaios de espalhamento com a forma tronco-cônica e funil V para argamassas. A definição da relação filer/cimento e a dosagem de saturação dos aditivos das pastas foram obtidas por meio dos ensaios mini-*slump* e cone de Marsh, respectivamente. O estudo de argamassas teve como objetivo realizar as alterações necessárias na relação f/c e dosagem de saturação do superplastificante. Finalmente, na quinta etapa, foi determinado o esqueleto granular e os concretos foram produzidos com teores de pasta variando de 38% a 44%, sendo avaliados por meio dos ensaios reológicos: funil V, *slump flow*, *slump flow* com anel J, caixa L, caixa U, caixa de preenchimento e tubo U além da determinação da resistência à compressão aos 7 dias conforme a metodologia para obtenção de CADAR.

Do ponto de vista reológico, o CAA com escória de aciaria LD atendeu as três principais propriedades de auto-adensamento: capacidade de preenchimento, capacidade de passar pelas barras de armadura e resistência à segregação. Além disso, este concreto apresentou características comparáveis ao concreto de referência (100CAL) e aos demais concretos desenvolvidos na pesquisa.

Palavras-Chave: concreto auto-adensável, pastas, reologia, escória de aciaria LD, escória de alto-forno, cinza volante.

¹ Engenheira Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

ABSTRACT

Giacometti, M. A. **Study of Rheological Properties of Self Compacting Concrete with BOF steel slag Filler.** 238p. Master's Dissertation – Technological Center. Federal University of Espírito Santo. Vitória, Espírito Santo.

Marcela Giacometti de Avelar²

Self compacting concrete has been recognized in the technical-scientific milieu as one of the greatest innovations in concrete technology. Its use, however, is still modest considering all the advantages this material offers. One of the reasons for this acceptance barrier concerns economy. Although SCC uses the same components of conventional concrete, the additional costs derive from the need to characterize it through non-conventional tests and from the proportions used in its mix design, especially the large amount of fines. These fines may be replaced with industrial waste, such as: Blast furnace slag, fly ash and, in this study, BOF steel slag, are some of the alternatives that may minimize costs and reduce environmental impact.

Thus, this study aimed at studying the high-strength Self compacting concrete (HSSCC) in its fresh state, produced with Portland cement CP V-ARI, cutting-edge polycarboxylate-based superplasticizer, coarse aggregate (DMC \leq 12,5mm), fine aggregate (DMC \leq 2,4mm) and four types of admixtures composed as follows:

100% of ground BOF steel slag (*100EALD*), 100% of limestone filler (*100CAL*), 70% of ground BOF steel slag and 30% of granulated blast furnace slag (*70EALD30EGAF*), and a compound of 85% of ground BOF steel slag with 15% of fly ash (*85EALD15CV*), by means of the main rheological tests proposed by relevant literature.

The established water/cement ratio was 0.35 and the concretes were dosed in compliance with the methodology proposed by Professor Paulo César Gomes, in 2002. The study was developed in five stages: Selection and characterization of materials, study of fines, study of pastes, study of mortars and, finally, development of concretes. In the first stage, the materials were selected according to technical requirements and local market availability. Spread tests with trunk-conic formwork and V-funnel for mortars were carried out in order to analyze the fines. The definition of filler/cement ratio and the saturation dosage of paste admixtures were obtained from mini-slump and Marsh Cone tests, respectively. Mortar study aimed at carrying out the necessary alteration in the *f/c* ratio and saturation dosage of the superplasticizer. In order to develop this stage, spread and flow time tests were performed with the same equipment used in the fine analysis. Finally, in the fifth stage, the granular skeleton was determined and concretes produced with paste contents ranging from 38 to 44%, analyzed through the rheological tests: V-funnel, slump flow, slump flow with J-ring, L-box, U-box, fill-box and U-pipe, besides the compressive strength determination at 7 days, in compliance with the methodology for obtaining HSSCC.

From the rheological point of view, SCC with BOF steel slag met three of the main self-compacting property standards: Filling ability, passing ability through the reinforcement bars, and resistance to segregation. Furthermore, this concrete showed characteristics comparable to the referential concrete (*100CAL*) and the other concretes developed for this study.

Key-words: self compacting concrete, pastes, rheology, BOF steel slag, blast-furnace slag, fly ash.

² Civil Engineer, Master's Student of the Civil Engineering Post Graduation Program at Federal University of Espírito Santo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Equação de Bingham para um fluido (FERRARIS, 1999).....	43
Figura 2.2-	Princípio dos reômetros coaxiais (ESPING, 2007a).....	44
Figura 2.3-	Reômetro BTRHEOM (DE LARRARD <i>et al.</i> , 1997).....	45
Figura 2.4-	Variação da resistência à compressão com a relação a/c (DRUTA, 2003).....	47
Figura 2.5-	Variação da resistência à tração por compressão diametral com a relação a/c (DRUTA, 2003).....	48
Figura 2.6-	Resultados da difusividade para os concretos ensaiados (ZHU e BARTOS, 2003).....	51
Figura 2.7-	Comparativo de custos para fck de 20 MPa (CBIC, 2005).....	54
Figura 2.8-	Distribuição geográfica dos estudos de caso (DOMONE, 2006b).....	56
Figura 2.9-	Ponte Akashi Kaikyo (OUCHI, 1999).....	57
Figura 2.10-	Vigas T em CAA (OUCHI <i>et al.</i> , 2003).....	57
Figura 2.11-	Tanque de metano (KHRAPKO, 2007).....	57
Figura 2.12-	Túnel Yokohama (CAVALCANTI, 2006).....	58
Figura 2.13-	Igreja do Apostolo São Pedro (COLLEPARDI <i>et al.</i> , 2004).....	58
Figura 2.14-	World Trade Center (http://www.edilportale.com/).....	58
Figura 2.15-	Dois Iglus (BERNABEU e LABORDE, 2000).....	58
Figura 2.16-	Condomínio Cinque Terre (LAFARGE CORPORATION, 2007).....	59
Figura 2.17-	Estádio Nacional do Chile (CANALLE, 2004).....	59
Figura 2.18-	Banco Galícia (ZITZER <i>et al.</i> , 2004).....	59
Figura 2.19-	Museu Iberê Carmargo (www.archinet.com).....	59
Figura 2.20-	Metodologia para obter auto-adensamento (OKAMURA e OUCHI, 2003).....	61
Figura 2.21-	Esquema detalhado do método de dosagem de Gomes (2002).....	63
Figura 2.22-	<i>Slump flow</i> (CAVALCANTI, 2006).....	67

Figura 2.23-	(a) O cone e o técnico estão em firmemente plantados no piso. (b)- Técnico executando o ensaio de <i>slump-flow</i> invertido em uma base elevada (RAMSBURG, 2003).....	68
Figura 2.24-	Medida das alturas no anel-J (PCI, 2003).....	69
Figura 2.25-	Geometrias do funil V (GOMES, 2002).....	70
Figura 2.26-	Dimensões da caixa - L (EFNARC, 2002).....	71
Figura 2.27-	Espaçamento entre as barras e medidas do T ₂₀ e T ₄₀ (SONEBI <i>et al.</i> , 2000).....	71
Figura 2.28-	Dimensões (mm) da caixa U e detalhe dos obstáculos (MANUEL, 2005).....	73
Figura 2.29-	Medidas da caixa U recomendadas (EFNARC, 2002).....	73
Figura 2.30-	Medidas da caixa de preenchimento recomendadas (EFNARC, 2002).....	74
Figura 2.31-	Ensaio do tubo U (CAVALCANTI, 2006).....	75
Figura 2.32-	Utilização de superplastificantes: alta fluidez a uma relação a/c constante para concretos auto-adensáveis (a). Redução da relação a/c para fabricação de concretos mais duráveis (aplicação: concreto de alta-resistência) (b) (GREISSER, 2002).....	79
Figura 2.33-	Capacidade de exsudação em função do <i>slump</i> para concreto sem aditivos (COLLEPARDI, 2001).....	80
Figura 2.34-	Capacidade de exsudação em função do <i>slump</i> para concreto com aditivos (COLLEPARDI, 2001).....	80
Figura 2.35-	Micrografia da cinza volante: a) aumento de 5000x; b) aumento de 10.000x (ABREU, 2004).....	86
Figura 2.36-	Micrografia do cimento Portland (esquerda) e da sílica ativa (direita) para exemplificar a ordem de magnitude (SFA, 2005).....	87
Figura 2.37-	Microscopia eletrônica de varredura da escória granulada de alto-forno (BOURGUIGNON, 2004).....	90
Figura 2.38-	Fluxograma da fabricação do aço (PENA, 2004).....	92
Figura 2.39-	Esquema de produção do aço nas usinas LD e EAF (MASUERO <i>et al.</i> , 2004).....	93

Figura 2.40-	Seqüência de operação do conversor LD (MOREIRA e LANA, 200-?).....	95
Figura 2.41-	Planta de Britagem, classificação e separação magnética (SILVA e LEITE, 200-?).....	96
Figura 2.42-	DRX de uma escória de aciaria LD resfriada lentamente (MACHADO, 2000).....	98
Figura 2.43-	Características expansivas de um pavimento rodoviário construído com escória de aciaria LD – Ouro Branco – MG (GUMIERI, 2002).....	100
Figura 2.44-	Erupções na pista (SILVA, <i>apud</i> BRANCO, 2004).....	100
Figura 2.45-	Possibilidades de reciclagem da escória de aciaria (PENA, 2004).....	104
Figura 2.46 -	Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas de traço 1:1,5 (MASUERO, 2001).....	105
Figura 2.47 -	Resistência à compressão, ao longo do tempo de argamassas de traço 1:1,5 com escórias de alto forno (MASUERO, 2001).....	106
Figura 3.1-	Fluxograma do programa experimental.....	112
Figura 3.2-	Granulometria a <i>laser</i> do CP V – ARI.....	122
Figura 3.3-	Difratograma do CP V-ARI.....	123
Figura 3.4-	Granulometria a <i>laser</i> da cinza volante.....	124
Figura 3.5-	Difratograma da cinza volante.....	125
Figura 3.6-	Granulometria a <i>laser</i> da escória granulada de alto-forno.....	126
Figura 3.7-	Difratograma da escória granulada de alto-forno moída.....	127
Figura 3.8-	Granulometria a <i>laser</i> do fíler calcário.....	128
Figura 3.9-	Difratograma do fíler calcário.....	128
Figura 3.10-	Preparação das escórias de aciaria LD: (a) Escória no pátio da indústria de insumos; (b) Escória antes da moagem estocada no LEMAC; (c) Quarteamento da escória moída; (d) Escória armazenada em bombonas plásticas.....	129
Figura 3.11-	Fluxograma ilustrativo do processo de preparação das escórias.	130
Figura 3.12-	Granulometria a <i>laser</i> da escória de aciaria LD.....	131

Figura 3.13-	Difratograma da escória de aciaria LD.....	132
Figura 3.14-	Composição de curvas granulométricas do cimento e dos finos utilizados na pesquisa.....	133
Figura 3.15-	Curvas granulométricas do agregado miúdo e graúdo.....	135
Figura 3.16-	Forma tronco cônica (CALMON <i>et al.</i> , 2006).....	139
Figura 3.17-	Gráfico genérico de $\Gamma_m \times (V_a/V_f)$ mostrando o comportamento de dois finos distintos (a); Dimensões do tronco-cônico e forma das medições dos diâmetros de espalhamento (b) Fonte: Domonte e Hsi-Wen (1997) adaptado.....	140
Figura 3.18-	Dimensões do funil V (EFNARC, 2002).....	141
Figura 3.19-	Funil V utilizado na pesquisa (CALMON <i>et al.</i> , 2006).....	141
Figura 3.20-	Imagens capturadas pela câmera digital para o ensaio do funil V.....	141
Figura 3.21-	Cone de Marsh (CAVALCANTI, 2006).....	145
Figura 3.22-	Curva log $T_{FL} \times sp/c$ (%) (CAVALCANTI, 2006).....	145
Figura 3.23-	Mini – <i>Slump</i> (CALMON <i>et al.</i> , 2006).....	146
Figura 3.24-	Montagem da câmera para a realização dos ensaios.....	147
Figura 3.25-	Seqüência de imagens para obtenção do T_{115} e diâmetro final (D_{FMC}).....	148
Figura 3.26-	Esquema de obtenção do teor ótimo de pasta quando o concreto com teor de pasta igual a 38% atinge os requisitos de auto-adensamento.....	150
Figura 3.27-	Esquema de obtenção do teor ótimo de pasta quando o concreto com teor de pasta igual a 38% não atinge os requisitos de auto-adensamento.....	150
Figura 3.28-	Seqüência de colocação dos materiais na betoneira.....	152
Figura 3.29-	Fluxograma de produção dos concretos.....	153
Figura 3.30-	Seqüência de execução do ensaio de espalhamento (<i>Slump flow</i>).....	155
Figura 3.31-	Seqüência de execução do ensaio de espalhamento em conjunto com o anel J.....	156
Figura 3.32-	Seqüência de execução do ensaio do funil – V.....	157
Figura 3.33-	Caixa – L fabricada para a execução do ensaio.....	158

Figura 3.34-	Seqüência para determinação dos tempos T_{20} e T_{40} registrados pela câmara digital.	159
Figura 3.35-	Seqüência de execução do ensaio da caixa - U.....	160
Figura 3.36-	Caixa de preenchimento utilizada na pesquisa.....	161
Figura 3.37-	Seqüência de execução do ensaio da caixa de preenchimento.....	162
Figura 3.38-	Seqüência de execução do ensaio do tubo U.....	164
Figura 3.39-	Moldagem dos corpos-de-prova.....	166
Figura 3.40-	Cura dos corpos-de-prova em câmara úmida.....	166
Figura 3.41-	Retificação dos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão.....	167
Figura 3.42-	Prensa hidráulica utilizada.....	167
Figura 3.43-	Corpo-de-prova no momento da ruptura.....	167
Figura 4.1-	Gráfico $V_a/V_f \times \Gamma_m$	171
Figura 4.2-	Espalhamento para mistura de cimento com $V_a/V_f = 1,70$	172
Figura 4.3-	Espalhamento das misturas com 100% EALD para diversos valores de V_a/V_f	172
Figura 4.4-	Espalhamento para as misturas com 70EALD30EGAF para diversos valores de V_a/V_f	173
Figura 4.5-	Espalhamento para as misturas com 85EALD15CV para diversos valores de V_a/V_f	173
Figura 4.6-	Espalhamento para as misturas com 100CAL para diversos valores de V_a/V_f	174
Figura 4.7-	Gráfico $R_m \times V_a/V_f$	175
Figura 4.8-	Gráfico da dosagem de superplastificante (P100EALD).....	176
Figura 4.9-	Gráfico %SSP x T_{115} (100EALD).....	176
Figura 4.10-	Seqüência de obtenção dos valores de T_{115} e espalhamento final para P100CAL ideal.....	177
Figura 4.11-	Gráfico da dosagem de superplastificante (P70EALD30EGAF).....	178

Figura 4.12-	Gráfico %SSP x T ₁₁₅ (P70EALD30EGAF).....	178
Figura 4.13-	Seqüência de obtenção dos valores de T ₁₁₅ e espalhamento final para P70EALD30EGAF.....	179
Figura 4.14-	Gráfico da dosagem de superplastificante (P85EALD15CV).....	180
Figura 4.15-	Gráfico %SSP x T ₁₁₅ (P85EALD15CV).....	180
Figura 4.16-	Seqüência de obtenção dos valores de T ₁₁₅ e espalhamento final para P85EALD15CV.....	181
Figura 4.17-	Gráfico da dosagem de superplastificante (P100CAL).....	182
Figura 4.18-	Gráfico %SSP x T ₁₁₅ (100CAL).....	182
Figura 4.19-	Seqüência de obtenção dos valores de T ₁₁₅ e espalhamento final para P100CAL.....	183
Figura 4.20-	Gráfico da dosagem de superplastificante (P100CIM).....	184
Figura 4.21-	Dosagem de saturação das pastas.....	185
Figura 4.22-	(a) – Gráfico da Dosagem de superplastificante (P100EALD); (b) Gráfico da Dosagem de superplastificante (P70EALD30EGAF); (c) Gráfico da Dosagem de superplastificante (P85LD15CV); (d) Gráfico da Dosagem de superplastificante (P100CAL).....	186
Figura 4.23-	(a)Gráfico %SP x T ₁₁₅ (P100EALD); (b) Gráfico%SP x T ₁₁₅ (P70EALD30EGAF); (c) Gráfico %SP x T ₁₁₅ (P85EALD15CV); (d) Gráfico %SP x T ₁₁₅ (P100CAL).....	187
Figura 4.24-	Ensaio de espalhamento para ARG100EALD com 38% de pasta.....	189
Figura 4.25-	Composição do esqueleto granular.....	189
Figura 4.26-	Ensaio de <i>slump flow</i> com anel J para CON100EALD_38_1,20_0,40.....	191
Figura 4.27-	Ensaio de <i>slump flow</i> para CONC100EALD_40_1,20.....	192
Figura 4.28-	Execução do ensaio <i>Slump flow</i> com anel J para CON100EALD_42_1,15.....	192
Figura 4.29-	Resultado do ensaio de espalhamento e caixa – L para CON100EALD_42_1,20_0,40.....	193
Figura 4.30-	Resultados dos ensaios de Caixa L e U para CONC_44_1,20_0,40.....	194
Figura 4.31-	Ensaio da caixa de preenchimento.....	194

Figura 4.32-	<i>Slump flow</i> com anel J de CON70EALD30EGAF_38_1,35_0,40.....	196
Figura 4.33-	Ensaio no concreto CON70EALD30EGAF_40_1,35.....	196
Figura 4.34-	<i>Slump flow</i> e <i>slump flow</i> com anel J para CON70EALD30EGAF_42_1,35_0,40.....	197
Figura 4.35-	Ensaio realizado no concreto CON70EALD30EGAF_42_1,35.....	197
Figura 4.36-	Resultados dos ensaios para CON85EALD15CV_38_1,35.....	199
Figura 4.37-	Ensaio para CON85EALD15CV_40_1,35.....	200
Figura 4.38-	Resultados dos ensaios para CON85EALD15CV_42_1,35.....	200
Figura 4.39-	Caixa de preenchimento para CON85EALD15CV_42_1,35_0,40.....	201
Figura 4.40-	Concreto produzido com 100% de fíler calcário e 1,25% de superplastificante.....	202
Figura 4.41-	Ensaio para CON100CAL_42_1,20_0,40.....	203
Figura 4.42-	Ensaio realizado no CON100CAL_44_0,85_0,30.....	204
Figura 4.43-	<i>Slump flow</i> com anel J.....	205
Figura 4.44-	Ensaio para CON100CAL_42_0,05_0,30.....	206

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1-	Eventos importantes relacionados ao CAA nos últimos 11 anos (BARTOS, 2000; RILEM, 2006).....	39
Quadro 2.2-	Lista de ensaios para as propriedades de trabalhabilidade do CAA (EFNARC, 2002).....	42
Quadro 2.3-	Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade (FERREIRA <i>et al.</i> ,2006).....	49
Quadro 2.4-	Proporções das misturas e coeficiente de permeabilidade dos concretos (ZHU e BARTOS, 2003).....	51
Quadro 2.5-	Custos relativos para 1m ³ de concreto com fck de 20 MPa.....	54
Quadro 2.6-	Aplicações do CAA.....	57
Quadro 2.7-	Misturas de CAA de resistência normal.....	65
Quadro 2.8-	Misturas para concretos auto-adensáveis de alta resistência (CADAR).....	66
Quadro 2.9-	Limites de resultados para o <i>slump flow</i> e T _{50cm} (TU TIKIAN, 2004).....	68
Quadro 2.10-	Valores limites de resultados e dimensões para o funil – V (TUTIKIAN, 2004).....	70
Quadro 2.11-	Limites de resultados e dimensões para a caixa L (TUTIKIAN, 2004).....	72
Quadro 2.12-	Limites de resultados e dimensões para a caixa U (TUTIKIAN, 2004).....	73
Quadro 2.13-	Limites de resultados e dimensões para a caixa de preenchimento (TUTIKIAN, 2004).....	74
Quadro 2.14-	Composições químicas da escória de aciaria tipo LD (PENA, 2004).....	96
Quadro 2.15-	Composição mineralógica típica das escórias LD (LÓPEZ,1989; SEKI <i>et al.</i> , 1986; MURPHY, 1997; BOYNTON, 1966, <i>apud</i> MACHADO, 2002).....	97

Quadro 2.16-	Propriedades físicas da escória de aciaria LD em comparação com agregados naturais estabilizados (GEISELER, 1996).....	99
Quadro 2.17-	Características das espécies químicas isoladas antes e após hidratação (WEAST, <i>apud</i> MACHADO, 2000).....	101
Quadro 2.18-	Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (MACHADO, 2000).....	101
Quadro 2.19-	Resumo dos tratamentos na escória de aciaria (PENA, 2004).....	102
Quadro 2.20-	Aplicações da escória de aciaria.....	108
Quadro 3.1-	Quadro resumo dos ensaios reológicos.....	165
Quadro 4.1 -	Siglas utilizadas para descrever os resultados.....	168
Quadro 4.2-	Exemplo da apresentação dos resultados.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Caracterização do CP V-ARI.....	121
Tabela 3.2 -	Caracterização da cinza volante.....	124
Tabela 3.3 -	Caracterização da escória granulada de alto-forno.....	126
Tabela 3.4 -	Caracterização do fíler calcário.....	127
Tabela 3.5 -	Caracterização da escória de aciaria LD.....	131
Tabela 3.6 -	Resumo da caracterização física do cimento e das adições minerais.....	132
Tabela 3.7 -	Caracterização química do cimento e das adições minerais.....	133
Tabela 3.8 -	Características físicas dos agregados empregados.	134
Tabela 3.9 -	Seqüência de mistura para finos + água.	136
Tabela 3.10 -	Seqüência de mistura para as pastas.	142
Tabela 3.11 -	Seqüência de mistura do concreto.	151
Tabela 4.1 -	Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de cimento Portland.	169
Tabela 4.2 -	Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de escória de aciaria LD.	169
Tabela 4.3 -	Resultados dos ensaios em finos para mistura com 70% de escória de aciaria LD e 30% escória granulada de alto forno.....	169
Tabela 4.4 -	Resultados dos ensaios em finos para mistura com 80% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante.....	170
Tabela 4.5 -	Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de fíler calcário.....	170
Tabela 4.6 -	Valores de β_p e E_p e água da pasta de consistência normal.....	170
Tabela 4.7 -	Pastas selecionadas.....	185
Tabela 4.8 -	Resultados dos ensaios em ARG100EALD.....	188
Tabela 4.9 -	Proporções e resultados da mistura com 100%EALD.....	190
Tabela 4.10 -	Taxa de agregado para o concreto com 100EALD.....	194
Tabela 4.11 -	Proporções e resultados da mistura com 70%EALD30%EGAF.....	195

Tabela 4.12-	Taxa de agregado para o concreto com 70EALD30EGAF.....	198
Tabela 4.13-	Proporções e resultados da mistura com 85%EALD15%CV.....	198
Tabela 4.14-	Taxa de agregado para o concreto com 85EALD15CV.....	201
Tabela 4.15-	Proporções e resultados da mistura com 100% CAL.....	202
Tabela 4.16-	Taxa de agregado para o concreto com 100CAL.....	205
Tabela 4.17-	Concretos auto-adensáveis selecionados.....	206

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ARI - Alta Resistência Inicial

ASA – Australian Slag Association

ASCE - American Society of Civil Engineers

ASTM - American Society for Testing Materials

BOF – Blast Oxygen Furnace

CAA - Concreto Auto-Adensável

CADAR - Concreto Auto-Adensável de Alta Resistência

CANMET - Canadian Centre for Mineral and Energy Technology

CBI - Swedish Cement and Concrete Research Institute

CBR – California Bearing Ratio

CP – Cimento Portland

CPCI - Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute

CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão

CTPL – Centre Technique et de Promotion des Laitiers Siderurgiques

DRX – Difração de raios-X

EAF – Eletric Arc Furnace

EFNARC - European Federation of National Trade Associations

FehS – Forschungsgemeinschaft Eisenhuttenschlacken – Associação de pesquisa para escória de alto-forno, escória de aciaria e outros.

FURNAS - Furnas Centrais Elétricas S. A.

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

ICON - International Center for Sustainable Development of Cement & Concrete

IRC - Institute for Research in Construction

ISIS - Intelligent Sensing for Innovative Structures

JRMCA - Japanese Ready-Mixed Concrete Association

LCPC - Laboratory Central Des Ponts et Chaussées

LD – Lins e Donawitz

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção da UFES

NBR NM - Norma Brasileira Registrada - Norma Mercosul

NDCC - Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil

NEXES – Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas

NORIE - Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

NSA - National Slag Association

PCI - Precast/Prestressed Concrete Institute

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages

SCC - Self-Compacting Concrete

SP - Aditivo Superplastificante (Superplasticizer)

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNESP – Universidade Estadual de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

SiO_2 – Sílica

C_3A - Aluminato tricálcico

CaCO_3 – Carbonato de Cálcio

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – Dolomita

C_2S - Silicato dicálcico

C_3S – Silicato tricálcico

CaO – Óxido de Cálcio

MgO - Óxido de Magnésio

Al_2O_3 - Trióxido de Alumínio

C_4AF - Ferroaluminato tetracálcico

$\alpha\text{-C}_2\text{S}$ – Bridgita

$\beta\text{-C}_2\text{S}$ - Larnita

τ – tensão de cisalhamento;

τ_0 - tensão de escoamento;

η – viscosidade plástica;

γ – taxa de cisalhamento

MPa: mega Pascal

pH: potencial hidrogeniônico

a/c: relação água-cimento, em kg/kg

μm - Micrômetro

a/f - Relação água/finos

sp/c - Relação do superplastificante em relação à massa de cimento

f/c - Relação filer/cimento

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	Considerações iniciais	31
1.2	Justificativas e importância da pesquisa.....	33
1.3	Objetivos	34
1.3.1	Objetivo Geral.....	34
1.3.2	Objetivos específicos.....	34
1.4	Limitações do estudo.....	35
1.5	Estrutura da pesquisa.....	36
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1	Histórico e situação mundial do Concreto auto-adensável.....	37
2.2	Propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco.....	40
2.2.1	Aspectos reológicos.....	42
2.3	Propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido.....	45
2.4	Concreto auto – adensável <i>versus</i> concreto convencional: vantagens e desvantagens.....	52
2.5	Aplicações práticas do concreto auto-adensável.....	56
2.6	Dosagem dos concretos auto-adensáveis.....	60
2.6.1	Método de Okamura.....	61
2.6.2	Método de Gomes.....	62
2.6.3	Proporções da mistura.....	64
2.7	Ensaio em concreto auto-adensável.....	67
2.7.1	Ensaio de espalhamento (<i>Slump flow</i>) e T_{50}	67
2.7.2	Ensaio de espalhamento com Anel - J (<i>J-Ring test</i>)	68
2.7.3	Ensaio de tempo de fluidez com funil-V (<i>V funnel test</i>).....	69

2.7.4	Ensaio da Caixa L (<i>L Box test</i>).....	71
2.7.5	Ensaio da Caixa – U (<i>U Box Test</i>).....	72
2.7.6	Ensaio da Caixa de preenchimento (<i>Fill BoxTest</i>).....	73
2.7.7	Ensaio do Tubo U (<i>U Pipe Test</i>).....	74
2.8	Materiais.....	75
2.8.1	Cimento.....	76
2.8.2	Agregados.....	77
2.8.3	Aditivos.....	78
2.8.3.1	Superplastificantes.....	78
2.8.3.2	Aditivos modificadores de viscosidade.....	80
2.8.4	Adições minerais.....	81
2.8.4.1	Fíler Calcário	84
2.8.4.2	Cinza Volante.....	86
2.8.4.3	Sílica Ativa.....	87
2.8.4.4	Escória Granulada de alto-forno.....	89
2.9	Escórias de Aciaria.....	90
2.9.1	Considerações iniciais.....	90
2.9.2	Produção do aço e obtenção das escórias de aciaria.....	91
2.9.3	Características das escórias de aciaria.....	96
2.9.3.1	Composição química.....	96
2.9.3.2	Composição mineralógica.....	97
2.9.3.3	Propriedades técnicas.....	98
2.9.4	Fenômeno da expansibilidade.....	100
2.9.5	Aplicações.....	103
2.9.5.1	Adição de escórias de aciaria em argamassas e concretos.....	105
2.9.5.2	Outras aplicações.....	107

3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	111
3.1	Introdução.....	111
3.2	Variáveis da pesquisa experimental.....	114
3.2.1	Variáveis independentes.....	115
3.2.1.1	Finos.....	115
3.2.1.2	Pastas.....	115
3.2.1.3	Argamassas.....	115
3.2.1.4	Concretos.....	116
3.2.2	Variáveis dependentes.....	116
3.2.2.1	Finos.....	116
3.2.2.2	Pastas.....	116
3.2.2.3	Argamassas.....	117
3.2.2.4	Concretos.....	117
3.2.3	Variáveis de controle.....	117
3.2.3.1	Seleção e caracterização dos materiais.....	118
3.2.3.2	Finos.....	118
3.2.3.3	Pastas.....	118
3.2.3.4	Argamassas.....	119
3.2.3.5	Concretos.....	119
3.2.4	Variáveis intervenientes (não- controladas).....	120
3.2.4.1	Concretos.....	120
3.3	Escolha e caracterização dos materiais.....	120
3.3.1	Aglomerante.....	121
3.3.2	Adições minerais.....	123
3.3.2.1	Cinza volante.....	124
3.3.2.2	Escória granulada de alto-forno.....	125

3.3.2.3	Fíler Calcário.....	127
3.3.2.4	Escória de aciaria.....	129
3.3.2.5	Resumo dos resultados.....	132
3.3.3	Agregados.....	134
3.3.4	Aditivo químico.....	135
3.4	Definição dos parâmetros para a composição das misturas.....	135
3.4.1	Estudo de finos.....	135
3.4.1.1	Ensaio de espalhamento.....	139
3.4.1.2	Ensaio de tempo de fluidez com funil V.....	140
3.4.2	Estudo de pastas.....	142
3.4.2.1	Ensaio do Cone de Marsh.....	145
3.4.2.2	Ensaio do mini- <i>slump</i>	146
3.4.2.2.1	<i>Metodologia análise de imagens.....</i>	<i>147</i>
3.4.3	Estudos em argamassas.....	148
3.5	Produção dos concretos.....	149
3.5.1	Esqueleto Granular.....	150
3.5.2	Desenvolvimento dos Concretos.....	151
3.5.2.1	Ensaio no estado fresco.....	154
3.5.2.1.1	<i>Ensaio de espalhamento e T_{50}.....</i>	<i>154</i>
3.5.2.1.2	<i>Slump Flow com anel J.....</i>	<i>155</i>
3.5.2.1.3	<i>Funil V.....</i>	<i>156</i>
3.5.2.1.4	<i>Ensaio da Caixa L.....</i>	<i>157</i>
3.5.2.1.5	<i>Ensaio da Caixa – U.....</i>	<i>159</i>
3.5.2.1.6	<i>Ensaio da Caixa de Preenchimento.....</i>	<i>160</i>
3.5.2.1.7	<i>Ensaio do Tubo U.....</i>	<i>162</i>
3.5.2.2	Ensaio no concreto endurecido.....	166
3.5.2.2.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>166</i>

4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	168
4.1	Finos.....	169
4.2	Pastas.....	175
4.2.1	Pasta P100EALD.....	175
4.2.2	Pasta P70EALD30EGAF.....	177
4.2.3	Pasta P85EALD15CV.....	179
4.2.4	Pasta P100CAL.....	181
4.2.5	Pasta 100CIM.....	183
4.2.6	Comparação dos resultados.....	184
4.3	Argamassas.....	188
4.4	Concretos.....	189
4.4.1	Esqueleto Granular.....	189
4.4.2	Resultados dos ensaios de auto-adensamento.....	190
4.4.2.1	Concretos com 100% de escória de aciaria LD.....	190
4.4.2.2	Concretos com 70% de escória de aciaria LD e 30% de escória de alto-forno.....	195
4.4.2.3	Concretos com 85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante.....	198
4.4.2.4	Concretos com 100% de fíler calcário (referência).....	201
4.4.2.5	Resumo dos resultados.....	206
5.	CONCLUSÕES.....	208
5.1	Aspectos gerais.....	208
5.2	Estudo de finos.....	209
5.3	Otimização das pastas.....	210
5.4	Estudo de argamassas.....	211
5.5	Desenvolvimentos dos concretos.....	211
5.6	Sugestões para futuras pesquisas.....	212

BIBLIOGRAFIA.....	214
Bibliografia Referenciada.....	214
Bibliografia Consultada.....	233
Bibliografia das Normas.....	235

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A construção civil é o macro-setor da economia que produz os bens de maiores dimensões do planeta, conseqüentemente demanda de uma grande quantidade de matérias-primas naturais (JOHN, 2000). Porém, a exploração exaustiva das fontes de recursos ao longo dos anos, vem criando um sério problema de escassez de material de construção. Nas proximidades das grandes cidades, por exemplo, há necessidade de buscar esses insumos (areia, brita, calcário) a distâncias cada vez maiores, agregando-lhes o valor do transporte, o que certamente reflete no custo final das construções.

Dessa forma, a utilização de materiais à base de resíduos é uma condição inevitável à construção civil. Setores como a indústria cimenteira, a construção rodoviária, a fabricação de cerâmica entre outras, são potenciais consumidoras de resíduos industriais, como os siderúrgicos, que apresentam características praticamente inertes, carentes de qualquer perigosidade e que tornam segura a sua utilização como matéria-prima (GEYER, 2001; MASUERO, 2001; GUMIERI, 2002).

Neste contexto, há possibilidade de incorporar estes resíduos a um material de construção, que possui grande versatilidade de dosagem: o concreto, e em especial, o auto-adensável, que demanda uma grande quantidade de finos.

O concreto auto-adensável é definido como aquele capaz preencher totalmente o interior das fôrmas, sob ação do seu peso próprio, atingindo ao adensamento completo, mesmo em situações onde há densidade de armadura. Esse concreto apresenta elevada fluidez e moderada coesão e viscosidade, alcançadas com a utilização de aditivos superplastificantes e com o incremento de um percentual adequado de adição mineral de granulometria muito fina ou com a incorporação de agentes modificadores de viscosidade (AMV). Além disso, para ser considerado auto-adensável o concreto deve atender aos requisitos de capacidade de preenchimento, habilidade de passar pelas barras da armadura e resistência a segregação (EFNARC, 2002; GOMES, 2002).

Por outro lado, dentre os resíduos siderúrgicos que têm grande potencial de reciclagem estão as escórias de alto-forno e aciaria. A escória de alto-forno, oriunda da fabricação do ferro gusa no alto-forno, tem seu emprego consolidado na indústria cimenteira. Já a escória de aciaria é um resíduo da produção do aço e, só no Brasil, sua geração fica em torno de 5 milhões de toneladas por ano (IBS, 2007).

A escória de aciaria tem, muitas vezes, sua reciclagem limitada, principalmente devido ao problema da expansão. Ainda assim, suas características vêm sendo sistematicamente avaliadas nos últimos anos. Pesquisadores da Alemanha, China, Japão, Brasil e outros países com grandes parques siderúrgicos, publicam anualmente diversos trabalhos visando sua aplicação na construção civil e em outras áreas.

No que se refere a concretos auto-adensáveis, as limitações envolvem a exigência de maiores cuidados para sua produção, necessidade de ensaios não convencionais e de métodos de dosagem ainda não consolidados (DE LARRARD, 1998). A escolha de materiais, por exemplo, precisa ser criteriosa, de forma que gerem composições com propriedades desejadas para este tipo de concreto. Quanto aos ensaios, a literatura mostra diversas arquiteturas para o mesmo tipo de equipamento e como parâmetros, às vezes, controversos. E, os procedimentos de dosagem são, muitas vezes, específicos para uma dada aplicação.

Ainda assim, inúmeras pesquisas vêm sendo desenvolvidas para conhecer o comportamento dos concretos auto-adensáveis, melhorar suas propriedades e verificar sua aplicabilidade em

diferentes elementos estruturais. Propostas de novos equipamentos de ensaios são desenvolvidas com intuito de melhor caracterizar suas propriedades, principalmente no estado fresco. A partir dos anos 90 surgiram vários métodos de dosagem de CAA, dentre eles: Okamura (1995, *apud* OKAMURA e OUCHI, 2003), Sedran *et al.* (1996), Petersson *et al.* (1996), Billberg (1999), EFNARC (2002) e Gomes (2002).

Um conhecimento mais profundo das propriedades do concreto auto-adensável tanto no estado fresco como no endurecido, e o domínio das particularidades da seleção e dosagem de seus componentes são os caminhos mais eficazes para aumentar a introdução do CAA no mercado da construção civil.

1.2 Justificativas e importância da pesquisa

As escórias de aciaria se convertem em um dos principais problemas para as usinas siderúrgicas do país e do mundo. A geração de um grande volume desses resíduos apresenta inúmeros inconvenientes que vão desde a necessidade de grandes áreas de descarte, até um custo de U\$ 20 a U\$ 30 com transporte e preparação do pátio de estocagem, por tonelada de material depositado (GALDEANO *et al.*, *apud* GEYER, 2001). Além disso, nos últimos anos, o setor siderúrgico vem sofrendo pressões por parte de uma legislação ambiental cada vez mais rígida, da sociedade e do mercado em geral para minimizar os efeitos da disposição da escória no meio ambiente.

Por outro lado, o concreto auto-adensável possui inúmeras vantagens, mas ainda é pouco utilizado quando comparado ao concreto convencional. Ho *et al.*(2001a) descreve que o professor Hajime Okamura, em 1999, na sua palestra direcionada a I Primeira Conferência Internacional sobre Concreto Auto-adensável, afirmou que somente 0,5% do mercado de concreto usinado foi de CAA. A principal razão para isso é que, dependendo dos materiais utilizados, seu custo de produção pode chegar a ser três vezes maior do que um concreto convencional de mesma resistência.

Uma alternativa para minimizar este custo é a incorporação de filers (ou finos) alternativos, como os resíduos industriais de baixo custo, podendo assim reduzir de 5 a 10% o preço final do CAA (HO *et al.*, 2001a). Neville (1997) explica que o *filer* é um material moído com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, devido às suas propriedades físicas, e algumas vezes hidráulicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido.

Ora, se a escórias de aciaria necessitam de uma destinação de acordo com as exigências ambientais e são de fácil acesso na região da Grande Vitória/ES e, por outro lado, o concreto auto-adensável necessita de um elevado teor de finos para manter suas propriedades reológicas e reduzir seu custo, nada mais coerente então, que unir estes dois materiais em uma investigação de grande potencial técnico, econômico e ambiental.

Um aspecto importante é que não foram negligenciadas as principais limitações do uso de escória de aciaria no concreto: a instabilidade volumétrica e a ausência de propriedades hidráulicas. Do ponto de vista reológico, estas características pouco importam para obtenção das propriedades desejadas em CAA, entretanto, influem significativamente no seu comportamento no estado endurecido. Por isso, a escória foi moída a uma finura passante na peneira nº 200 (# 0,075 de malha), a fim de verificar seu potencial aglomerante.

É válido acrescentar que, estas questões não serão abordadas neste trabalho, e sim em um estudo paralelo sobre as propriedades do CAA no estado endurecido, que vêm sendo desenvolvido pelo Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil da UFES, através do NDCC (Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil) e dentro da linha de pesquisa que objetiva viabilizar o emprego de resíduos industriais em concretos auto-adensáveis.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral estudar a influência da escória de aciaria LD como fíler, de forma isolada, ou em composição com escória granulada de alto forno e cinza volante nas propriedades reológicas do concreto auto-adensável de alta resistência (CADAR).

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral listado acima foi necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar os materiais utilizados do ponto de vista químico, físico e mecânico;
- b) obter as dosagens adequadas dos materiais componentes das misturas de finos, das pastas, das argamassas e dos concretos;
- c) realizar um estudo em argamassas afim de evitar a produção demasiada de concreto;

- d) obter os percentuais ótimos dos agregados miúdo e graúdo na composição do esqueleto granular;
- e) obter os percentuais adequados de pasta e de agregados na dosagem do CADAR;
- f) avaliar suas propriedades do estado fresco;
- g) determinar a resistência à compressão aos 7 (sete) dias conforme indica a metodologia de Gomes(2002).

1.4 Limitações do estudo

- a) Foram estudados apenas concretos auto-adensáveis em que as propriedades de auto-adensamento forem obtidas mediante a presença de adições minerais e aditivos superplastificantes. Não serão estudados CAA's com aditivos modificadores de viscosidade (AMV), visando evitar a introdução de mais uma variável no estudo;
- b) Não foi estudada a influência do tipo de cimento nas propriedades do CAA. Foi determinado o uso do cimento Portland CPV – ARI de acordo com a NBR 5732 (ABNT,1991), uma vez que este tipo de aglomerante não apresenta adição reativa. Isto é necessário para que a adição reativa ou pozolânica contida no cimento também não se torne mais uma variável na pesquisa;
- c) Não foi objeto deste estudo a influência de diferentes tipos e dosagens de aditivo superplastificante. Fixou-se o uso de aditivos de terceira geração à base de policarboxilato, oriundo de um único fabricante e lote. Foi utilizada a dosagem de saturação para cada mistura, conforme a metodologia de Gomes (2002);
- d) O método de dosagem será o proposto por Gomes (2002), com algumas adaptações no transcorrer do desenvolvimento. Entretanto, não foi objeto de estudo utilizar mais de um método de dosagem;
- e) Manteve-se constante a procedência e litologia dos agregados de toda a pesquisa;
- f) Não serão estudadas as propriedades mecânicas e relativas a durabilidade, apenas a resistência à compressão aos 7 dias será determinada por ser um dos requisitos para verificar se o CAA é de alta resistência.

1.5 Estrutura da pesquisa

Essa dissertação é estruturada em cinco capítulos conforme a sequência abaixo.

No primeiro capítulo tem-se uma breve introdução dos macro-temas a serem abordados longo desse trabalho. Além disso, constam ainda as justificativas que levaram à definição do tema, os objetivos a serem alcançados, as hipóteses da pesquisa, as limitações do estudo e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 são apresentados os aspectos gerais envolvendo o concreto auto-adensável. Inicialmente tem-se um histórico juntamente com a evolução das pesquisas na área, que incluem seu surgimento e desenvolvimento até os dias atuais. Em seguida, são mostradas as principais características deste tipo de concreto, com um levantamento das propriedades reológicas e mecânicas, métodos de dosagem, vantagens e desvantagens em relação ao concreto convencional e as possibilidades de aplicação. Ainda nesse capítulo, tem-se uma breve revisão sobre escórias de aciaria, principal adição deste estudo.

O capítulo 3 trás uma visão geral dos materiais e métodos utilizados no programa experimental, onde estão descritas as variáveis, os materiais empregados, os procedimentos de ensaios utilizados no estudo de finos e pastas, bem como os procedimentos adotados para o desenvolvimento de concreto auto-adensável de alta resistência.

A apresentação e a discussão dos resultados obtidos no programa experimental são mostradas no capítulo 4. Inicialmente são abordados os resultados relativos aos estudos de finos e pastas. Em seguida é apresentada a avaliação das propriedades referentes ao CAA no estado fresco e a resistência mecânica.

Finaliza-se o trabalho no quinto capítulo, no qual são apresentados os aspectos gerais, as conclusões específicas obtidas por meio do programa experimental da pesquisa, e as recomendações para trabalhos futuros dentro da linha de pesquisa ou em linhas correlatas.

Em seguida, se apresenta a bibliografia utilizada na pesquisa: a bibliografia referenciada, a bibliografia consultada e a bibliografia de normas técnicas – normas NBR da ABNT, bem como os procedimentos de ensaios de FURNAS.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são discutidos os principais aspectos encontrados na literatura sobre Concreto Auto-Adensável (CAA). Inicialmente, apresenta-se um breve histórico e a situação da pesquisa em CAA no âmbito mundial. Em seguida, traça-se um panorama das suas principais propriedades no estado fresco e endurecido, suas vantagens e desvantagens em relação ao concreto convencional e as principais aplicações práticas no Brasil e no mundo. Ainda neste capítulo são abordados os parâmetros para a produção do CAA, bem como os principais ensaios para sua caracterização reológica. Finalizando o capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre as escórias de aciaria, principal adição mineral deste estudo.

2.1 Histórico e situação mundial do Concreto auto-adensável

O termo auto-adensável só foi adotado no final dos anos 90, entretanto, seu conceito vem sendo utilizado na prática há mais de 25 anos. Collepardi¹ já em 1975 desenvolvia o chamado concreto reoplástico, com características de alta fluidez e baixa segregação. Esse concreto foi

¹ Mario Collepardi é professor da Universidade Politécnica de Milão, Itália. Ele é reconhecido mundialmente por sua contribuição como autor e co-autor de inúmeros artigos relacionados a tecnologia do concreto e química do cimento. Atua também, no estudo e aplicação de superplastificantes, tendo recebido muitos prêmios nesta área (COLLEPARDI, 2001).

utilizado com êxito em obras de concretagem submersa, podendo ser considerado o embrião do moderno CAA (COLLEPARDI, 2001).

A necessidade de se produzir concretos com capacidade de auto-consolidação também foi observada no Japão, na década de 80. Nesse país, as estruturas de concreto necessitam de uma grande quantidade de armadura, com a finalidade de resistir aos freqüentes abalos sísmicos. Dessa forma, a compactação do concreto convencional através de equipamentos de vibração se torna difícil e, geralmente, pode deixar nichos e vazios na estrutura que conduzem numa queda na durabilidade (OKAMURA, 1997; OKAMURA e OUCHI, 2003; BARTOS, 2000; DE LA PEÑA, 2000a).

Além disso, a modernização da indústria japonesa demandou uma grande quantidade de trabalhadores, reduzindo gradativamente dos canteiros, boa parte da mão-de-obra especializada na construção civil. O fato levou a uma diminuição na qualidade final das construções devido à falta de cuidados especiais na compactação (OKAMURA, 1997; BARTOS, 2000; DE LA PEÑA, 2000a; OKAMURA e OUCHI, 2003;).

Assim, em 1986, Okamura (1997) estudou a necessidade de um tipo de concreto que pudesse alcançar qualquer parte da forma, sem necessidade de vibração, apenas sob ação de seu peso próprio, diminuindo, dessa maneira, a dependência de mão-de-obra qualificada e os problemas com a durabilidade.

Os avanços nessas pesquisas culminaram, em 1988, com a construção do primeiro protótipo em escala real, utilizando materiais existentes no mercado na época. Os resultados experimentais realizados no protótipo apresentaram condições satisfatórias em relação à retração por secagem, calor de hidratação, propriedades no estado endurecido entre outras (OKAMURA e OUCHI, 2003).

No início da década de 1990, somente as grandes corporações japonesas² detinham o *Know – how* para produção de CAA, mantendo secretas as suas pesquisas e descobertas. Entretanto, o emergente desenvolvimento desse concreto chamou a atenção do RILEM (*Réunion Internationale dès Laboratoires et Experts dès Matériaux*), na França, especialmente após a

² O CNV – Concreto Não Vibrado (NVC – *No Vibrated Concrete*) da corporação Kajima, o CSQ-Concreto de Super Qualidade (SQC- *Super Quality Concrete*) da Corporação Maeda e o Bioconcreto da Corporação Tasei são exemplos de denominações dadas pelas grandes corporações japonesas para o concreto auto-adensável (BARTOS, 2000).

formação do Comitê Técnico 145 – WSM – “*Workability of Fresh Special Concrete Mixes*”, em 1992 (BARTOS, 2000; DRUTA, 2003; RILEM, 2006).

A fundação do TC 145– WSM atraiu imediatamente a comunidade científica mundial e propiciou a criação de um Comitê Técnico RILEM (TC 174 – CAA), totalmente dedicado ao concreto auto-adensável e formado por membros de quatro continentes em um total de dez países. A partir desse momento, foram desenvolvidos métodos de dosagem, ensaios e técnicas de aplicação específicas para o CAA, mostradas através de diversas conferências organizadas pela RILEM como mostra o Quadro 2.1 (BARTOS, 2000; RILEM, 2006).

ANO	LOCAL	EVENTO	OBSERVAÇÕES
1996	-	Criação do TC-174-CAA	Comitê técnico totalmente voltado para o estudo do CAA.
1999	Estocolmo– Suécia	I Simpósio Internacional em CAA – RILEM	Publicação de 70 artigos de 13 países, sendo que 20 deles descreviam aplicações do CAA, o que mostrou que tal concreto teve uma rápida aceitação no mercado da construção civil. O TC-174 – CAA concluiu seus trabalhos através da produção de um estado-da-arte em CAA.
2001	Tóquio – Japão	II Simpósio Internacional em CAA – RILEM	Realizado pelo comitê técnico TC-188 CSC (<i>Casting of Self SSC</i>). Publicação de 74 artigos de 20 países. A aceitação do CAA foi tão grande que exigiu um cronograma de simpósios internacionais de 2 em 2 anos.
2002	Chicago -EUA	I Congresso Norte Americano em CAA	-
2003	Reykjavik-Islândia	III Simpósio Internacional em CAA - RILEM	108 artigos de 26 países foram apresentados
2005	Changsha - China	I Congresso Chinês em CAA	Co-patrocinado pelo RILEM
2005	Chicago - EUA	IV Simpósio Internacional em CAA e II Congresso Norte Americano – RILEM	Apresentação de 140 artigos de 38 países
2007	Ghent - Bélgica	V Simpósio Internacional em CAA - RILEM	160 apresentações orais e 30 apresentações em poster de diversos países, inclusive do Brasil.

Quadro 2.1 – Eventos importantes relacionados ao CAA nos últimos 11 anos (BARTOS, 2000; RILEM, 2006).

Além dos diversos congressos dedicados ao CAA, surgiram instituições e centros de referência voltados à pesquisa e desenvolvimento do produto. No Canadá, por exemplo, os estudos se iniciaram poucos anos após o conceito do concreto auto-adensável ter sido introduzido no Japão. O IRC (*Institute for Research in Construction*) juntamente com o CPCI (*Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute*), o CANMET (*Canadian Centre for Mineral and Energy Technology - International Center for Sustainable Development of*

Cement & Concrete) e o ISIS (*Intelligent Sensing for Innovative Structures*) foram alguns dos grupos que estudaram os vários aspectos da nova tecnologia (DRUTA, 2003).

Nos Estados Unidos pode-se citar o PCI (*Precast/Prestressed Concrete Institute*) que realizou os primeiros estudos em 1999, na aplicação em estruturas pré-fabricadas e protendidas.

Já na Inglaterra, destaca-se a EFNARC³ (*European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products*), fundada em 1989, atualmente uma das maiores referências no desenvolvimento de métodos de ensaios específicos para o concreto auto-adensável (EFNARC, 2002; DRUTA, 2003).

Quanto ao Brasil, ainda não existe representatividade de pesquisas que justifiquem a criação de eventos totalmente voltados ao CAA, mas esse papel é muito bem representado pelos congressos anuais do IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto).

Nos COBRACON's (Congresso Brasileiro de Concreto) destacam-se trabalhos da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, sobre dosagem e aplicação; da Universidade do Rio Grande do Sul - UFRS, sobre o uso em indústrias de pré-fabricados, métodos de dosagem e aspectos econômicos; das Universidades Federais de Alagoas -UFAL, de Pernambuco – UFPE e do Núcleo de Desenvolvimento da Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, com sua contribuição no uso de resíduos na produção de CAA; e a UNESP (Universidade Estadual de São Paulo) de Ilha Solteira e o Laboratório Central de Furnas que se destacam no campo de reologia do CAA (BARBOSA *et al.*, 2002; BARBOSA *et al.*, 2004; MELO *et al.*, 2005; TUTIKIAN *et al.*, 2005a; MELO e REPETTE, 2005; GOMES *et al.*, 2006; CALMON *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2006; CALMON *et al.*, 2007).

2.2 Propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco

O concreto auto-adensável é considerado um concreto capaz de se consolidar no interior das fôrmas pela ação única da gravidade. Simultaneamente, mantêm-se suficientemente estável para garantir o preenchimento completo da forma, mesmo em áreas de difícil acesso ou congestionadas, sem bloqueio ou separação do agregado. Tais características são melhores definidas como: capacidade de preenchimento (*filling ability*), capacidade de passagem

³ EFNARC é uma Federação Européia dedicada as especialidades de produtos químicos para construções e sistemas estruturais em concreto. Foi fundada em março de 1989, representando os produtores e aplicadores de produtos especiais para edifícios (LISBÓIA, 2004).

(*passing ability*) e resistência à segregação (HO *et al.*, 2002; EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003; BOSILOJKOV, 2003).

A capacidade de preenchimento ou habilidade de fluxo (*flowability*) do CAA é governada pela elevada fluidez e coesão da mistura. Essas propriedades permitem que o concreto escoe intacto no interior da estrutura, preenchendo as fôrmas adequadamente e garantindo a cobertura total das barras de armadura, sob ação de seu peso próprio, ou seja, sem vibração (GOMES, 2002; KHAYAT e DACZKO, 2002; ARAUJO *et al.*, 2003).

A capacidade de passagem pode ser descrita como a facilidade da mistura de CAA de fluir livremente entre as barras de armadura, ou outros obstáculos, mantendo sua homogeneidade e, sem que haja obstrução do agregado graúdo na região das ferragens (GOMES, 2002; BARTOS, 2000; SCCEPG, 2005). Noguchi *et al.* (1999) acrescentam que esta é a propriedade mais importante para o desempenho do concreto auto-adensável no estado fresco, pois ela irá determinar a capacidade de preenchimento final o que, conseqüentemente irá influenciar na resistência e durabilidade da estrutura.

A resistência a segregação ou estabilidade é um parâmetro fundamental para a manutenção da uniformidade e qualidade do CAA na obra. Esse concreto deve possuir coesão e viscosidade suficientes para evitar a separação de seus componentes durante as operações de transporte, lançamento e consolidação (GOMES, 2002; KHAYAT e DRACZKO, 2003; GUJAR, 2004; SSCEPG, 2005).

Outro aspecto importante diz respeito à exsudação, caracterizada como um tipo de segregação bastante comum em concretos altamente fluidos, tal como o auto-adensável. Este fenômeno se manifesta pelo aparecimento de água na superfície do concreto após sua consolidação, ou ainda quando há retenção de água sob os agregados maiores e nas barras horizontais da armadura. A exsudação no CAA deve ser controlada a fim de se evitar o enfraquecimento da aderência entre o concreto e a armadura e o surgimento de fissuração (METHA e MONTEIRO, 1994; KHAYAT *et al.*, 1999).

Diante do exposto, um concreto só poderá ser considerado auto-adensável se as três propriedades de trabalhabilidade mencionadas anteriormente forem alcançadas. Para quantificar os parâmetros necessários existe uma série de ensaios que serão descritos em detalhes posteriormente. A seguir, no Quadro 2.2, apresenta-se uma lista desses métodos, bem como as respectivas propriedades avaliadas (EFNARC, 2002; GOMES, 2002).

MÉTODO	PROPRIEDADE
Ensaio de espalhamento (<i>slump flow</i>)	Capacidade de preenchimento
Fluxo de espalhamento T50	Capacidade de preenchimento
Anel J	Capacidade de passagem
Funil V	Capacidade de preenchimento
Funil V – T5minutos	Resistência à segregação
Caixa L	Capacidade de passagem
Caixa U	Capacidade de passagem
Caixa de preenchimento	Capacidade de passagem
Ensaio de estabilidade GTM	Resistência à segregação
Orimet	Capacidade de preenchimento

Quadro 2.2 – Lista de ensaios para as propriedades de trabalhabilidade do CAA (EFNARC, 2002).

2.2.1 Aspectos reológicos

O estudo das propriedades de fluxo do concreto é extremamente importante porque dele dependem fatores como bombeabilidade, lançamento, facilidade de colocação e adensamento, além das características de desempenho mecânico e durabilidade (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003).

Por muito tempo uma determinação mais aprofundada da reologia do concreto foi negligenciada. No concreto convencional, por exemplo, geralmente o abatimento é o único parâmetro medido. Esse ensaio, ainda que seja realizado em laboratório, raramente fornece informações adicionais sobre o comportamento do concreto fluido (BANFILL, 2003; CASTRO e LIBÓRIO, 2006).

Com o desenvolvimento dos concretos especiais, tais como o concreto de alto desempenho e o auto-adensável, a medida dos parâmetros reológicos tornou-se indispensável para a obtenção do desempenho desejado.

De uma forma geral, a reologia pode ser definida como a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos fluidos e suspensões, quando submetidos a um sistema de forças. Considerando o concreto fresco como uma suspensão de partículas sólidas (agregados) mergulhadas em um líquido viscoso (a pasta do aglomerante) nada mais apropriado que aplicar ao material os modelos clássicos da reologia (FERRARIS *et al.*, 2001; PILEGGI, 2001; CAMÕES, 2005; CASTRO e LIBÓRIO, 2006).

Através da reologia, então, o concreto assume macroscopicamente um comportamento associado a um fluido não - newtoniano, frequentemente modelado pela expressão de Bingham (Equação 2.1) e descrito por meio da tensão de escoamento e viscosidade plástica,

como mostra o gráfico da Figura 2.1 (DE LARRARD *et al.*, 1998; FERRARIS *et al.*, 2001; BANFILL, 2003; POON e HO, 2004).

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma, \quad \text{onde:} \quad (\text{Equação 2.1})$$

τ – tensão de cisalhamento;

τ_0 – tensão de escoamento;

η – viscosidade plástica;

γ – taxa de cisalhamento.

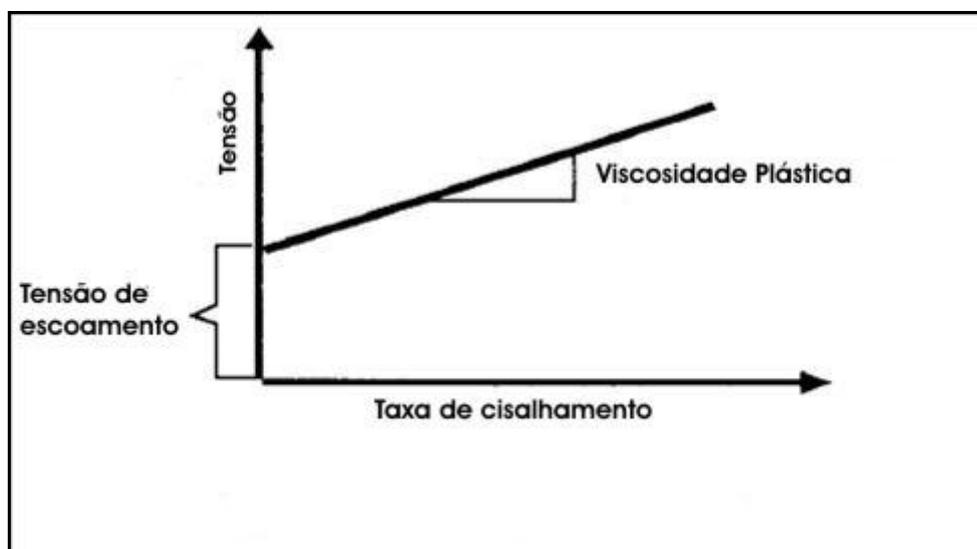


Figura 2.1- Equação de Bingham para um fluido (FERRARIS, 1999)

De acordo com o gráfico, a tensão de escoamento corresponde a uma tensão mínima de cisalhamento necessária para que o fluido escoe, sendo determinada no ponto em que a coordenada da taxa de cisalhamento é zero. A viscosidade, por outro lado, é definida como sendo a medida da resistência do fluxo ao escoamento, representada pela inclinação da reta (FERRARIS, 1999; PILEGGI, 2001; BANFILL, 2003; CASTRO e LIBÓRIO, 2006).

O modelo de Bingham tem sido aplicado adequadamente para descrever o comportamento reológico dos concretos em geral. No entanto, alguns autores afirmam que o CAA não segue a mesma função linear e sugerem que para este se utilize o modelo de Herschel – Bulkley, representado pela Equação 2.2 (DE LARRARD *et al.*, 1998; FERRARIS *et al.*, 2001; BANFILL, 2003):

$$\tau = \tau_0 + a.\dot{\gamma}^b, \quad \text{onde:} \quad (\text{Equação 2.2})$$

τ_0 – tensão de escoamento;

a e b = são novos parâmetros característicos que descrevem o comportamento reológico do concreto. Neste caso a viscosidade plástica não pode ser calculada diretamente.

Diversos equipamentos têm sido propostos pra avaliar a viscosidade plástica e tensão de escoamento de materiais cimentícios, dentre eles, destacam-se os reômetros. Em concretos, são comumente utilizados os reômetros de cilindros coaxiais e de pratos paralelos (DE LARRARD *et al.*, 1997; ESPING, 2007a).

No reômetro coaxial (Figura 2.2) a amostra de concreto é colocada na abertura entre dois cilindros concêntricos, sendo registrado o torque aplicado ao cilindro externo a partir da rotação do cilindro interno (PILEGGI, 2006). Esping (2007a) ressalta que para a confiabilidade dos resultados das medidas reológicas em concretos, utilizando reômetros coaxiais, qualquer dimensão do equipamento deve ser de no mínimo 10 vezes maior que o diâmetro máximo da maior partícula da suspensão ($R_{\text{ext}} - R_{\text{int}} \geq 10 \cdot D_{\text{max}}$) e que a relação entre o raio do cilindro externo e interno seja inferior a 1,2 ($R_{\text{ext}}/R_{\text{int}} \leq 1,2$).

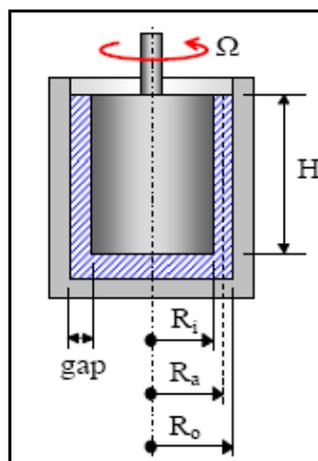
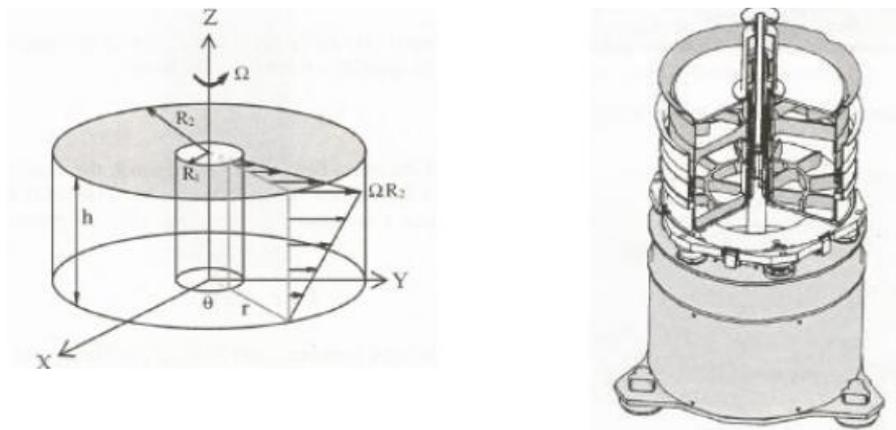


Figura 2.2 – Princípio dos reômetros coaxiais (ESPING, 2007a).

Além das restrições citadas anteriormente, Saak *et al.*(2001) acrescentam que é necessário que haja uma certa rugosidade na superfície dos cilindros, para minimizar o *efeito parede*, gerado pela formação de uma camada lubrificante de concreto em torno das paredes do equipamento. Esse fenômeno promove o escorregamento do material, fazendo com que o resultado obtido

não represente seu comportamento real, ao longo de todo seu volume. Entretanto, Esping (2007a) afirma que já existe no mercado reômetros coaxiais com ranhuras ou nervuras superficiais tanto no cilindro externo como no interno, o mais conhecido do mercado é o reômetro BML para concreto.

Ao contrário do que acontece quando se usa os reômetros de cilindros coaxiais, utilizando-se o reômetro de pratos paralelos, o fluido é cisalhado entre um prato estacionário e um prato liso rotacional. Baseados nesta arquitetura destacam – se os reômetros comercialmente conhecidos como BTRHEOM (Figura 2.3) e o planetário IBB, desenvolvidos e utilizados nas pesquisas de De Larrard *et al.* (1997); Ferraris *et al.* (1999), de Sedran (2000) e de Maragon (2006).



(a) Princípio de funcionamento do BTRHEOM. (b) – Desenho esquemático do BTRHEOM.

Figura 2.3 – Reômetro BTRHEOM (DE LARRARD *et al.*, 1997).

Embora o emprego de reômetros esteja conquistando seu espaço na comunidade científica internacional, seu uso ainda é restrito a grandes centros de pesquisa. Isso ocorre, porque tratam-se de equipamentos relativamente complexos e caros, que devem ser fabricados em dimensões suficientemente grandes para se considerar o concreto como um fluido homogêneo. Outrossim, no caso do CAA, a simples determinação dos parâmetros reológicos através dos reômetros não basta para avaliar o comportamento do concreto quanto à capacidade de passar por restrições e de resistência à segregação, o que pode ser obtido através dos ensaios empíricos descritos na seção 2.7 (NUNES, 2001; REPETTE, 2005).

2.3 Propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido

A avaliação do comportamento do CAA no estado endurecido é de primordial interesse de projetistas estruturais e usuários. É necessário demonstrar que, além de seus reconhecidos

benefícios no estado fresco, também é possível obter características de desempenho mecânico e durabilidade, iguais ou superiores aos concretos convencionais.

Contudo, uma comparação das propriedades no estado endurecido entre o concreto auto-adensável e o convencional de resistência equivalente, deve ser feita com cautela, devido as particularidades da composição do CAA.

O maior teor de finos presentes nesse concreto e a menor granulometria de seus agregados causam alterações no esqueleto granular da mistura, podendo influenciar de forma significativa em propriedades como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Além disso, sua diferenciada microestrutura afeta a durabilidade do concreto (DOMONE, 2006a).

Alguns pesquisadores, dentre eles, Holschemacher e Klug (2002), procuraram compilar o maior número de informações referentes as propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido, em uma base de dados. As considerações desses e de outros autores acerca dessas propriedades são descritas a seguir.

a) Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto endurecido. No geral, consiste no valor material característico para a classificação de um concreto nas especificações nacionais e internacionais.

É de consenso na literatura sobre o assunto que, a composição da mistura e a microestrutura do concreto auto-adensável afetam o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo. Entretanto, no geral, o desenvolvimento das resistências à compressão com a idade do concreto convencional e do CAA é bastante similar, salvo em alguns casos isolados em que o CAA apresentou resistências ligeiramente superiores (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; DOMONE, 2006a).

Dessa maneira, um dos aspectos que influenciam para a obtenção de resistências superiores é a incorporação de adições minerais. Persson (2001a) cita que a adição de fíler calcário em CAA aumenta a resistência à compressão em comparação com o concreto convencional. Este autor salienta ainda, que a maior eficiência do empacotamento de partículas causada pela adição do fíler, foi a razão para o ganho de resistência.

No trabalho de Druta (2003) a incorporação de cinzas volante e sílica ativa promove um aumento da resistência à compressão do CAA em 65% em relação ao concreto convencional. O gráfico da Figura 2.4 mostra os valores mínimos e máximos obtidos em três ensaios de resistência à compressão para cada relação a/c. O CAA alcançou resistências à compressão de até 50 MPa, obtidos com os fatores água/cimento de 0,3 e 0,4 podendo assim, ser considerado um concreto de alta resistência, capaz de substituir o concreto tradicional no campo da construção.

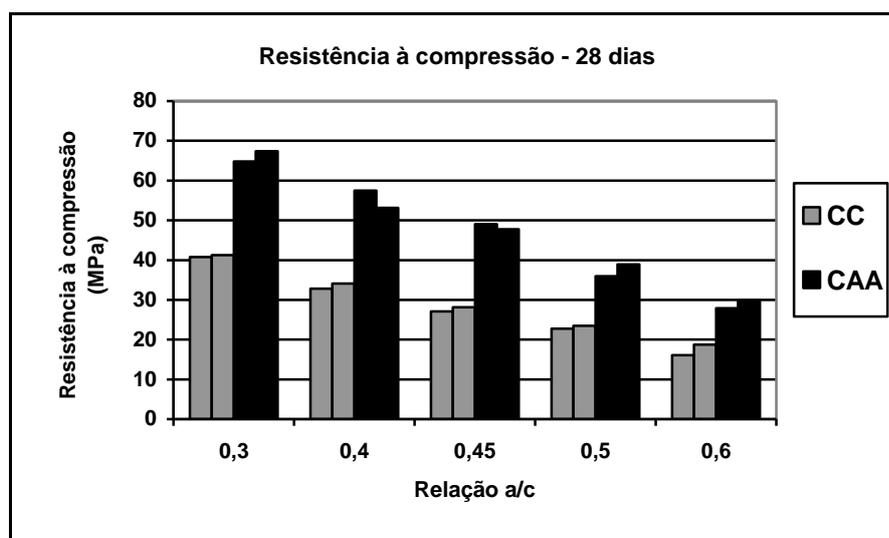


Figura 2.4 – Variação da resistência à compressão com a relação a/c (DRUTA, 2003).

Nesta mesma linha, Araújo *et al.* (2007) estudou a influência da adições minerais em concretos auto-adensáveis. As misturas foram produzidas com cimento CP V – ARI, aditivo superplastificante de base policarboxilato e adições inertes e pozolânicas, a saber: sílica ativa, metacaulim, pó-de-pedra de micaxisto e de granito.

Os resultados desta pesquisa mostraram que concretos com sílica ativa atingiram resistências à compressão acima de 50MPa, aos 28 dias. Enquanto que concretos com metacaulim obtiveram resistências aproximadamente 23,5% menores em comparação com misturas com sílica ativa. Observou-se também que os concretos de referência apresentaram bom desempenho, e apesar de não haver adição de finos ou pozolanas em sua composição, seu desempenho foi superior ao dos concretos com finos de pedreiras. A mistura com pó-de-micaxisto demandou uma maior quantidade de água, por ser uma adição com maior área específica, o que acarretou em maiores relações água/aglomerante e menores resistências.

b) Resistência à tração

Em concretos auto-adensáveis observa-se uma maior tendência ao aumento da resistência à tração em relação ao concreto convencional. Este fato se deve a sua melhor microestrutura e, em especial, pela sua menor porosidade e melhor distribuição dos tamanhos dos poros dentro da zona de transição dos agregados com a pasta de cimento (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002).

Para CADAR as resistências à tração são em torno de 0,07 a 0,10 (7 a 10%) da resistência à compressão (GOMES, 2002). No banco de dados criado por Holschemacher e Klug (2002), a maioria dos resultados de resistência à tração em concretos auto-adensáveis está na mesma faixa regulamentar de concretos convencionais com mesma resistência à compressão. Contudo, é possível observar que cerca de 30% da totalidade dos dados, apontam para uma maior resistência à tração em CAA.

No estudo feito por Druta (2003) em CAA, concluiu-se que, a utilização de adições minerais (sílica ativa e cinza volante) e aditivos aumentou a resistência à tração por compressão diametral dos concretos auto-adensáveis em aproximadamente 30% em relação ao concreto convencional. Observa-se no gráfico⁴ da Figura 2.5 que a resistência à tração do CAA aos 7 dias foi comparável como com a resistência à tração do concreto de referência aos 28 dias, com uma relação a/c de 0,4. Isso foi possível devido ao uso de sílica ativa e cinza volante que tendem a aumentar a resistência do concreto nas primeiras idades.

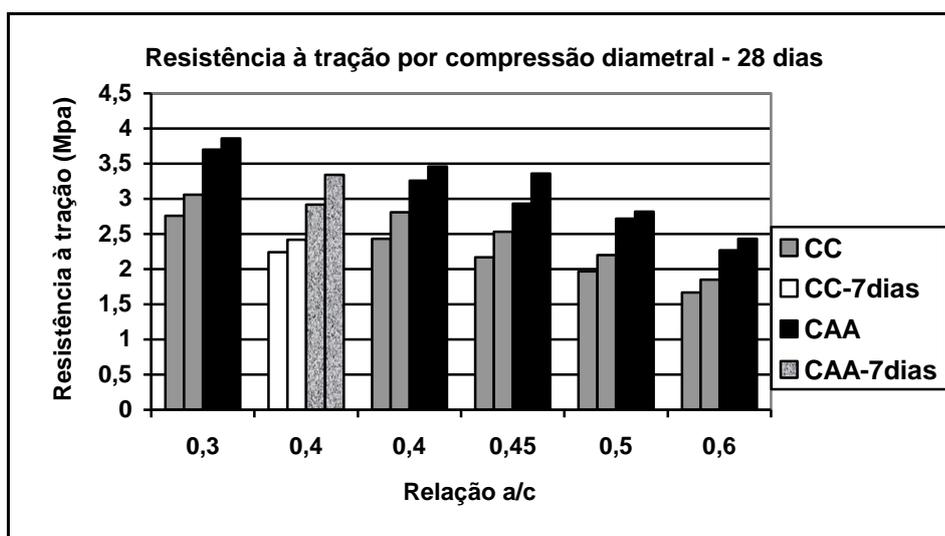


Figura 2.5 – Variação da resistência à tração por compressão diametral com a relação a/c (DRUTA, 2003).

⁴ Para a composição deste gráfico foram utilizados os valores mínimos e máximos entre três ensaios de resistência à tração por compressão diametral para cada relação a/c (DRUTA, 2003).

c) Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é consideravelmente afetado pelas características do agregado graúdo na mistura de concreto. No caso do CAA, constituído por agregados graúdos de pequena e média densidade e em menores proporções que em concretos convencionais, é esperado que esta propriedade apresente valores relativamente mais baixos.

No banco de dados gerado por Holschemacher e Klug (2002), foi demonstrado que o módulo de elasticidade pode ser até 20% menor em comparação com o concreto convencional de mesma resistência à compressão e produzidos com os mesmos agregados.

No trabalho de Klug e Holschemacher (2003) foram encontrados valores médios para módulo de elasticidade de 35,5 GPa, aos 28 dias e 36,5 GPa aos 56 dias. O módulo de deformação longitudinal apresentou-se sensivelmente menor que o concreto convencional, possivelmente devido aos resultados maiores de resistência, menor densidade e quantidade de agregado graúdo.

Já no estudo de Ferreira *et al.*(2006) ficou demonstrado com um nível de confiança de 95%, através de análise estatística, que não houve diferenças significativas entre o concreto convencional e o auto-adensável nesta propriedade, em misturas de diferentes consistências e níveis de resistência à compressão.

Foram produzidos um concreto convencional vibrado (CCV) com *slump* de 13±2 cm e dois concretos auto-adensáveis (CAA) com *slump flow* de 55±2 e 70±2 cm, respectivamente. As relações água/cimento (*a/c*) adotadas foram de 0,35, 0,45 e 0,60 para buscar os níveis de resistência de 50MPa (N50), 35MPa (N35) e 20MPa (N20), respectivamente. No Quadro 2.3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade.

Ensaio	Concreto				
	CCV13*N20	CCV13*N50	CAA55*N35	CAA70*N20	CAA70*N50
Resistência à compressão (MPa)	19,2	48,2	33,5	19,3	53,9
Módulo de Elasticidade (GPa)	19,9	33,6	26,4	20,0	33,4

*Valores referentes ao nível de consistência medidos pelo ensaio de espalhamento.

Quadro 2.3 – Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade (FERREIRA *et al.*,2006).

No programa experimental desta pesquisa foi adotado um planejamento fatorial⁵ onde, as duas variáveis de estudo, tipo de concreto e relação a/c são os fatores e os três diferentes tipos de concreto e as relações água/cimento são os níveis escolhidos. Os resultados evidenciaram que o efeito do fator a/c é significativo, entretanto o mesmo não acontece com a variável tipo de concreto, indicando que ela não exerce influência significativa no módulo de elasticidade.

d) Outros aspectos

Outros aspectos relacionados às propriedades no estado endurecido, tais como retração, fluência, aderência, difusividade, permeabilidade e absorção do CAA vêm sendo investigados por diversos pesquisadores devido à grande importância de caracterizar este concreto de forma completa (DEHN *et al.*, 2000; HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; ZHU e BARTOS, 2003; ALMEIDA FILHO, 2006).

Existem poucos estudos sobre retração plástica, autógena e sobre o comportamento da deformação ao longo do tempo sob carregamento para concretos auto-adensáveis. As pesquisas publicadas se diferem muito sobre estas propriedades, fato que pode ser explicado, devido aos diversos parâmetros, como a relação entre agregado graúdo e miúdo e finura, que influenciam essas propriedades. No entanto, existe um consenso geral que o CAA é afetado da mesma forma que o concreto convencional de mesma relação a/c e tipo de cura (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002).

Quanto a aderência do CAA as barras da armadura, Dehn *et al.* (2000) e Holschemacher e Klug (2002) realizaram estudos experimentais em modelos de arrancamento de barras produzidos com concreto auto-adensável comparando-os com modelos em concreto convencional de mesmas características. Como resultados, os referidos autores avaliaram que existe certa ductilidade no comportamento pós-pico da tensão de aderência, sendo esta caracterizada por um deslizamento acompanhando de uma perda de tensão de aderência muito pequena.

Zhu e Bartos (2003) avaliaram as características de permeabilidade e difusividade de duas categorias de CAA: um com resistência à compressão de 40 MPa e outro com 60 MPa. Para cada nível de resistência foram produzidos três concretos auto-adensáveis e dois concretos

⁵ O planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes. Esta técnica permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de uma variável, sujeita a todas as combinações das demais (FERREIRA *et al.*, 2006)

convencionais de referência. As composições do concreto bem como os coeficientes de permeabilidade e os resultados da difusividade são apresentados no Quadro 2.4 e na Figura 2.6.

Proporções da mistura (Kg/m ³)		REF 1		REF2		CAA1		CAA2		CAA3	
		C40	C60	C40	C60	C40	C60	C40	C60	C40	C60
Agregado graúdo (20-5mm)		1105	1085	1045	1110	770	750	770	750	770	750
Areia natural (zona M)		715	620	695	635	875	915	875	915	990	930
Cimento Portland		340	465	280	375	285	320	335	410	360	475
Filer calcário		-	-	-	-	265	230	-	-	-	-
Cinza Volante		-	-	120	95	-	-	145	100	-	-
AMV		-	-	-	-	-	-	-	-	0,17	0,12
Superplastificante		-	-	-	1,5	5,0	4,4	4,8	4,6	7,2	6,7
Água livre		195	196	190	169	180	167	195	177	210	196
Relação a/c		0,57	0,42	0,68	0,45	0,63	0,52	0,58	0,43	0,58	0,41
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	29,3	44,7	27,4	50,2	40,4	48,5	33,0	50,4	32,4	50,4
	28 dias	45,5	61,8	42,9	68,5	50,9	56,9	49,9	71,3	41,6	66,8
Coeficiente de Permeabilidade (10 ⁻¹⁷ m ²)		12,8±0,5	10,4±0,3	13,9±1,1	5,0±0,4	5,5±0,2	4,5±0,6	4,1±0,2	2,9±0,1	8,2±1,5	7,3±0,7

Quadro 2.4 – Proporções das misturas e coeficiente de permeabilidade dos concretos (ZHU e BARTOS, 2003).

Os resultados desse estudo mostraram que os concretos auto – adensáveis apresentaram coeficientes de permeabilidade mais baixos que os concretos convencionais, para mesma classe de resistência. A difusividade foi dependente do tipo de finos utilizados na mistura. Concluiu-se também que, apenas a classe de resistência ou relação a/c, não pode assegurar que diferentes dosagens de CAA possuam menor ou igual grau de difusividade do que concretos convencionais. Entre os três concretos auto – adensáveis avaliados, observou-se que os que não possuíam adição de finos, mas com adição de aditivos modificadores de viscosidade, obtiveram maior coeficiente de permeabilidade e difusividade.

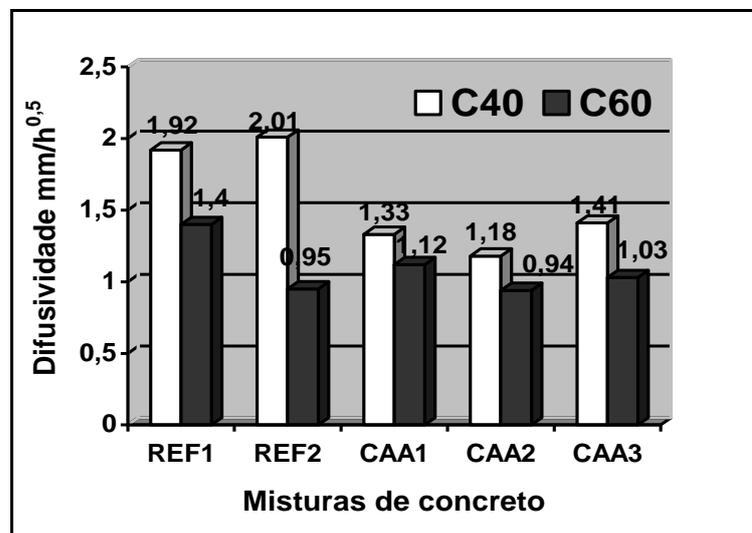


Figura 2.6 – Resultados da difusividade para os concretos ensaiados (ZHU e BARTOS, 2003).

e) Durabilidade

No que se refere à durabilidade, esta é consideravelmente maior em concretos auto-adensáveis. Diversos autores afirmam que o elevado teor de finos é responsável por proporcionar uma boa distribuição granulométrica dos sólidos, aumentando assim, o empacotamento de partículas. Em outros termos, a adição de finos à mistura acarreta numa menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, há um aumento na densidade da matriz na zona interfacial de transição entre a pasta do cimento e os agregados. Com a microestrutura e interface agregado-pasta mais densa que em um concreto convencional, de mesma relação água/cimento, a permeabilidade a cloretos e gases, por exemplo, é menor (HOLSCHEMACHER e KLUG, 2002; BOSILJKOV, 2003; BILLBERG, 1999).

Em um estudo realizado por Persson (2003) foram avaliadas seis misturas de CAA e uma mistura de concreto convencional (referência), compostas por fíler calcário, agregados naturais, aditivos superplastificantes e incorporadores de ar, submetidas a uma solução de sulfato de sódio, água do mar ou água destilada, durante 900 dias. Verificou-se que o aumento de massa foi independente do teor de fíler calcário e ar incorporado. Observou-se, entretanto que, quando curado em uma solução com sulfato de sódio, os concretos auto-adensáveis mostraram maior perda de massa do que o concreto convencional, provavelmente devido ao teor de fíler calcário do CAA.

Persson (2001b) também analisou o comportamento dos concretos auto-adensáveis com diferentes adições minerais, quanto à penetração de cloretos. Este pesquisador observou que em um CAA com fíler calcário e outro, com uma composição de 5% de sílica ativa e 12% de cinza volante, o coeficiente de penetração de cloretos foi aproximadamente 60% maior do que no concreto convencional. O fator de eficiência da sílica ativa e da escória de alto-forno comparadas ao cimento Portland é em torno de 1,6 e 1, respectivamente.

2.4 Concreto auto – adensável *versus* concreto convencional: vantagens e desvantagens

As principais vantagens do concreto auto-adensável estão associadas à sua independência do processo de compactação. Devido à grande deformabilidade e à baixa segregação, sua aplicação em estruturas difíceis ou pouco viáveis de serem construídas mediante a vibração é facilitada. Com isso também, são eliminados os problemas gerados pela má compactação do concreto, como macro-defeitos, bolhas de ar e ferragens expostas, responsáveis diretos pela

queda no desempenho mecânico e durabilidade das estruturas (GETTU e AGULLÓ, 2003; COPPOLA, *apud* TUTIKIAN, 2004).

A ausência de vibração também conduz a outros benefícios tais como:

- a) rapidez na execução da obra: com a eliminação da vibração reduz-se o tempo de concretagem, o número de trabalhadores e os equipamentos de vibração envolvidos no processo (CBIC, 2005);
- b) menor dependência de mão-de-obra qualificada: as operações de lançamento e consolidação do CAA são simplificadas e, portanto, não é necessária muita habilidade ou grande quantidade de operários para se obter um produto final de qualidade (GETTU e AGULLÓ, 2003; MANUEL, 2005);
- c) melhor aspecto superficial: desde que sejam utilizadas fôrmas de qualidade e que haja um controle técnico na aplicação, a propriedade auto-nivelante do CAA garante superfícies suaves e uniformes, possibilitando sua utilização como concreto aparente em detalhes complexos, como, em obras de arte. Além disso, conduz a uma economia em revestimento uma vez que não há necessidade de se corrigir falhas de concretagem (DE LA PEÑA, 2000a; EFNARC, 2002);
- d) redução de problemas ergonômicos: a vibração necessária para compactar o concreto convencional provoca problemas de saúde nos trabalhadores, como fadiga, dores lombares e má circulação sanguínea nas mãos (BARTOS e SÖDERLIND, 2000; GETTU e AGULLÓ, 2003; RILEM, 2006);
- e) redução do barulho: o ruído provocado pelos vibradores incomoda não só os trabalhadores na obra, mas também a população e estabelecimentos (escolas, hospitais entre outros) próximos à construção (GETTU e AGULLÓ, 2003). Em um estudo realizado por Bartos e Söderlind (2000) se constatou que, com o uso do concreto auto-adensável há uma redução da ordem de um décimo de decibéis no ruído captado pelos trabalhadores e pelo entorno do que quando o concreto convencional é utilizado.

Apesar de todas as vantagens técnicas, econômicas e ambientais mencionadas anteriormente, a aplicação do concreto auto-adensável no campo da construção civil ainda é modesta. Um dos principais motivos para esta barreira de aceitação é de ordem econômica.

Ho *et al.*,(2001b) afirmam que, dependendo dos tipos de materiais empregados na mistura e do grau de controle de qualidade do concreto, o custo do CAA pode ser de 2 a 3 vezes maior que em um concreto convencional. Esses autores ainda citam que, na França, o preço do CAA é em torno de 50 a 100% mais caro e em Singapura, onde todos os ingredientes da mistura são importados, os custos chegam a ser 150% maiores que no concreto vibrado.

Por outro lado, em uma análise em que se considerem o custo total da construção, como gastos com aluguel e manutenção de equipamentos de vibração, desgaste dos moldes e formas, números de trabalhadores, custos com energia elétrica, dentre outros, o CAA se apresenta com um material economicamente viável (HO *et al.*, 2001b; SCHLGBRAUM, 2002).

Um exemplo desse tipo de análise foi o estudo agraciado com o 12º. Prêmio Falcão Bauer, dado pela Câmara Brasileira da Indústria de Construção Civil em 2005. Nesse trabalho foi apresentado um estudo comparativo entre custos diretos de produção do CAA e do concreto convencional. O Quadro 2.5 e a Figura 2.7 ilustram esses valores.

	CONVENCIONAL	CAA	DIFERENÇA
Concreto	89,08	105,39	+ 18,3 %
Mão – de – Obra	7,03	2,23	- 68,3 %
Equipamentos e Energia Elétrica	3,89	0,39	-90,0 %
TOTAL	100,00	108,01	+ 8,0%

Quadro 2.5 – Custos relativos para 1m³ de concreto com fck de 20 MPa (CBIC, 2005).

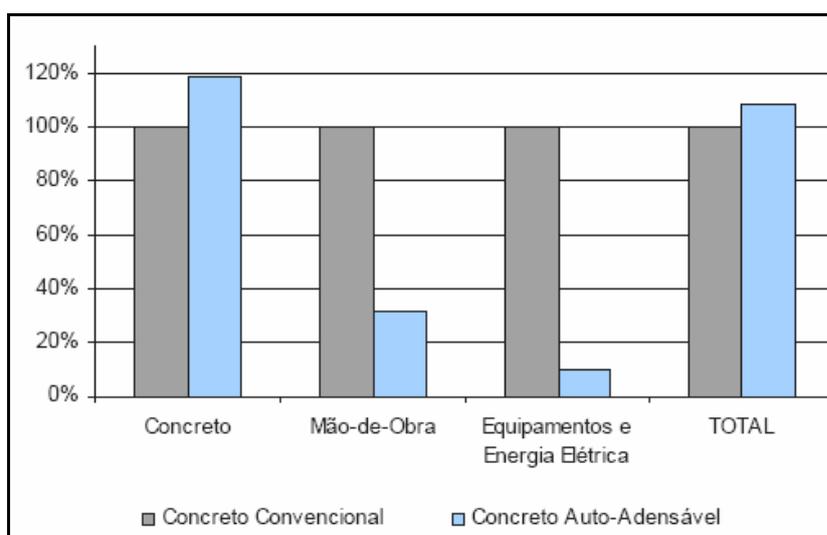


Figura 2.7 – Comparativo de custos para fck de 20 MPa (CBIC, 2005).

Nota-se pelo gráfico que o valor do CAA ficou 8% mais caro que o concreto convencional. No entanto, se forem levados em consideração também os custos indiretos, tais como:

importância e valor da velocidade de execução da obra; melhoria na qualidade final da estrutura; benefícios sociais e ambientais, o custo total do concreto auto-adensável será menor que o do convencional (CBIC, 2005).

Cabe ressaltar que o valor da resistência também irá influenciar no custo final do CAA. De acordo com o trabalho de Tutikian (2004), quanto maior a resistência, menor o custo final do concreto auto-adensável. Este autor estudou concretos com fck de 40 MPa constatando que os custos do materiais para CAA foram apenas 1,8% mais caro que o concreto convencional.

Outro aspecto vantajoso do concreto auto-adensável é que ele pode incorporar uma grande quantidade de resíduos industriais (cinzas volante e escória de alto-forno, por exemplo) como finos em sua mistura. Além de essas adições diminuïrem os gastos com materiais⁶ no CAA, melhoram consideravelmente suas propriedades no estado fresco e endurecido, solucionando os problemas ambientais gerados pela disposição desses resíduos (BOSILJOKOV, 2003; GOMES *et al.*, 2003).

Contudo, algumas considerações devem ser feitas para que o CAA seja mais difundido no meio técnico e científico. Primeiramente, deve-se levar em conta que, devido à alta fluidez desse tipo de concreto, as fôrmas devem ser mais estanques e com uma inclinação de no máximo 2 %. As pressões internas nas fôrmas também são maiores e variam de acordo com o aumento da altura de lançamento do concreto e, por razões de segurança, é conveniente considerar o concreto com um líquido para calcular a pressão lateral sobre o molde (DE LA PENA, 2000b; HAMILTON, 2004; REPETTE, 2005).

Além disso, é necessário promover adaptações físicas e capacitação técnica nas usinas que se dispõem a produzir o CAA; os métodos de dosagem e de ensaios e controle de qualidade do concreto precisam ser aprimorados e desenvolvidos; deve haver maior controle do tempo e da dosagem do concreto e deve-se conhecer com maior predição qual a variabilidade desse tipo de material tanto na produção como em elementos estruturais (HAMILTON, 2004; REPETTE, 2005).

⁶ A adição de finos ao CAA melhora sua coesão e viscosidade, como conseqüência, pode-se eliminar ou reduzir o uso de agentes modificadores de viscosidade, um dos ingredientes mais caros do mercado.

2.5 Aplicações práticas do concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável possui uma elevada fluidez e se consolida sob ação de seu peso próprio, não necessitando de vibração dentre outras vantagens já discutidas na seção anterior. Tais características conferem um grande leque de aplicações que vão desde a construção de fundações executadas por hélice contínua até a utilização de áreas de difícil acesso à vibração ou formas com grande concentração de ferragens, passando pela construção de vigas e colunas, paredes diafragma, estações de tratamento de água e esgoto, reservatórios de água e piscinas, pisos, contrapisos, lajes de pequena espessura ou nervuradas, muros painéis, obras com acabamento em concreto aparente, túneis, pontes, sendo até mesmo utilizado em peças pequenas, com muitos detalhes ou com formatos não convencionais (GEYER e SÁ; 2005).

Além do mais, apresenta excelentes propriedades para ser usado em reabilitação de estruturas, em indústria de concreto pré-fabricado, protendido e pré-misturado. Também, pode ser dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto e depois transportado via caminhão betoneira, lançado com bombas de concreto, guias ou simplesmente espalhado da mesma forma que um concreto convencional (TUTIKIAN, 2004; SCHLUMPF, 2004).

Domone (2006b) analisou 51 relatos de importantes aplicações do CAA no campo da construção ao longo de 11 anos. O gráfico da Figura 2.8 mostra a frequência dessas aplicações em três continentes.

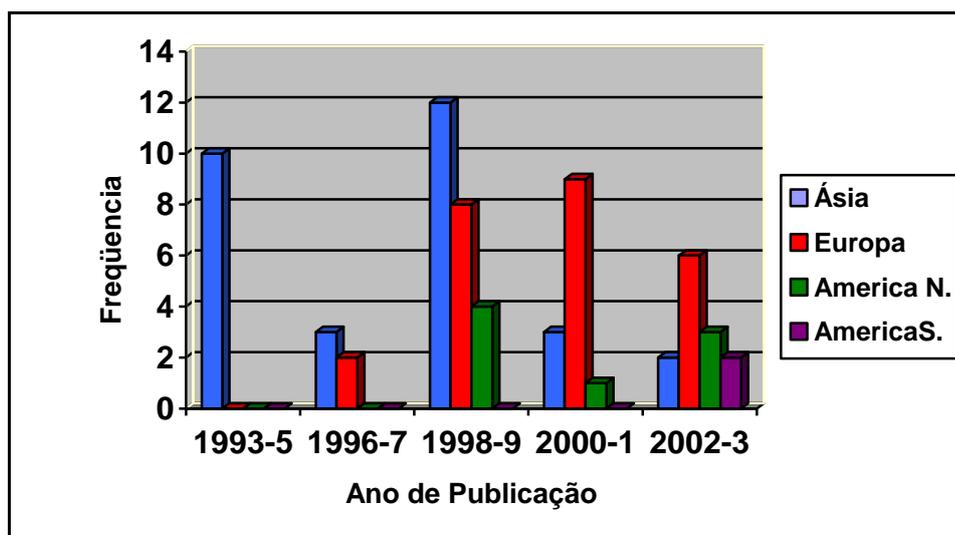


Figura 2.8 – Distribuição geográfica dos estudos de caso (DOMONE, 2006b).

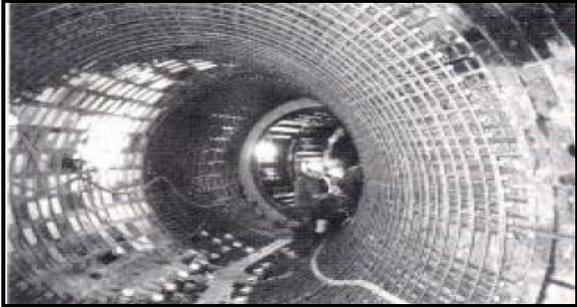
Como se pode notar, utilizações mais antigas e de maior frequência estão situadas no continente asiático, predominantemente no Japão, devido ao pioneirismo de desenvolvimento

do concreto auto-adensável nesse país. Em meados de 1996 o CAA passa a se integrar no panorama europeu, apresentando um crescimento gradual ao longo dos anos. A introdução na América do Norte é mais recente, seguida posteriormente por aplicações na América do Sul.

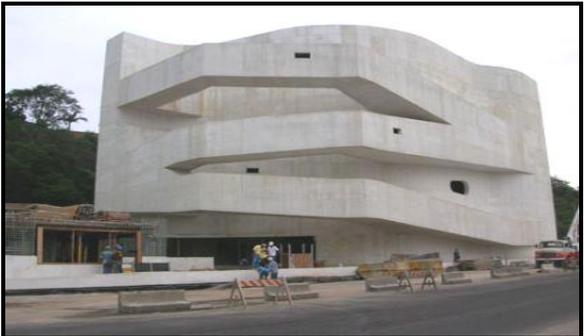
A seguir apresenta-se o Quadro 2.6 com algumas obras em que há utilização do concreto auto-adensável nos continentes asiático, europeu e americano, além das citadas anteriormente.

País	Aplicação e descrição	Imagens
Japão	<p>Obra: Ponte Akashi Kaikyo</p> <p>Construção: 1998</p> <p>Características: Primeira aplicação com grande volume de CAA. Maior vão livre do mundo na época de sua construção (1991m).</p> <p>Vantagens: Foram utilizados 290.000 m³ de CAA nos seus dois blocos de ancoragem, com um rendimento de 1900 m³/dia, o que gerou uma redução do prazo de execução em 20%.</p> <p>Fontes: OKAMURA, 1997; OUCHI, 1999.</p>	 <p>Figura 2.9- Ponte Akashi Kaikyo (OUCHI, 1999).</p>
Japão	<p>Obra: Viaduto Higashi-oozu.</p> <p>Características: O CAA foi usado nas principais vigas T pré-fabricadas/protendidas do viaduto. Na proporção da mistura foram usados 20% de cinza volante, considerando as propriedades do concreto, a localização da obra e o custo.</p> <p>Vantagens: O custo do material do CAA aumentou 4,1%, entretanto, o custo com mão-de-obra foi 33% mais barato que no concreto convencional, diminuindo, assim, o custo final em 7,5%.</p> <p>Fonte: (OUCHI <i>et al.</i>, 2003).</p>	 <p>Figura 2.10- Vigas T em CAA (OUCHI <i>et al.</i>, 2003).</p>
Japão	<p>Obra: Reservatório de metano liquefeito</p> <p>Construção: 1998</p> <p>Características: Tanque com 85 m de diâmetro, 38 m de altura e 80 cm de espessura e cerca de 12.000 m³ de concreto.</p> <p>Vantagens: Rendimento de 200-250 m³/h de concreto; redução no período de construção de 22 para 18 meses; diminuição do n° inicial de camadas de concretagem de 14 para 10; e redução do n° de trabalhadores de 150 para 50.</p> <p>Fonte: OKAMURA, 1997; OUCHI, 1999).</p>	 <p>Figura 2.11- Tanque de metano (KHRAPKO,2007).</p>

Quadro 2.6 - Aplicações do CAA.

País	Aplicação e descrição	Imagens
Japão	<p>Obra: Túnel Yokohama</p> <p>Características: 3 m de diâmetro, 1 km de comprimento. Cerca de 40 m³ de CAA foram utilizados para o preenchimento da estrutura, com um reforço em duas camadas de barras de aço deformadas.</p> <p>Fonte: TAKEUCHI <i>et al.</i>, <i>apud</i> GOMES, 2002.</p>	 <p>Figura 2.12- Túnel Yokohama (CAVALCANTI, 2006)</p>
Itália	<p>Obra: Igreja do Apóstolo São Pedro</p> <p>Local: Pescara</p> <p>Características: Feita com uma variante do CAA na cor branca.</p> <p>Vantagem: O efeito marmorizado nas paredes externas da igreja acentua as vantagens arquitetônicas dessa variante do CAA. Alta fluidez em termos <i>slump flow</i>. ≥ 600 mm.</p> <p>Fonte: Collepari <i>et al.</i> (2004).</p>	 <p>Figura 2.13- Igreja do Apóstolo São Pedro (COLLEPARDI <i>et al.</i>, 2004).</p>
Itália	<p>Obra: World Trade Center</p> <p>Local: San Marino</p> <p>Características: CAA de alta resistência; <i>slump flow</i>. ≥ 600 mm depois de 1h; resistência à compressão ≥ 80 MPa aos 28 dias; módulo de elasticidade dinâmico ≥ 40 GPa; e retração por secagem $\leq a 500$ $\mu\text{m}/\text{m}$ em dois meses.</p> <p>Fonte: Collepari <i>et al.</i> (2004).</p>	 <p>Figura 2.14 - World Trade Center (http://www.edilportale.com/).</p>
França	<p>Obra: Dois Iglus</p> <p>Construção: 1999</p> <p>Características: Iglus de 22 m para testes. Estrutura com duas paredes de fechamento, uma abóboda no topo e outra com 5 segmentos iglu de 4.5 m. Volume total de CAA de 200 m³.</p> <p>Vantagens: Impossibilidade de compactação do concreto convencional tanto com vibradores internos como externos devido à complexidade da estrutura e inadequação das fôrmas.</p> <p>Obs: Foram estudados parâmetros de trabalhabilidade, qualidade da superfície, observações na capacidade de preenchimento.</p> <p>Fonte: BERNABEU e LABORDE (2000).</p>	 <p>Figura 2.15 - Dois Iglus (BERNABEU e LABORDE, 2000)</p>

Quadro 2.6 – Aplicações do CAA (continuação).

País	Aplicação e descrição	Imagens
Canadá	<p>Obra: Condomínio Cinque Terre Local: Vancouver Vantagens: Trabalho de assentamento e término das lajes em balanço reduzido em 90%; redução de 35 homens/hora para 3 homens/hora. Fonte: LAFARGE CORPORATION (2007).</p>	 <p>Figura 2.16 - Condomínio Cinque Terre (LAFARGE CORPORATION, 2007).</p>
Chile	<p>Obra: Reforma do Estádio Nacional do Chile Características: Reparo das arquibancadas altas e das vigas invertidas do estádio, onde o concreto encontrava-se em elevado grau de deterioração por problemas de corrosão. Vantagens: O uso do CAA proporcionou a entrega da obra no prazo (duas semanas, apenas), devido à fácil e rápida forma de aplicação – sem o uso de vibradores. Fonte: CANALLE (2004).</p>	 <p>Figura 2.17 - Estádio Nacional do Chile (CANALLE, 2004)</p>
Argentina	<p>Obra: Edifício do Banco Galicia Local: Buenos Aires Características: Edifício de 34 andares. Nos primeiros 12 pisos foi utilizado concreto convencional; CAA utilizado na abóboda e nas colunas de concreto de alta resistência do edifício. Vantagens: Com a utilização de CAA a pressão no sistema hidráulico da bomba diminuiu 20%, com conseqüente economia na manutenção e aumento da vida útil do equipamento. Fonte: ZITZER <i>et al.</i> (2004)</p>	 <p>Figura 2.18 - Banco Galicia (ZITZER <i>et al.</i>, 2004).</p>
Brasil	<p>Obra: Museu Iberê Camargo Local: Porto Alegre. Características: Concreto branco auto-adensável. Vantagens: resolução de problemas com a vibração do concreto convencional fluido; economia de 7% no custo /m² da obra; redução do consumo de cimento de 80Kg/m³; aumento do tempo de trabalhabilidade e; diminuição da possibilidade de ocorrência de manifestações patológicas. Fonte: SILVA FILHO <i>et al.</i>(2004); TUTIKIAN <i>et al.</i> (2005b).</p>	 <p>Figura 2.19 – Museu Iberê Carmargo (www.archinet.com).</p>

Quadro 2.6 – Aplicações do CAA (conclusão).

2.6 Dosagem dos concretos auto-adensáveis

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) *dosar* um concreto significa obter a melhor proporção entre os materiais disponíveis, como cimento, água, agregados e aditivos, de maneira a produzir uma mistura que atenda aos requisitos de desempenho mínimos necessários a determinada aplicação, assim como o menor custo possível.

Os métodos para proporcionar da mistura do CAA diferem completamente dos métodos tradicionais, entretanto são igualmente empíricos (GOMES, 2002). Além disso, no concreto auto-adensável é importante levar em consideração o tamanho e a forma da estrutura e a dimensão e a densidade das armaduras, as quais podem influir consideravelmente sobre os requisitos de capacidade de preenchimento da peça, na habilidade de passar por obstáculos e na resistência à segregação (EFNARC, 2002).

No entanto, nem sempre o proporcionamento dos componentes do CAA é uma tarefa fácil. Segundo Tutikian (2004), um dos fatores que dificultam a implantação efetiva deste concreto no Brasil e no mundo é a falta de métodos de dosagem que permitam o uso de materiais locais, com garantia de eficiência econômica e técnica.

De acordo com Su *et al.* (2001), em 1995 Okamura publicou o primeiro método de dosagem para CAA, sendo um marco no desenvolvimento da técnica do concreto auto-adensável. Depois da proposta inicial, grupos e pesquisadores desenvolveram outros métodos, dentre os quais pode-se citar:

- a) *Japanese Ready-Mixed Concrete Association (JRMCA)*, uma versão simplificada do método de Okamura;
- b) *Laboratory Central Des Ponts et Chaussées (LCPC)*, que se baseia no reômetro BTRHEON e no software RENE LCPC⁷;
- c) *Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI)*, que considera o concreto em três fases: determinação do volume mínimo de pasta, composição da pasta baseada na caracterização reológica da argamassa e verificação das propriedades do CAA no estado fresco e endurecido;

⁷ O software RENE – LCPC é encarregado de analisar as interações entre os diferentes componentes da mistura de maneira a promover uma combinação com maior densidade (GETTU e AGULLÓ, 2003).

- d) *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*, que também denomina o método de dosagem para concretos auto-adensáveis de alta resistência (CADAR) como método de Gomes (2002);
- e) *Su et al.* (2001), que objetiva obter uma primeira mistura de um concreto auto-adensável, cuja principal consideração é o preenchimento do vazio do esqueleto granular pouco compactado, com argamassa

Neste trabalho são apresentados resumidamente uma descrição do método de Okamura e do método de Gomes. Este último será posteriormente detalhado no capítulo 3 por ser o método utilizado para a dosagem dos concretos desta pesquisa.

2.6.1 Método de Okamura

Em 1995, Okamura propôs um método simples de dosagem, utilizando os constituintes comuns para fabricação de concreto. Basicamente, fixou a taxa de agregado miúdo e graúdo, e a trabalhabilidade requerida é alcançada facilmente, ajustando-se o fator água/finos e a dosagem do superplastificante. O esquema do procedimento de dosagem é apresentado na Figura 2.20.

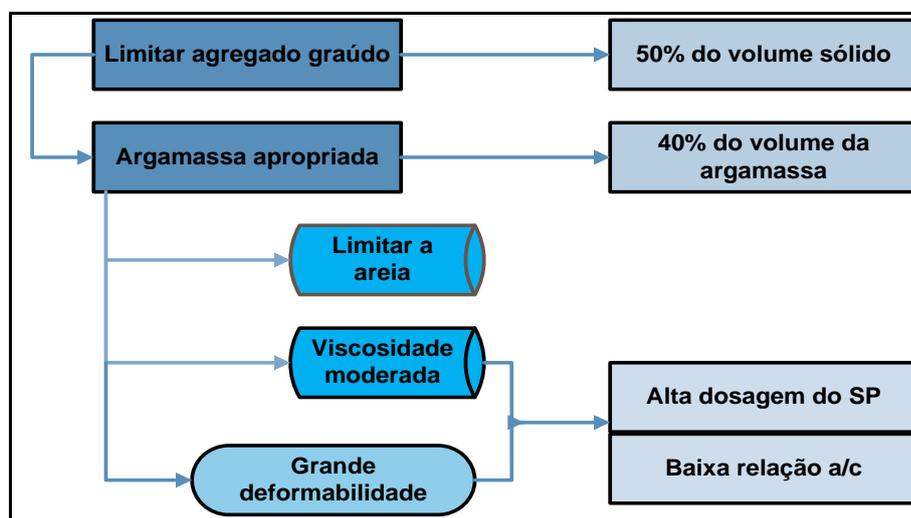


Figura 2.20- Metodologia para obter auto-adensamento (OKAMURA e OUCHI, 2003).

De acordo com a metodologia, a quantidade de agregado graúdo é limitada em 50% do volume total de concreto, enquanto a de agregado miúdo é fixado a 40% do volume total de argamassa. A relação água/finos é quantificada entre 0,9 e 1,0, dependendo do tipo de fíler utilizado, e a dosagem de aditivo é determinada experimentalmente até o material apresentar as características esperadas (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Em seguida, as propriedades de auto-adensamento da argamassa são avaliadas através de índices que expressam a capacidade de fluxo (Γ_m) e viscosidade (R_m), medidos respectivamente nos ensaios⁸ de *tronco de cone de consistência* e *funil V* (OKAMURA e OUCHI, 2003). Tais critérios foram usados também para definir a dosagem apropriada do superplastificante e a relação água/finos para o CAA (GOMES, 2002).

Apesar da simplicidade do método, algumas limitações são apontadas por Tutikian (2004). Este autor afirma que “não há como dosar um concreto apenas com limites superiores de quantidade e com termos altamente abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação a/c”. Outra deficiência é o fato de não incorporar no seu cálculo a adição de finos pozolânicos ou aditivos modificadores de viscosidade, além de não existir uma seqüência de execução, forçando a várias tentativas para alcançar as propriedades requisitadas.

2.6.2 Método de Gomes

Este método foi desenvolvido pelo professor Paulo Cesar Gomes na Universidade Politécnic da Catalunya em caráter experimental. Trata-se de uma extensão do método de Torrales *et al.*(1996;1998, *apud* LISBÔA, 2004) para concretos de alta resistência, adaptado para concretos auto-adensáveis.

O procedimento considera o concreto como um material bifásico no qual a fase da pasta é otimizada separadamente do esqueleto granular. Além disso, para ser considerado de alta resistência o CAA deve apresentar resistência à compressão igual ou maior que 50 MPa aos 7 dias. Na Figura 2.21 está representado um esquema detalhado do processo de dosagem proposto por Gomes (2002).

De acordo com o fluxograma, no método são designadas as relações água/cimento (a/c), superplastificante sólido/cimento (sp/c) e fíler/cimento. O fator a/c se mantém na faixa de 0,35 a 0,40, sendo determinada de acordo com a resistência requerida. A dosagem ótima de superplastificante (sp/c) e a relação f/c são encontradas através dos ensaios⁹ de cone de *Marsh* em conjunto com o mini-*slump*. Da mesma forma, a dimensão máxima característica dos agregados é limitada em 20mm (GOMES, 2002).

⁸ Esses ensaios serão descritos detalhadamente do capítulo 3.

⁹ Esses ensaios serão descritos detalhadamente no capítulo 3.

A melhor combinação do esqueleto granular é determinada segundo um critério de máxima densidade a seco e sem compactação. Esse resultado é alcançado com a variação da composição dos agregados que forneçam maior massa unitária¹⁰, garantindo o menor conteúdo de vazios.

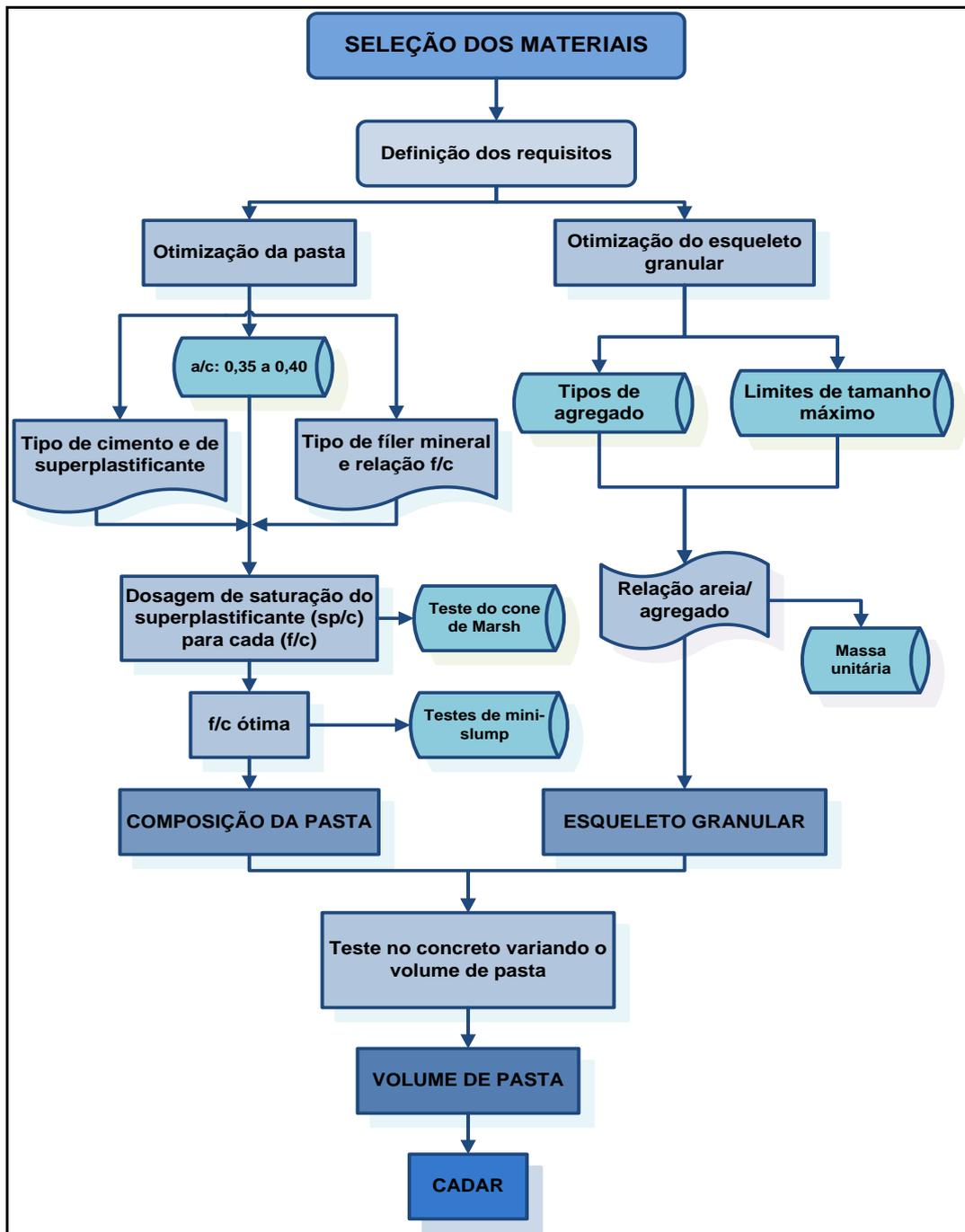


Figura 2.21 – Esquema detalhado do método de dosagem de Gomes (2002).

¹⁰ Gomes (2002) utiliza as orientações da norma ASTM C29/C29M. Nesta pesquisa foi utilizado o procedimento conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) - Determinação de massa unitária no estado solto, descrito posteriormente no capítulo 3.

Finalizada essas etapas, passa-se a otimização do volume de pasta, em que os CAA's são submetidos a diversos ensaios que avaliam suas propriedades no estado fresco. Para medir a capacidade de preenchimento, Gomes (2002) recomenda os ensaios de espalhamento (*slump flow*) e funil V, para os parâmetros de capacidade de passar pelas armaduras, a caixa – L e, finalmente, para os parâmetros de resistência à segregação, o tubo U.

2.6.3 Proporções da mistura

A alta fluidez e moderada viscosidade e coesão do concreto auto-adensável são características que estão diretamente ligadas a escolha dos componentes e suas proporções na mistura. O CAA necessita de uma grande quantidade de finos para evitar a segregação do agregado e a exsudação da água durante o lançamento. Além disso, contribui para a redução do calor de hidratação pela substituição parcial do cimento por estas adições, uma vez que o CAA exige um alto volume de pasta (GOMES, 2002; GETTÚ e AGULLÓ, 2003).

Nos Quadros 2.7 e 2.8 estão apresentadas as proporções de mistura de CAA com níveis de resistência normal e alta resistência, elaboradas por diversos autores.

Em uma análise comparativa entre o CAA de resistência normal e o CADAR, observa-se que o concreto auto-adensável de alta resistência apresenta um maior volume de pasta, maior massa de finos, menor relação água/finos e conseqüentemente menor massa de agregados, que são características comumente encontradas no concreto convencional de alta resistência.

Ainda nos Quadros 2.7 e 2.8, observa-se a presença usual de materiais finos, tais como: sílica ativa, escória de alto-forno, fíler calcário, cinza volante e a incorporação de superplastificantes de grande poder redutor de água, principalmente de nova geração como policarboxílicos e outros copolímeros.

Mistura kg/m ³	Bouzoubaâ (2001)	Bouzoubaâ (2001)	Nagataki (2005)	Domone e Chai (1996)	Kim <i>et al.</i> (1996)	Sakata <i>et al.</i> (1996)	Sakata <i>et al.</i> (1996)	Sedran <i>et al.</i> (1996)	Bartos e Grauers (1999)	Umehara (1999)	Shindoh (1996)	Ambroise e Péra (2001)	Su <i>et al.</i> (2001)
Cimento	163	161	200	218	370	331	331	350	280	360	215	380	300
Filler Calcário						216	216	134	240			20	
Escória de alto forno			200	280						247	215		63
Sílica Ativa													
Cinza Volante	245	241	100	125	159						107		148
Material Cimentício (mc)	408	402	500	623	529	331	331	350	280	607	537	380	511
Total material fino (mf)	408	402	500	623	529	547	547	484	520	607	537	400	511
Água	164	141	166	179	185	166	166	168	199	176	178	201	171
Agregado Miúdo	851	866	704	686	782	713	713	852	865	774	881	900	928
Brita Ø até 10 mm													
Brita Ø até 11 mm								363					
Brita Ø até 12,7 mm	851	864											
Brita Ø até 14 mm													
Brita Ø até 16 mm										803		800	
Brita Ø até 20 mm			898	785	820	888	888	571	750		663		718
Total de Brita	851	864	898	785	820	888	888	934	750	803	663	800	718
Superplastificante	2	3	6	8,2	10	9,8	13,7	7,1	4,2	6,4		4	8,2
Incorporador	0,394	0,345		0,8		0,3	0,1						
Agente Viscoso							0,35					2	
Volume de Pasta (%)	33,6	31,1											
Relação a/c (em peso)	1,01	0,88	0,83	0,82	0,5	0,5	0,5	0,48	0,71	0,49	0,83	0,53	0,57
Relação a/mc (em peso)	0,40	0,35	0,33	0,29	0,35	0,50	0,50	0,48	0,71	0,29	0,33	0,53	0,33
Relação a/f (em peso)	0,4	0,35	0,33	0,28	0,35	0,3	0,3	0,34	0,36	0,29	0,33	0,5	0,4
Argamassa	2110	2132	2102	2094	2131	2148	2148	2270	2135	2184	2081	2100	2157
Teor de Argamassa (%)	59,67	59,47	57,28	62,51	61,52	58,66	58,66	58,85	64,87	63,23	68,14	61,90	66,71
teor água/materiais secos (%)	7,77	6,61	7,90	8,55	8,68	7,73	7,73	7,40	9,32	8,06	8,55	9,57	7,93
fc 28dias (MPa)	30,3	30,3			47			50	47			48	41

Quadro 2.7- Misturas de CAA de resistência normal.

Mistura kg/m ³	Barbosa <i>et al.</i> (2002)	Persson (2001 a)	Su <i>et al.</i> (2001)	Nishizaki <i>et al.</i> (1996)	Khayat e Guizani (1997)	Billberg (1999)	Nagai (1999)	Gomes (2002)	Gomes (2002)	Gomes (2002)	Gomes (2002)	Erliem y Helmdal (1999)	Bui <i>et al.</i> (2002)
Cimento	378	260	300	515	417	405	505	432	465	501	458	395	380
Filler Calcário				70		121	75	130	186				
Sílica Ativa	37,8				18			43,2				16	
Escória de Alto forno			63										
Filler Quartzito		185											
Cinza Volante			148		118					200	275		145
Material Cimentício (mc)	415,8	260	511	515	553	405	505	475,2	465	701	733	411	525
Total material fino (mf)	415,8	445	511	585	553	526	580	605,2	651	701	733	411	525
Água	185	207	172	170	225	162	187	183	178	190	190	165,9	159,6
Agregado Miúdo	770,5	1000	928	737	691	895	861	791	791	771	744	932	788
Brita Φ até 11 mm		395											
Brita Φ até 12,7 mm	1010				568			834	834	721	696		
Brita Φ até 14 mm													
Brita Φ até 16 mm		270										488	854
Brita Φ até 20 mm			718	789	247	732	882						
Brita Φ até 24 mm												414	
Total de Brita	1010	665	718	789	815	732	882	834	834	721	696	902	854
Superplastificante	3,23	1	8,2	9	5,6	3,4	12,8	13,6	11,1	8,8	7,4	4,2	2,2
Incorporador													
Agente Viscoso							0,1						
Volume de Pasta (%)								38	38	43	45		
Relação a/c (em peso)	0,49	0,8	0,57	0,33	0,54	0,4	0,37	0,4	0,35	0,35	0,4	0,42	0,48
Relação a/mc (em peso)	0,44	0,80	0,34	0,33	0,41	0,40	0,37	0,39	0,38	0,27	0,26	0,40	0,30
Relação a/f (em peso)	0,44	0,47	0,34	0,29	0,41	0,31	0,32	0,3	0,27	0,27	0,26	0,38	0,35
Argamassa	2196,3	2110	2157	2111	2059	2153	2323	2230	2276	2193	2173	2245	2167
Teor de Argamassa (%)	54,01	68,48	66,71	62,62	60,42	66,00	62,03	62,60	63,36	67,12	67,97	59,82	60,59
teor água/materials secos (%)	8,42	9,81	7,97	8,05	10,93	7,52	8,05	8,21	7,82	8,66	8,74	7,39	7,37
fc 28dias (MPa)	65,3	65	51,4	60	52	69	70	63,6	55,9	67	60,8	72	74

Quadro 2.8 – Misturas para concretos auto-adensáveis de alta resistência (CADAR).

2.7 Ensaios em concreto auto-adensável

2.7.1 Ensaio de espalhamento (*Slump flow*) e T_{50}

O ensaio de espalhamento é o método mais comum para avaliar a habilidade do concreto auto-adensável de fluir, devido a seu peso próprio. Com esse método é possível também avaliar visualmente a presença de segregação (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

O equipamento para o ensaio é o cone de Abrams (Figura 2.22), o mesmo usado para o ensaio de abatimento do concreto convencional, especificado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). O procedimento de ensaio é descrito em detalhes na seção 3.5.2.1.1.

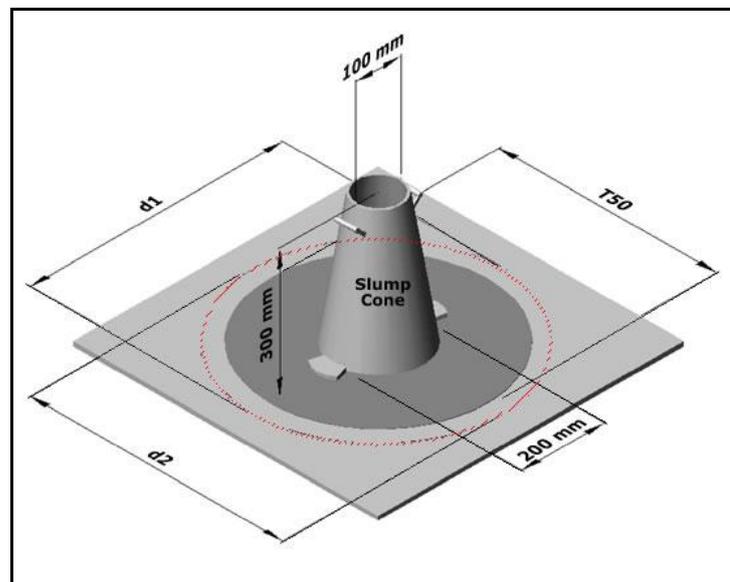


Figura 2.22 – *Slump flow* (CAVALCANTI, 2006).

Como mencionado anteriormente, por meio deste ensaio também pode-se avaliar o grau de segregação do CAA. Examinando o aspecto final do concreto é possível determinar um índice de estabilidade visual (IEV) usando-se uma escala numérica de 0 a 3, quantificando a presença de sinais de segregação ou exsudação. Para ser aceitável dentro dos parâmetros de auto-adensamento, o CAA deve exibir taxa 0 ou 1 (KOEHLER *et al.*, 2003).

Utilizando-se o cone de Abrams invertido, ou seja, com a abertura de menor diâmetro sobre a base, pode obter-se uma variação deste ensaio. A grande vantagem da inversão é que não há necessidade de outra pessoa para firmar o cone sobre a base, pois o próprio peso do concreto o mantém estável. Tal fato facilita a execução do ensaio em obra, uma vez que dá ao operador, mobilidade para o preenchimento do cone, além de poder ser executado em

superfícies elevadas, como mostra a Figura 2.23 Os parâmetros medidos para esta variante são os mesmos que o *slump flow* convencional (GETTU e AGULLÓ, 2003; RAMSBURG, 2003).



Figura 2.23 – (a) O cone e o técnico estão firmemente plantados no piso. (b)- Técnico executando o ensaio de *slump-flow* invertido em uma base elevada (RAMSBURG, 2003).

Tanto na forma tradicional, quanto na invertida, os resultados obtidos por estes ensaios são o T_{50} e o diâmetro final de espalhamento (D_F). O T_{50} representa o tempo necessário para que a amostra de concreto alcance um diâmetro de 50 cm. São recomendados valores de T_{50} entre 1 e 10 segundos para misturas com uma viscosidade moderada sem que apresente segregação e com um comportamento favorável frente ao bloqueio. Quanto aos valores de D_F , são recomendadas medidas entre 600 e 800mm, apresentadas por misturas com boa habilidade ou facilidade para preenchimento. No Quadro 2.9 são mostrados os limites mínimos e máximos dentro dos parâmetros de auto-adensamento, segundo diversos autores.

REFERÊNCIAS	ESPALHAMENTO		TEMPO	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Araújo <i>et al.</i> (2003)	650	800	2	5
Coppola (2000)	600	750	5	12
EFNARC (2002)	650	800	2	5
Gomes (2002)	600	700	4	10
Gomes <i>et al.</i> (2003)	600	750	3	7
Palma (2001)	650	750	3	6
Peterssen (1999)	650	725	3	7
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	600	800	3	6
Tviksta (2000)	600	-	3	7

Quadro 2.9 – Limites de resultados para o *slump flow* e T_{50} cm (TUTIKIAN, 2004).

2.7.2 Ensaio de espalhamento com Anel - J (*J-Ring test*)

O anel japonês é usado em conjunto com o *slump flow* para determinar a capacidade de fluxo juntamente com a resistência ao bloqueio do CAA. O equipamento consiste em um anel de

30cm de diâmetro por 10 ou 12cm de altura, no qual se dispõem barras perimetrais verticais com espaçamento entre as barras normalmente recomendado igual a 3 vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Vale dizer que a especificação alemã fixa a separação das barras em aproximadamente 2,5 vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo (GOMES, 2002; EFNARC, 2002; BRAMESHUBER e UEBACHS, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

O diâmetro final D_F de espalhamento é obtido da mesma maneira que foi feito com o ensaio de espalhamento de fluxo (*slump flow*), mas desta vez a amostra atravessa o anel durante o espalhamento. As alturas alcançadas pelo concreto junto às faces interna e externa do anel são medidas em quatro lugares (em mm), como ilustra a Figura 2.24. As médias entre essas medidas são calculadas (GOMES, 2002; EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

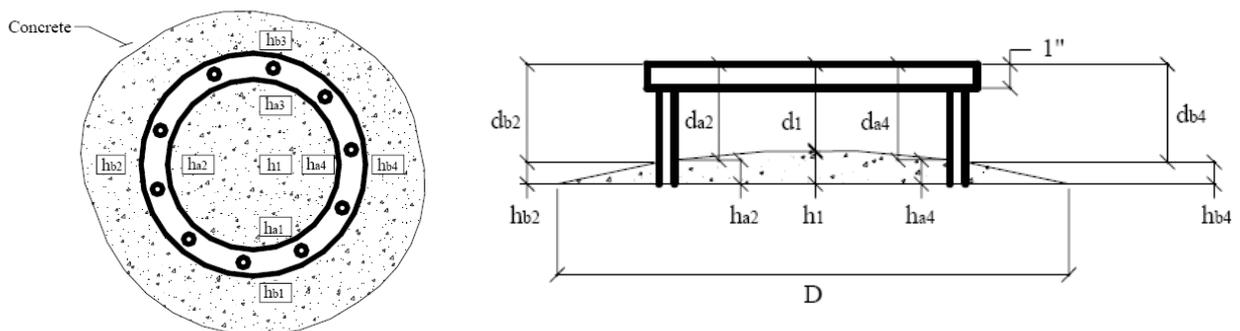


Figura 2.24 - Medida das alturas no anel-J (PCI, 2003).

O resultado do diâmetro de espalhamento final deve ser maior que o valor obtido no *slump flow* sem o anel menos 50 mm. Da mesma forma, a diferença entre as alturas interna e externa do anel não deve superar 10 mm (GOMES, 2002; EFNARC, 2002; BRAMESHUBER e UEBACHS, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

2.7.3 Ensaio de tempo de fluidez com funil-V (*V funnel test*)

Este ensaio expressa a avaliação da capacidade do CAA de passar por áreas restritas, na direção vertical e sob ação de seu peso próprio. Além de ser um bom indicativo da viscosidade, também avalia a resistência à segregação. O funil V foi desenvolvido na Universidade de Tóquio e consiste em medir o tempo que aproximadamente 10 litros de concreto leva para escoar pela abertura do funil (GOMES, 2002; EFNARC, 2002; KOEHLER *et al.*, 2003; GETTU e AGULLÓ, 2003).

As dimensões e geometria do equipamento são variadas, conforme mostra a Figura 2.25. Normalmente o funil retangular é o mais utilizado. Para o canal de saída do funil, recomenda-se uma abertura de dimensão mínima maior que três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Como no CAA o tamanho máximo do agregado graúdo não ultrapassa 20mm, a dimensão mínima da saída é em torno de 6,5 a 7,5 cm (GOMES, 2002; EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

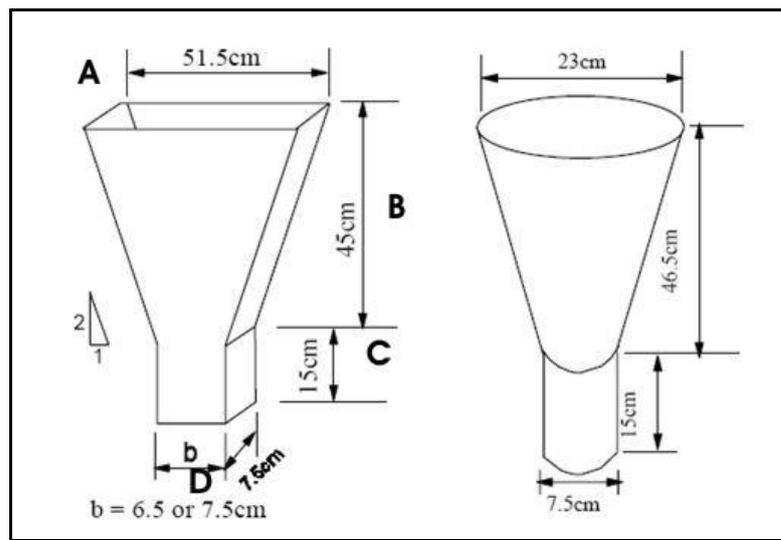


Figura 2.25 - Geometrias do funil V (GOMES, 2002).

O procedimento deste ensaio é descrito em detalhes na seção 3.5.2.1.3. Os resultados obtidos apontam para vários aspectos do concreto fresco. O primeiro deles está relacionado com o teor e tamanho dos agregados graúdos. Se a dosagem desses componentes for correta, o concreto passará facilmente pela abertura do funil V. O tempo que o concreto leva para fluir pelo funil é associado à sua maior ou menor fluidez. Um tempo de fluxo elevado indica a necessidade da modificação da viscosidade. O Quadro 2.10 apresenta alguns resultados do ensaio de acordo com referências de diversos pesquisadores.

REFERÊNCIAS	TEMPO		DIMENSÕES			
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D
Araújo <i>et al.</i> (2003)	6	12	-	-	-	-
Coppola (2000)	-	-	550	425	150	65
EFNARC (2002)	6	12	490	425	150	65
Furnas (2004c)	-	-	515	450	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 Ou 75
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	7	13	515	450	150	65
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Peterssen (1998 E 1999)	5	15	550	450	120	75

Quadro 2.10 – Valores limites de resultados e dimensões para o funil – V (TUTIKIAN, 2004).

2.7.4 Ensaio da Caixa L (*L Box test*)

O ensaio da caixa L mede a habilidade do concreto de fluir sob ação da gravidade e, simultaneamente, sua capacidade de passar por obstáculos que simulam as barras de armadura (GETTU e AGULLÓ, 2003).

O equipamento é uma caixa em formato de “L” que deve ser fabricado em materiais não absorventes e rígidos, tais como madeira, metal ou acrílico, de fácil montagem e desmontagem para facilitar a limpeza das superfícies em contato com o concreto. Consiste basicamente em um depósito vertical com altura de 600 mm que se conecta a uma seção horizontal de comprimento que pode variar de 700 mm a 800 mm. Na abertura que liga o canal vertical ao horizontal está localizada uma pequena porta móvel, responsável por reter o concreto antes do início do escoamento, e as barras de aço, que simulam as armaduras de uma estrutura real. As Figuras 2.26 e 2.27 ilustram o formato e as dimensões da caixa L (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

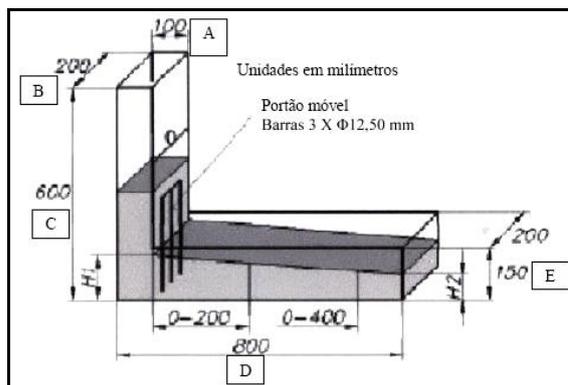


Figura 2.26 - Dimensões da caixa - L (EFNARC, 2002).

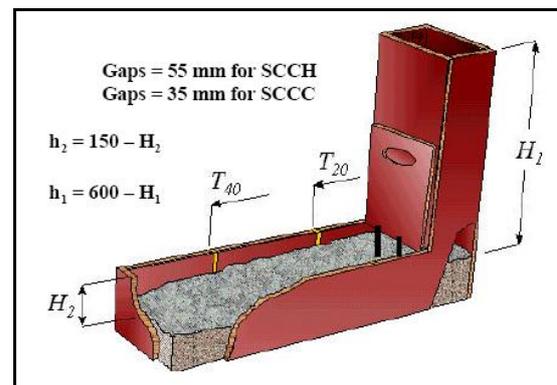


Figura 2.27 - Espaçamento entre as barras e medidas do T_{20} e T_{40} (SONEBI *et al.*, 2000).

O espaçamento entre essas barras ainda é controverso na literatura. A AFGC (2000) recomenda o uso de barras com diâmetro de 14 mm, com espaçamento entre elas de 39mm, podendo ser aumentado para 58 mm em casos de aplicações em que não há congestionamento de armaduras. Já a EFNARC (2002) e Gomes (2002) recomendam utilizar um espaçamento de 3 vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo, coincidindo praticamente com a recomendação de Billberg (1999), para a utilização de 3 barras de 12 mm, com um espaço de 34 mm entre elas. Manuel (2005) cita ainda que é possível fabricar caixas L sem obstáculos para concretos onde a dimensão máxima característica do agregado graúdo não ultrapasse 25 mm.

O procedimento de ensaio é descrito detalhadamente na seção 3.5.2.1.4. Neste teste os parâmetros obtidos são tempos de escoamento para que a mistura atinja a marca de 20 cm (T_{20}) e 40 cm (T_{40}) na seção horizontal da caixa e a relação de bloqueio (H_2/H_1). Os valores desses parâmetros, obtidos em diferentes variações de caixa – L são apresentados no Quadro 2.11.

REFERÊNCIA	MEDIDAS			DIMENSÕES				
	H2/H1	T20 (s)	T40 (s)	A	B	C	D	E
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0,80	-	-	-	-	-	-	-
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	-	-	-	100	-	600	700	150
Coppola (2000)	0,90	-	-	120	300	600	780	200
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
FURNAS (2004d)	-	-	-	100	200	600	700	150
Gomes (2002)	0,80	<1	<2	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	700	150
Palma (2001)	0,80	-	3 a 6	-	-	-	-	-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	700	150
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	0,80	<1,50	<3,50	100	-	-	-	-
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	200	600	-	150

Quadro 2.11 – Limites de resultados e dimensões para a caixa L (TUTIKIAN, 2004).

2.7.5 Ensaio da Caixa – U (*U Box Test*)

O ensaio de caixa U foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Tecnológicas da *Taisei Corporation*, no Japão, com o objetivo de avaliar a fluidez e a habilidade do CAA de passar por obstáculos sem segregar (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

O equipamento consiste basicamente em duas seções verticais, separadas por uma porta deslizante, na qual estão localizadas barras de aço que simulam as armaduras de uma estrutura. A base do aparato pode ser semicircular ou retangular, como ilustram as Figuras 2.28 e 2.29. Ambas podem ser fabricadas em madeira, metal ou acrílico, sendo que, esta última é mais fácil de construir e exige maior deformabilidade do concreto, uma vez que apresenta ângulos retos na sua parte inferior (GETTU e AGULLÓ, 2003).

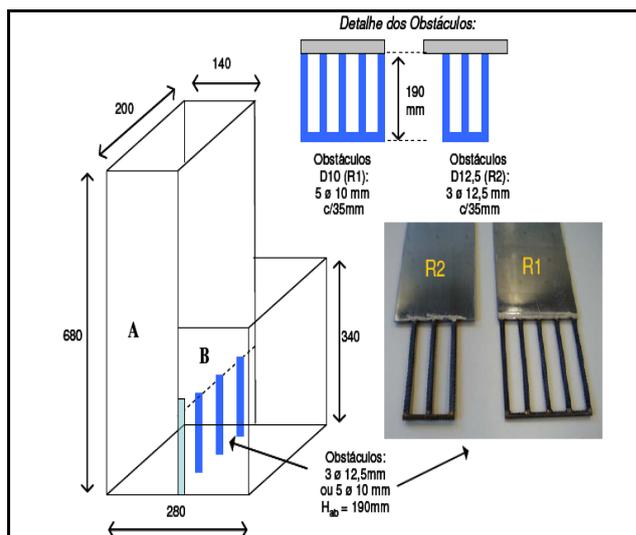


Figura 2.28 – Dimensões (mm) da caixa U e detalhes dos obstáculos (MANUEL, 2005).

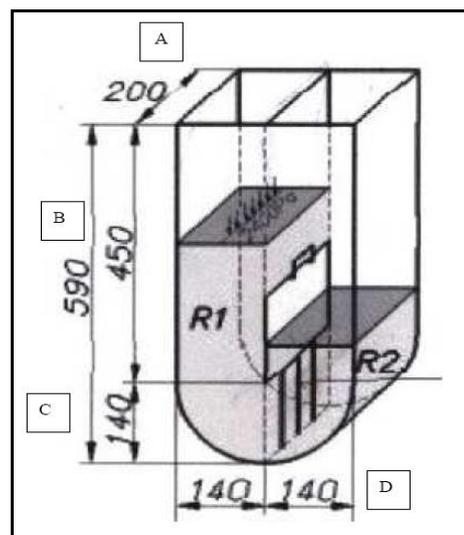


Figura 2.29 – Medidas da caixa U recomendadas (EFNARC, 2002).

A quantidade de barras e o espaçamento entre elas podem ser definidos de acordo com a finalidade que o concreto ensaiado terá na obra (GETTU e AGULLÓ, 2003). Entretanto, a EFNARC (2002) recomenda barras de aço com um diâmetro nominal de 13 mm, com espaçamento de 50 mm entre elas. Manuel (2005) cita ainda que, é possível utilizar 5 barras de diâmetro de 10 mm ou 3 barras de 12,5 mm, que definem o grau de exigência para que o concreto seja auto-adensável.

O procedimento de ensaio é detalhado na seção 3.5.2.1.5. Com os resultados obtidos determina-se a altura de preenchimento e quanto mais próximo de zero esse valor resultar, maior a fluidez do concreto. O Quadro 2.12 mostra os valores mínimos e máximos encontrados, em várias configurações da caixa – U, por diversos pesquisadores.

REFERÊNCIA	R2 – R1 (mm)		DIMENSÕES (mm)			
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0	30	-	-	-	-
Coppola (2000)	90%	100%	200	680	190	140
EFNARC (2002)	0	30	200	590	140	140
FURNAS (2004)	-	-	200	680	190	140
Gomes (2002)	0	80	200	680	190	140
Noor e Uomoto (1999)	0	24,2	200	680	190	140
Shindoh e Matsuoka (2003)	0	80	200	680	190	140

Quadro 2.12 - Limites de resultados e dimensões para a caixa U (TUTIKIAN, 2004).

2.7.6 Ensaio da Caixa de preenchimento (*Fill Box Test*)

Este equipamento permite avaliar a capacidade de preenchimento do concreto em uma situação em que se simula uma estrutura com alta taxa de armadura. O ensaio da caixa de

preenchimento é também conhecido como método de Kajima ou *vessel test* (GETTU e AGULLÓ, 2003; EFNARC, 2002).

O aparato, ilustrado na Figura 2.30, consiste em um recipiente fabricado em material transparente, não absorvente, com dimensões de 30 x 50 x 30 cm. No interior da caixa são dispostos 35 obstáculos (barras metálicas ou de PVC) com diâmetro de 20 mm e um espaçamento de 50 mm entre eixos. Para facilitar a execução do ensaio, um tubo de 100 mm de diâmetro e 500 mm de altura, acoplado a um funil, deve ser colocado na parte superior do equipamento.

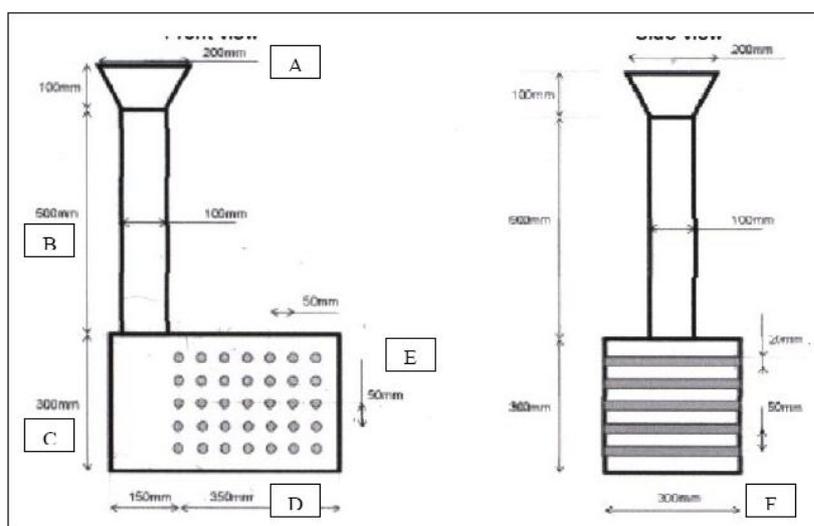


Figura 2.30 – Medidas da caixa de preenchimento recomendadas (EFNARC, 2002).

O procedimento de execução do ensaio é apresentado no capítulo 3. O objetivo principal do teste é obter a porcentagem média de preenchimento, devendo este valor estar entre 90 e 100% para considerar um concreto auto-adensável. O Quadro 2.13 ilustra os resultados obtidos na caixa de preenchimento por diversos autores.

REFERÊNCIA	F (%)		DIMENSÕES (mm)					
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D	E	F
Araújo <i>et al.</i> (2003)	90	100	-	-	-	-	-	-
EFNARC (2002)	90	100	200	500	300	500	50	300
FURNAS (2004b)	-	-	200	500	300	500	50	300
Gomes <i>et al.</i> (2003)	-	-	-	-	300	500	50	-
Palma (2001)	-	100	-	500	-	-	50	-

Quadro 2.13 – Limites de resultados e dimensões para a caixa de preenchimento (TUTIKIAN, 2004).

2.7.7 Ensaio do Tubo U (*U Pipe Test*)

O objetivo do ensaio do Tubo U é avaliar quantitativamente a resistência à segregação ou a estabilidade do concreto auto-adensável no estado fresco. O aparato foi desenvolvido por

Gomes (2002) como uma adaptação do ensaio U de Sakata *et al.* (1997) e Coluna de Rols *et al.* (1999), na Universidade Politécnica da Catalunya, Espanha (GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003;).

O equipamento é fabricado com três segmentos de tubo e dois joelhos de PVC, com diâmetro interno de 156 mm e comprimentos conforme ilustra a Figura 2.31.

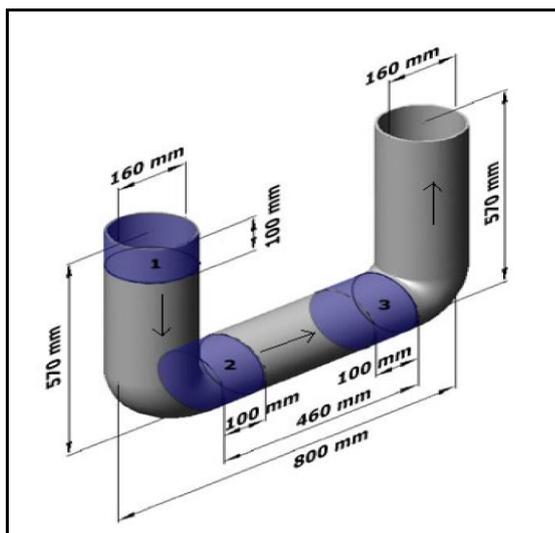


Figura 2.31 – Ensaio do tubo U (CAVALCANTI, 2006)

O parâmetro obtido no ensaio é a relação de segregação (RS), que deve ser igual ou superior 0,90 para concretos auto-adensáveis. O procedimento de ensaio e as equações para calcular a relação de bloqueio são mostrados na seção 3.5.2.1.7.

2.8 Materiais

Os materiais envolvidos na dosagem de concretos auto-adensáveis são, em geral, os mesmos empregados no concreto convencional. São eles: cimento, agregados graúdos e miúdos, finos, água e aditivos. No entanto, no caso do CAA, o uso de aditivos superplastificantes é obrigatório e imprescindível para obtenção da alta fluidez. Além disso, também estão presentes as adições minerais e os agentes modificadores de viscosidade, utilizados para se obter uma adequada coesão na mistura e evitar a segregação e a exsudação durante colocação do concreto (GETTU e AGULLÓ, 2003; LISBÔA *et al.*, 2004).

Do ponto de vista econômico, o emprego de materiais locais no CAA resulta em um concreto economicamente mais viável devido à redução de custos de transporte e facilidade de obtenção. Além do mais, este concreto pode incorporar um elevado teor de finos, sendo um potencial consumidor de resíduos industriais. A utilização de adições provenientes de resíduos

e subprodutos¹¹ das indústrias locais não só reduz custos do material e melhora seu desempenho, mas também diminui o impacto ambiental (GETTU e AGULLÓ, 2003; GOMES *et al.*, 2003; LISBÔA *et al.*, 2004).

A seguir serão apresentadas as características e as implicações de cada material empregado na fabricação do CAA.

2.8.1 Cimento

De uma forma geral, não existe nenhum requisito adicional exigido ao cimento para seu emprego em concreto auto-adensável. Frequentemente é utilizado o cimento Portland (CP), bastante produzido e facilmente encontrado no mercado. Todavia, é importante acrescentar que seu teor na mistura deve ser limitado para evitar efeitos indesejados, tais como elevado calor de hidratação e aumento da retração plástica. A EFNARC (2002) recomenda que a quantidade de cimento esteja na faixa entre 350 Kg/m³ – 450 Kg/m³. Teores superiores a 500 Kg/m³ podem causar retração, e inferiores ao limite mínimo de 350 Kg/m³ só são adequados em conjunto com outras adições, formando misturas binárias¹² ou ternárias¹³ (EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003; REPETTE, 2005; MELO, 2005).

Além disso, algumas características do aglomerante devem ser avaliadas antes de ser incorporado ao CAA, dentre elas, a finura e a capacidade de adsorver o superplastificante. Em concretos auto-adensáveis é desejável cimentos que apresentem maior área específica, objetivando a redução da tensão de escoamento e maior viscosidade (NEVILLE, 1997). Este tipo de cimento também é o mais adequado para a produção de CADAR (Concreto Auto-Adensável de Alta Resistência), pois possuem elevada velocidade de hidratação e um rápido ganho de resistência (NUNES, 2001; REPETTE, 2005).

O fenômeno da adsorção do aditivo pelo cimento se dá preferencialmente nas fases de aluminatos (C₃A¹⁴ e C₄AF¹⁵), especialmente no C₃A. A fixação no aluminato tricálcico ocorre de forma rápida e em poucos segundos, retardando a evolução da hidratação. Os aditivos

¹¹ Subprodutos são materiais que não são produtos primários de suas respectivas indústrias produtoras e podem ou não requerer um processamento qualquer antes do emprego como adições minerais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

¹² cimento + adição.

¹³ cimento + duas adições.

¹⁴ Aluminato tricálcico

¹⁵ Ferroaluminato tetracálcico

também podem retardar a hidratação dos silicatos (C_2S^{16} e C_3S^{17}), no entanto, esse efeito é mais evidente no C_3A . Por isso, são recomendados cimentos com uma quantidade menor que 10% (em massa de cimento) do composto, a fim de manter a trabalhabilidade das misturas de CAA (EFNARC, 2002; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; REPETTE, 2005).

2.8.2 Agregados

Normalmente os agregados que comumente são empregados no concreto convencional podem ser utilizados no CAA. Mas, características como teor de umidade, absorção de água e variação da quantidade de finos devem ser constantemente monitoradas. A forma e granulometria dos agregados também são importantes, pois influenciam diretamente as propriedades de fluxo e a demanda de pasta do concreto. Quanto mais esféricas forem as partículas do agregado, menos suscetível ele é a bloqueio e maior é a fluidez da mistura devido à redução do atrito interno. Diante disso, é preferível o emprego de areias naturais, por apresentarem grãos com forma mais uniforme e arredondada, e britas de forma regular de qualquer natureza (EFNARC, 2002; REPETTE, 2005; SCCEPG, 2005).

A influência dos agregados miúdos nas propriedades dos concretos em geral é significativamente maior do que a dos agregados graúdos. Em especial no CAA, a umidade superficial das areias deve ser cuidadosamente verificada, pois este concreto é muito mais sensível às flutuações no teor de água total da mistura do que o concreto tradicional (RILEM, 2006). Outrossim, frações de partículas com tamanho inferior a 0,125 mm presentes na areia devem ser consideradas no total do teor de finos (cimento + finos) da pasta e ainda no cálculo da relação água/finos, contribuindo positivamente com a reologia do concreto (EFNARC, 2002; SCCEPG, 2005).

O agregado graúdo geralmente tem seu tamanho máximo limitado entre 12 e 20 mm, sendo que o espaçamento entre as barras da armadura é o principal fator dessa limitação. Mas valores inferiores ou superiores são aceitáveis, dependendo das exigências da estrutura. Gomes (2002), por exemplo, fixou a dimensão máxima do agregado graúdo em 12 mm, visando à produção de concretos auto-adensáveis de alta resistência. Da mesma maneira, em certas situações é possível o emprego de agregados com dimensão máxima característica entre 25 e 40 mm (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003; SCCEPG, 2005).

¹⁶ Silicato dicálcico.

¹⁷ Silicato tricálcico.

2.8.3 Aditivos

O aditivo é um material empregado como constituinte do concreto ou argamassa, com o objetivo principal de produzir uma determinada modificação nas características da mistura. Como função secundária pode modificar paralelamente outras propriedades do concreto, independente da que define a função principal (MEHTA e MONTEIRO, 1994; MARTIN, 2005).

No caso do CAA, a utilização de aditivos, em especial, o superplastificante, é indispensável para garantir sua elevada fluidez e capacidade de passar por entre obstáculos, além de promover o aumento da bombeabilidade (RONCERO, 2000). Em alguns casos também, utiliza-se os aditivos modificadores de viscosidade para ajudar a reduzir a segregação e a sensibilidade da mistura, devido às variações de outros componentes, principalmente do teor de umidade (SCCEPG, 2005).

Outros aditivos que incluem incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega podem ser usados da mesma forma que no concreto convencional. No entanto, deve-se verificar a compatibilidade dos outros aditivos adicionados ao CAA e com o cimento a ser utilizado (SCCEPG, 2005).

A seguir, são apresentadas as características dos principais tipos de aditivos utilizados no concreto auto-adensável.

2.8.3.1 Superplastificantes

Os superplastificantes são aditivos químicos incorporados ao concreto, capazes de atuar na redução do fator água/cimento sem alterar a trabalhabilidade da mistura ou como agente fluidificante, melhorando a fluidez sem necessidade de água adicional. Por estas características são também chamados de *redutores de água de alta eficiência*. (RONCERO, 2000; GREISSER, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Existem três grandes grupos de superplastificantes: os condensados de lignossulfonados modificados, ácidos hidro-carboxílicos e polímeros hidroxilatos, também conhecidos como aditivos de *primeira geração*, os condensados sulfonados de melamina-formaldeídos, condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos e os poliacrilatos, ou aditivos de *segunda geração* e os ésteres de ácido sulfônico, base policarboxilato, ou de *terceira geração* (AÏTCIN, 2000; RAMACHANDRAN, *apud* GREISSER, 2002).

Para a produção do CAA, os de base policarboxilatos são os mais empregados por conferir considerável aumento na fluidez. Além do mais, permitem a redução de até 40% no teor de água, possibilitando o emprego de concretos de elevada resistência, trabalhabilidade e durabilidade (COLLEPARDI, 1998; AİTCIN, 2000; COLLEPARDI, 2003; REPETTE, 2005). Uma prova disso é mostrada através do gráfico da Figura 2.32. A incorporação do aditivo em CAA é capaz de promover um maior espalhamento com mesma a mesma relação a/c de concretos sem superplastificante (GREISSER, 2002).

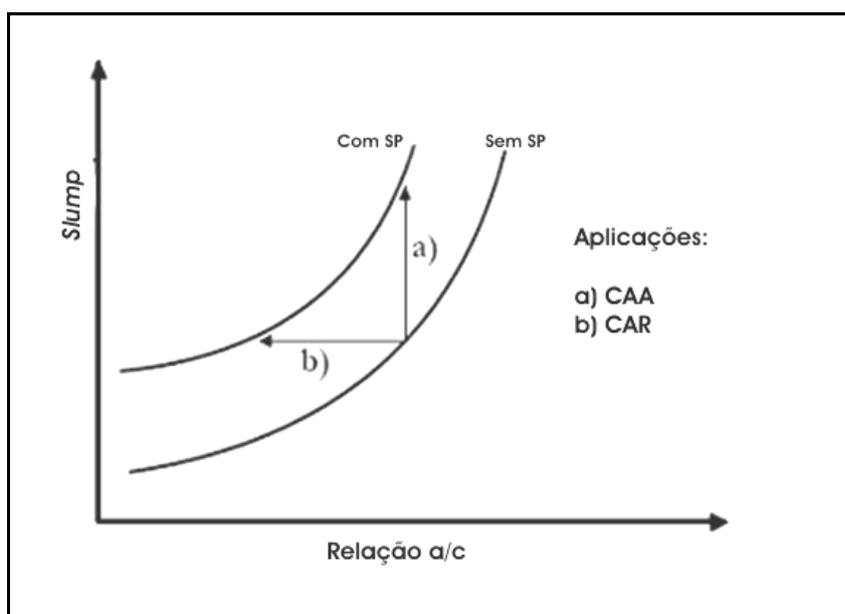


Figura 2.32 – Utilização de superplastificantes: alta fluidez a uma relação a/c constante para concretos auto-adensáveis (a). Redução da relação a/c para fabricação de concretos mais duráveis (aplicação: concreto de alta-resistência) (b) (GREISSER, 2002).

Na mesma linha de estudo, Collepardi (2001) comparou comportamento de concretos, com teores de cimento de 300, 350 e 400 Kg/m³, na ausência e depois, na presença de aditivos. De acordo com a Figura 2.33, observa-se que a exsudação aumenta exponencialmente com o aumento do espalhamento (*slump*) e à medida que o teor de finos diminui (cimento). Por outro lado, com a incorporação de superplastificantes (Figura 2.34) é possível produzir um concreto muito fluido, coeso e por isso, com baixa segregação e exsudação.

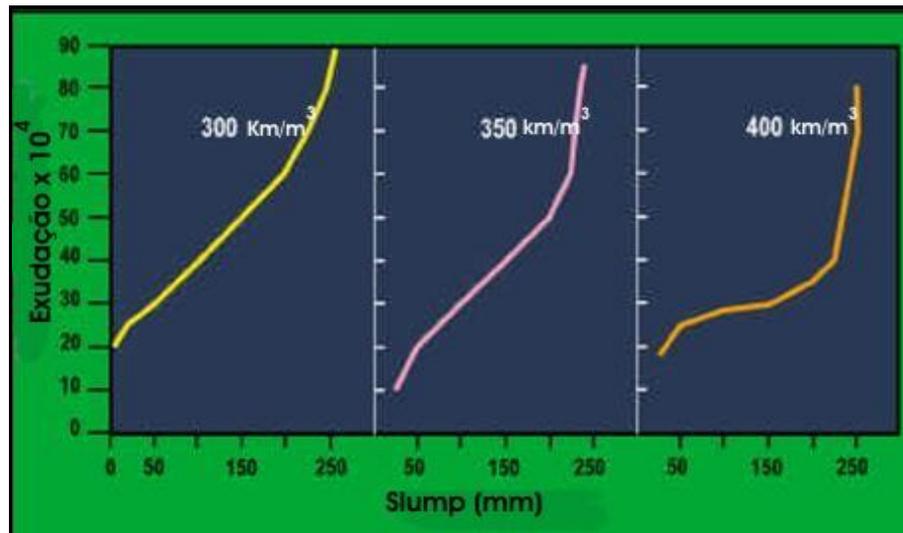


Figura 2.33 – Capacidade de exsudação em função do *slump* para concreto sem aditivos (COLLEPARDI, 2001).

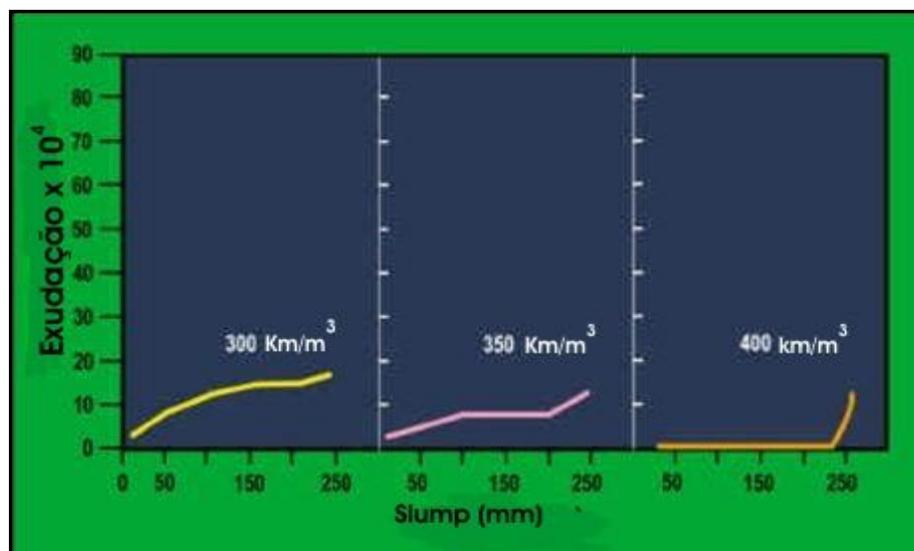


Figura 2.34 – Capacidade de exsudação em função do *slump* para concreto com aditivos (COLLEPARDI, 2001).

2.8.3.2 Aditivos modificadores de viscosidade

Aditivos que modificam a coesão do concreto, sem alterar significativamente a sua fluidez, são chamados modificadores viscosidade (AMV). Estes aditivos são utilizados em CAA para minimizar o efeito das variações de umidade, dos finos nas areias ou da granulometria das partículas, o que o torna menos sensível às pequenas variações nas proporções e condições de outros componentes (SSCEPG, 2005).

Do ponto de vista reológico, estes agentes melhoram substancialmente a coesão do CAA, induzem uma viscosidade moderadamente alta juntamente com um comportamento

pseudoplástico¹⁸. Além disso, em conjunto com os aditivos superplastificantes de última geração, permitem obter concretos estáveis, limitando a perda de água pela exsudação e minimizando sua tendência a segregação (KHAYAT, 1998; GETTU e AGULLÓ, 2003; SSCEPG, 2005).

São relativamente novos e sua aplicação inicial está intimamente ligada com a concretagem submersa (KHAYAT, 1998). A maioria dos AMV são produtos a base de polissacarídeos, cujas cadeias poliméricas adsorvem água e se entrelaçam, formando grandes reticulados flexíveis, responsáveis pelo aumento da retenção da água. Produtos a base de sílica precipitada também podem ser empregados na composição de aditivos promotores de viscosidade (REPETTE, 2005).

O uso dos agentes modificadores de viscosidade pode ser muito eficaz na estabilização da reologia do CAA. Entretanto, eles não devem ser considerados como uma maneira de evitar a necessidade de uma boa dosagem e seleção cuidadosa dos outros constituintes do concreto, mas sim como uma alternativa valiosa para suprir a necessidade de finos e de correção da mistura (SSCEPG, 2005; REPETTE, 2005). Lachemi *et al.*, (2003); Repette (2005) salientam também, que podendo-se contar com teores adequados de finos, o uso do AMV é dispensável, pois os aditivos disponíveis no mercado são caros, onerando o custo final do concreto.

Outro aspecto importante, é que grandes teores de cimento e altas temperaturas podem comprometer negativamente a eficiência dos AMV, assim como elevados teores de finos com módulo de finura inferior a 2,6, podem comprometer o bombeamento devido a alta coesão da mistura. Recomenda-se que a incorporação de AMV não modifique substancialmente as propriedades do concreto fresco que não estão relacionadas com o auto-adensamento, como tempo de pega e a quantidade de ar incorporado (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

2.8.4 Adições minerais

Adições minerais são materiais silicosos, com superfície específica elevada, responsáveis por produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005). Elas são classificadas de acordo com sua ação no concreto, conforme os tipos a seguir:

¹⁸ Quando a viscosidade plástica do fluido diminui com aumento da taxa e/ou tensão de cisalhamento (PILEGGI, 2001).

Inertes (TIPO I) – não possuem atividade química. Seu efeito no concreto é apenas físico, contribuindo com o empacotamento granulométrico (efeito *microfíler*), no refinamento da estrutura dos poros e na nucleação para os produtos da hidratação do cimento, além de alterar a microestrutura da zona de transição. São comumente chamados de *fíler*. Os mais utilizados em concreto são o fíler calcário, o pó de pedra e o pó de quartzo (EFNARC, 2002; DAL MOLIN, 2005).

Reativas (TIPO II) – possuem capacidade de reação com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C – S – H), principal fonte de resistência do concreto. As adições reativas subdividem-se em pozolânicas¹⁹, que incluem a sílica ativa e a cinza volante com baixo teor de cálcio; cimentantes²⁰, como a escória granulada de alto-forno; e em pozolânicas e cimentantes, simultaneamente, como é o caso da cinza volante com alto teor de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005).

Tanto as adições reativas quanto as inertes podem ser utilizadas na produção de concreto auto-adensável, com as importantes funções de suprir a maior necessidade de finos deste concreto, contribuindo, assim, com o aumento da coesão da mistura e evitando a segregação dos agregados e a exsudação da água (EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003). Existem, ainda, outros aspectos descritos na literatura sobre o comportamento de concretos com adições minerais, sendo algumas considerações apresentadas a seguir:

a) Aspectos econômicos

Algumas adições minerais podem ser empregadas em até 70%, como substituto parcial do cimento Portland, como é o caso do CP III²¹ especificado pela NBR 5735 (ABNT, 1991). Como o cimento é, geralmente o componente mais caro do concreto, a substituição por adições minerais leva a uma redução considerável no custo final por m^3 de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996).

¹⁹ Adição pozolânica é um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícea, mas quando finamente moído e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades cimentantes (DAL MOLIN, 2005).

²⁰ Adição cimentante é um material que não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos de cimentantes.

²¹ O CP III é a sigla designada para o cimento Portland de alto-forno, que contém de 35 a 70% de escória de alto-forno, dependendo da região onde é fabricado (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

b) Aspectos Ambientais

Como a maioria das adições minerais são resíduos ou sub-produtos industriais, seu emprego em concretos contribui para a conservação de recursos não renováveis e reduz o impacto ambiental devido à diminuição do consumo de cimento, de agregados e água. Além do mais, permite evitar que esses resíduos sejam dispostos de forma irregular no meio ambiente, sem nenhuma finalidade benéfica (MALHOTRA e MEHTA, 1996; GOMES *et al.*, 2003).

c) Propriedades do concreto fresco

A incorporação de uma grande quantidade de finos contribui para o empacotamento de partículas, melhorando os aspectos reológicos do concreto. Outro fator importante é que tal incorporação possibilita a diminuição da elevação do calor de hidratação em proporção direta com a quantidade de cimento Portland substituído. (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ESPING, 2003). Dal Molin (2005) acrescenta ainda que, o emprego de adições de reação lenta é especialmente vantajoso em grandes massas de concreto.

Da mesma forma, o consumo de água também pode ser reduzido para uma dada trabalhabilidade do concreto. No entanto, essa diminuição depende das características físicas e químicas da adição empregada e da utilização de superplastificantes. Quanto à retração plástica, observa-se que em concretos com elevada quantidade de finos, a água tem dificuldade de alcançar a superfície devido à microestrutura mais densa desses concretos. Por isso, existe um risco potencial de fissuração, principalmente se a taxa de evaporação de água for alta. Contudo, uma cura adequada é capaz de resolver o problema (DAL MOLIN, 2005).

d) Propriedades do concreto endurecido

A redução dos poros do concreto e a reatividade elevada de algumas adições geralmente promovem um aumento na resistência à compressão do concreto, tanto nas primeiras idades quanto nas idades mais avançadas (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Entrementes, Dal Molin (2005) salienta que a evolução dessa propriedade com o tempo depende de fatores como o tamanho das partículas do fino, a quantidade de SiO_2 ²² na forma amorfa e a relação a/c além das condições adequadas de cura.

²² Sílica.

Na resistência à tração, observa-se uma melhora geral devido à redução da porosidade da matriz. Mas vale informar que seu aumento não é proporcional ao aumento da resistência à compressão nos concretos com finos. De igual modo, o módulo de deformação é pouco influenciado pela incorporação de adições, uma vez que nesta propriedade os agregados são os componentes mais efetivos (DAL MOLIN, 2005).

e) Durabilidade

A durabilidade de estruturas de concreto é, sem dúvida, melhorada com a adição de finos. As adições minerais são responsáveis por reduzir a permeabilidade do concreto, evitando a penetração dos agentes agressivos, responsáveis diretos pelo processo de deteriorização. Quando as adições apresentam reatividade química, também dificultam o acesso e a difusão de sulfatos na matriz de cimento, além de inibir ou reduzir a reação álcali-agregado (DAL MOLIN, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A influência das adições nas propriedades do concreto depende de uma série de fatores, que vão desde a sua proporção na mistura até seu grau de reatividade. A seguir são apresentadas algumas características e os efeitos das adições de uso mais comum em concreto auto-adensável, segundo a literatura sobre o assunto.

2.8.4.1 Fíler Calcário

O fíler calcário é um pó fino oriundo da rocha calcário. Pode ser classificado de acordo com sua composição química como:

- a) Calcítico: aquele em que há o predomínio de calcita, mineral composto basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3);
- b) Dolomítico: é gerado pela substituição de parte do cálcio existente na calcita, por magnésio, formando a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), num processo chamado de dolomitização.

A incorporação de calcário de natureza dolomítica em concreto não é indicada, pois o alto teor de óxido de magnésio presente nesse mineral pode comprometer a durabilidade, em função do risco de ocorrer reação álcali-carbonato e expansão por formação de taumasita (NEVILLE, 1997; EFNARC, 2002; REPETTE, 2005). Por outro lado, o calcário calcítico tem sido utilizado durante os últimos 25 anos não só para reduzir os custos e o impacto ambiental

da produção de cimento, mas também para aumentar a durabilidade de concretos. Mais recentemente essa adição vem sendo usada como fíler para aumentar a trabalhabilidade e a estabilidade do concreto fresco (ESPING, 2007b).

O fíler calcário possui uma superfície dotada de estrias e sua forma é mais ou menos regular, o que o qualifica como a adição mais usada em concretos auto-adensáveis (MOOSBERG-BUSTNES, 2003; SHEINN *et al.*, *apud* MELO, 2005). Em termos mineralógicos, o fíler calcário é considerado um material inerte, no entanto, essa afirmação não é totalmente correta, pois sua atuação se dá tanto por meio físico como químico. No aspecto físico, ele promove a melhoria do empacotamento do esqueleto granular, vincula o excesso de água e aumenta o volume de pasta lubrificante (BOSILJKOV, 2003; ESPING, 2007b).

Um estudo realizado por Yahia *et al.* (2005) mostrou que os efeitos físicos do fíler calcário em argamassas muito fluidas dependem dos parâmetros da mistura, em especial do fator a/c e do teor incorporado. De acordo com os autores, para uma certa relação a/c, a adição de fíler calcário dentro de um determinado intervalo contribui para melhorar o arranjo do sistema de partículas e para o aumento da fluidez da mistura. No entanto, a incorporação de uma quantidade além da dosagem crítica resultou em um aumento substancial da viscosidade das argamassas no estudo. Para uma relação a/c de 0,35, o teor de finos (cimento + fíler calcário) adequado varia de 23 a 29% em volume de argamassa. No caso das relações a/c de 0,4 e 0,45, o intervalo é de 25% a 35% e 23% a 38%, respectivamente.

A ação química do fíler calcário favorece a aceleração da velocidade de hidratação dos minerais do clínquer, em especial o C_3S , e fornece pontos de nucleação para a produção de hidróxido de cálcio e C-S-H, resultando em melhora da resistência nas primeiras idades (BOSILJKOV, 2003; ESPING, 2007b). Nessa mesma linha de estudos Poppe e Schutter (2005) analisaram o comportamento da hidratação de diferentes tipos de cimentos em misturas de CAA, na presença de fíler calcário e pó de quartzo. Os resultados dos ensaios de hidratação isotérmica e adiabática demonstraram que, em alguns casos, o mecanismo de reação do cimento Portland é claramente influenciado pela adição de fíler calcário, e que o mesmo não é observado para o pó de quartzo. Isso pode confirmar as propriedades reativas do fíler calcário.

2.8.4.2 Cinza Volante

As cinzas volantes são resíduos produzidos pela combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas. Suas partículas são tipicamente esféricas, apresentando-se como esferas ocas, que podem estar vazias (cenosferas) ou preenchidas com outras esferas menores (plenosferas). Elas possuem dimensões variando entre 1 e 100 μm (Figura 2.35) e superfície BET²³ similar ao cimento Portland, estando na faixa de 300 a 700 m^2/kg . Para o concreto auto-adensável a finura da cinza volante deve estar preferencialmente entre 500 e 600 m^2/kg (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005; REPETTE, 2005).

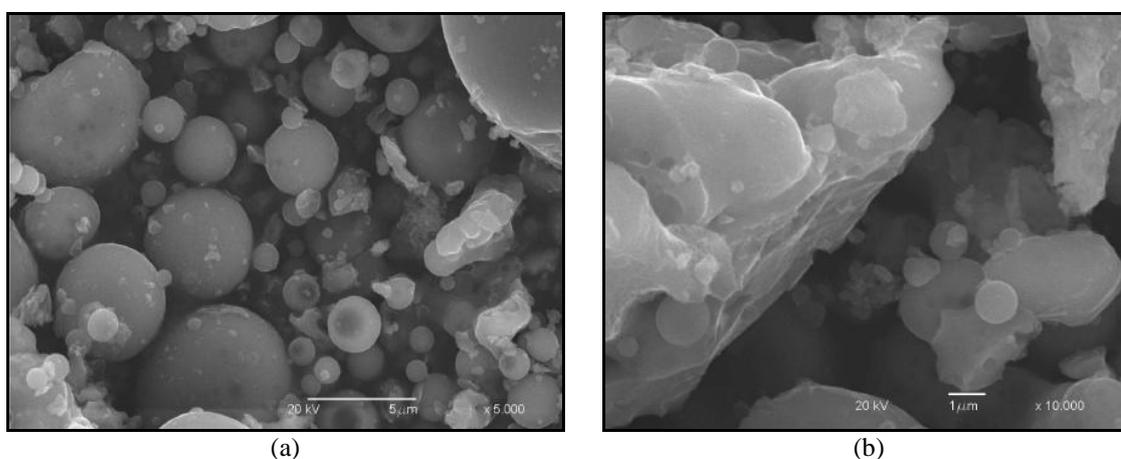


Figura 2.35 – Micrografia da cinza volante: a) aumento de 5000x; b) aumento de 10.000x (ABREU, 2004).

A superfície específica e as composições químicas da cinza volante dependem dos materiais associados ao carvão e às condições de queima. Com base nessas diferenças, elas podem ser divididas em duas categorias que se diferem entre si, principalmente no teor de cálcio. A cinza de primeira categoria, é chamada de cinza volante classe F²⁴, contendo menos que 10% de CaO. A segunda categoria é denominada de cinza volante classe C²⁵ e possui uma quantidade CaO entre 15 e 30% (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005).

A esfericidade das partículas de cinza volante as qualifica como adição em CAA, promovendo a rolagem dos agregados, diminuindo o atrito interno entre eles e o atrito destes com as partículas de cimento, resultando em maior fluidez e viscosidade para um menor consumo de superplastificante (REPETTE, 2005). Em uma pesquisa realizada por Bouzoubaâ e Lachemi (2001) em nove concretos auto-adensáveis, a substituição de cimento por 40%,

²³ Técnica de determinação de finura por adsorção de nitrogênio.

²⁴ Produzida na combustão do antracito e carvões betuminosos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

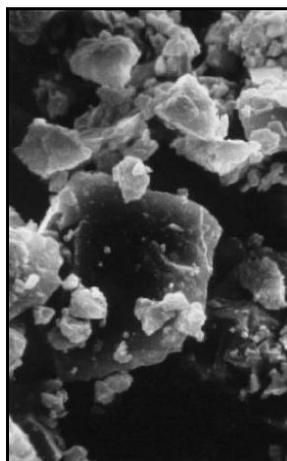
²⁵ Proveniente da combustão do lignito (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

50% e 60% de cinza volante classe F demonstraram que a incorporação de grandes volumes dessa adição é possível.

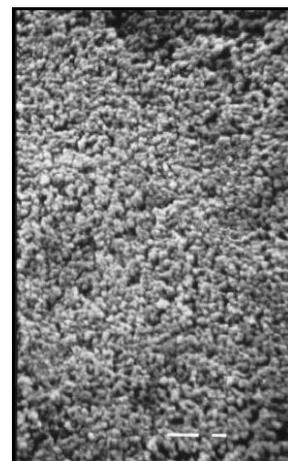
Das misturas analisadas, apenas uma não apresentou *slump flow* em um intervalo de 500 a 700mm, tempo de fluxo variando de 3 a 7s, índice de segregação variando entre 1,9 a 14%, e exsudação da água variando entre 0,025 a 0,129 ml/cm². Nas que apresentaram *slump flow* nos intervalos citados o aumento da temperatura do CAA foi de 5° C a 10° C inferior à do concreto de referência. Os CAA's desenvolveram resistências à compressão variando de 15 a 31 MPa e de 26 a 48 MPa, em 7 e 28 dias, respectivamente.

2.8.4.3 Sílica Ativa

O *American Concrete Institute* (ACI) define sílica ativa como "uma sílica não cristalina muito fina produzida em fornos de arco elétrico como um subproduto da produção elementar de silício ou ligas que contenham silício". São classificadas como materiais cimentícios complementares e caracterizam-se por sua estrutura amorfa que se assemelha à forma esférica, com a maior parte com partículas de diâmetro menor que 1 µm e com diâmetro médio de 0,1 a 0,2µm, sendo aproximadamente duas ordens de magnitude mais finas que as partículas do cimento Portland comum (Figura 2.36). A sílica ativa possui ainda um teor de SiO₂ entre 85 e 90%, massa específica de 2,2 g/m³ e superfície específica²⁶ entre 13.000 e 30.000m³/kg (AÏTCIN, 2000; DAL MOLIN, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2005; SFA, 2005).



a) cimento Portland



b) Sílica ativa

Figura 2.36 – Micrografia do cimento Portland (esquerda) e da sílica ativa (direita) para exemplificar a ordem de magnitude (SFA, 2005).

²⁶ Medida pela técnica de adsorção de hidrogênio.

O manual de sílica ativa (SFA, 2005) enumera os principais efeitos desse material no concreto, podendo-se destacar:

- a) promove melhor empacotamento de partículas devido à sua extrema finura, preenchendo, assim, os vazios entre os grãos de cimento. Mesmo não reagindo quimicamente, o efeito *microfíler* traz melhorias significativas na natureza do concreto;
- b) aumento da coesão e conseqüente redução da segregação;
- c) efeito fluidificante: aumento da fluidez principalmente em concretos com baixa relação água/cimento, que, geralmente, são muito viscosos;
- d) devido à sua elevada superfície específica, há uma redução drástica tanto da exsudação interna como da superficial;
- e) redução da retração plástica;
- f) rápida evolução da resistência à compressão devido a maior densificação da matriz de cimento, levando também à melhoria de outras propriedades mecânicas, como resistência à flexão e módulo de elasticidade;
- g) redução do calor de hidratação;
- h) aumento na demanda de água, problema que é facilmente resolvido com a incorporação de superplastificantes;
- i) redução da permeabilidade, garantindo maior durabilidade às estruturas.

Repetto (2005) salienta que o uso da sílica ativa em CAA é mais comum para produção de concreto de elevada resistência à compressão, isto é, acima de 60 MPa. Quando empregada em teores de 2% a 5% em relação à massa de cimento, promove o aumento da resistência à segregação, mas deve-se esperar uma maior demanda por aditivo superplastificante e um aumento da tensão de escoamento do concreto.

2.8.4.4 Escória Granulada de alto-forno

As escórias de alto-forno são subprodutos da fabricação do ferro gusa, resultantes da combinação dos minerais da ganga²⁷, do minério de ferro, das cinzas do coque e do calcário ou dolomita utilizados como fundentes (BATTAGIN e ESPER, *apud* CASCUDO e HELENE, 2000). As escórias saem do alto-forno na forma de um líquido viscoso com temperatura entre 1350° C e 1500° C, contendo 1700 KJ/Kg de energia térmica. Quando são resfriadas lentamente ao ar, a energia é perdida para atmosfera e liberada através da cristalização do líquido, formando distintas fases cristalinas e, com isso, perdem parcialmente seu poder com material cimentante. Na condição cristalina a escória possui pouca capacidade aglomerante, sendo utilizada como agregado para concreto, pavimentação e lastro ferroviário (MEHTA e MONTEIRO, 1994; JOHN, 1995; DAL MOLIN, 2005).

Quando resfriada bruscamente, geralmente através de jatos d'água ou de vapor, pelo processo conhecido como granulação, não há tempo suficiente que o arranjo cristalino ocorra, a escória torna-se um material predominantemente vítreo e potencialmente reativo. Esta é a chamada escória granulada de alto-forno, e, ao ser finamente moída, tem excelente propriedade hidráulica, sendo largamente utilizada na indústria do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994; JOHN, 1995; DAL MOLIN, 2005; AİTCIN, 2000).

Assim, como material cimentício suplementar, a escória possui algumas características úteis, visto que ela tem composição química estável. O formato poliédrico (Figura 2.37) de suas partículas pouco contribuem para o efeito rolamento, sendo um efeito redutor de trabalhabilidade tanto quanto for maior a superfície específica dos grãos. A reatividade das escórias depende de características granulométricas das partículas, da composição e teor de vidro, da finura e do histórico de temperatura do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A escória é utilizada a uma finura de entre 250 m²/kg e 700 m²/kg e sua composição química é constituída em sua maioria de SiO₂, CaO²⁸, MgO²⁹ e Al₂O₃³⁰. Seu teor de fase vítrea³¹ é em média, 95% (CINCOTO *et al.*, *apud* MELO NETO, 2002).

²⁷ Ganga é parte do depósito mineral que não é objetivo da exploração, é o rejeito do processo de separação e concentração de minérios (ARAÚJO, 1997).

²⁸ Óxido de Cálcio

²⁹ Óxido de Magnésio

³⁰ Trióxido de Alumínio

³¹ O teor de fase vítrea comanda a reatividade da escória de alto-forno (MELO NETO, 2002).

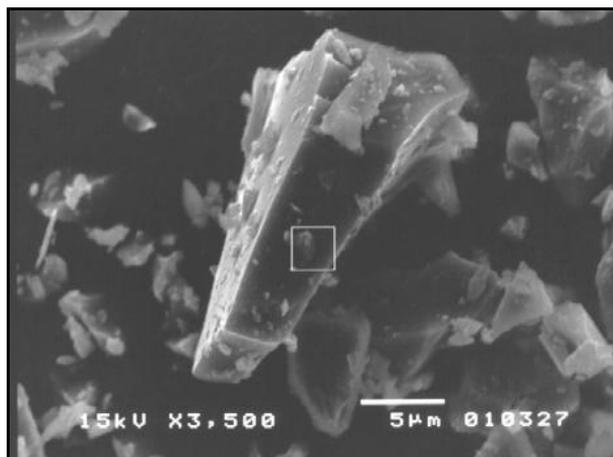


Figura 2.37 – Microscopia eletrônica de varredura da escória granulada de alto-forno (BOURGUIGNON, 2004).

Em concretos, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que as partículas de escória menores do que $10\mu\text{m}$ contribuem para as resistências iniciais do concreto até 28 dias; partículas de $10\mu\text{m}$ a $45\mu\text{m}$ contribuem para as resistências a longa idade, mas, partículas maiores que $45\mu\text{m}$ são difíceis de hidratar. No geral, a escória obtida por granulação possui granulometria grosseira e bastante umidade, por isso, ela é seca e pulverizada, em sua maior parte, a partículas menores que $45\mu\text{m}$, o que corresponde aproximadamente a $500\text{ m}^2/\text{Kg}$ de área específica Blaine.

No concreto no estado fresco, a escória promove maior fluidez, devido ao elevado teor de pasta das misturas; maior viscosidade da pasta; maior tempo de pega; e menor exsudação (MALHOTRA, 1987). Essas propriedades demonstram que o uso da escória pode trazer benefícios quanto à obtenção das propriedades requeridas para o CAA.

2.9 Escórias de Aciaria

2.9.1 Considerações iniciais

A indústria siderúrgica é considerada de forte impacto ambiental não só por sua grande demanda energética e de matérias - primas, mas também, pelo grande volume de resíduos gerados em seus processos. Uma moderna siderúrgica integrada³² à coque, por exemplo, produz uma média 700 Kg de resíduos por tonelada de aço líquido produzido, sendo que 80% deles são escórias de alto-forno e aciaria (PEREIRA, 1994; CST, 2003a).

A escória de alto-forno é oriunda da fabricação do ferro-gusa, em alto-forno, e a escória de aciaria, objeto principal desta pesquisa, é um co-produto do refino do aço. Estima-se que só

³² As usinas integradas operam as três fases básicas: redução, refino e laminação, tendo seu processo produtivo iniciado com a utilização de minério de ferro (IBS, 2007).

no Brasil, são geradas 5 milhões de toneladas³³ de escória de aciaria ao ano. Esse grande volume produzido se converte em inúmeros inconvenientes tanto para as usinas como para o meio ambiente (AZEVEDO, 2001; LANA, 2003; IBS, 2007).

Esta seção tem por objetivo descrever o processo de produção do aço e a obtenção das escórias de aciaria, dando ênfase à escória gerada pelo processo LD. Serão abordadas suas principais características bem como as vantagens e limitações do seu uso. Ainda será discutido, de forma resumida, o fenômeno de expansão, responsável por vários problemas de durabilidade e desempenho em materiais de construção produzidos com escórias.

2.9.2 Produção do aço e obtenção das escórias de aciaria

De uma forma geral, o aço é produzido a partir do minério de ferro, carvão e calcário. O seu processo de fabricação pode ser dividido em quatro fases, a saber: preparação das matérias – primas, redução, refino e laminação. Na maioria das usinas siderúrgicas as duas primeiras etapas são basicamente iguais. A mudança acontece na etapa seguinte, na aciaria, onde o tipo de equipamento utilizado para a fabricação do aço varia de usina para usina (CST, 2007; IBS, 2007). A Figura 2.38 ilustra esquematicamente as etapas da produção do aço em uma usina siderúrgica integrada.

A primeira etapa consiste na preparação das matérias-primas para a fase seguinte através da coqueificação e sinterização. A coqueificação é o processo no qual o carvão mineral passa por uma bateria de fornos específicos chamada de coqueria, a fim de eliminar elementos indesejáveis à fabricação do aço. O produto resultante é denominado de *coque metalúrgico*, sendo um resíduo poroso composto basicamente de carbono, com elevada resistência mecânica e alto ponto de fusão. Paralelamente, acontece a sinterização onde, o minério de ferro sofre a aglutinação de finos, obtendo-se como resultado o *sínter* (DIAS, *apud* CASCUDO e HELENE, 2000).

³³ Valor estimado para a produção de aço bruto no Brasil em 2007, que foi cerca de 33 milhões de toneladas. A geração de escória de aciaria é cerca de 100 a 150kg por tonelada de aço produzido (IBS, 2007).

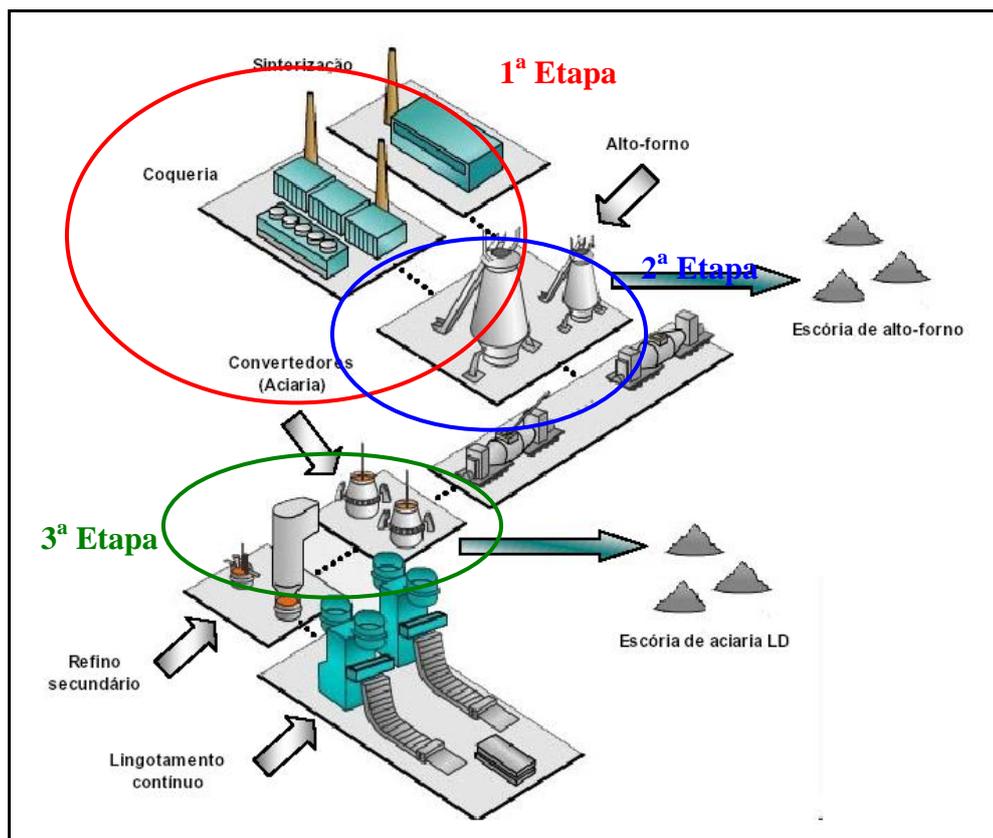


Figura 2.38 – Fluxograma da fabricação do aço (PENA, 2004).

Com a obtenção da carga metálica (sínter e coque) parte-se para etapa de redução. Nessa fase, o oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000°C é insuflado pela parte inferior do alto-forno em contra corrente a carga, promovendo no interior do mesmo uma série de reações químicas de redução do mineiro de ferro e, produzindo-se o ferro-gusa. Este ferro-gusa é vazado do alto-forno e, solidificado, é transformado em lingotes ou pode ser transferido em estado líquido para a aciaria onde acontece a fase de refino (CST, 2007; IBS, 2007).

A etapa de refino consiste na transformação do ferro-gusa, sucatas de aço, ferro fundido ou ferro-ligas³⁴ em aço líquido. Basicamente existem dois processos de produção de aço, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o conversor a oxigênio³⁵, também denominado forno LD³⁶, utilizado nas siderúrgicas integradas, e o forno elétrico a arco³⁷ (FEA), mais comum em usinas semi-integradas³⁸. O esquema da Figura 2.39 ilustra os dois processos.

³⁴ As Ferro – ligas possuem um uso mais restrito, normalmente quando se requer ajuste na proporção especificada.

³⁵ Em inglês: *Blast Oxygen Furnance* (BOF).

³⁶ Em homenagem as primeiras cidades que utilizaram o conversor a oxigênio, Linz e Donawitz, na Áustria.

³⁷ Em inglês: *Electric Arc Furnance* ou *Electric Arc Furnance Dust*

³⁸ As usinas semi-integradas operam duas fases, sendo as mais usuais refino e laminação (IBS, 2007).

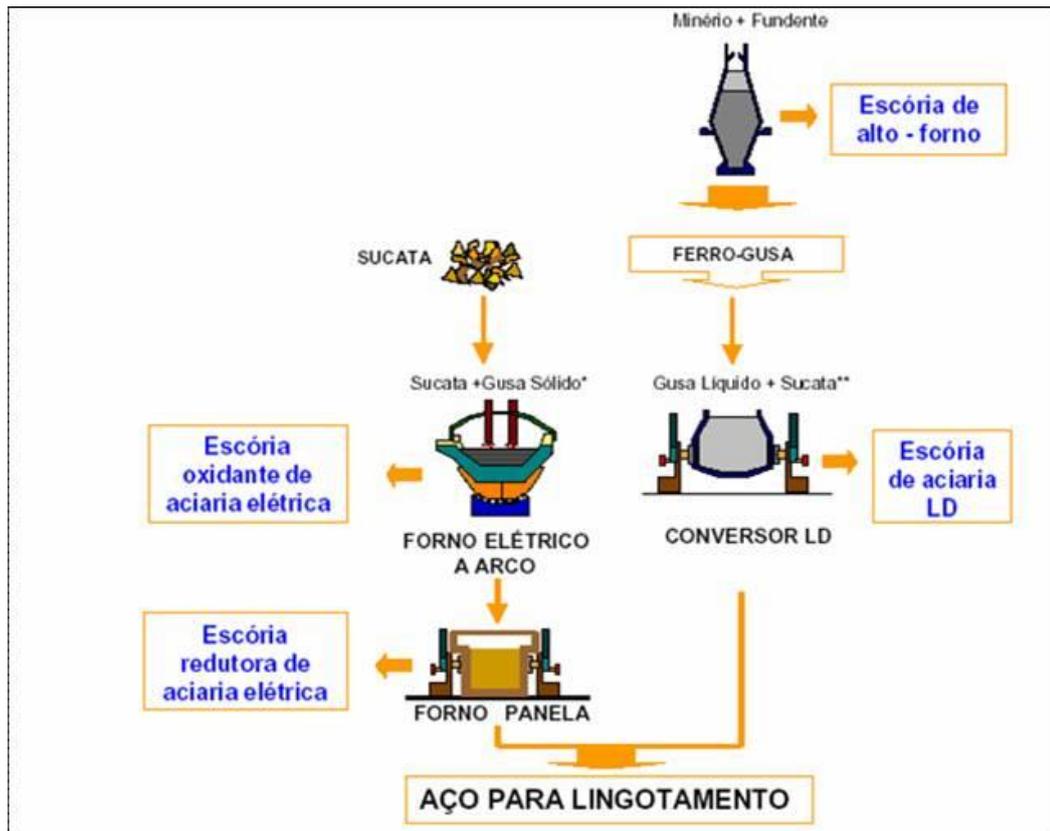


Figura 2.39 - Esquema de produção do aço nas usinas LD e EAF (MASUERO, 2001).

No processo FEA, primeiramente o forno recebe a sucata metálica e o fundente, óxido de cálcio (CaO). Então acontece a fusão da carga sólida, gerada por um arco elétrico formado entre o aço e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo (MACHADO, 2000). Após a fusão injeta-se oxigênio através de uma lança a fim de promover as reações de oxidação do C, Si e P. A cal adicionada vai se combinando com as impurezas da carga, abaixando o ponto de fusão e promovendo a formação de um material não metálico, de cor escura, denso e compacto, denominada escória oxidante ou negra³⁹ (LIMA, 1999; MASUERO, 2001).

Posteriormente, o aço líquido é vazado do forno de fusão e conduzido para uma estação de refino secundário, que pode ser um forno – panela (MASUERO, 2001). De acordo com Lima (1999) esse refino objetiva eliminar o excesso de oxigênio e enxofre na composição do aço, através da adição de ferro-ligas. Finalizada esta etapa, se obtém o aço com a composição desejada e uma capa sobrenadante de escória chamada de branca ou redutora. Esta escória é vazada da panela ainda líquida e incandescente. A partir daí ela é transportada para o pátio de escória, onde se resfria.

³⁹ Em termos metalúrgicos

Já no conversor LD, a principal finalidade do refino é reduzir os teores de carbono do ferro-gusa de 4% para 0,1%, tendo como principais matérias – primas: o gusa líquido, o gusa sólido, sucata de aço e de ferro fundido, cal ou calcário, fundentes e oxigênio. O gusa líquido constitui maior parte da carga metálica, correspondendo a mais de 80% desta carga e é responsável pelo fornecimento de calor do processo. Já a sucata metálica, possui um alto teor de ferro, é utilizada como material refrigerante da carga do conversor, controlando a temperatura do metal no final do sopro. Ao minério de ferro cabe a função de acelerar a dissolução da cal⁴⁰, quando adicionado no início do sopro, ou como agente refrigerante, quando adicionado no fim do sopro (MUNDIN, 1985; ARAÚJO, 1997; MOORE e MARSHAL, 1991).

Dessa forma, o processo de refino inicia-se quando o conversor é inclinado e carregado com a sucata sólida (Figura 2.40a-b) e levado à posição vertical para o assentamento da carga. Em seguida, é novamente inclinado para o carregamento do gusa líquido (Figura 2.40c), em temperaturas de 1300° C a 1450° C. Depois do carregamento, o conversor é colocado na posição vertical e a lança é introduzida até a distância desejada, injetando-se o oxigênio gasoso a alta velocidade (Figura 2.40d). Após a fusão completa do metal no conversor, adiciona-se a cal virgem por meio de um silo montado sobre o forno (ARAÚJO, 1997; MACHADO, 2000; GUMIERI, 2002).

Após o sopro de oxigênio, que tem duração média de 20 minutos, o conversor é basculado para a posição horizontal para a coleta de amostras para análise. Ao término do processo, a escória permanece sobrenadante ao aço, devido à diferença de densidade entre esse dois materiais. O aço é vazado em uma panela, através do bico conversor (Figura 2.40e), e após esta operação, a escória é vazada em um pote (Figura 2.40f) e conduzida ao pátio de deposição. A Figura 2.40 ilustra a seqüência operacional do processo de produção do aço em conversor LD.

⁴⁰ A cal (CaO) pode ser adicionada com a sucata metálica ou após o sopro de oxigênio sobre o metal fundido. Entretanto, esta ordem depende do processo de produção de cada siderúrgica (MACHADO, 2000).

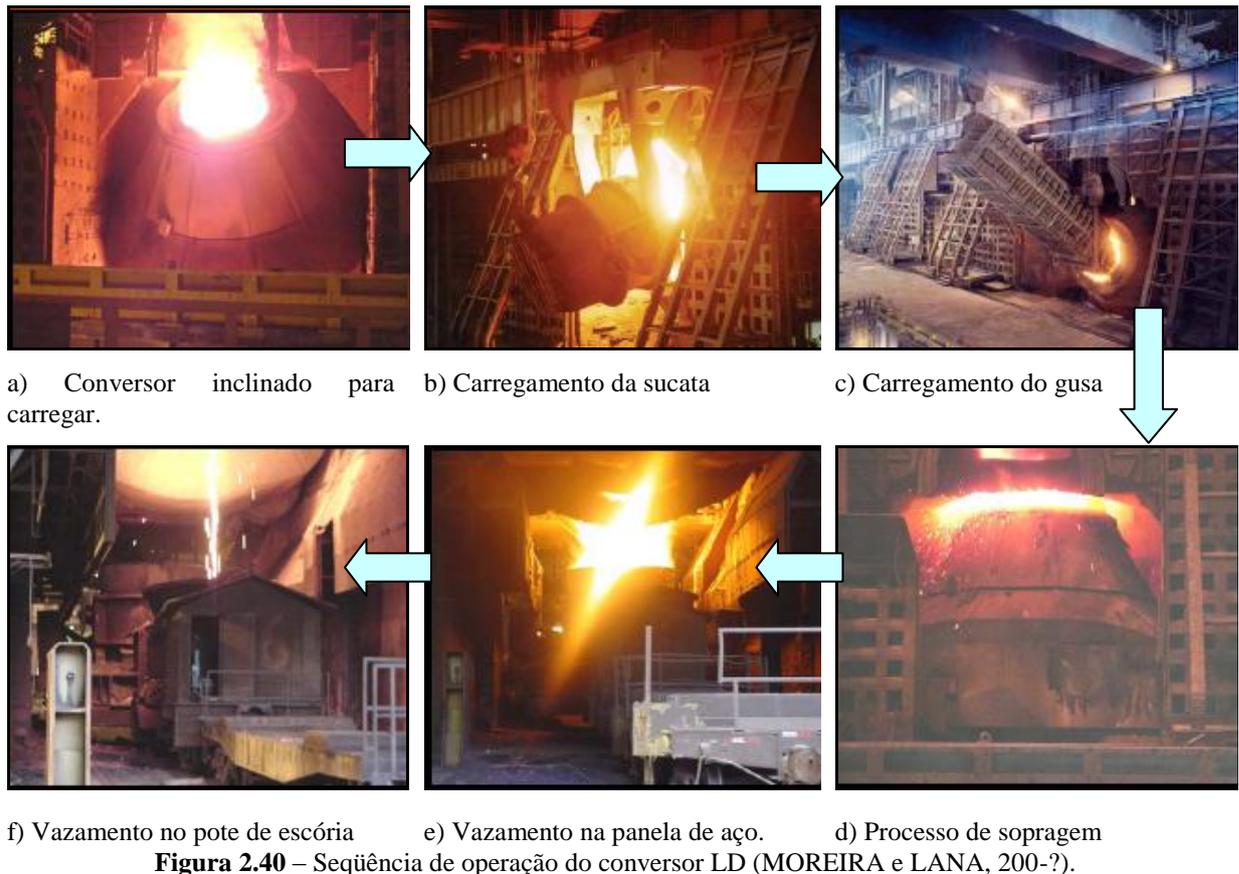


Figura 2.40 – Seqüência de operação do conversor LD (MOREIRA e LANA, 200-?).

Após o vazamento, os potes de escória de aciaria são geralmente transportados em vagões, sendo a mesma tombada em pátios de resfriamento ainda em estado líquido. De acordo com MASUERO (2001) existem três métodos de resfriamento da escória: ao ar, controlado com água e brusco com água ou ar, sendo que, o primeiro é mais utilizado para escórias de aciaria e o último para escórias de alto-forno. Geyer *et al.* (2000) afirmam que as propriedades físicas características (densidade, granulometria, propriedades estruturais) destes resíduos irão variar de acordo como método escolhido.

Finalizado o processo de resfriamento as escórias de aciaria seguem para o beneficiamento, onde serão fragmentadas e separadas em distintas granulometrias, por meio de correias rolantes em um sistema composto por um ciclo fechado, um eletroímã, correias e britadores (Figuras 2.41).



Figura 2. 41 – Planta de Britagem, classificação e separação magnética (SILVA e LEITE, 200-?).

2.9.3 Características das escórias de aciaria

2.9.3.1 Composição química

De uma forma geral, as escórias de aciaria são constituídas basicamente de óxidos de cálcio e magnésio, silicatos de cálcio, ferro metálico além de outros compostos que aparecem em menor escala (MACHADO, 2000; PENA, 2004). O Quadro 2.14 apresenta a composição química média das escórias de aciaria LD.

	Autor	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe total	S	P ₂ O ₅
1	MURPHY <i>et al.</i> , 1997	35	11,5	3,6	18	6,5	-	-	-
2	MOTZ; GEISELER, 2001	45-55	< 3	< 3	12-18	< 5	18	-	< 2
3	MOTZ; GEISELER, 2001	42-50	5-8	< 3	12-15	< 5	15-20	-	< 2
4	GEISELER, 1999	48-54	1-4	1-4	11-18	1-4	14-19	-	-
5	NSA, s.d.	42	8	5	15	5	24	0,08	0,8
6	GEORGE; SORRENTINO, 1980	47	6	1	13	5	25	< 0,1	2
7	FILEV, 2002	44,3	6,4	1,5	13,8	5,3	17,5	0,07	-
8	LITTLE; SETEPLA, 1999	36-46	5,5-12,5	0,8-4	11-15,5	-	14-22	-	-

Quadro 2.14 – Composições químicas da escória de aciaria tipo LD (PENA, 2004).

Conforme mostrado no Quadro 2.14, a escória tipo LD possui em sua composição química predominância de elementos como o CaO, o MgO, o FeO e o SiO₂, mostrando, inclusive, uma certa semelhança com a composição química do cimento Portland (PENA, 2004). No entanto, verifica-se uma alta variabilidade entre esses componentes, resultantes de inúmeros fatores que vão desde a escolha das matérias-primas utilizadas até o tipo de aço fabricado. Emery e Geiseler (*apud* GUMIERI, 2002) acrescentam ainda que, pode existir variação química em escórias produzidas em uma mesma usina, dependendo das condições metalúrgicas, da tecnologia utilizada e até mesmo do revestimento refratário do alto-forno.

Um elemento importante a ser considerado é o MgO livre, que pode ter seu teor mais alto devido ao desgaste do revestimento refratário e/ou devido ao tipo de fundente utilizado. O teor de óxido de magnésio livre juntamente com a cal livre são os componentes mais importantes para utilização de escórias de aciaria para fins de engenharia civil. Em contato com a água estas fases minerais reagem aos hidróxidos e dependendo de suas quantidades há um aumento volumétrico das escórias seguido de uma desintegração de partes da mesma e perda de resistência. Portanto, a estabilidade volumétrica é um fator chave para o uso de escórias de aciaria em materiais de construção. (MOTZ e GEISLER, 2001).

2.9.3.2 Composição mineralógica

Os óxidos que são formados durante a operação de refino do aço e durante a solidificação das escórias, dão origem a distintos grupos minerais (MASUERO, 2001). Em média, as escórias de aciaria LD são compostas predominantemente por alita (silicato tricálcico – C_3S); belita (βC_2S – beta silicato dicálcico); larnita (C_2S – silicato dicálcico); ferrita cálcica (CF), periclásio (óxido de magnésio – MgO), wüstita (óxido de ferro – FeO), portlandita ($Ca(OH)_2$) e calcita (CaO_3) entre outros minerais mostrados no Quadro 2.15 (MACHADO, 2000; MOTZ e GEISELER, 2001; GUMIERI, 2002; PENA, 2004).

Fase Mineral	Fórmula	Ponto de fusão (°C)
Silicato dicálcico – Larnita ($\beta-C_2S$)	$\beta - 2CaO.SiO_2$	2130
Silicato tricálcico (C_3S)	$3 CaO.SiO_2$	1900
Silicato de magnésio	$\beta - 2MgO.SiO_2$	-
Ferrita dicálcica	$2 CaO.Fe_2O_3$	1430
Mervinita	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$	-
Diopsita	$Ca Mg(SiO_3)_2$	-
Brown millerita	$4 CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	1410
Bredigita	$\alpha - 2CaO.SiO_2$	-
Gelenita	$CaO.Al_2O_3.SiO_2$	-
Óxidos de alumínio e magnésio	$MgO.Al_2O_3$	-
Wüstita (óxido de ferro)	FeO	-
Periclásio (óxido de magnésio)	MgO	2800
Óxido de cálcio	CaO	2570

Quadro 2.15 - Composição mineralógica típica das escórias LD (LÓPEZ, 1989; SEKI *et al.*, 1986; MURPHY, 1997; BOYNTON, 1966, *apud* MACHADO, 2000).

As fases mineralógicas presentes nas escórias são dependentes do tipo de resfriamento ao qual é submetida (MASUERO, 2001). Como exemplo disto, a Figura 2.42 mostra o resultado de uma DRX⁴¹ de uma escória de aciaria resfriada lentamente, onde são identificados diversos minerais como a wüstita, a hematita e a larnita. A existência de silicatos de cálcio não

⁴¹ Neste tipo de ensaio os compostos podem ser identificados através de seus ângulos de difração (θ), que são característicos de cada composto.

hidratados, em especial, a larnita, indica um fraco potencial para atividade hidráulica, possuindo uma estrutura cristalina (PENA, 2004).

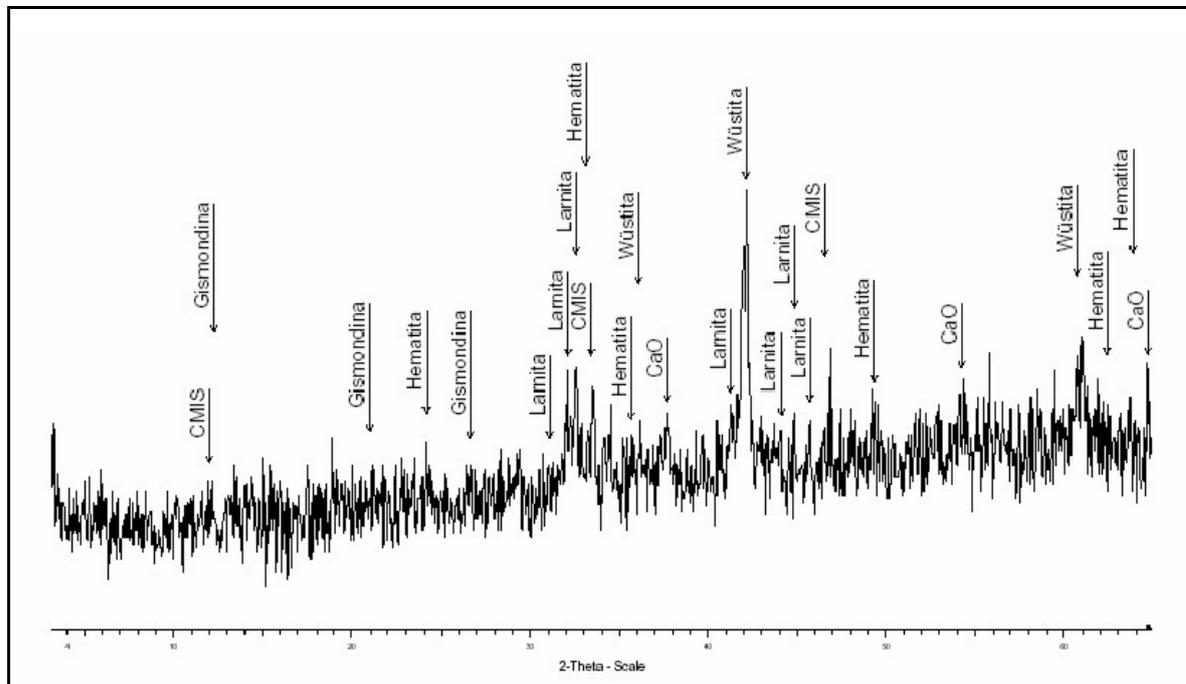


Figura 2.42 - DRX de uma escória de aciaria LD resfriada lentamente (MACHADO, 2000).

O resfriamento brusco evita a recristalização da fase vítrea e a precipitação das fases cristalinas, gerando assim, um material amorfo que tenha propriedades hidráulicas latentes. Nas escórias de alto-forno resfriadas por este processo, há a presença de silicatos de cálcio, com alguma presença de magnésia e alumina. Estas fases minerais em conjunto com a alta proporção de fase amorfa faz com que esta escória seja um excelente material cimentício. Ao contrário, as escórias de aciaria resfriadas bruscamente, indicam a presença de wüstita que apresenta alta solubilidade para outros óxidos divalentes, não proporcionando a este material a mesma propriedade cimentante (MURPHY *et al.*, 1997).

2.9.3.3 Propriedades técnicas

Os agregados produzidos com escória de aciaria devem possuir um comportamento igual ou superior aos materiais tradicionalmente utilizados a fim de justificar sua viabilidade. Segundo Motz e Geiseler (2001) forças dinâmicas, estáticas e intempéries ambientais como chuva, aquecimento, congelamento e degelo requerem destes materiais um desempenho adequado para seu uso em construção civil. Por isso, uma avaliação das propriedades físicas e mecânicas das escórias é de fundamental importância. Algumas dessas propriedades são mostradas no Quadro 2.16.

Características	Agregados		
	Escória LD	Basalto	Granito
Massa específica dos sólidos (<i>Bulk density</i>) (g/cm^3)	3,1 – 3,7	2,8 – 3,1	2,6 – 2,8
Determinação da resistência ao impacto em agregados britados (<i>Resistance to impact determined on crushed aggregates</i>) (8-12 mm) (% massa)	10 – 26	9 – 20	12 - 27
Absorção de água (<i>Absortion of water</i>) (% massa)	0,2 -1,0	< 0,5	0,3 – 1,2*
Resistência ao congelamento e degelo (<i>Freeze/thaw spalling < 5mm</i>) (% massa)	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	0,8 – 2,0*
Abrasão Los Angeles (<i>Los Angeles Test</i> <i>Test aggregate particle size 8/12mm</i>) (% massa)	9 – 18	-	15 - 20
Valor de Polimento de Rocha (<i>Polished Stone Value</i>) (PSV ⁴²)	54 - 57	45 - 55	45 - 55
Resistência à britagem (<i>Crushing Strength</i>) (N/mm^2)	> 100	> 250	> 120

*Valores médios de um local específico na Alemanha.

Quadro 2.16 – Propriedades físicas da escória de aciaria LD em comparação com agregados naturais estabilizados (GEISELER, 1996).

Todas as propriedades listadas no Quadro 2.16 são comparáveis ou mesmo melhores que dos agregados naturais, demonstrando que as escórias podem ser processadas para obtenção de um agregado de alta resistência e para atender as normas rodoviárias. Destaca-se em particular a elevada massa específica, superior a $3,1 \text{ g/cm}^3$, sendo esta uma característica muito favorável para o uso em construções rodoviárias, hidráulicas, estabilização de encostas e berços de rios. O nível de resistência é descrito pela determinação do valor de impacto e resistência a britagem, que, somadas ao alto valor de polimento da rocha (PSV) e a textura predominantemente rugosa da escória, qualificam esse material como agregado em camadas de pavimento de tráfego pesado, sob altas temperaturas, em especial para compor capas asfálticas (GEISELER, 1996; MOTZ e GEISELER, 2001).

Deve-se levar em consideração, entretanto, a instabilidade volumétrica das escórias. Para sua utilização em bases e sub-bases de rodovias e aterros, ela deve ter suas principais características dentro dos limites permitidos pelas normas rodoviárias de cada país. Em contrapartida, em aplicações onde não há restrições quanto à expansibilidade, tais como

⁴² “Valor da Pedra Polida” é a medida da resistência do agregado à ação de polimento de pneus sob condições similares àquela que ocorre na superfície de um pavimento. O número PSV determina a resistência à derrapagem de um agregado a ser utilizado em camadas superficiais. A norma Britânica –BS 812 é recomendada pela RILEM e pela ASTM para determinação do PSV.

estradas não asfaltadas, estacionamentos e barragens, tem-se demonstrado que a escória de aciaria é um material eficiente e viável (GEISELER, 1996).

2.9.4 Fenômeno da expansibilidade

“O fenômeno da expansibilidade das escórias de aciaria é provocado pela hidratação do óxido de cálcio livre e do óxido de magnésio não reagido. Em presença de umidade, estes óxidos se hidratam, aumentando de volume. A expansão também pode estar associada ao poliformismo do silicato dicálcico (C_2S) e a oxidação e corrosão do ferro metálico (Fe^0).” (GUMIERI, 2002, p. 22).

Pena (2004) cita que as escórias de aciaria como agregados, não previamente tratadas, podem ter seu uso dificultado ou até mesmo impossibilitado, devido ao problema da expansão, principalmente se estas se encontrarem confinadas, como em uma matriz cimentícia, por exemplo. Mendonça (*apud* Branco, 2004) acrescenta que, no caso de agregados de escória de aciaria em pavimentos, estas podem ter uma expansão de até 10%, ocasionando erupções na pista, que podem chegar a 10 cm de altura. As Figuras 2.43 e 2.44 ilustram pavimentos de escória não curada.



Figura 2.43 – Características expansivas de um pavimento rodoviário construído com escória de aciaria LD – Ouro Branco – MG (GUMIERI, 2002).



Figura 2.44 – Erupções na pista (SILVA, *apud* BRANCO, 2004).

No Quadro 2.17, são apresentados variações volumétricas em função das transformações ocorridas nos principais compostos presentes na escória de aciaria. Observa-se que, nas transformações, seja por hidratação (2,4,10 e 11) e carbonatação (5), seja por oxidação (8 e 9), ocorre um significativo aumento de volume em relação as dimensões originais do cristal. Este fenômeno conduz a expansão destrutiva na escória de aciaria (MACHADO, 2000).

Nº	Fórmula	Densidade (g/cm ³)	Densidade (g/cm ³)	M.mol (g/mol)	Vol. Molar (cm ³ /mol)	Varição do volume (%)
1	MgO	Periclásio	3,58	40,31	11,26	Em relação ao MgO
2	Mg(OH) ₂	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,5
3	CaO	Cal	3,38	56,08	16,59	Em relação ao CaO
4	Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,4
5	CaCO ₃	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,9
		Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,6
6	CaCO ₃ MgCO ₃	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,3
7	Fe ⁰	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	Em relação ao Fe⁰
8	FeO	Wüstita	5,70	71,85	12,61	77,4
9	Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,7
10	Fe(OH) ₂	Hidróxido	3,40	89,86	26,43	271,7
11	FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,0

Nota: Volume calculado a partir do volume e da densidade absoluta das espécies químicas isoladas.

Quadro 2.17 - Características das espécies químicas isoladas antes e após hidratação (WEAST, *apud* MACHADO, 2000).

Machado (2000) destaca ainda no Quadro 2.18, alguns dos fatores e dos mecanismos que influenciam diretamente a expansão ou a estabilização das escórias de aciaria.

Espécies químicas	Parâmetros que influenciam na expansão	Mecanismo
CaO e MgO	<ul style="list-style-type: none"> • Teor da espécie no estado livre • Umidade • Temperatura • Teor de CO₂ • Tamanhos dos grãos de escória 	Hidratação
Fe ⁰	<ul style="list-style-type: none"> • Teor de Fe • Umidade • Tempo de exposição ao ar • Teor de oxigênio no resfriamento • Tamanho dos grãos da escória 	Oxidação
C ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de resfriamento • Impurezas iônicas • Temperatura de resfriamento • Basicidade das escórias 	Transformação

Quadro 2.18 - Parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria (MACHADO, 2000).

Assim, existem diversos tratamentos para reduzir o problema da expansão. Estes procedimentos podem ser classificados de acordo com o instante que ocorrem: antes da separação entre a escória e o aço, alternando o processo de escoridificação, com a escória de aciaria no estado líquido e com a escória de aciaria no estado sólido.

Masuero (2001), por exemplo, desenvolveu um método para granulação de escórias de aciaria elétrica em laboratório. O procedimento consistiu em reduzir a granulometria da escória proveniente do processo de resfriamento lento, refundir o material à 1450°. C de temperatura

e, posteriormente verter-lo em um tonel com água corrente. Desse resfriamento brusco obteve-se a escória denominada de ACIGRAN (Escória de Aciaria Granulada) constituída basicamente de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO em teores muito próximos dos encontrados em escórias de alto-forno.

Na escória obtida observou-se que não houve o aparecimento do mineral periclásio, principal responsável pelos problemas de expansão e teores de óxido de cálcio foram praticamente nulos, não implicando em problemas de desintegração. Nas argamassas com 50% de substituição de cimento por ACIGRAN, analisadas através dos principais ensaios de expansibilidade⁴³, não foi verificada uma expansão significativa.

Da mesma forma, Gumieri *et al.* (2003) utilizou a metodologia desenvolvida por Masuero (2001) em escórias de aciaria LD. Os resultados da granulação foram a redução do índice de basicidade, do teor de CaO livre, a eliminação do MgO na forma de periclásio e da larnita ($\beta\text{C}_2\text{S}$), considerados agentes causadores de expansão. Os autores observaram, através de difratometria de raios - X, o aparecimento de compostos com propriedades cimentícias, tal como o silicato tricálcico (C_3S) e o mineral bridgita ($\alpha\text{C}_2\text{S}$). Os ensaios de expansão evidenciaram a estabilização das escórias após a granulação.

No Quadro 2.19 é possível visualizar um resumo com algumas informações a respeito dos diferentes tratamentos encontrados para redução da expansibilidade.

TRATAMENTO	DESCRIÇÃO	MOMENTO DE ATUAÇÃO	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS	EFICÁCIA RELATIVA (quanto à redução da expansão)
Aumento da dissolução dos fundentes	Redução da granulometria da cal/dolomita	Antes da geração	Baixo custo	ND	ND
Alteração do agente escorificante	Utilização de um material sintético com fundente	Antes da geração	Aumenta também a atividade hidráulica da escória	Não altera o teor de MgO livre	Baixa
Adição de sílica e oxigênio	Adição de sílica e oxigênio à escória líquida, com uma fonte de calor	Após a geração, com a escória no estado líquido	Redução dos teores de CaO livres para abaixo de 1%	Alto custo	média

Quadro 2.19 – Resumo dos tratamentos na escória de aciaria (PENA, 2004).

⁴³ Ensaio da agulha de Le Chatelier (NBR 11582/1991), Método das Barras (ASTM C1260/2001), Autoclave (ASTM C151/1940) (MASUERO, 2001).

TRATAMENTO	DESCRIÇÃO	MOMENTO DE ATUAÇÃO	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS	EFICÁCIA RELATIVA (quanto à redução da expansão)
Granulação com água	Resfriamento brusco com água	Após a geração com a escória no estado líquido	Aumenta também a atividade hidráulica da escória	Alteração da granulometria; É preciso Secagem; Problemas ambientais; Friabilidade	Alta
Granulação a seco	Resfriamento brusco e seco	Após a geração, com escória no estado líquido	Aumenta também a atividade hidráulica da escória; Mais simples que a granulação com água	Alteração da granulometria; Friabilidade da escória	Alta
Cura ao tempo (weathering)	Exposição ao tempo – ocasionalmente com molhagem	Após a geração, com a escória no estado sólido	Baixo custo e simplicidade	Demorado; Falta de definição metodológica; Heterogeneidade.	Variável
Cura a vapor sob pressão atmosférica (open yard)	Injeção de vapor à escória sem pressão	Após a geração, com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível	Alta
Cura a vapor sob pressão	Injeção de vapor à escória em autoclave	Após a geração, com a escória no estado sólido	Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres	Alto custo	Muito alta
Misturas	Mistura com outros materiais, com o objetivo de modificar e melhorar suas propriedades.	Após a geração, com escória no estado sólido.	Ganho de resistência com o tempo	ND	Alta

ND – Não divulgado.

Quadro 2.19 – Resumo dos tratamentos na escória de aciaria (conclusão) (PENA, 2004).

2.9.5 Aplicações

O estudo sobre as potencialidades das escórias de aciaria é recente. Em 1982, na Europa verificou-se que o volume de escórias geradas, em torno de 9 milhões de toneladas, não era totalmente absorvido como fertilizante, deste fato, tornou-se necessário o emprego de novas tecnologias a fim de reciclar um maior volume de escória produzido e estocado sem perspectiva de reciclagem (MACHADO, 2000).

Dessa forma, diversas pesquisas foram desenvolvidas nas décadas de 70, 80 e 90, principalmente para avaliar o emprego de escórias de aciaria em estradas e pavimentação (GUMIERI, 2002), evoluindo posteriormente para outras aplicações como as mostradas na Figura 2.45.



Figura 2.45 – Possibilidades de reciclagem da escória de aciaria (PENA, 2004).

De acordo com a Figura 4.45, além do uso em fertilizantes e camadas de pavimento, a escória pode ser utilizada na construção civil e rodoviária como agregados para concreto; adição e matéria – prima para o cimento; estruturas de contenção e aterros e; lastro ferroviário. Ainda, é possível sua utilização em aplicações em outras áreas como a sua reutilização nos próprios processos siderúrgicos (indústria metalúrgica); jateamento de estruturas (indústria mecânica) e; no tratamento de águas ácidas (indústria química) (LANA, 2003).

No Brasil e no mundo, essas aplicações são possíveis graças aos estudos que têm sido desenvolvidos pelas universidades, em parceria com algumas siderúrgicas nacionais e internacionais, como é retratado nos trabalhos de Geyer (2001); Gumieri (2002); Pena (2004); Branco (2004) entre outros.

Além disso, podem ser citados alguns centros de referência em estudos e pesquisas que envolvem escória de aciaria no âmbito nacional e internacional. No Brasil, encontram-se o PCC, na Universidade de São Paulo – USP, o NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação) na UFRGS e o NEXES (Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas), na

UFES. No mundo, os mais conhecidos são a NSA (*National Slag Association*), nos EUA, a FEhS⁴⁴, na Alemanha, a *Euroslag*, na Europa, a *Nippon Slag*, no Japão, a ASA (*Australian Slag Association*), na Austrália, e a CTPL⁴⁵, na França.

2.9.5.1 Adição de escórias de aciaria em argamassas e concretos.

A utilização de escória de aciaria como adição em argamassas e concretos é descrita nos trabalhos de Masuero (2001), Geyer (2001), Gobbo *et al.*(2003), conforme é descrito a seguir.

Masuero (2001) analisou a viabilidade da utilização de escórias de aciaria elétrica como substituição ao cimento. Para esta pesquisa foram confeccionadas argamassas com 10%, 30% e 50% em volume de escória tratada onde se avaliou as propriedades mecânicas e a durabilidade comparando-as com argamassas produzidas com escória de alto forno nas mesmas proporções.

Do ponto de vista físico e mecânico as argamassas com a incorporação de ACIGRAN⁴⁶ apresentaram melhor comportamento quando comparadas com a de referência (0% escória). O gráfico da Figura 2.46 mostra os valores da resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 91 dias. O ganho na resistência é resultante das suas propriedades hidráulicas e sua ação fíler. Da mesma forma, observa-se que o uso de teores até 50% não alterou o resultado da resistência à compressão (MASUERO, 2001).

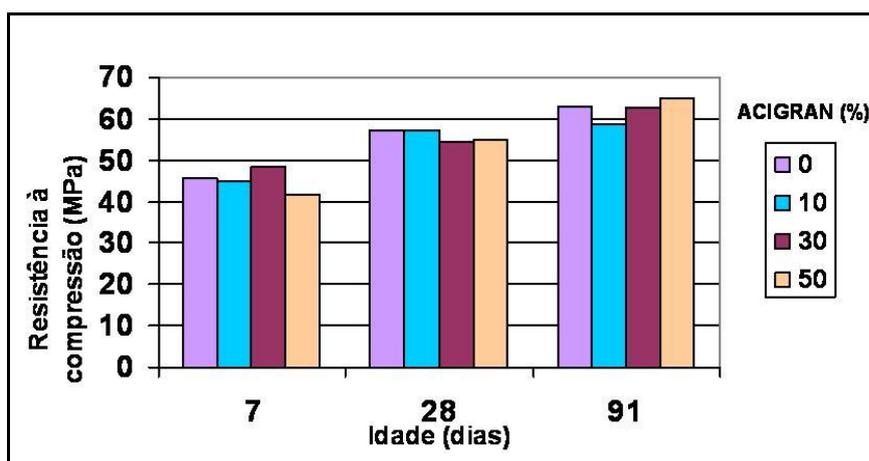


Figura 2.46 - Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas de traço 1:1,5 (MASUERO, 2001).

⁴⁴ Forschungsgemeinschaft Eisenhuttenschlacken – Associação de pesquisa para escória de alto-forno, escória de aciaria e outros co-produtos siderúrgicos.

⁴⁵ Centre Technique et de Promotion des Laitiers Sidérurgiques

⁴⁶ A autora chama de ACIGRAN as escórias de aciaria elétrica resfriadas pelo processo brusco em laboratório.

Em comparação com argamassas com escória de alto forno, as com ACIGRAN apresentaram melhor desempenho em relação à resistência à compressão, tanto aos 7 dias como aos 28 dias, apresentando um acréscimo de até 26% nos valores. O gráfico da Figura 2.47 confirma esta afirmação (MASUERO, 2001).

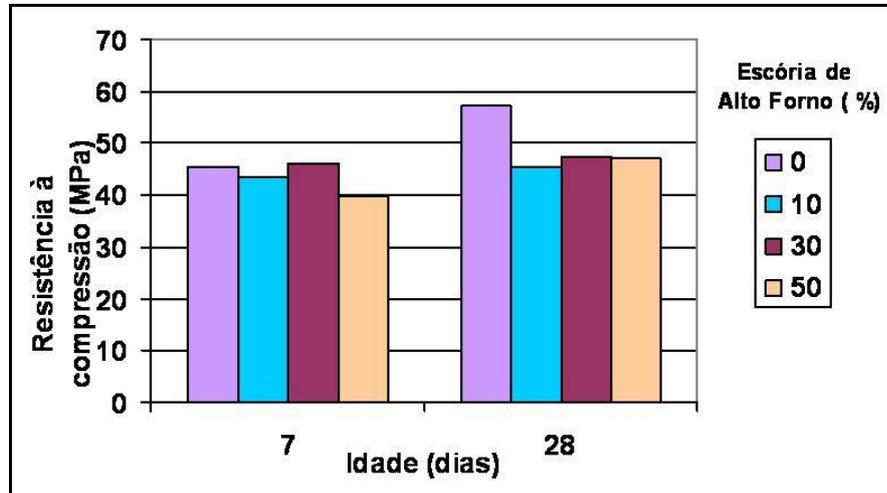


Figura 2.47 - Resistência à compressão, ao longo do tempo de argamassas de traço 1:1,5 com escórias de alto forno (MASUERO, 2001).

Quanto à durabilidade, o ensaio de carbonatação acelerada mostrou que quanto maior o teor de substituição de escória maior é a profundidade de carbonatação. Este efeito é consequência, provavelmente, da menor reserva alcalina. Da mesma forma, no ensaio de ataque por íons cloreto, observou-se uma diminuição do coeficiente de difusão à medida que aumenta-se o teor de ACIGRAN. Em relação à resistência por ataque de sulfatos, amostras submetidas à solução de 5% de NaSO_4 apresentaram um aumento de até 100% na resistência a tração na flexão, com o acréscimo de ACIGRAN (MASUERO, 2001).

Gobbo *et al.* (2003) realizaram um estudo onde adicionaram teores de 5, 10, 15 e 20% de escória de aciaria elétrica, submetida a cura úmida e seca, em concretos compactados com rolo. Houve um aumento de resistência à compressão para os teores de adição de 10, 15 e 20% de escória em relação ao concreto de referência, aos 28 dias. As dosagens de concreto que apresentaram maior resistência foram os teores de 15 e 20%. Os autores concluíram que na maioria das propriedades e idades investigadas, houve melhoria das propriedades com o teor de adição. Quanto ao tipo de cura, não houve efeito significativo sobre dosagens estudadas.

Geyer (2001) demonstrou a possibilidade da escória de aciaria (oxidante e redutora) como adição ao cimento Portland para confecção de concretos. Foram realizados ensaios de expansibilidade, de pozolanicidade, resistência à compressão e profundidade de carbonatação

em concretos com 0% (referência), 5%, 35% e 70% de escória de aciaria elétrica sobre a massa de cimento. A pesquisadora também comparou a escória simplesmente moída com a escória passante na peneira nº 200 (# 0,075mm de malha), nos teores de 5% e 35%, com o intuito de verificar que quanto mais fino o material, maior é seu índice de pozolanicidade.

Os resultados mostraram que, apenas a adição de partículas finas de escória aumentaram a resistência à compressão, aos 28 dias, em 23,7% e em 112,48% para adições de 5 e 35%, respectivamente, em relação a estas mesmas adições com escória simplesmente moída. A adição de 5% de finos de escória no concreto melhorou a resistência à compressão em 50,2% em comparação com o concreto de referência. Para 35% desta mesma adição, o resultado permaneceu praticamente o mesmo. O índice de pozolanicidade foi de aproximadamente 70%, ficando abaixo dos 75% mínimos necessários para classificá-la como pozolana.

No ensaio de carbonatação, 5% de adição da escória, resultou numa diminuição de 50% da profundidade carbonatada quando comparadas aos corpos-de-prova de referência. Se usadas partículas finas (5%), este resultado é ainda melhor (< 1 mm), o que aponta uma durabilidade maior de estruturas confeccionadas com este material. Confirmando os outros resultados, sobre o ponto de vista da resistência à compressão, a adição de 35% aumentou a profundidade de carbonatação em relação ao testemunho em mais de 100% e adições próximas a 70% são inviáveis. Com o uso de partículas finas, com 35% de adição, o resultado permaneceu inalterado em relação ao testemunho. A autora conclui que a escória de aciaria elétrica utilizada nos ensaios de viabilização mostrou-se estabilizada e viável em adições de até 35% no concreto. Adições de até 5% melhoraram a resistência e reduziram a profundidade da carbonatação em concreto convencional (GEYER, 2001).

2.9.5.2 Outras aplicações

Outras aplicações da escória de aciaria, bem como suas vantagens e limitações são descritas no Quadro 2.20.

Aplicação	Vantagens da escória	Limitações do uso
Base e sub-bases de estradas	<ul style="list-style-type: none"> - bases e sub-bases mais duráveis e econômicas; - execução de camadas mais finas (em torno de 5%); - alta resistência a abrasão, atrito e compressão; - suporta um grande volume de tráfego e a altas velocidades e carga pesada (CBR⁴⁷ em torno de 300%); - permite uma drenagem livre; - tem maior facilidade de compactação; - preservação dos recursos naturais; - hidráulicidade⁴⁸. 	<ul style="list-style-type: none"> - maior necessidade de projeto; - exige maior conhecimento técnico e científico específico para conter a expansibilidade; - formação de tufa⁴⁹; - possui maior densidade e; - seu uso deve ser evitado próximo a águas paradas como poços, lagos ou terrenos alagadiços.
Misturas asfálticas	<ul style="list-style-type: none"> - partículas mais coesas e angulares; - resistência a derrapagem com melhor condição de frenagem para curvas e paradas de semáforo; - maior durabilidade atribuída ao índice de vazios⁵⁰ da mistura, espessura da camada de ligante, - o elevado pH da escória que acarreta grande afinidade pelo betume, possibilitando um elevado grau de retenção do ligante à escória; - retém maior calor por mais tempo entre a usina e a obra; - alta resistência ao polimento; 	<ul style="list-style-type: none"> - problemas de segregação e decapagem; - a textura superficial rugosa das partículas resulta em um material bastante absorvente e poroso, aumentando o consumo de cimento asfáltico; - o aumento dos custos envolvidos com transporte, devido à alta massa específica.
Cobrimento de pátios e revestimento ANTI-PÓ⁵¹.	<ul style="list-style-type: none"> - melhoram as condições de suporte e tráfego nos pátios; - eliminam a possibilidade de formação de barro; - tem baixo custo tanto para a aplicação quanto a manutenção; - conferem alta resistência para posterior estoque de materiais; - produz uma superfície mais compacta, durável e econômica; - evita a emissão de poeira; - facilidade de aplicação devido a rusticidade do método; - indicada para vias de baixo tráfego; - alta qualidade; - adequada para serviços de prefeituras. 	<ul style="list-style-type: none"> - não devem estar confinadas nem possuir qualquer revestimento;

Quadro 2.20 – Aplicações da escória de aciaria.

⁴⁷ *California Bearing Ratio* ou ISC – Índice de Suporte Califórnia.

⁴⁸ É o processo pelo qual o material endurece através da reação com água. Na prática rodoviária recebe o nome de cimentação ou concrecionamento.

⁴⁹ A tufa é originada da carbonatação da cal livre lixiviada, resultando numa massa porosa e pouco resistente que provoca o entupimento do sistema de drenagem (PENA, 2004).

⁵⁰ Medida através do índice PSV

⁵¹ Camada de rolamento constituída de um mistura de escória, material betuminoso e areia sobre um sub-leito compactado (LANA, 2003).

Aplicação	Vantagens da escória	Limitações de uso
Lastro ferroviário	<ul style="list-style-type: none"> - melhores propriedades que os agregados naturais comumente usados em vias férreas; - melhor resistência ao desgaste e abrasão; - melhor ajustamento dos dormentes; - melhor comportamento do lastro, quanto ao movimento lateral devido a sua massa específica elevada; - melhor intertravamento dos grãos; - sua estrutura vesicular e a ausência de substâncias orgânicas proporcionam melhor drenagem; - boa resistência elétrica, o que evita interferências em sinais utilizados nos sistemas de controle em ferrovias; - aplicação consolidada pela CVRD e FCA e normatizada pela ABNT. 	<ul style="list-style-type: none"> - não divulgado
Obras de contenção, hidráulicas e aterros	<ul style="list-style-type: none"> - pode ser utilizada em muros de arrimo, como gabiões; - maior peso próprio; - baixo custo de implantação e manutenção; - alto poder drenante; - excelente aparência visual; - estruturas tipo <i>rip-rap</i>; - controlar os processos erosivos; - propriedades cimentíceas; - utilizada como colchão drenante; - compatibilidade com as condições do sub-solo; - pode ser usada na forma grossa, não necessitando de britagem em níveis elevados; - permite a conservação das condições físicas do leito, reduzindo o assoreamento e a erosão; - para aterros: facilidade de compactação; - alcalinidade adequada; - pequeno ou nenhum recalque; 	<ul style="list-style-type: none"> -deve ser evitado seu uso nas proximidades de mananciais de água potável por possível contaminação do material solubilizado, de elevado pH.
Fertilizante e corretivo do solo	<ul style="list-style-type: none"> - alto teor calcário e pequenas quantidades de fosfato, magnésio e enxofre que a tornam desejáveis no condicionamento dos solos; - equilibrar solos acidificados; - efeito residual prolongado sendo ideal para culturas de ciclo; - Liberação lenta de CaO; - Teor de P₂O₅ solúvel, aumentando o crescimento do vegetal. - correção de águas ácidas. 	<ul style="list-style-type: none"> -presença de álcalis e chumbo; - maior custo de moagem.

Quadro 2.20 – Aplicações da escória de aciaria (Continuação).

Aplicação	Vantagens da escória	Limitações do uso
Fabricação de Cimento Portland	<ul style="list-style-type: none"> - É adicionada no forno de cimento como substituto parcial do calcário; - composição química similar ao cimento Portland; - menor consumo energético no processo de clínquerização; - redução de emissão de CO₂ na atmosfera; - baixo custo em relação ao clínquer. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é utilizado no Brasil; - teor de ferro, muito superior ao desejável em matéria – prima do cimento; - Necessita de correções na composição química.
Agregados para concreto, argamassas e blocos	<ul style="list-style-type: none"> - resistências à compressão superiores à obtidas em concretos com agregados pétreos; - maior resistência devido a hidraulicidade; - menor penetração a cloretos; - maior durabilidade quando submetida a ambientes marinhos; - reduz a temperatura de queima dos blocos; - concreto de boa aparência e baixa exsudação. 	<ul style="list-style-type: none"> - necessidade de cura térmica para minimizar a expansibilidade; - elevado teor de alumínio e cálcio.
Reciclagem nos processos siderúrgicos	<ul style="list-style-type: none"> - recuperação do ferro presente na escória; - facilidade de recuperação do ferro; - o calcário da escória já está calcinado; - economia com matérias-primas de alto valor comercial; 	<ul style="list-style-type: none"> - não divulgado
Jateamento de Estruturas	<ul style="list-style-type: none"> - uso da escória em substituição a areia de jateamento; - não contem sílica cristalina, responsável por causar problemas respiratórios; - efeito superior ao da areia; - a superfície jateada possui qualidade equivalente. 	<ul style="list-style-type: none"> - não divulgado

Quadro 2.20 – Aplicações da escória de aciaria (conclusão).

Fontes: MURPHY *et al.*(1997); GOMES (1999); LIMA (1999); MACHADO (2000); MASUERO (2001); GEYER, (2001); GRAFFITTI (2002); GUMIERI, 2002; FERREIRA *et al.*(2002); LANA (2003); CST (2003b); ROSSI (2003);PIMENTA e LIMA (2003); CORRÊA *et. al.* (2003); BALDUINO (2004); PENA (2004); SHIH *et. al.*(2004).

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo são descritas as variáveis em estudo, as propriedades físicas e químicas dos materiais empregados na pesquisa, bem como os métodos de ensaios utilizados no estudo de finos, pastas, na composição do esqueleto granular e os ensaios em concreto fresco para a obtenção do Concreto Auto-adensável de Alta Resistência (CADAR), cujos procedimentos foram baseados no método de Gomes (2002).

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC – UFES) e nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas, sendo desenvolvido em cinco etapas que são descritas a seguir (Figura 3.1).

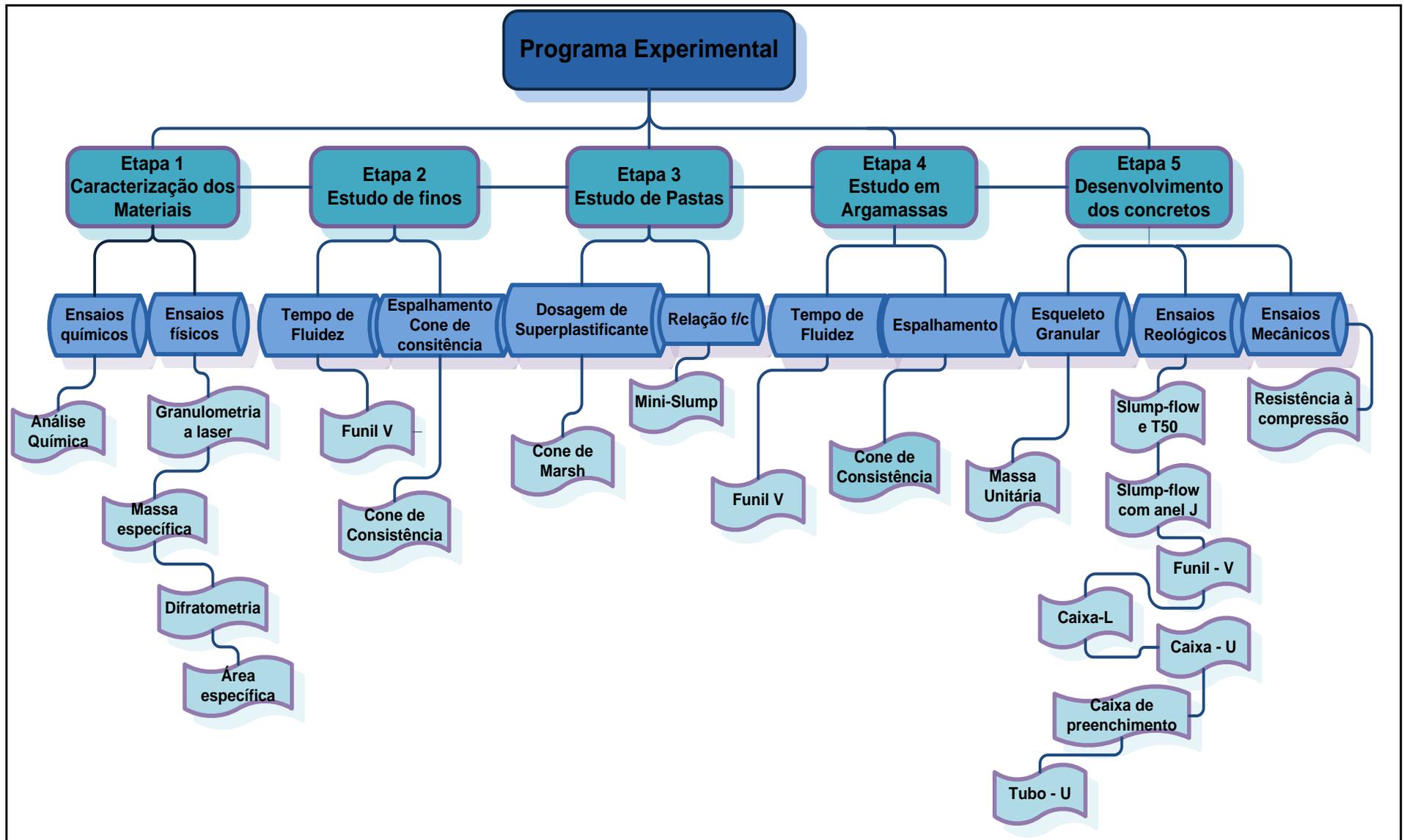


Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental.

a) Primeira Etapa – Seleção e caracterização dos materiais

O primeiro passo desenvolvido para realização desta pesquisa foi a seleção e caracterização dos materiais. Procurou-se escolher materiais de acordo com requisitos técnicos e econômicos e em função da disponibilidade na região de estudo. Exceto pela cinza volante, todos os componentes para os concretos auto-adensáveis foram adquiridos no estado do Espírito Santo.

Alguns dos ensaios foram realizados no Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A (DCTT/FURNAS), na cidade de Aparecida de Goiânia – GO. Os testes realizados em Furnas foram: análise química, difratometria de raio X e granulometria a *laser* do cimento e dos finos empregados na pesquisa. No LEMAC foram determinadas características físicas por meio dos ensaios de determinação da área específica Blaine, água da pasta de consistência normal, massa específica, tempo de pega do cimento entre outros.

b) Segunda Etapa – Estudo dos finos

Na segunda etapa foi realizado um estudo a fim de analisar o comportamento das composições dos finos com a água por meio de ensaios que medem deformabilidade (tronco de cone de consistência) e tempo de fluidez (funil V para argamassas).

c) Terceira Etapa – Estudo em pastas

A terceira etapa consistiu no estudo de pastas proposto pela metodologia de dosagem desenvolvida por Gomes (2002). Foram realizados os ensaios de mini-*slump*, para determinar a dosagem ótima da relação fíler/cimento, e o ensaio do cone de Marsh, responsável pela determinação do ponto de saturação do superplastificante. Após estudo determinou-se as pastas tidas como ideais para a produção de cada concreto.

d) Quarta Etapa – Estudo em argamassas

Com os resultados obtidos na terceira etapa, realizou-se uma pequena alteração na metodologia de dosagem, realizando um estudo de argamassas, dando início a quarta etapa. O objetivo deste estudo foi de verificar se a argamassa presente no concreto possui deformabilidade e fluidez compatíveis com os parâmetros propostos por Okamura e Ouchi (2003) e EFNARC (2002), e assim, realizar as alterações necessárias como ajuste na relação fíler/cimento (f/c) e dosagem de saturação do aditivo superplastificante. Para o

desenvolvimento dessa fase foram realizados os ensaios de espalhamento e tempo de fluidez, com os mesmos equipamentos utilizados para análise dos finos (2ª. etapa).

É importante acrescentar que, esta fase não será descrita em detalhes neste programa experimental uma vez que foi realizada de forma empírica e apenas para evitar a necessidade de uma produção demasiada de concreto. No entanto, considerou-se importante mencioná-la para explicar o fato de que a maioria das relações finos/cimento e dosagens ótimas de superplastificante determinadas no estudo de pastas foram modificadas para o desenvolvimento dos concretos (5ª. Etapa).

e) Quinta Etapa – Desenvolvimento dos concretos

Com a nova relação f/c e nova dosagem de saturação do aditivo obtido no estudo de argamassas, foram recalculados os traços dos concretos com estes valores, dando início a quinta etapa. Os objetivos dessa fase foram o de obter o esqueleto granular e obter as misturas de concreto com um teor de pasta que atingisse as propriedades de auto-adensamento, isto é, capacidade de preenchimento, habilidade de passar por entre as barras de armadura e estabilidade, além de obter-se concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa aos 7 dias de acordo com a metodologia para CADAR.

Nesta etapa foram realizados os ensaios de espalhamento (*slump flow*) e T_{50} , *slump flow* em conjunto com anel J, funil V, caixa – L, caixa – U, caixa de preenchimento e tubo U, além do ensaio de resistência à compressão.

Os ensaios e os detalhes de cada etapa serão apresentados nas seções seguintes.

3.2 Variáveis da pesquisa experimental

As principais variáveis estudadas nesta pesquisa foram o tipo de adição mineral utilizada na produção do CADAR; as relações f/c/cimento e dosagem ótima de superplastificante; os teores de pasta e o atendimento do concreto auto-adensável com as adições, aos parâmetros de auto-adensamento. A seguir, estas e as demais variáveis são detalhadas para cada fase do programa experimental.

3.2.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes são fixadas pelo pesquisador com o intuito de observar o reflexo de suas variações sobre as variáveis dependentes. São consideradas neste trabalho as seguintes variáveis independentes:

3.2.1.1 Finos

a) Tipo de adição mineral

Quatro tipos de adição mineral foram utilizados na produção do CADAR: escória de aciaria LD moída, escória granulada de alto-forno, cinza volante e fíler calcário. A escolha dessas adições foi baseada na literatura científica consultada, com o objetivo de comparar o comportamento da escória isoladamente e em conjunto com outras adições.

3.2.1.2 Pastas

a) Relação entre o fíler e o cimento, em massa (f/c);

Fixou-se para essa variável o valor mínimo igual a 0,00 e máximo igual a 0,60, sendo determinada através do ensaio com o mini-*slump*.

b) Teor de superplastificante em relação à massa de cimento (%SP);

Determinada no ensaio do cone de Marsh.

3.2.1.3 Argamassas

a) Relação agregado miúdo/agregado graúdo, em massa (am/ag)

Fixou-se para a produção das argamassas uma relação agregado miúdo/agregado graúdo igual a 1, isto é, correspondente ao valor encontrado na determinação do esqueleto granular.

b) Relação f/c

A relação fíler/cimento para argamassas variou de 0,10 a 0,50.

c) Volume de ar incorporado

O volume de ar incorporado foi de 2%.

3.2.1.4 Concretos

a) Tipo de pasta

b) Teor de pasta

O teor de pastas nos concretos foi determinado segundo a metodologia de Gomes (2002), variando de 36% a 44%.

c) Teor de aditivo superplastificante

3.2.2 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são fatores influenciados pela alteração das variáveis independentes e, em determinadas situações, por variáveis dependentes. A seleção destas variáveis foi realizada de acordo com a determinação das variáveis independentes, buscando determinar as propriedades dos materiais em estudo. Foram determinadas em laboratório, por meio da realização de ensaios normalizados. As seguintes variáveis dependentes são apresentadas a seguir.

3.2.2.1 Finos

a) Relação Volume de água/Volume de finos (V_a/V_f)

b) Sensibilidade do fino à adição de água (E_p)

c) Quantidade de água necessário para o início do espalhamento (β_p)

d) Espalhamento relativo Γ_m

e) Parâmetro de viscosidade (R_m) e tempo de escoamento da mistura (T_{esc})

3.2.2.2 Pastas

a) Fluidez e deformabilidade das pastas

São representadas por três parâmetros: o tempo de fluxo (T_{FL}), o diâmetro de espalhamento final utilizando o mini-*slump* (D_F) e o tempo para obtenção um diâmetro igual a 115 mm utilizando o mini-*slump* (T_{115}).

3.2.2.3 Argamassas

a) Deformabilidade

Medida pelo ensaio de espalhamento no cone de consistência.

b) Viscosidade

Medida pelo ensaio do funil V para argamassas.

3.2.2.4 Concretos

a) Esqueleto granular

A massa compactada (MC), o índice e o volume de vazios são variáveis dependentes nessa pesquisa. Essas variáveis foram determinadas no ensaio de massa unitária no estado solto NBR MN 45 (ABNT, 2006).

b) Propriedades do concreto fresco

As variáveis dependentes relativas ao CAA no estado fresco são a massa específica, o teor de ar incorporado, o diâmetro de espalhamento no cone de Abrams e o diâmetro de espalhamento no cone de Abrams em conjunto com o anel J. Além disso, representam ainda variáveis dependentes os resultados de altura de preenchimento na caixa U, tempos de fluidez T_{20} e T_{40} e valor de resistência ao bloqueio da caixa – L, percentual de segregação utilizando o tubo U e porcentagem de preenchimento na caixa de preenchimento.

c) Propriedades do concreto endurecido

No concreto endurecido a única variável dependente a ser avaliada é a resistência à compressão, uma vez que a metodologia de Gomes (2002) exige que o CAA apresente resistência maior que 50 MPa aos 7 dias.

3.2.3 Variáveis de controle

As variáveis de controle são as variáveis independentes que serão mantidas fixas no decorrer dos experimentos para que sejam avaliadas as variáveis dependentes em função das independentes. São elas:

3.2.3.1 Seleção e caracterização dos materiais

a) Características dos materiais empregados

A procedência, litologia, granulometria e proporção entre os materiais foram as mesmas para todos os concretos estudados. Os agregados são oriundos da mesma fonte assim como a origem das diferentes adições minerais foram mantidas constantes. O tipo de superplastificante utilizado foi de 3ª. geração, á base de policarboxilatos. A umidade da areia foi controlada para que não houvesse flutuações no teor de água dos concretos auto-adensáveis ensaiados.

b) Tipo de Cimento

Foi empregado cimento Portland de Alta Resistência Inicial, tipo V, especificado de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991), uma vez que este tipo de aglomerante não apresenta adição reativa. Isto é necessário para que a adição reativa ou pozolânica contida no cimento não se torne mais uma variável na pesquisa.

3.2.3.2 Finos

a) Procedimento de mistura e ensaios

O procedimento da mistura de água e finos foi rigorosamente mantido.

b) Forma e dimensões dos equipamentos

A forma e as dimensões dos equipamentos usados nesta etapa não variaram. Para determinação dos parâmetros E_p e β_p foi utilizado o cone de consistência também chamado de forma tronco-cônica, prescrita na NBR 13320 (ABNT, 2001), medindo 100x70x60mm e para obtenção do tempo de fluidez, o funil V para argamassas, proposto por Okamura em 1995 (OKAMURA e OUCHI, 2003)

3.2.3.3 Pastas

a) Proporção das adições

A proporção entre as adições sobre a massa de cimento foi determinada de acordo com a literatura. São elas: 100% de escória de aciaria LD; 70% de escória de aciaria LD com 30%

de escória granulada de alto-forno; 85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante e; 100% de fíler calcário.

b) Forma e dimensões dos equipamentos

Para determinação da dosagem ótima de superplastificante foi adotado o cone de Marsh com abertura de 8 mm. O volume de pasta utilizado nesse ensaio foi de 1 litro, sendo que a análise de escoamento correspondeu ao tempo gasto para a vazão de 500 ml. Na determinação da relação f/c foi utilizado o mini-*slump* ou mini-cone proposto por Kantro (1980) de 19x38x57mm.

c) Relação água/cimento

A relação água/cimento foi determinada a 0,35.

3.2.3.4 Argamassas

a) Relação água/cimento de 0,35

b) Forma e dimensões dos equipamentos

Foram utilizados os mesmos equipamentos do estudo de finos.

3.2.3.5 Concretos

a) Relação água/cimento

A relação água/cimento foi determinada a 0,35 com o objetivo de alcançar resistências maiores que 50 MPa aos 7 dias, conforme recomenda a metodologia de dosagem de Gomes (2002).

b) Forma e dimensões dos equipamentos

O anel J utilizado em conjunto com o cone de Abrams manteve um diâmetro de 30 mm e altura de 10 mm, o espaçamento entre as barras foi de 3 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo. O funil V usado foi o de geometria retangular com abertura de 7,5 mm forma retangular. A caixa – L teve suas manteve sua dimensão horizontal de 800 mm e altura de 600 mm, o espaçamento entre as barras de aço foi de 3 vezes o tamanho máximo do

agregado graúdo. Para o ensaio de caixa U utilizou-se o formato com base retangular, por ser mais fácil de reproduzir.

c) Temperatura e umidade do ar

A temperatura e umidade do ar foram controladas através de equipamentos específicos de modo a evitar variações nas misturas.

d) Método de dosagem

A metodologia de dosagem adotada para compor as misturas de concreto foi a de Gomes (2002), desenvolvida na Universidade Politécnica da Catalunya. Os critérios de Gomes (2002) quando a determinação do esqueleto granular, dosagem ótima de superplastificante, relação fíler/cimento foram seguidas. No entanto, utilizou-se também alguns parâmetros propostos no método de Okamura no estudo de finos bem como na formulação das argamassas como já mencionado na seção anterior.

3.2.4 Variáveis intervenientes (não- controladas)

As variáveis intervenientes são aquelas que também exercem efeito sobre as variáveis dependentes, porém não se tem o interesse de controlar suas variações nesta pesquisa, sendo somente medidas para observação da sua variação. Neste trabalho foram consideradas como intervenientes as seguintes variáveis:

3.2.4.1 Concretos

a) Consistência do concreto fresco

b) Massa específica do concreto

3.3 Escolha e caracterização dos materiais

Para este estudo experimental foram escolhidos materiais de acordo com requisitos técnicos e econômicos levando em consideração sua maior disponibilidade no mercado local. A seguir apresentam-se a procedência e caracterização dos componentes dos concretos auto-adensáveis desenvolvidos nesta pesquisa.

3.3.1 Aglomerante

O aglomerante empregado foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, tipo V, especificado de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991) e proveniente da indústria cimenteira Holcim (Brasil) S.A, localizada no município da Serra, Espírito Santo. As características químicas, físicas e mecânicas deste cimento estão dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização do CP V-ARI.

Propriedades Determinadas CP V – ARI		Teores	Método de ensaio	Limites NBR 5733:1991	
Massa Específica (g/cm ³)		3,061	NBR NM 23/00	N.E.	
Finura	Resíduo da peneira 200 (75µm) (%)	0,30	NBR 3432/91	≤ 6	
	Área específica – Blaine (cm ² /g)	4.810	NBR NM 76/98	≥ 3000	
Tempos de Pega	Início de Pega (h:min)	2:30	NBR NM 65/03	≥ 1:00	
	Fim de Pega (h:min)	4:15		≤ 10:00	
Água da pasta de consistência normal (%)		30,0	NBR NM 43/03	N.E.	
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	35,9	NBR 7215/96	≥ 24	
	7 dias	38,3		≥ 34	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	2,94	NBR 5743/89	≤ 4,5	
	Resíduo insolúvel	0,61	NBR 5744/89	≤ 1,0	
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,30	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	≤ 4,5	
	Óxido de magnésio (MgO)	1,56		≤ 3,0	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	19,95		N.E.	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,11		N.E.	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,85		N.E.	
	Óxido de cálcio (CaO)	63,72		N.E.	
	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,3		N.E.	
	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,43	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾
		Óxido de potássio (K ₂ O)	1,21	N.E.	
		Equiv. alcalino	1,22	N.E.	
	Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,22	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾	N.E.
		Óxido de potássio (K ₂ O)	1,00		N.E.
Equiv. alcalino		0,88	N.E.		
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		5,61		N.E.	

N.E.: não especificado.

(1): fluorescência por raios X.

(2): espectrofotometria de absorção atômica.

Através dos resultados da granulometria a *laser* (Figura 3.2) observa-se 10% das partículas se encontram abaixo do diâmetro de 2,07 µm, e o tamanho médio dos grãos situam-se em torno de 11,09 µm. O gráfico mostra ainda que 90% das partículas se encontram abaixo do diâmetro de 20, 31 µm.

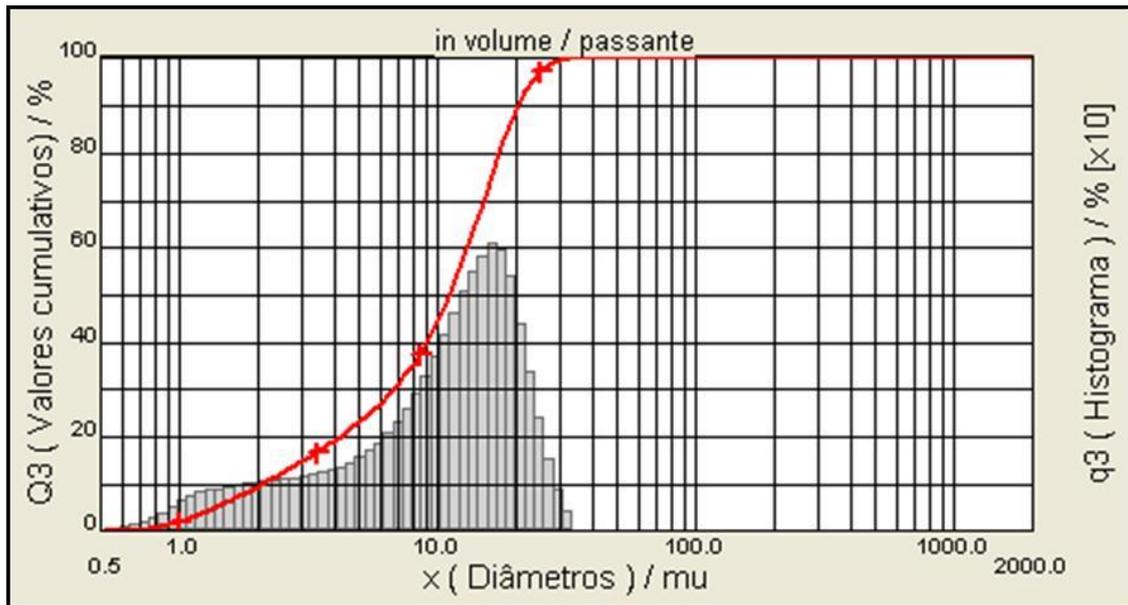


Figura 3.2 – Granulometria a laser do CP V – ARI.

Também foi realizada a difratometria de raios - X do cimento assim como dos demais finos dessa pesquisa. Os métodos de difração de raios - X figuram-se como uma das principais técnicas para caracterização microestrutural de materiais, consistindo na determinação das distâncias mantidas pelos íons e átomos formadores de cristais (distâncias interplanares), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de raios - X incidente e o plano atômico que o difrata e, do comprimento desses raios. Este método esclarece qual a natureza e parâmetros da rede do material, assim como fornecem detalhes a respeito do tamanho, qualidade e orientação dos cristais. Deve-se ressaltar que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite provavelmente não são captados.

A metodologia adotada para a preparação e análise das amostras está estabelecida nos seguintes procedimentos do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A., que são parte integrante do Sistema da Qualidade. São eles:

- Procedimento 4.15.03- Operação do Difratorômetro de Raios-X;
- Procedimento 4.15.04 - Preparação de Amostras para Difractometria de Raios-X;
- Procedimento 4.15.11 - Análise por Difração de Raios-X.

A análise por difração de raios - X da amostra de cimento permitiu a identificação de uma grande quantidade de C_3S , C_2S (Larnita) e calcita, sendo estes, considerados os minerais

principais. Os minerais subordinados foram a Gipsita e o C_3A e os minerais do traço a Etringita e Brownilerita. O espectro da difração de raios-X é mostrado na Figura 3.3.

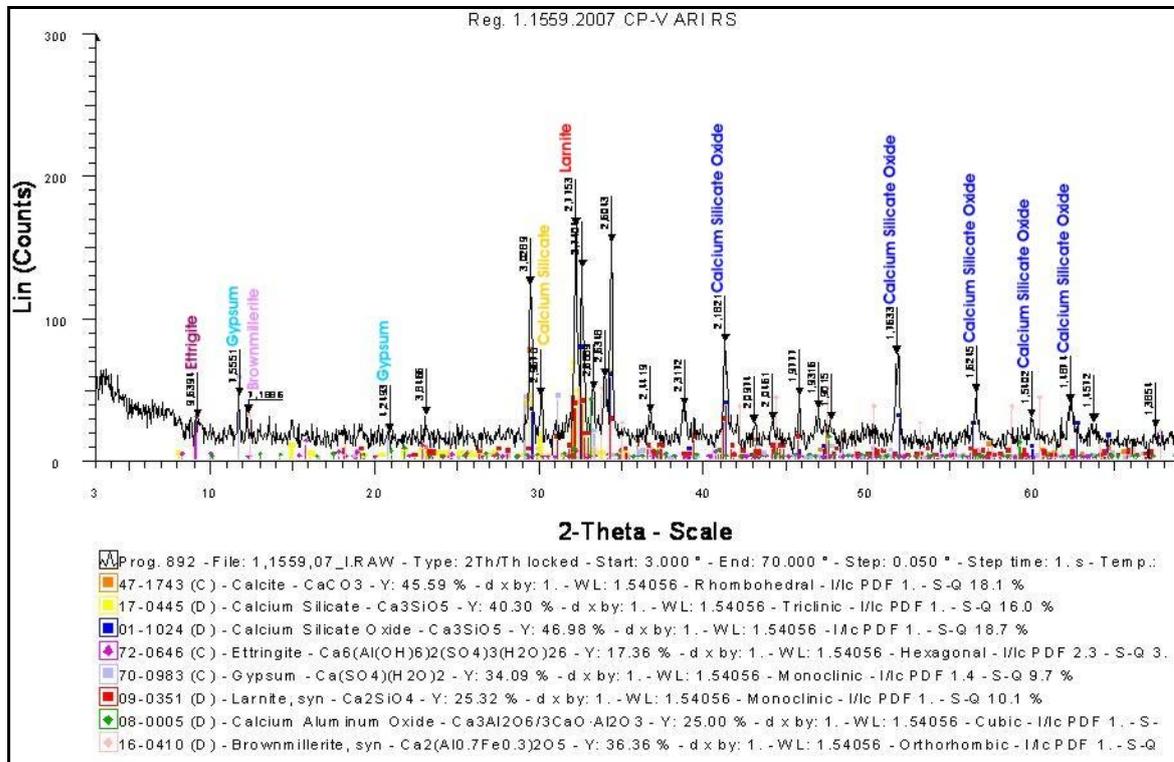


Figura 3.3 – Difratoograma do CP V-ARI.

3.3.2 Adições minerais

Adições minerais são materiais finamente moídos adicionados ao concreto com objetivo de regular e manter a trabalhabilidade, aumentar a coesão, evitar segregação dos agregados e a exsudação da água durante a colocação do concreto. Na produção de concretos auto-adensáveis dessa pesquisa foram utilizadas quatro adições minerais, a saber: cinza volante, escória de alto-forno, fíler calcário e escória de aciaria LD.

Observa-se que os materiais finos, com exceção do fíler calcário, são resíduos industriais, e ao invés de serem enterrados ou dispostos de outra forma agressiva para o meio ambiente, podem ser utilizadas em substituição aos componentes do concreto, o que é bastante interessante dos pontos de vista ambiental e econômico. Nas seções seguintes são apresentadas as características desses materiais.

3.3.2.1 Cinza volante

A cinza volante utilizada neste estudo foi de classe F, proveniente da indústria de cimento Pozosul, do município de Capivari de Baixo, Santa Catarina. As propriedades desta adição são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização da cinza volante.

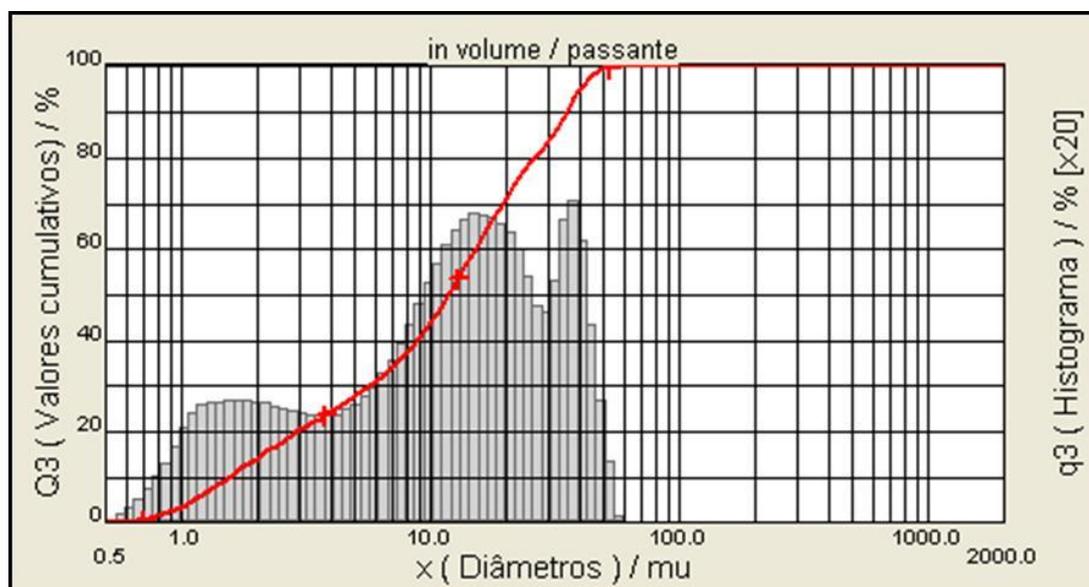
Propriedades Determinadas Cinza Volante		Teores	Método de ensaio	Limites NBR 12653:1992	
Massa Específica (g/cm ³)		2,399	NBR NM 23/00	N.E.	
Área específica – Blaine (cm ² /g)		3.788	NBR NM 76/98	N.E.	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	2,33	NBR 5743/89	≤ 6,0	
	Óxido de magnésio (MgO)	0,94	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	N.E.	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	62,79		N.E.	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,71		N.E.	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	26,52		N.E.	
	Óxido de cálcio (CaO)	2,51		N.E.	
	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,18	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,85	N.E.	
		Equiv. alcalino	0,74	N.E.	
	Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,02	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾	N.E.
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,23		N.E.
		Equiv. alcalino	0,17		N.E.
	SiO ₂ + Al ₂ + Fe ₂ O ₃		93,02		≥ 70,0
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,00		N.E.	

N.E.: não especificado.

(1): fluorescência por raios X.

(2): espectrofotometria de absorção atômica.

O gráfico da Figura 3.4 é referente a granulometria a *laser* da cinza volante e mostra que 10% das partículas se encontram abaixo do diâmetro de 1,55 µm, a dimensão média das partículas é de 11,82 µm e que 90% das partículas encontram-se abaixo do diâmetro de 35,07 µm.

Figura 3.4 – Granulometria a *laser* da cinza volante.

A análise por Difração de Raios-X mostrada na Figura 3.5 permitiu a identificação de quartzo e mullita, como minerais principais; silicato de cálcio, Mg, Al, calcita e hematita, como minerais subordinados e, portlandita como mineral do traço.

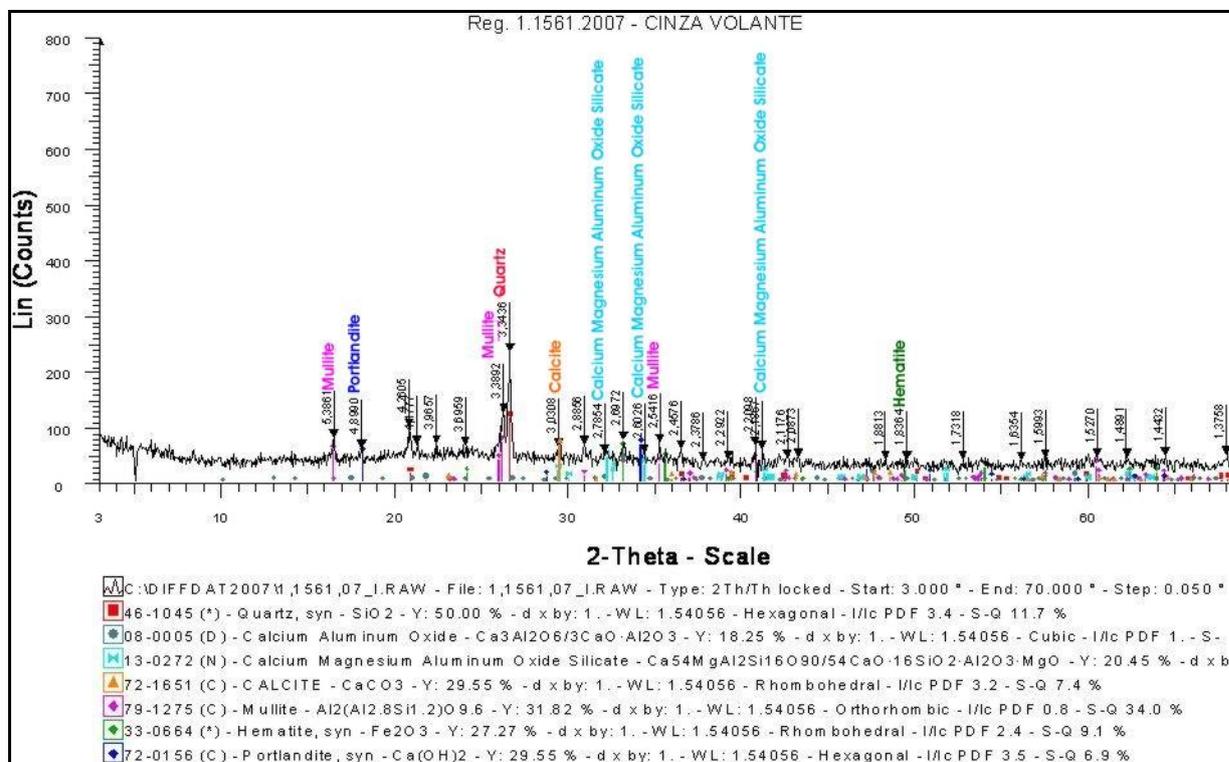


Figura 3.5 – Difratograma da cinza volante.

3.3.2.2 Escória granulada de alto-forno

A escória de alto-forno utilizada na pesquisa foi cedida pela fábrica de cimento Mizu, localizada no município da Serra, no estado do Espírito Santo. O material já se encontrava granulada e moído. As características físicas e químicas dessa escória são apresentadas na Tabela 3.3 e a granulometria a *laser* na Figura 3.6.

De acordo a Figura 3.6, a escória apresentou 10% das partículas abaixo do diâmetro de 1,63 μm e dimensão média dos grãos de 10,64 μm , sendo que 90% das partículas se encontram abaixo do diâmetro de 23,30 μm .

Tabela 3.3 – Caracterização da escória granulada de alto-forno.

Propriedades Determinadas		Teores	Método de ensaio	Limites NBR 12653:1992		
Escória de alto-forno						
Massa Específica (g/cm ³)		2,885	NBR NM 23/00	N.E.		
Área específica – Blaine (cm ² /g)		4.658	NBR NM 76/98	N.E.		
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	0,00	NBR 5743/89	≤ 6,0		
	Resíduo insolúvel	0,09	NBR 5744/89	N.E.		
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	0,11	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	≤ 5,0		
	Óxido de magnésio (MgO)	5,06		N.E.		
	Dióxido de silício (SiO ₂)	35,48		N.E.		
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,42		N.E.		
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	13,06		N.E.		
	Óxido de cálcio (CaO)	42,07		N.E.		
	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,64	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾	N.E.
		Óxido de potássio (K ₂ O)		0,78		N.E.
		Equiv. alcalino	1,16	N.E.		
	Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,20	N.E.		
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,17	N.E.		
Equiv. alcalino		0,31	N.E.			
SiO ₂ + Al ₂ + Fe ₂ O ₃		48,96		≥ 50,0		
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,19		N.E.		

N.E.: não especificado.

(1): fluorescência por raios X.

(2): espectrofotometria de absorção atômica.

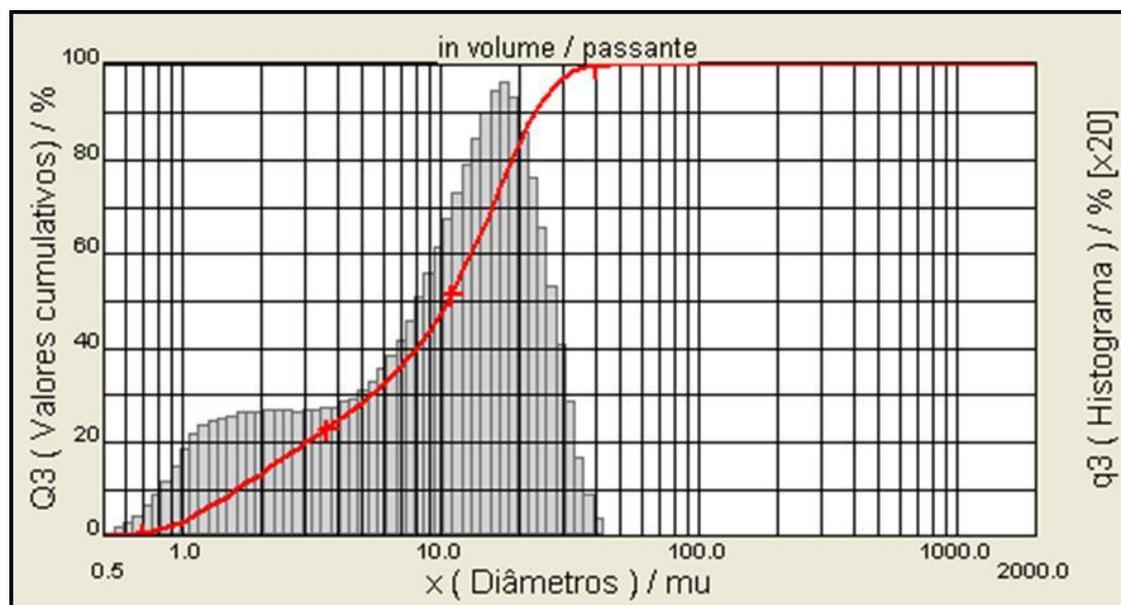


Figura 3.6 – Granulometria a laser da escória granulada de alto-forno.

O difratograma da Figura 3.7 apresenta o resultado da amostra de escória.

Como já era esperado, na análise por Difração de Raios-X da amostra de escória granulada de alto-forno mostrou que este produto é amorfo, com alguma sugestão de picos, que não forneceram informações suficientes para sua identificação.

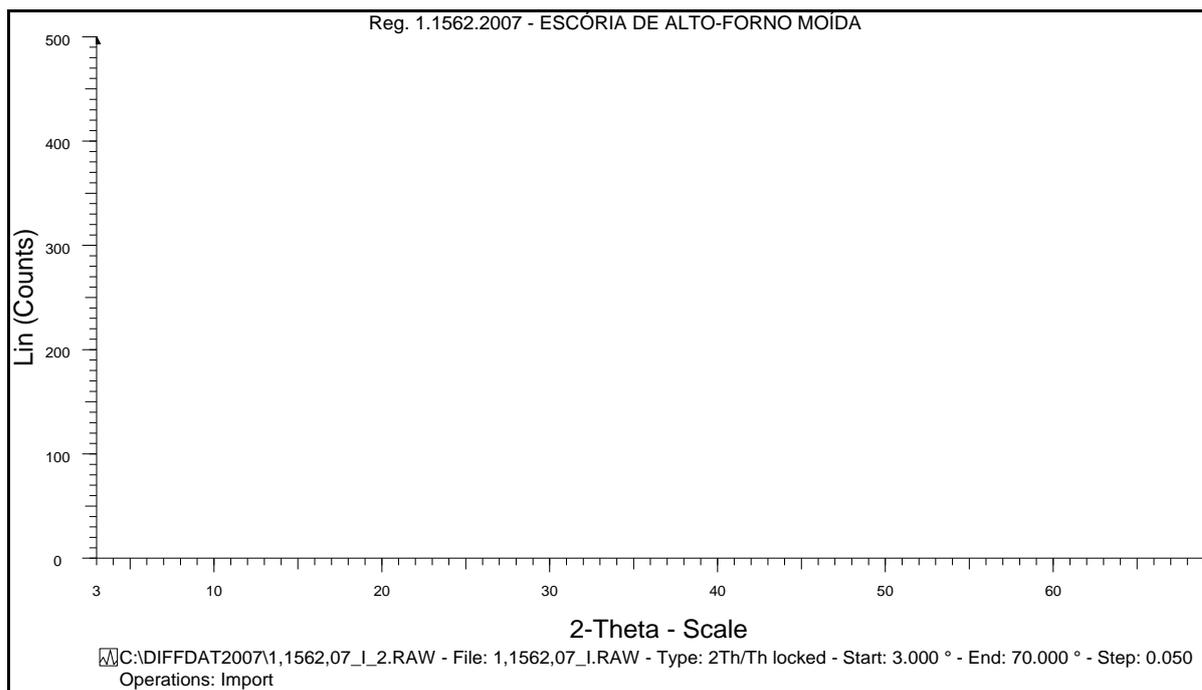


Figura 3.7 – Difratograma da escória granulada de alto-forno moída.

3.3.2.3 Fíler Calcário

O fíler calcário ou calcita é um fino proveniente da moagem de rocha calcária. Essa adição mineral foi escolhida como a de referência pelo fato de ser uma das principais adições utilizadas nos estudos referentes à concretos auto-adensáveis. A calcita utilizada é proveniente de uma mineradora NEMER, situada no município de Castelo, Espírito Santo. A caracterização física, química e mineralógica é mostrada na Tabela 3.4 e nas Figuras 3.8 e 3.9.

Tabela 3.4 – Caracterização do fíler calcário.

Propriedades Determinadas		Teores	Método de ensaio	Sem Especificação	
Fíler Calcário					
Massa Específica (g/cm ³)		2,731	NBR NM 23/00	N.E.	
Área específica – Blaine (cm ² /g)		3.983	NBR NM 76/98	N.E.	
Água da pasta de consistência normal (%)		31	NBR NM 43/03	N.E.	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	5,98	NBR 5743/89	N.E.	
	Resíduo insolúvel	6,13	NBR 5744/89	N.E.	
	Óxido de magnésio (MgO)	1,78	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	N.E.	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	6,52		N.E.	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,15		N.E.	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,24		N.E.	
	Óxido de cálcio (CaO)	82,38		N.E.	
	Alcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,14	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,14	N.E.	
		Equiv. alcalino	0,23	N.E.	
	Alcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,01	N.E.	
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,12	N.E.		
Equiv. alcalino		0,09	N.E.		
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,00		N.E.	

N.E.: não especificado. (1): fluorescência por raios X. (2): espectrofotometria de absorção atômica.

O histograma da Figura 3.8 mostrou que a dimensão média das partículas de fíler calcário é de 12,85 μm , sendo que 10% das partículas encontram-se abaixo do diâmetro de 1,43 μm , e 90% encontram-se abaixo do diâmetro de 31,68 μm .

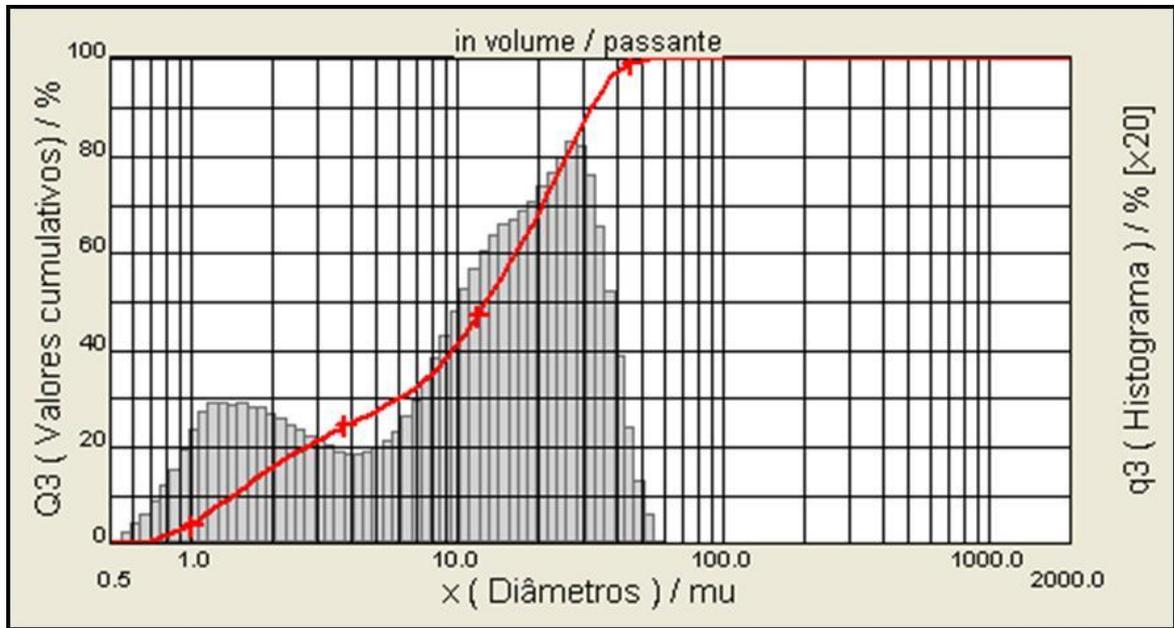


Figura 3.8 – Granulometria a laser do fíler calcário.

A análise por Difração de Raios-X (Figura 3.9) da amostra do fíler calcário permitiu a identificação de calcita como mineral principal; dolomita com mineral subordinado e, quartzo com mineral do traço.

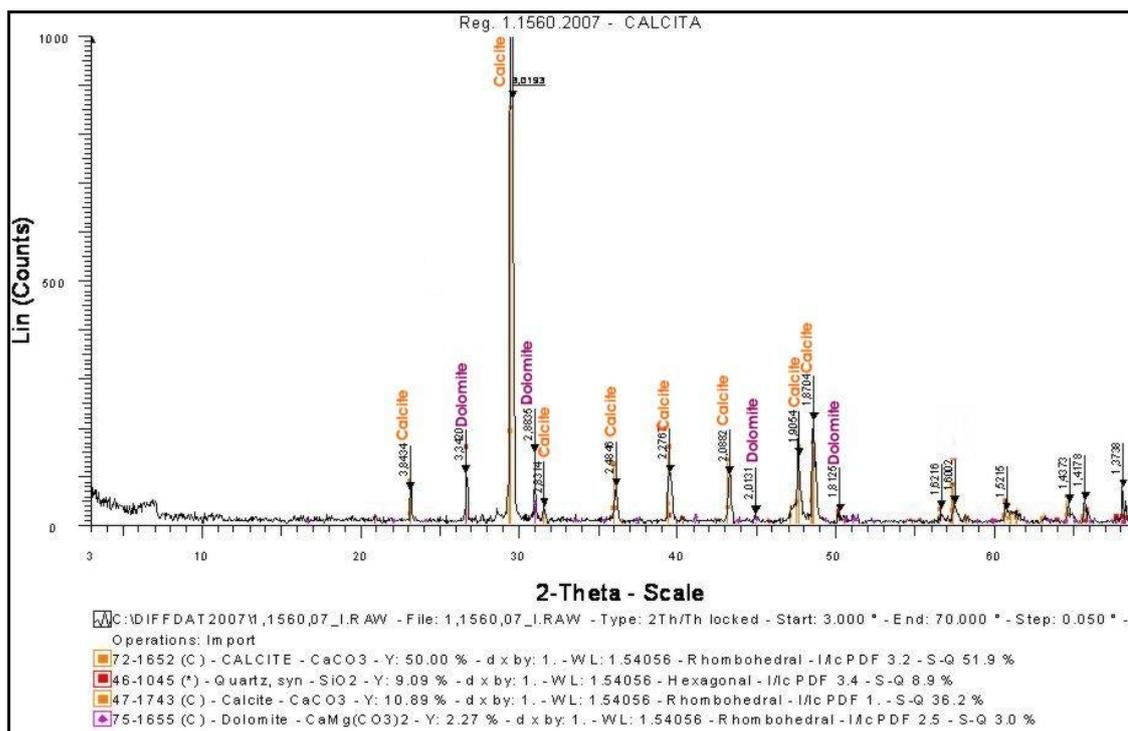


Figura 3.9 – Difratograma do fíler calcário.

3.3.2.4 Escória de aciaria

As escórias de aciaria LD são resíduos da produção do aço em conversores LD e se encontram depositadas em grande quantidade nos pátios das siderúrgicas brasileiras, gerando ônus e causando danos ambientais. Essa adição é o principal objeto de estudo da pesquisa, uma vez que se pretende indicar a viabilidade de utilização de escória de aciaria LD como fíler no CAA.

A escória de aciaria LD utilizada é proveniente da Siderúrgica Arcelor Mittal, resfriada no pátio de escória, e depois britada e separada granulometricamente sofrendo cura ao ar em pátio a céu aberto. O período de armazenamento da pilha foi de aproximadamente seis meses. A amostragem da pilha foi realizada segundo a NBR NM 26 (ABNT, 2000). Posteriormente foi enviada para uma empresa de produção de insumos siderúrgicos, onde foi peneirada e colocada em tambores. Após esse procedimento foi enviada ao Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde foi moída, homogeneizada, quarteada e estocada em sacos plásticos (Figura 3.10). O fluxograma ilustrativo do processo é mostrado na Figura 3.11.

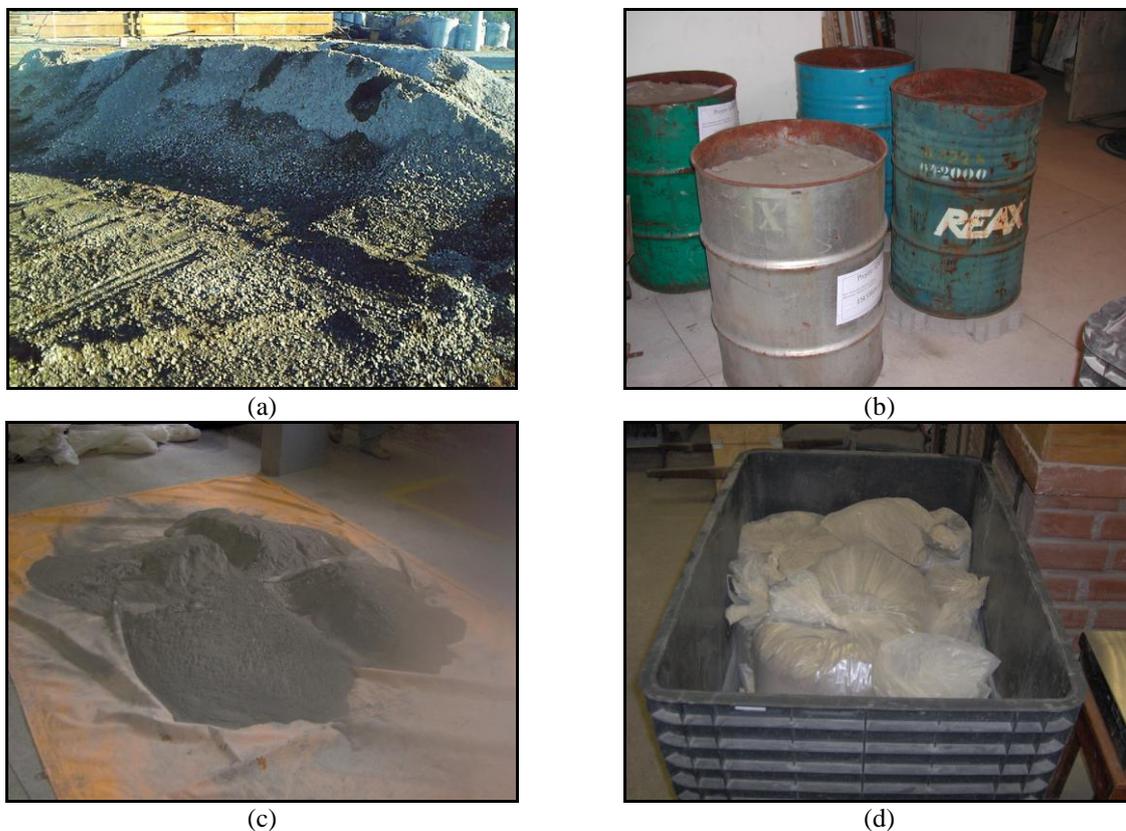


Figura 3.10 – Preparação das escórias de aciaria LD: (a) Escória no pátio da indústria de insumos; (b) Escória antes da moagem estocada no LEMAC; (c) Quarteamento da escória moída; (d) Escória armazenada em bombonas plásticas.

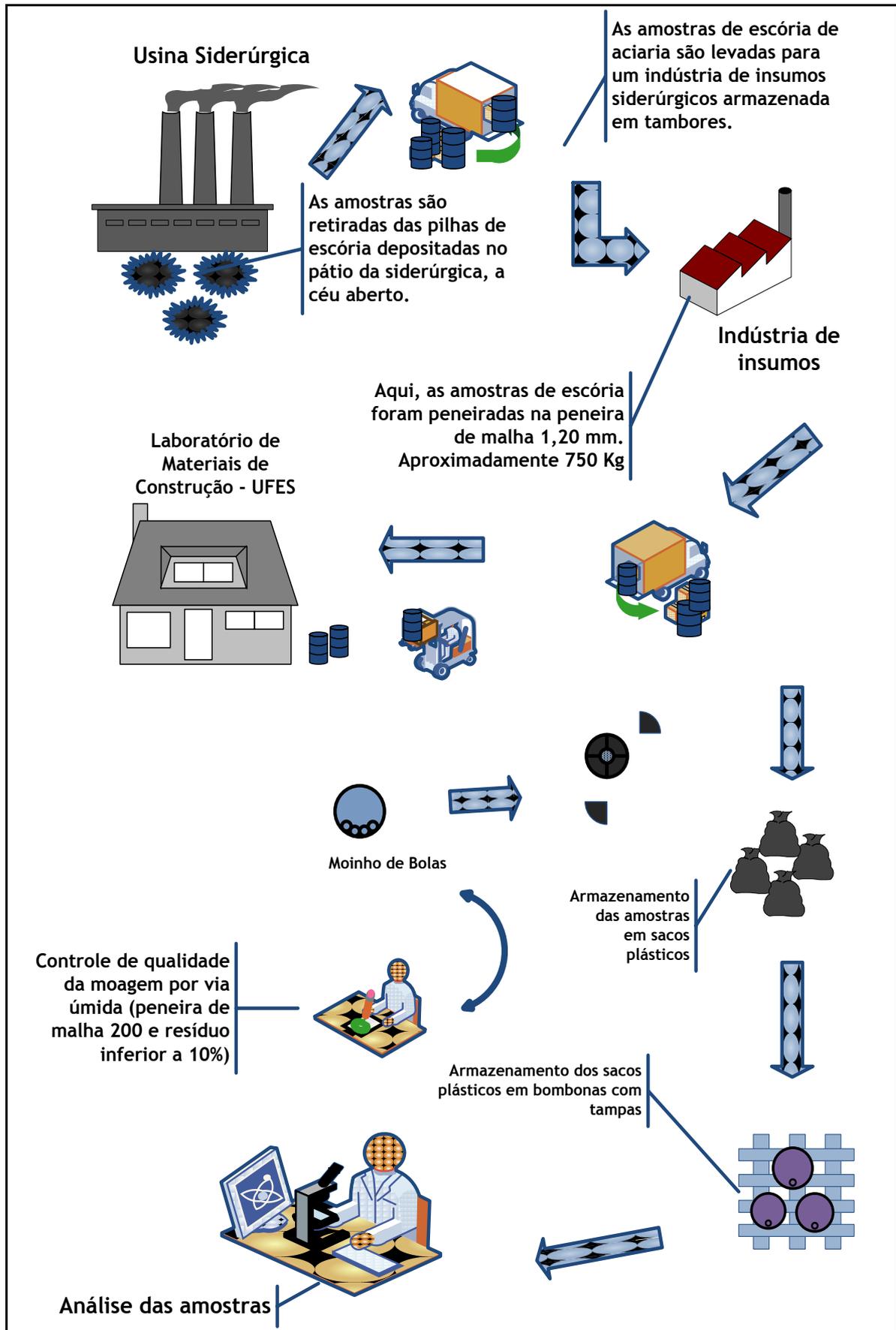


Figura 3.11 – Fluxograma ilustrativo do processo de preparação das escórias.

As principais características das escórias de aciaria LD utilizadas nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 3.5 e nas Figuras 3.12 e 3.13.

Tabela 3.5 – Caracterização da escória de aciaria LD.

Propriedades Determinadas		Método de		Não	
Escória de aciaria		Teores	ensaio	Especificado	
Massa Específica (g/cm ³)		3,129	NBR NM 23/00	N.E.	
Área específica – Blaine (cm ² /g)		7.704	NBR NM 76/98	N.E.	
Água da pasta de consistência normal (%)		27	NBR NM 43/03	N.E.	
Perda ao fogo		8,20	NBR 5743/89	N.E.	
Resíduo insolúvel		10,36	NBR 5744/89	N.E.	
Trióxido de enxofre (SO ₃)		0,24	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 ⁽¹⁾	N.E.	
Óxido de magnésio (MgO)		5,64		N.E.	
Dióxido de silício (SiO ₂)		8,87		N.E.	
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		14,60		N.E.	
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		2,09		N.E.	
Óxido de cálcio (CaO)		39,38		N.E.	
Álcalis Totais				Procedimento FURNAS n. 1.02.31 ⁽²⁾	N.E.
Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,36	N.E.		
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,17	N.E.		
Equiv. alcalino		0,47	N.E.		
Álcalis Solúveis em Água			N.E.		
Óxido de sódio (Na ₂ O)		0,15	N.E.		
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,14	N.E.		
Equiv. alcalino		0,25	N.E.		
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,41	N.E.		

N.E.: não especificado.

(1): fluorescência por raios X.

(2): espectrofotometria de absorção atômica.

O gráfico da Figura 3.12 mostra que 10% das partículas encontram-se abaixo do diâmetro de 1,29 µm, a dimensão média das partículas é de 6,81 µm e que 90% das partículas encontram-se abaixo do diâmetro de 22,28 µm.

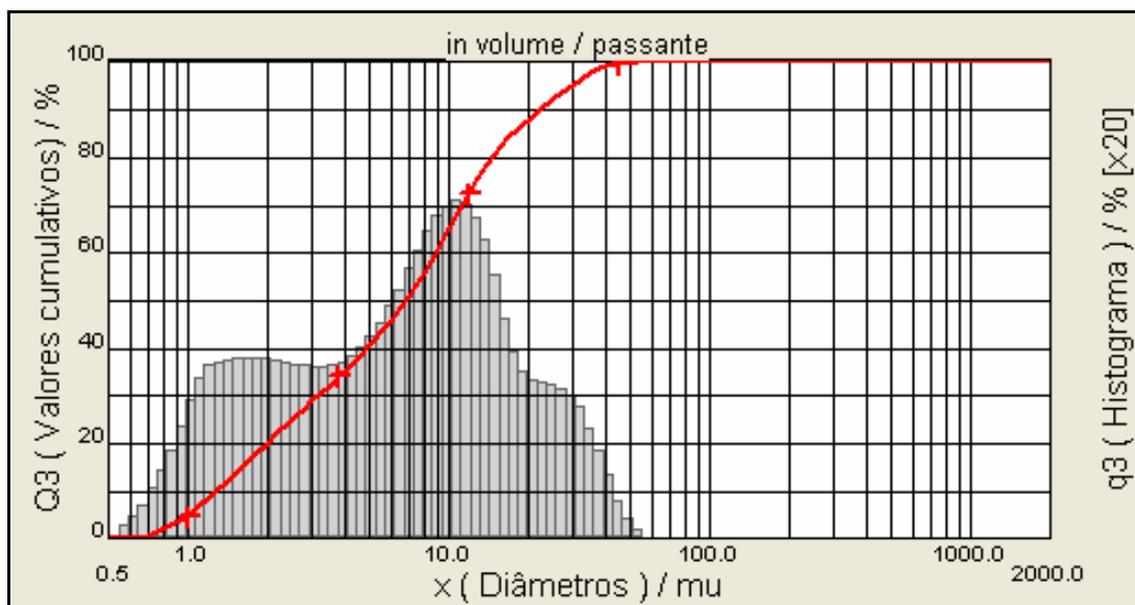


Figura 3.12 – Granulometria a laser da escória de aciaria LD.

A análise por Difração de Raios-X da amostra de escória de aciaria LD moída permitiu a identificação da portlandita como mineral principal, brownmillerita com mineral subordinado e, sheelita e cálcio ferrita como minerais do traço.

O espectro da difração de raios-X da Figura 3.13 mostra o resultado para a amostra de escória de aciaria LD moída.

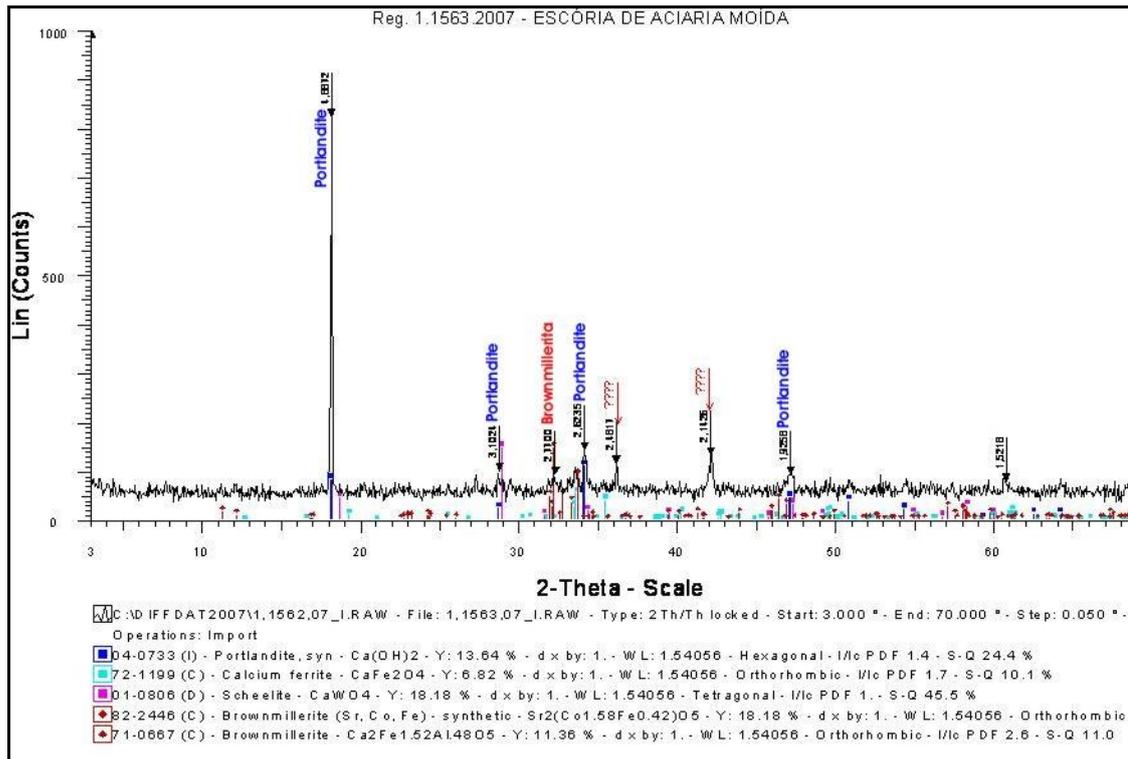


Figura 3.13 – Difratoograma da escória de aciaria LD.

3.3.2.5 Resumo dos resultados

Neste item são apresentadas as tabelas e o gráfico que resumem as principais características do cimento e das adições minerais empregadas na pesquisa. Na Tabela 3.6 constam as características físicas do cimento e dos finos utilizados e na Tabela 3.7 a composição química deles. O gráfico da Figura 3.14 apresenta a composição das curvas granulométricas a critério de comparação.

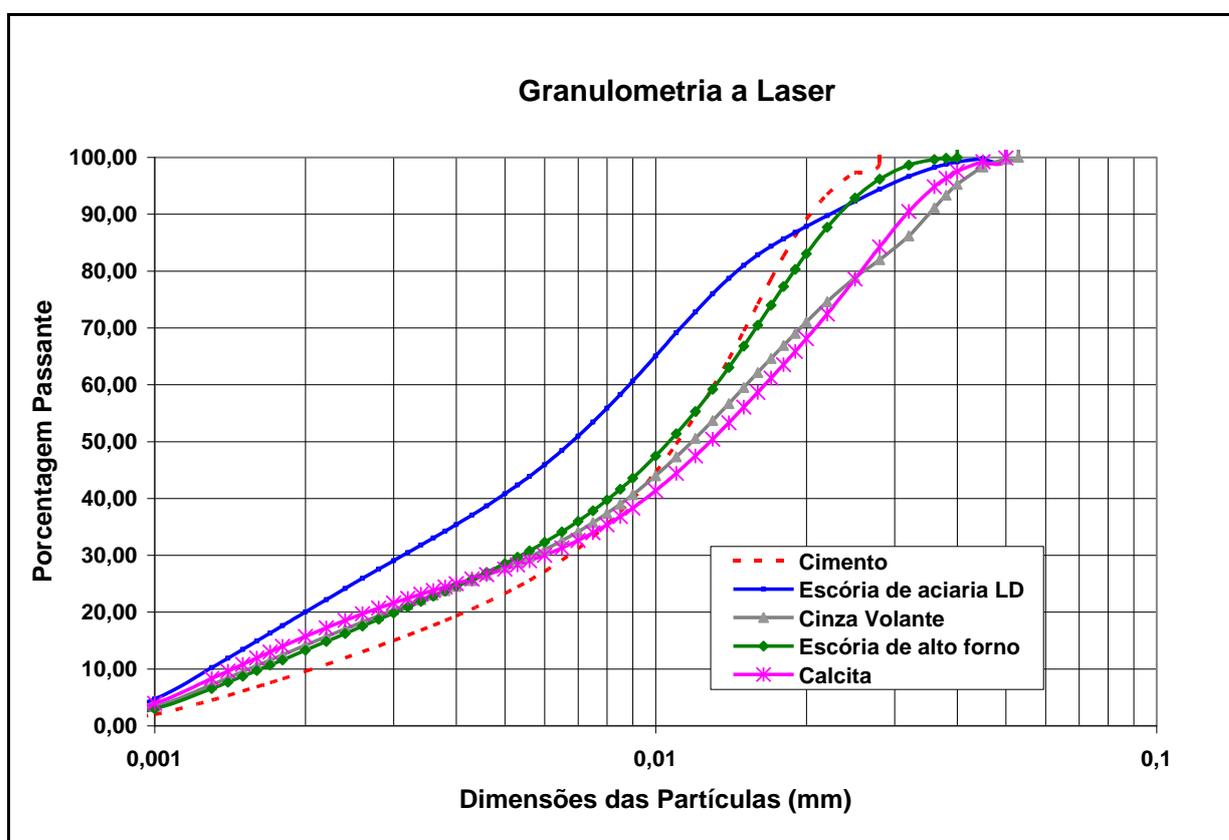
Tabela 3.6 – Resumo da caracterização física do cimento e das adições minerais.

Adição	Massa específica (g/cm ³)	Área específica Blaine (m ² /kg)
Cimento	3,061	481,0
Escória de aciaria	3,129	770,4
Escória de alto-forno granulada	2,885	465,8
Cinza volante	2,399	378,8
Fíler calcário	2,731	398,3

Tabela 3.7 – Caracterização química do cimento e das adições minerais.

Característica Química		CIM	EALD	CAL	EGAF	CV
Perda ao fogo		2,94	8,20	5,98	0,00	2,33
Resíduo insolúvel		0,61	10,36	6,13	0,09	-
Trióxido de enxofre (SO ₃)		3,30	0,23	-	0,11	-
Óxido de magnésio (MgO)		1,56	5,64	1,78	5,06	0,94
Dióxido de silício (SiO ₂)		19,95	8,87	6,52	35,48	62,79
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,11	14,60	0,15	0,42	3,71
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,85	2,09	0,24	13,06	26,52
Óxido de cálcio (CaO)		63,72	39,38	82,38	42,07	2,51
Óxido de cálcio livre (CaO)		1,30	*	-	-	-
Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,43	0,36	0,14	0,64	0,18
	Óxido de potássio (K ₂ O)	1,21	0,17	0,14	0,78	0,85
	Equivalente Alcalino	1,22	0,47	0,23	1,16	0,74
Álcalis Solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,22	0,15	0,01	0,20	0,02
	Óxido de potássio (K ₂ O)	1,00	0,14	0,12	0,17	0,23
	Equivalente Alcalino	0,88	0,25	0,09	0,31	0,17
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		5,61	0,41	0,00	0,19	0,00

* não determinado.

**Figura 3.14** – Composição de curvas granulométricas do cimento e dos finos utilizados na pesquisa

3.3.3 Agregados

Como agregado graúdo foi utilizado uma brita de origem granítica e como agregado miúdo uma areia quartzosa natural comercialmente denominados brita 0 e areia média respectivamente, atendendo a NBR NM 7211 (ABNT, 2005).

As amostras utilizadas nesses ensaios foram obtidas seguindo a metodologia das normas NBR NM 26 (ABNT, 2001) Agregados – Amostragem e NBR NM 27 (ABNT, 2001) Agregados - Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. A granulometria foi determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) - Determinação da composição granulométrica. As principais características dos agregados estão dispostas na Tabela 3.8 e as curvas granulométricas na Figura 3.15.

Tabela 3.8 - Características físicas dos agregados empregados.

Característica	Norma		Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Distribuição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	<i>Abertura</i>	<i>% retida acumulada</i>	<i>% retida acumulada</i>
		12,5 mm	0	0
		9,5 mm	14	0
		6,3 mm	64	0
		4,75 mm	76	0
		2,36 mm	95	2
		1,18 mm	97	11
		600 µm	98	36
		300 µm	98	62
		150 µm	99	86
Fundo	100	100		
DMC (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)		12,5	2,4
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)		5,77	1,97
Classificação	NBR NM 248 (ABNT, 2003)		Zona 4,75/12,5	Zona utilizável
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2003)		2,748	2,653
	NBR NM 53 (ABNT, 2003)			
Absorção (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2003)		0,37	0,21
	NBR NM 30 (ABNT, 2001)			

De acordo com a distribuição granulométrica mostrada na Tabela 3.8, o agregado miúdo se enquadra na zona utilizável e o graúdo na zona 4,75/12,5 mm da referida norma.

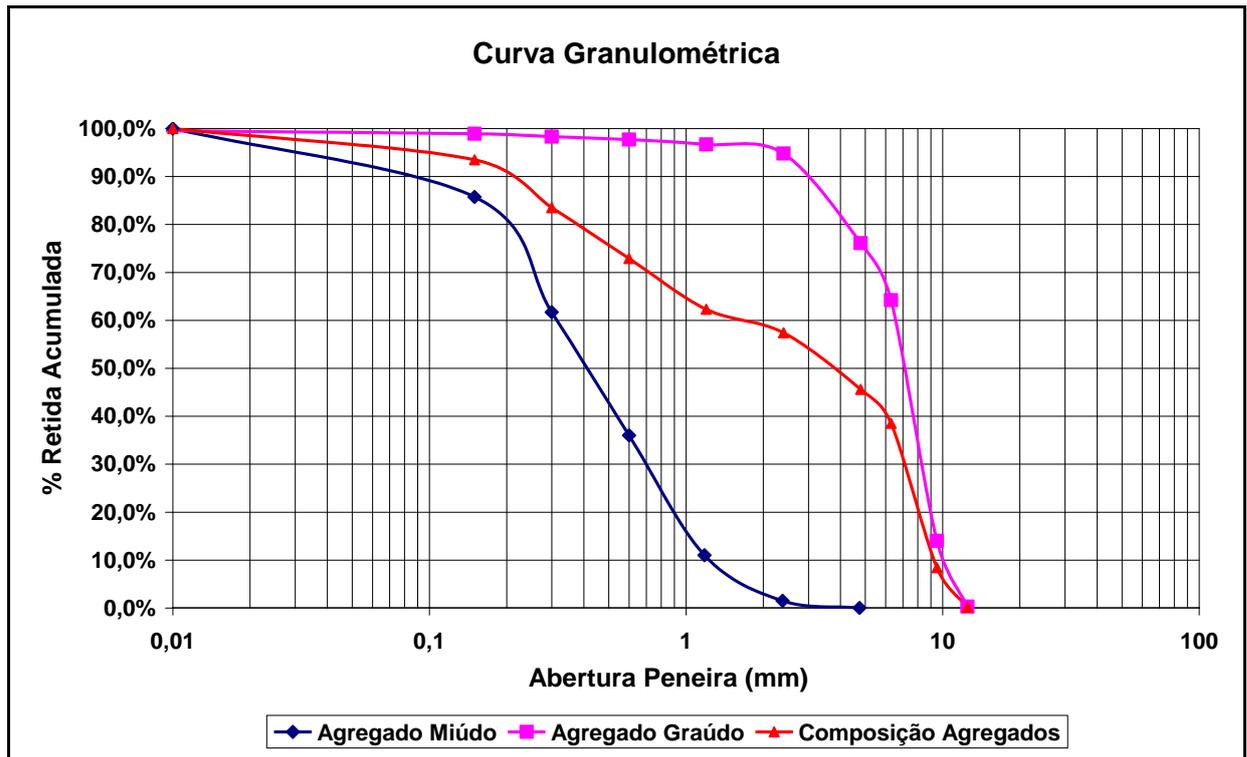


Figura 3.15 – Curvas granulométricas do agregado miúdo e graúdo.

3.3.4 Aditivo químico

O uso de aditivo superplastificante proporciona aumento da fluidez no concreto sem reduzir de forma considerável a viscosidade, o que é desejável em CAA. Neste estudo foi utilizado um superplastificante à base de policarboxilatos, Glenium 51. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, sua massa específica e teor de sólidos é $1,069 \text{ g/cm}^3$ e 28,7% respectivamente.

3.4 Definição dos parâmetros para a composição das misturas

Antes do estudo das pastas procedeu-se à análise dos finos que a constituem, com o intuito de melhor conhecê-los do ponto de vista reológico e interpretar de forma mais coerente os resultados dos ensaios em pastas.

3.4.1 Estudo de finos

Este estudo foi realizado com base nas pesquisas de Domone e Hsi-Wen (1997) de adições para Concreto de Alto Desempenho (CAD). Esses autores desenvolveram uma metodologia bastante simples utilizando um ensaio análogo ao ensaio de espalhamento (*slump flow*) para concretos, desenvolvido por Okamura *et al.* (1993, apud DOMONE e HSI-WEN, 1997) para a seleção dos constituintes do concreto auto-adensável.

Neste método avalia-se o comportamento de misturas de finos isoladamente com água, e posteriormente as misturas dois ou mais finos com água, e também, com a incorporação de cimento e superplastificantes. O interessante é que esses pesquisadores compararam os resultados dos ensaios com valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica obtidos em um viscosímetro de cilindros concêntricos.

A comparação dos resultados mostrou que com o ensaio proposto é possível prever com razoável confiança os valores de β_p e E_p para pastas que contenham misturas de finos testados isoladamente. Essa vantagem é extremamente útil na fase inicial de dosagem dos concretos, principalmente quando ele exige elevada trabalhabilidade com um mínimo teor de água, como é o caso, do CADAR.

O ensaio de fluidez também é parte desta etapa do programa experimental. Para a medida da fluidez das misturas de finos e água foi utilizado um aparato denominado funil V cuja utilização para esta finalidade é proposta por Okamura e Ouchi (2003). Este ensaio tem o objetivo de caracterizar materiais usados no CAA, sejam eles finos, pastas ou argamassas.

As misturas usadas nos dois ensaios descritos a seguir foram produzidas no LEMAC-UFES. Foram necessários em torno de 2 litros de cada mistura com as seguintes composições:

- 100% de escória de aciaria LD + água;
- 70% de escória de aciaria LD e 30% de escória granulada de alto-forno + água;
- 85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante + água;
- 100% de fíler calcário + água.

Para o procedimento de mistura utilizou-se um misturador mecânico na velocidade e seqüência apresentada na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Seqüência de mistura para finos + água.

Etapa	Velocidade	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Adição do fino (100%) + água (100%)	Lenta ⁽¹⁾	0	60
Limpeza	Parada	60	90
Mistura	Lenta	90	150
Limpeza	Parada	150	180
Mistura final	Lenta	180	360

⁽¹⁾ velocidade do eixo central e planetário igual a 140rpm e 60 rpm respectivamente.

Os traços da mistura de finos e água foram realizados de acordo com as equações descritas abaixo:

a) Para uma adição:

Massa específica do fino:

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Massa específica da água:

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Volume de água/Volume de finos:

$$\frac{V_a}{V_f} = K \quad (\text{Equação 3.3})$$

Massa do fino:

$$M_f = \frac{V_t \cdot \rho_f}{K + 1} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Massa de água:

$$M_a = \frac{M_f}{\rho_f} \cdot K \cdot \rho_a \quad (\text{Equação 3.5})$$

b) Para duas adições:

Massa específica do fino 1:

$$\rho_{f1} = \frac{M_{f1}}{V_{f1}} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Massa específica do fino 2:

$$\rho_{f2} = \frac{M_{f2}}{V_{f2}} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Volume de água/Volume do fino 1 + Volume do fino 2:

$$\frac{V_a}{V_{f1} + V_{f2}} = K \quad (\text{Equação 3.8})$$

Massa do fino 1/Massa do fino 2:

$$\gamma = \frac{M_{f1}}{M_{f2}} \quad (\text{Equação 3.9})$$

Massa do fino 2:

$$M_{f2} = \frac{V_t \cdot (\rho_{f1} \cdot \rho_{f2})}{(\gamma \rho_{f2} + \rho_{f1}) \cdot (K + 1)} \quad (\text{Equação 3.10})$$

Massa do fino 1:

$$M_{f1} = \gamma M_{f2} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Massa da água:

$$M_a = K \cdot \rho_a \left(\frac{M_{f1}}{\rho_{f1}} + \frac{M_{f2}}{\rho_{f2}} \right) \quad (\text{Equação 3.12})$$

onde:

ρ_a : massa específica da água

ρ_f : massa específica do fino

M_a : Massa da água

M_f : Massa do fino

V_a : Volume de água

V_f : Volume do fino

κ : Constante da relação a/f

γ : Constante da relação fino1/fino2

3.4.1.1 Ensaio de espalhamento

Este ensaio mede a deformabilidade da mistura de finos e água, sendo expressa através do espalhamento relativo (Γ_m). Para execução desse teste utilizou-se a forma tronco – cônica prescrita na NBR 13320 (ABNT, 2001) (Figura 3.16), uma folha de papel milimetrado para a medição dos diâmetros de espalhamento.

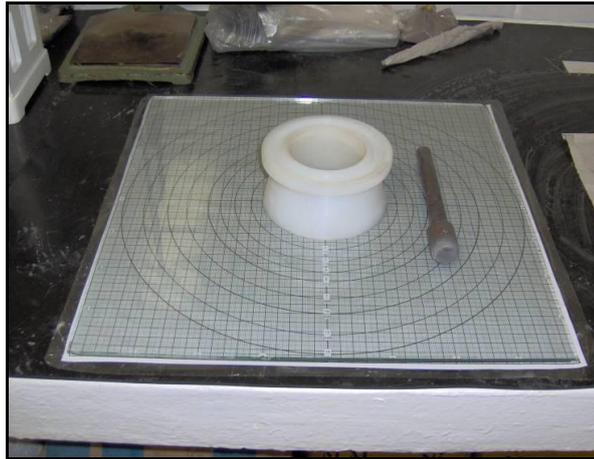


Figura 3.16 – Forma tronco cônica (CALMON *et al.*, 2006).

O procedimento consiste em preencher o recipiente com a mistura de finos e água, com duas camadas, de forma que cada uma seja compactada por 15 golpes com um bastão metálico, visando eliminar os possíveis vazios.

Feito isso, levanta-se o cone rapidamente medindo o diâmetro de abertura após seu espalhamento. A medida é feita em duas direções, perpendiculares entre si, obtendo-se uma média dos diâmetros (Figura 3.17b). A partir do diâmetro inicial d_0 (igual a 100 mm para esse tipo de forma) e do diâmetro médio medido (d_m) é calculado o valor do espalhamento relativo Γ_m a partir da Equação 3.13.

$$\Gamma_m = \frac{d_m^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (\text{Equação 3.13})$$

Este ensaio é feito para diferentes variações de volume de água por volume de finos (V_a/V_f), no mínimo três repetições. Com esses valores é possível plotar o gráfico $\Gamma_m \times (V_a/V_f)$ como o mostrado na Figura 3.17(a).

De acordo com Okamura *et al.* (1993, *apud* Domone e Hsi-Wen, 1997) a relação entre as variáveis é linear. O E_p e o coeficiente angular da reta e indica a sensibilidade do fino à adição de água e o coeficiente linear β_p indica a quantidade de água necessária para fazer com que a

mistura atinja o limiar entre o repouso e o início do espalhamento. A Figura 3.17(a) apresenta um gráfico genérico do espalhamento relativo versus V_a/V_f de dois finos distintos e o seu comportamento com a incorporação da água. Neste gráfico pode-se comparar a sensibilidade à água de dois finos. Observa-se que ao se dar o mesmo incremento de água ($\Delta V_a/V_f$), o fino com E_p maior possui uma variação do espalhamento relativo ($\Delta \Gamma_m$) menor, ou seja, é menos sensível ao incremento de água. Conclui-se que finos com valores de E_p maiores são menos sensíveis à água.

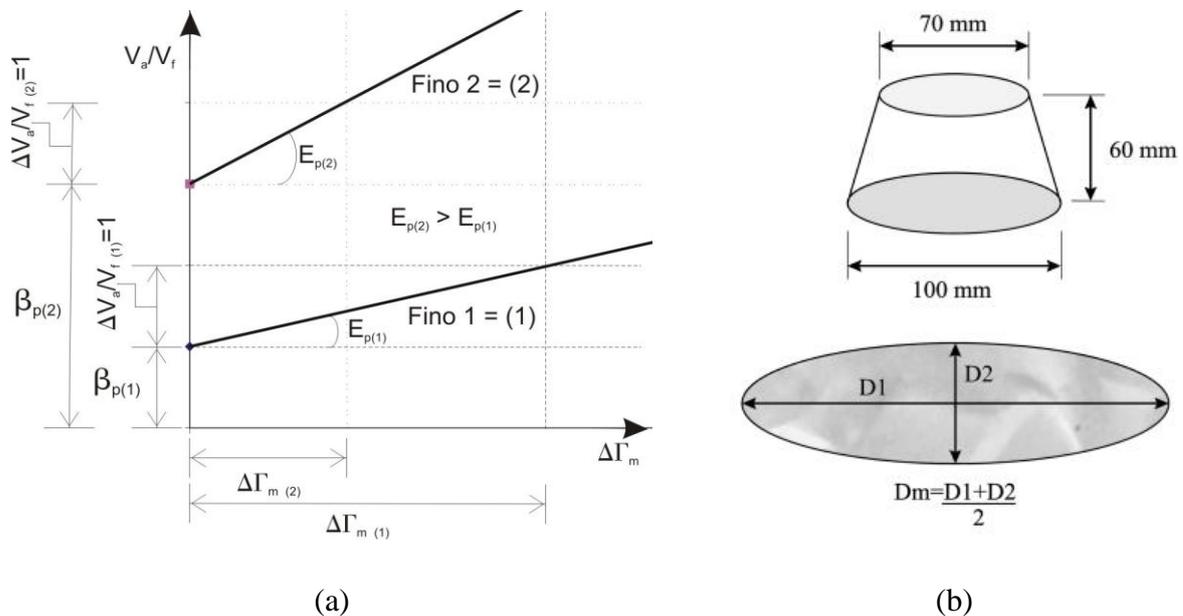


Figura 3.17 – Gráfico genérico de $\Gamma_m \times (V_a/V_f)$ mostrando o comportamento de dois finos distintos (a); Dimensões do tronco-cônico e forma das medições dos diâmetros de espalhamento (b)

Fonte: Domonte e Hsi-Wen (1997) adaptado

A Equação 3.14 apresenta a regressão linear do gráfico apresentado na Figura 3.17(a).

$$\frac{V_a}{V_f} = \beta p + \Gamma m \cdot E_p \quad (\text{Equação 3.14})$$

3.4.1.2 Ensaio de tempo de fluidez com funil V

A fluidez das misturas de finos e água é medida através do aparato denominado de funil V, de dimensões reduzidas, proposto por Okamura em 1995 (OKAMURA e OUCHI, 2003). O equipamento utilizado nesta pesquisa foi fabricado em metal e apresenta as dimensões mostradas nas Figuras 3.18 e 3.19.

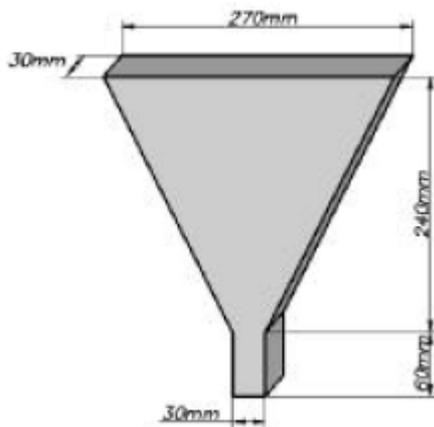


Figura 3.18 -Dimensões do funil V (EFNARC, 2002).

Figura 3.19 - Funil V utilizado na pesquisa (CALMON *et al.*, 2006).

O procedimento de ensaio consiste em colocar o restante da mistura feita para o ensaio de espalhamento até a borda do funil V e avaliar o tempo de fluidez. Para certificar a precisão dos dados recolhidos foi adotada a metodologia usada por Calmon *et al.* (2006) de análise de imagens, ao invés do uso de cronômetro.

O aparato consiste na utilização de uma câmera digital com capacidade de gravação de vídeos, acoplada a um tripé para posicionamento da câmera sobre o Funil V. Assim que a porta que veda o fundo do funil é retirada, a câmera que está previamente gravando, registra o momento exato do início do escoamento e o seu término. É considerado como fim do escoamento o momento em que se pode observar a luz no fundo do funil. A Figura 3.20 ilustra o procedimento de captura das imagens.



Figura 3.20 – Imagens capturadas pela câmera digital para o ensaio do funil V.

Com o valor do tempo de escoamento do fino é calculado R_m (Equação 3.15) para cada relação V_a/V_f . R_m é um parâmetro adimensional que avalia a fluidez da mistura.

$$R_m = \frac{10}{T_{esc}}, \quad \text{onde:} \quad (\text{Equação 3.15})$$

R_m = parâmetro de fluidez

T_{esc} = tempo de escoamento

Com esses valores é possível construir o gráfico $R_m \times V_a/V_f$. Valores maiores de R_m apresentam misturas mais fluidas.

3.4.2 Estudo de pastas

O comportamento do fluxo das pastas foi estudado através dos ensaios de cone de Marsh e mini – *slump*. O primeiro tem como objetivos: avaliar a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante para obtenção de pastas trabalháveis e determinar o ponto de saturação ou dosagem ótima de superplastificante. Além disso, é usado para quantificar a fluência de argamassas e pastas (GOMES, 2002).

O ensaio do mini – *slump* tem como objetivo estudar o comportamento das pastas com ou sem adições minerais. A medida do espalhamento final e o tempo de espalhamento obtidos neste ensaio são bons indicadores da tensão de escoamento e viscosidade.

Nesta pesquisa, considera-se pasta a mistura composta por água, cimento, aditivo superplastificante e as adições minerais nas mesmas proporções já mencionadas no estudo de finos. Para fase de otimização utilizou-se a metodologia proposta por Gomes (2002). As pastas foram produzidas no LEMAC-UFES com o auxílio de misturador e o procedimento de mistura é descrito na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Sequência de mistura para as pastas.

Etapa	Velocidade	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Cimento (100%) + adição (100%)	Lenta ⁽¹⁾	0	30
Água (80%)	Lenta	30	90
Limpeza	Parada	90	120
Mistura	Lenta	120	180
Limpeza	Parada	180	210
Água (20%) + Superplastificante (100%)	Lenta	210	240
Limpeza	Parada	240	270
Mistura final	Rápida ⁽²⁾	270	390

(1) velocidade do eixo central e planetário igual a 140 rpm e 60 rpm respectivamente;

(2) Velocidade do eixo central e planetário igual a 280rpm e 120 rpm respectivamente.

Os traços para as pastas desenvolvidos de acordo com as Equações descritas abaixo:

a) para uma adição:

Relação f/c:

$$\frac{Mf}{Mc} = K \quad (\text{Equação 3.16})$$

Relação a/c:

$$\frac{Ma}{Mc} = 0,35 \quad (\text{Equação 3.17})$$

Massa de superplastificante/Massa de cimento:

$$\frac{Msp}{Mc} = \beta \quad (\text{Equação 3.18})$$

Volume total de pasta:

$$Va + Vf + Vc + Vssp = Vt \quad (\text{Equação 3.19})$$

Massa de cimento:

$$Mc = Vt \cdot \left(\frac{0,35}{\rho_a} + \frac{K}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{\beta}{\rho_{sp}} \right)^{-1} \quad (\text{Equação 3.20})$$

Massa do fino:

$$Mf = K.Mc \quad (\text{Equação 3.21})$$

Massa de superplastificante:

$$Msp = \beta Mc \quad (\text{Equação 3.22})$$

b) para duas adições:

Volume total de pasta:

$$Va + Vf_1 + Vf_2 + Vc + Vssp = Vt \quad (\text{Equação 3.23})$$

Relação f/c:

$$\frac{Mf}{Mc} = \frac{Mf1 + Mf2}{Mc} = K \quad (\text{Equação 3.24})$$

Relação Massa fino1/Massa fino2:

$$\frac{Mf1}{Mf2} = \beta \quad (\text{Equação 3.25})$$

Massa de superplastificante/Massa de cimento:

$$\frac{Msp}{Mc} = \gamma \quad (\text{Equação 3.26})$$

Massa do cimento:

$$Mc = Vt \cdot \left(\frac{0,35}{\rho a} + \frac{K}{\rho f1(1 + \beta)} + \frac{\beta \cdot k}{\rho f2(1 + \beta)} + \frac{1}{\rho c} + \frac{0,287 \cdot \gamma}{\rho ssp} \right)^{-1} \quad (\text{Equação 3.27})$$

onde:

ρa : Massa específica da água

ρf : Massa específica do fino

ρc : Massa específica do cimento

ρsp : Massa específica do superplastificante

ρssp : Massa específica do superplastificante na fração sólida

Ma : Massa da água

Mf : Massa do fino

Mc : Massa do cimento

Msp : Massa do superplastificante

Va : Volume de água

Vf : Volume de fino

Vc : Volume de cimento

$Vssp$: Volume do superplastificante na fração sólida

Vt : Volume total

κ : Constante da relação finos/cimento

β : Constante da relação massa de fino1/massa de fino2

γ : Constante da relação massa de superplastificante/massa de cimento

3.4.2.1 Ensaio do Cone de Marsh

O ensaio no cone de Marsh tem sido usado previamente para avaliar a fluidez e a dosagem ótima de superplastificante nas pastas e argamassas. Segundo os critérios da metodologia de Gomes (2002) para concretos de alta resistência, o limite superior da relação água/finos deve ser de 0,4. Em função disso, os parâmetros a serem determinados neste teste são as relações superplastificante/cimento e finos/cimento.

O cone de Marsh consiste em um cone de metal oco invertido, com aberturas no topo e no fundo. De acordo com a literatura o diâmetro da abertura inferior pode variar entre 5 a 12,5 mm (Figura 3.20) e o volume (V) inicial utilizado de 800 a 2000 ml (Gomes,2002). Nos ensaios da pasta deste trabalho, no Cone de Marsh, foi utilizado $d = 8$ mm, $V = 1000$ ml, $v = 500$ ml, os mesmos parâmetros utilizados por Gomes (2002).

O procedimento de ensaio consiste em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T_{FL}) para que 500 ml de pasta fluam completamente pela abertura inferior do cone. Além do cone de Marsh outros aparatos como *beaker* graduado de 1000 ml, proveta de 500 ml, cronômetro são também utilizados. Com os resultados obtidos pela variação da relação sp/c e tempo de fluxo se obtém a curva $\log T_{FL}$ versus sp/c, conforme mostra a Figura 3.21.

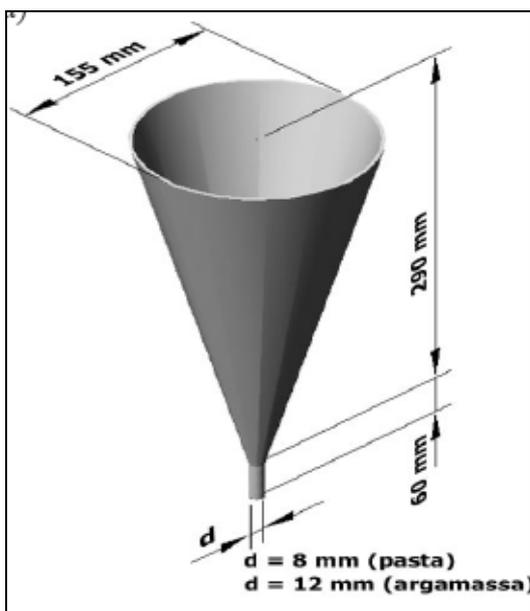


Figura 3.21 – Cone de Marsh (CAVALCANTI, 2006).

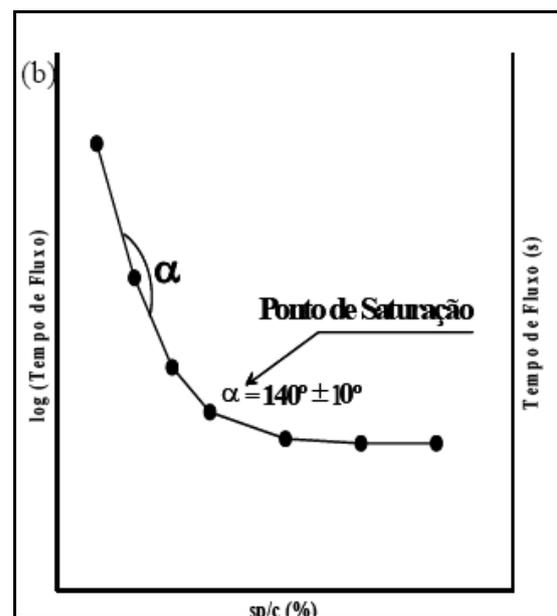


Figura 3.22 - Curva $\log T_{FL}$ x sp/c (%) (CAVALCANTI, 2006).

O tempo de fluxo geralmente diminui com um aumento na dosagem de superplastificante (sp/c). Porém, além de certa dosagem o tempo de fluxo não diminui significativamente. Esta dosagem em particular foi definida como saturação ou dosagem ótima por vários pesquisadores e correspondente a um ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ no gráfico da Figura 3.22.

Deve-se observar que a dosagem de superplastificante que corresponde ao ponto de saturação, depende da relação fíler/cimento da pasta obtida no ensaio do mini – slump. Dessa forma, este ensaio foi realizado para pastas fabricadas com os quatro tipos de composições de finos variando o teor de superplastificante. Assim, obteve-se a dosagem ótima de superplastificante para cada relação f/c de cada adição, minimizando o consumo do cimento.

3.4.2.2 Ensaio do mini-slump

Este ensaio tem como objetivo encontrar a dosagem ótima da relação entre fino e cimento (f/c) através do mini-slump (Figura 3.23). O aparato foi proposto por Kantro (1980) e consiste em um molde com formato tronco-cônico com um diâmetro de topo de 19 mm, um diâmetro de base 38 mm e altura de 57 mm. Para o ensaio são usados, além do mini-slump, uma base de vidro e uma folha de papel milimetrado.



Figura 3.23 – Mini – Slump (CALMON *et al.*, 2006).

O procedimento de ensaio consiste em encher o molde com a pasta e levantá-lo rapidamente na direção vertical. Com isso mede-se, através da análise de imagens, o diâmetro de espalhamento final (D_{FMC}) e, paralelamente o tempo necessário para atingir o diâmetro de 115 mm, denominado de T_{115} . Os ensaios foram realizados com diferentes relações f/c com sua dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação, já determinado no ensaio do cone de Marsh. A relação f/c ótima da pasta é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T_{115} no intervalo de 2 a 3,5 s.

Um T_{115} maior indica maior viscosidade e coesão da pasta. Além disso, a adição do fino aumenta o tempo de espalhamento e implica numa diminuição da fluidez.

Os ensaios das pastas com o cone de Marsh e o mini-*slump* permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, que geram misturas de concreto, com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material.

3.4.2.2.1 Metodologia análise de imagens

Assim como no ensaio do funil V utilizou-se no estudo de pastas a metodologia de análise de vídeos proposta por Calmon *et al.* (2006). A Figura 3.24 mostra a montagem da câmera para a medição dos tempos e os espalhamentos.



Figura 3.24 – Montagem da câmera para a realização dos ensaios (CALMON *et al.*, 2006).

Os arquivos de vídeo obtidos no formato MPEG foram convertidos para o formato AVI através do software InToo MPEG Encoder. Essa transformação é necessária para análise de vídeo com o programa Datapoint Version 0.61. Neste software é possível executar os vídeos *frame a frame*, possibilitando a medida das distâncias, como T_{115} e o diâmetro final (D_{FMC}).

As distâncias são medidas em *pixels*, e devem ser comparadas com alguma referência, como o papel milimetrado, por exemplo. A Figura 3.25 mostra como são obtidas as distâncias através desta metodologia tendo como referência uma pasta com adição 85LD15CV (85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante em massa), com relação f/c = 0,4 e percentual de

superplastificante igual a 0,75% (%SP = 0,75). Esta pasta é codificada na pesquisa como P85LD15CV_04_075.

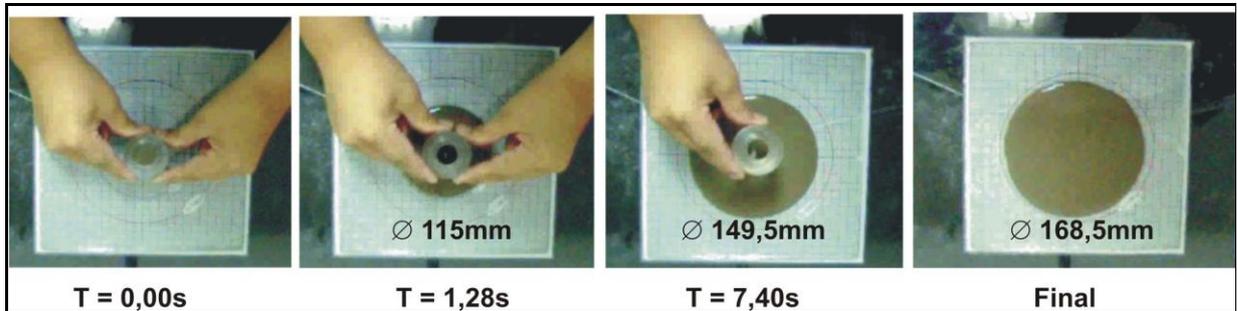


Figura 3.25 – Sequência de imagens para obtenção do T_{115} e diâmetro final (D_{FMC}).

3.4.3 Estudos em argamassas

No método de Gomes (2002) a verificação das propriedades das argamassas não se faz necessária, uma vez que foi constatado por este pesquisador que propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco são governadas pela pasta.

No entanto, um dos objetivos deste estudo é de verificar se a argamassa presente no concreto possui deformabilidade e fluidez compatíveis para a produção de concretos auto-adensáveis segundo Okamura e Ouchi (2003) e EFNARC (2002), e assim, se necessário, realizar alterações na viscosidade e coesão da pasta através do ajuste da relação fíler/cimento (f/c) e ponto de saturação do aditivo superplastificante. Além disso, evitou-se a produção de uma grande quantidade de concreto já que análise permitiu a alteração dos traços anteriormente, servindo como ponto de partida para fabricação dos CAA's.

Dessa forma, as argamassas foram estudadas com um teor de pasta de 40%. O traço foi obtido através da eliminação do agregado graúdo no traço inicial do concreto e conforme as Equações 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31. As relações (em massa) a/c, f/c e agregado graúdo/agregado miúdo foram de 0,35, 0,1 a 0,5 e 1, respectivamente.

$$V_{cim} + V_{f1} + V_{f2} + V_a + V_{ssp} + V_{ar} = V_p \quad (\text{Equação 3.28})$$

$$V_{cim} + V_{f1} + V_{fr2} + V_a + V_{ssp} + V_{ar} = V_p \quad (\text{Equação 3.29})$$

$$V_{cim} + V_{f1} + V_{f2} + V_a + V_{ssp} + V_{ar} = V_p \quad (\text{Equação 3.30})$$

$$V_{arg} + V_{br} = V_{con} = 1m^3 \quad (\text{Equação 3.31})$$

onde:

V_{cim} : Volume de cimento;

V_{f1} : Volume do fino 1;

V_{f2} : Volume do fino 2;

V_a : Volume de água;

V_{ssp} : Volume de superplastificante fração sólida;

V_{ar} : Volume de areia;

V_p : Volume de pasta;

V_{arg} : Volume de argamassa;

V_{br} : Volume de brita;

V_{con} : Volume de concreto.

Para a análise dessas argamassas foram utilizados os mesmos equipamentos e procedimentos descritos nas seções 3.4.1.1 e 3.4.1.2. O diâmetro de espalhamento no ensaio do cone de consistência deve ser de 260 ± 20 mm e o tempo de escoamento do funil V de 8 a 11 segundos.

3.5 Produção dos concretos

A metodologia para a produção de CADAR assume que o concreto é um material bifásico, composto de pasta e agregados (GOMES, 2002). Após as etapas de otimização da pasta e do esqueleto granular são estudados concretos com vários teores de pasta, sendo que o valor inicial adotado para esse parâmetro é igual a 38%. No caso de se atingir os parâmetros especificados com esse teor de pasta serão produzidos concretos com teores limítrofes entre 36% e 40% (Figura 3.26). Se os concretos com teores de pasta menores de 38% atenderem aos requisitos de auto-adensamento procede-se com a redução deste parâmetro até que se encontre o valor que não mais possua características de auto - adensamento. Esse procedimento visa encontrar o concreto mais econômico, já que a pasta constitui-se de cerca de 85% do valor do concreto.



Figura 3.26 – Esquema de obtenção do teor ótimo de pasta quando o concreto com teor de pasta igual a 38% atinge os requisitos de auto-adensamento.

Na hipótese de não se conseguir atingir os requisitos de auto-adensamento com o teor de pasta igual a 38% serão ensaiados concretos com teores de 40%, 42% (Figura 3.27) e assim por diante, até que se chegue a um teor de pasta que conduza a um concreto auto - adensável segundo os parâmetros propostos.

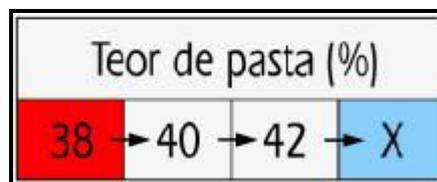


Figura 3.27 – Esquema de obtenção do teor ótimo de pasta quando o concreto com teor de pasta igual a 38% não atinge os requisitos de auto-adensamento.

3.5.1 Esqueleto Granular

O esqueleto granular é obtido de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) adaptada segundo Gomes (2002). Para o ensaio utilizou-se um recipiente de 15 litros e não houve compactação. De acordo com Gomes (2002), não há sentido em utilizar os 25 golpes por camada prescritos na norma, pois esse adensamento não existe no concreto auto-adensável. As mistura de agregado graúdo e miúdo somente são colocadas no recipiente e posteriormente pesadas. Com isso a determinação da massa unitária e do teor de vazio segue as Equações 3.32, 3.33 e 3.34.

$$MU = \frac{Mt}{Vt}, \text{ onde:} \quad (\text{Equação 3.32})$$

$$V_{sol} = \frac{Va}{\rho_a} + \frac{V_{br}}{\rho_{br}}, \text{ onde:} \quad (\text{Equação 3.33})$$

$$V(\%) = \left(\frac{Vt - V_{sol}}{Vt} \right) \cdot 100, \text{ onde:} \quad (\text{Equação 3.34})$$

- MU : Massa unitária;
- V_t : Volume total da mistura;
- V_{sol} : Volume do esqueleto granular;
- ρ_a : Massa específica da areia;
- ρ_{br} : Massa específica da brita;
- V : Volume de vazios.

Os percentuais adequados, entre agregados, gráudo e miúdo, as massas unitárias para diversas combinações de percentuais dos dois agregados são obtidas fazendo cada um variar de 0 a 100%. Na combinação em que se encontra a maior massa unitária, fica estabelecido o ponto no qual existe o menor índice de volume de vazios das diversas combinações, e conseqüentemente, o menor volume de pasta na mistura do concreto.

3.5.2 Desenvolvimento dos Concretos

Os concretos foram produzidos no interior do Laboratório de Materiais de Construção-LEMAC-UFES. O misturador utilizado foi uma betoneira com capacidade de 320 litros, eixo inclinado e pás solidárias à cuba. Os materiais empregados estavam submetidos à temperatura ambiente. Antes da confecção de cada traço era realizada a imprimação da betoneira com uma argamassa de traço similar àquela encontrada no concreto a ser produzido. Para cada traço, a seqüência e o tempo de mistura foram mantidos constantes. A seqüência de mistura é descrita na Tabela 3.11 e ilustrada na Figura 3.28.

Tabela 3.11 – Seqüência de mistura do concreto.

Etapa	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Agregado gráudo + agregado miúdo + água de absorção	0	60
Cimento + adição	60	120
80% da água	120	240
Limpeza da cuba(parada)	240	420
20% da água + aditivo e mistura final	420	660



Figura 3.28 – Sequência de colocação dos materiais na betoneira.

Nesta etapa do trabalho foram realizadas duas seqüências de ensaios conforme o atendimento aos parâmetros de auto-adensamento. A seqüência 01 corresponde aos ensaios de *slump flow*, T_{50} , *slump flow* com anel J, funil V, caixa L e caixa U, onde foram produzidos 90 litros para cada teor de pasta. A seqüência 02, referente aos ensaios de caixa de preenchimento, tubo – U e ao ensaio de resistência à compressão nos concretos que atendam os critérios de auto-adensamento. Nesta seqüência também foram necessários 90 litros de concreto. O fluxograma da Figura 3.29 ilustra detalhadamente a metodologia adotada para esta pesquisa.

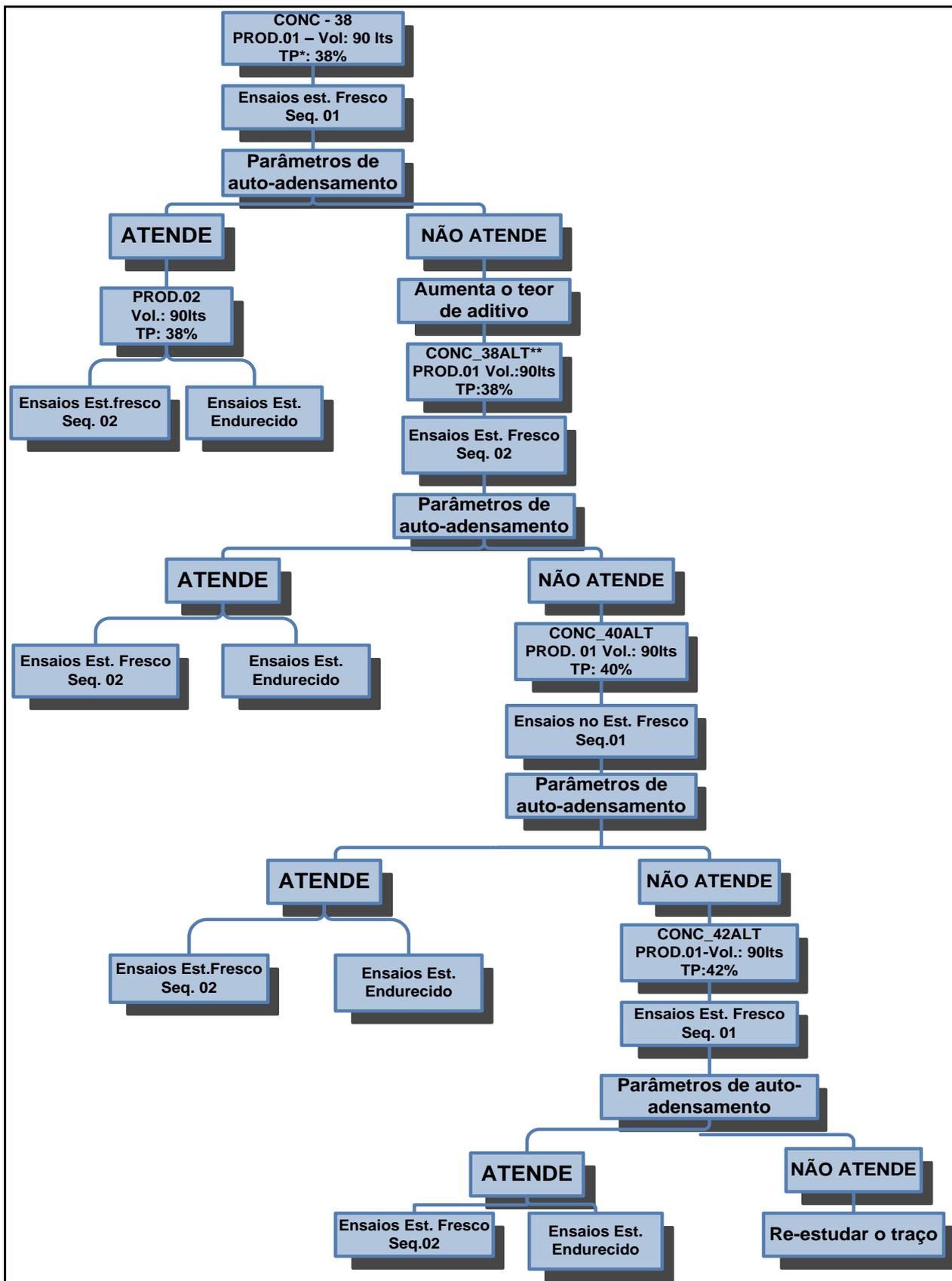


Figura 3.29 – Fluxograma exemplificando a produção dos concretos.

* TP: Teor de pasta

** ALT: Traço alterado.

3.5.2.1 Ensaio no estado fresco

Foram analisadas as seguintes propriedades dos CAA's no estado fresco:

- a) Capacidade de preenchimento;
- b) Capacidade de fluir;
- c) Resistência à segregação.

Os concretos produzidos nesta pesquisa foram ensaiados de acordo com os procedimentos descritos a seguir.

3.5.2.1.1 Ensaio de espalhamento e T_{50}

Para a execução do ensaio de espalhamento foi utilizado o cone de Abrams descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998) e uma base de metal de 1,00 x 1,00 m. O procedimento de ensaio é descrito conforme a seqüência a seguir.

- a) As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM33 (ABNT, 1998). Foram necessários aproximadamente 6 litros de concreto para executar o ensaio;
- b) a placa de metal utilizada como base foi colocada em um sobre uma superfície estável e devidamente nivelada. No centro da placa foi marcado o círculo que mede o T_{50} ;
- c) tanto a placa metálica quanto o cone de Abrams foram umedecidos para evitar a absorção da água do concreto;
- d) com a amostra obtida em a e em um tempo não superior a 5 min após sua coleta, o cone foi preenchido com auxílio de uma concha. O excesso de concreto ao redor da base foi removido com auxílio de um pano;
- e) antes de dois minutos, o cone foi levantado verticalmente e o concreto fluiu livremente sobre a placa. Simultaneamente o cronometro foi acionado para realizar a medida de tempo que o concreto leva para alcançar o círculo de 500 mm de diâmetro. Este período é considerado o T_{50} (Figura 3.30a-d);

f) os diâmetros finais de espalhamento foram medidos nas duas direções perpendiculares e a média entre eles foi calculada. Este é o *slump flow* em mm (Figura 3.30e);

g) foi observada borda da argamassa ou pasta de cimento sem agregado graúdo à extremidade da poça de concreto.

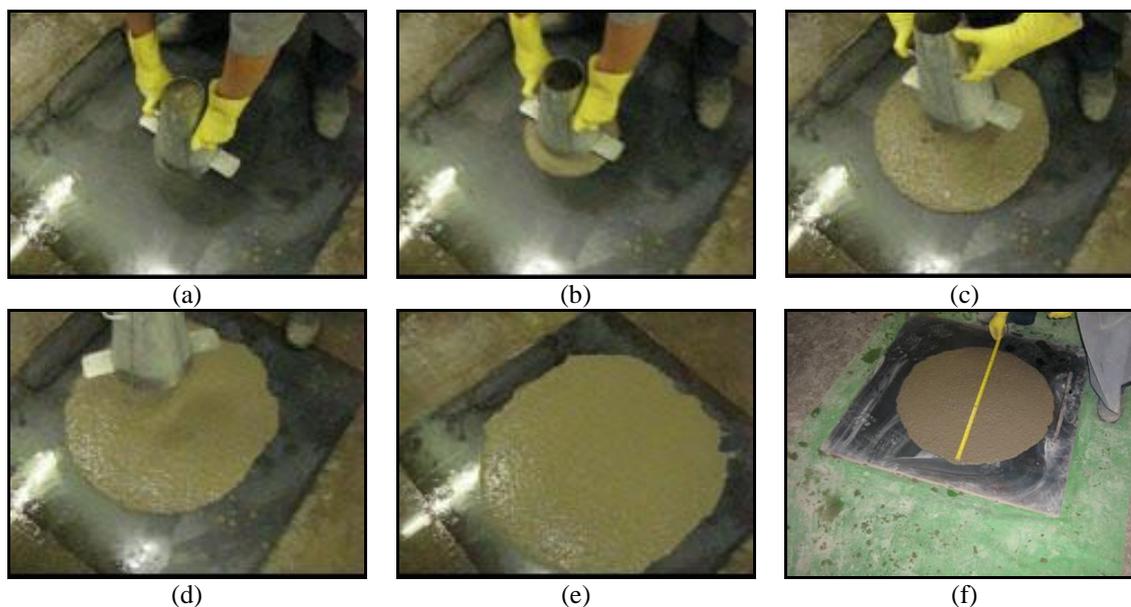


Figura 3.30 – Sequência de execução do ensaio de espalhamento (*Slump flow*).

3.5.2.1.2 *Slump Flow com anel J*

Nesta pesquisa o aparato conhecido como anel japonês, ou simplesmente anel J, foi utilizado em conjunto com o cone de Abrams de acordo com o procedimento descrito a seguir.

- a) Foram necessários aproximadamente 6 litros de concreto para executar o ensaio;
- b) a base de metal foi colocada em um piso devidamente estável e nivelado;
- c) o anel J foi centralizado na base do prato e cone de adensamento centralizado. Todos os aparatos e acessórios foram umedecidos (Figura 3.31a);
- d) com a amostra obtida em (a) e em um tempo não superior a 5 min após sua coleta, o cone foi preenchido com auxílio de uma concha. O excesso de concreto ao redor da base foi removido com auxílio de um pano;
- e) o cone foi levantado verticalmente permitindo o concreto escoar livremente (Figura 3.31b-c);

- f) as medidas do diâmetro final do concreto em duas direções perpendiculares foram feitas com auxílio de uma trena . A média entre os dois diâmetros foi calculada em mm;
- h) da mesma forma, foi executada a medida da diferença na altura entre o concreto junto ao interior das barras e no exterior em quatro locais (Figura 3.31e-f);
- i) observou-se qualquer borda de argamassa ou pasta de cimento sem agregado graúdo à extremidade da circunferência do concreto.

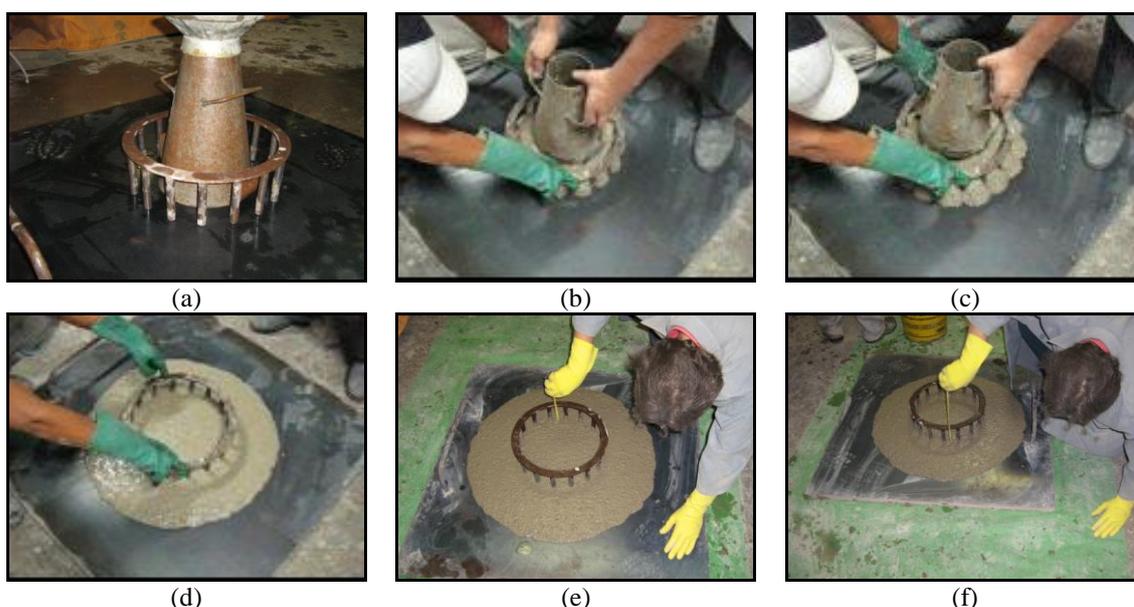


Figura 3.31 – Sequência de execução do ensaio de espalhamento em conjunto com o anel J.

3.5.2.1.3 Funil V

O funil – V utilizado nesta pesquisa foi fabricado em metal, com um tripé, de forma que ficasse nivelado. As dimensões do equipamento são: largura e altura da parte trapezoidal igual a 49 cm e 42,5 cm, respectivamente e do canal de saída de $6,5 \times 7,5$ cm.

- a) As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM33 (ABNT, 1998). Foram necessários aproximadamente 12 litros de concreto para executar o ensaio;
- b) o funil – V foi fixado em uma superfície firme e umedecido em seu interior para evitar a absorção de água do concreto (Figura 3.32a);
- c) com a abertura inferior fechada por uma placa móvel o aparato foi preenchido completamente sem adensamento, nivelando excesso com uma espátula (Figura 3.32b);

d) a portinhola foi aberta em 10 segundos depois de encher o funil, permitindo o concreto escoar sob gravidade (Figura 3.32c-e);

e) o cronômetro foi iniciado no momento em que a portinhola foi aberta. O tempo para completar a descarga é registrado, sendo este o tempo de fluxo. É possível verificar o final do escoamento quando se vê o vão por cima do funil V (Figura 3.32f);

f) o ensaio foi executado em um prazo de 5 minutos.

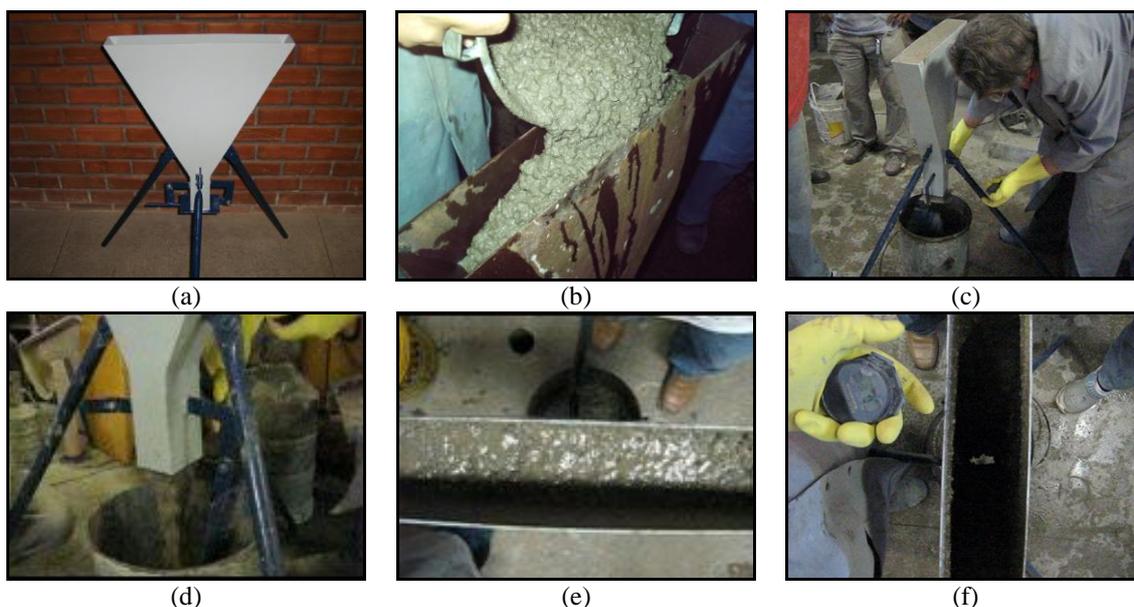


Figura 3.32 – Seqüência de execução do ensaio do funil – V.

3.5.2.1.4 Ensaio da Caixa L

A caixa – L produzida para a execução dos ensaios nesta pesquisa foi composta por partes metálicas e partes em acrílico conforme ilustra a Figura 3.33. As dimensões da parte vertical da caixa são de 20 x 10 x 60 cm e na parte vertical de 80 x 20 x 15 cm. O ensaio foi executado conforme a seqüência a seguir.

a) As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM 33 (ABNT,1998). Foram necessários aproximadamente 14 litros de concreto para executar o ensaio. A caixa foi montada com as barras de armadura correspondentes, sempre conferindo se as linhas de 200 e 400 mm estavam corretamente marcadas.



Figura 3.33 – Caixa – L fabricada para a execução do ensaio.

b) o aparelho foi fixado em uma superfície firme, e verificou-se que o portão corredeço abria livremente. Posteriormente, este foi fechado e as superfícies do interior do aparato foram umedecidas;

c) a seção vertical da caixa – L foi preenchida com a amostra de concreto, deixando-se repousar por 1 minuto até o assentamento;

d) então, o portão corredeço foi levantado permitindo que o concreto escoasse livremente pela seção horizontal (Figura 3.34c). Simultaneamente, a câmera filmadora foi acionada para registrar com maior precisão o tempo que o concreto leva para alcançar as marcas 200 e 400mm. Esses períodos são chamados de T_{20} e T_{40} (Figura 3.34b-e);

e) após a estabilização do concreto dentro da caixa (Figura 3.34f) mediu-se a altura inicial (H_1) e final (H_2), na seção vertical e na seção horizontal, respectivamente. A relação de bloqueio (RB) é dada pela Equação 3.35.

$$RB = \frac{H_1}{H_2}, \text{ onde:} \quad (\text{Equação 3.35})$$

RB : Relação de Bloqueio;

H_1 : Altura inicial;

H_2 : Altura final.

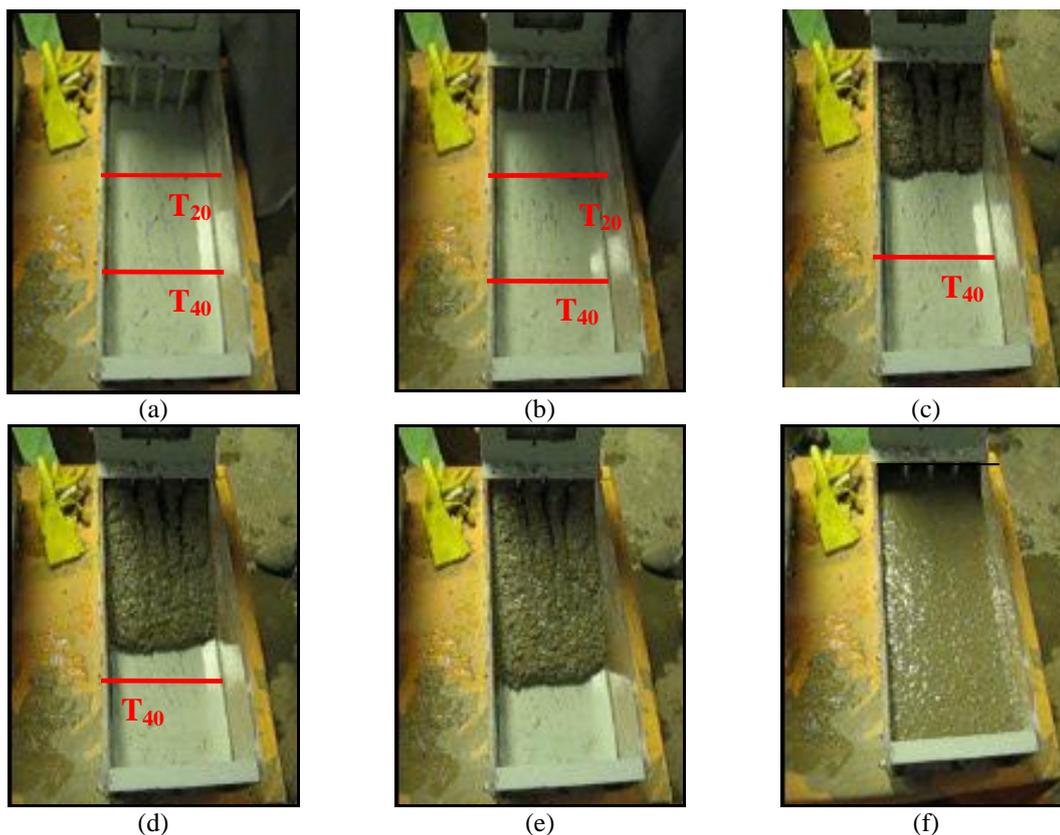


Figura 3.34 – Sequência para determinação dos tempos T_{20} e T_{40} registrados pela câmera digital.

3.5.2.1.5 Ensaio da Caixa – U

A caixa – U, produzida para a execução dos ensaios nesta pesquisa foi composta por partes metálicas e partes em acrílico conforme ilustra a Figura 3.35(a). O procedimento de ensaio é descrito a seguir.

- As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998). Foram necessários aproximadamente 20 litros de concreto para a execução do ensaio;
- antes do início do ensaio as superfícies interiores do aparelho foram umedecidas a fim de evitar absorção de água pelo concreto. A caixa – U foi colocada em posição vertical, em uma superfície plana, nivelada e firme, verificando-se se o portão corredeira abria e fechava com facilidade;
- o portão corredeira foi fechado e a caixa-U foi preenchida com a amostra, deixando-se repousar por 1 minuto até o assentamento (Figura 3.35b);

d) na seqüência, o portão correção é erguido permitindo que o concreto flua para o outro lado por pressão hidrostática (Figura 3.35c-f);

d) após o concreto descansar (Figura 3.35f), a altura do compartimento que esteve cheio é medida em dois lugares, calculando-se a média das alturas (R_1). Da mesma forma, a altura do concreto no outro compartimento também é medida e a média calculada (R_2). A altura de preenchimento é determinada de acordo com a Equação 3.36.

$$H_{preenchimento} = R_1 - R_2 \quad (\text{Equação 3.36})$$

e) o ensaio completo foi executado em 5 minutos. Avaliou-se de forma qualitativa a segregação do concreto pela observação visual.

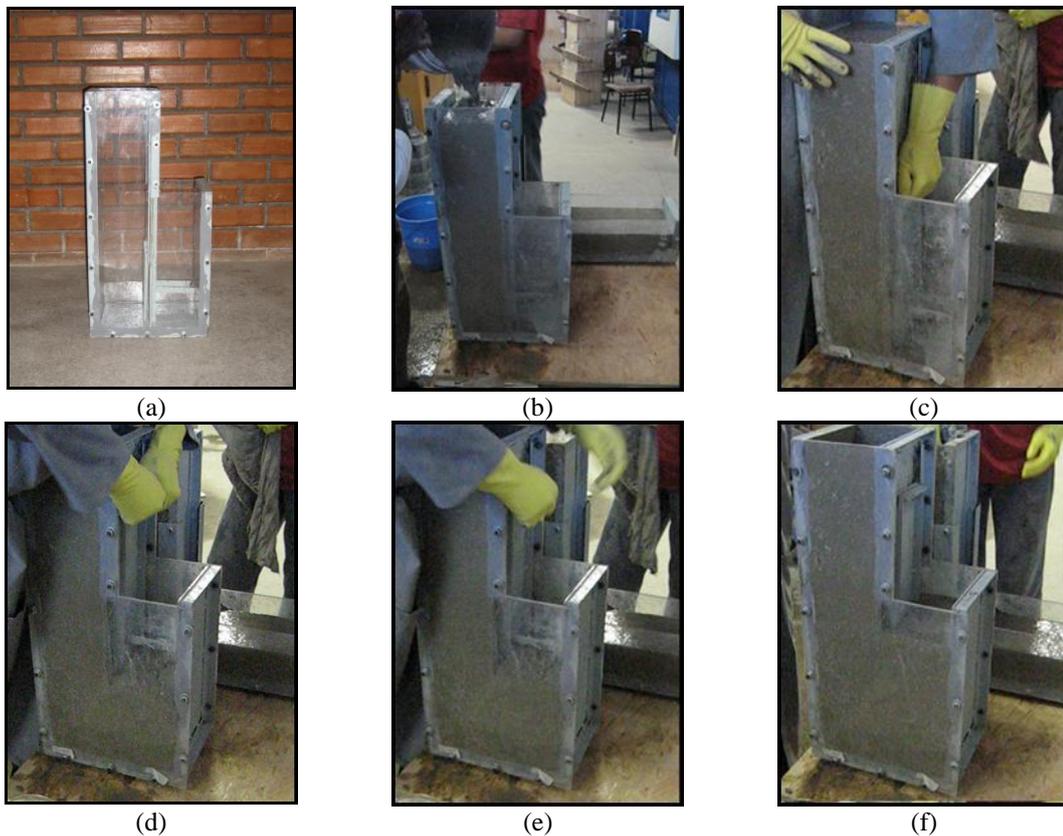


Figura 3.35 – Seqüência de execução do ensaio da caixa - U.

3.5.2.1.6 Ensaio da Caixa de Preenchimento

A caixa de preenchimento produzida para a execução dos ensaios nesta pesquisa foi composta por partes metálicas e partes em acrílico conforme ilustra a Figura 3.36. O procedimento de ensaio foi executado de acordo com a seqüência a seguir.



Figura 3.36 – Caixa de preenchimento utilizada na pesquisa.

- a) As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998). Foram necessários aproximadamente 45 litros de concreto para a execução do ensaio;
- b) o aparato foi fixado em uma superfície firme e as superfícies interiores foram umedecidas para evitar a absorção de água pelo concreto;
- c) o recipiente foi preenchido pelo funil acoplado com aproximadamente 2 litros de concreto fresco, a cada 5 segundos. Quando a amostra cobriu o primeiro obstáculo superior, cessou-se o preenchimento (Figura 3.37a-d);
- d) após o assentamento da amostra, a altura do lado ao qual o recipiente foi cheio foi medida em dois lugares e a média foi calculada (h_1). O mesmo foi feito do lado oposto do aparato. A porcentagem média de preenchimento foi calculada de acordo com a Equação 3.37;

$$F = \left\{ \frac{h_1 + h_2}{2xh_1} \right\} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.37})$$

- e) o ensaio completo foi executado em 8 minutos.

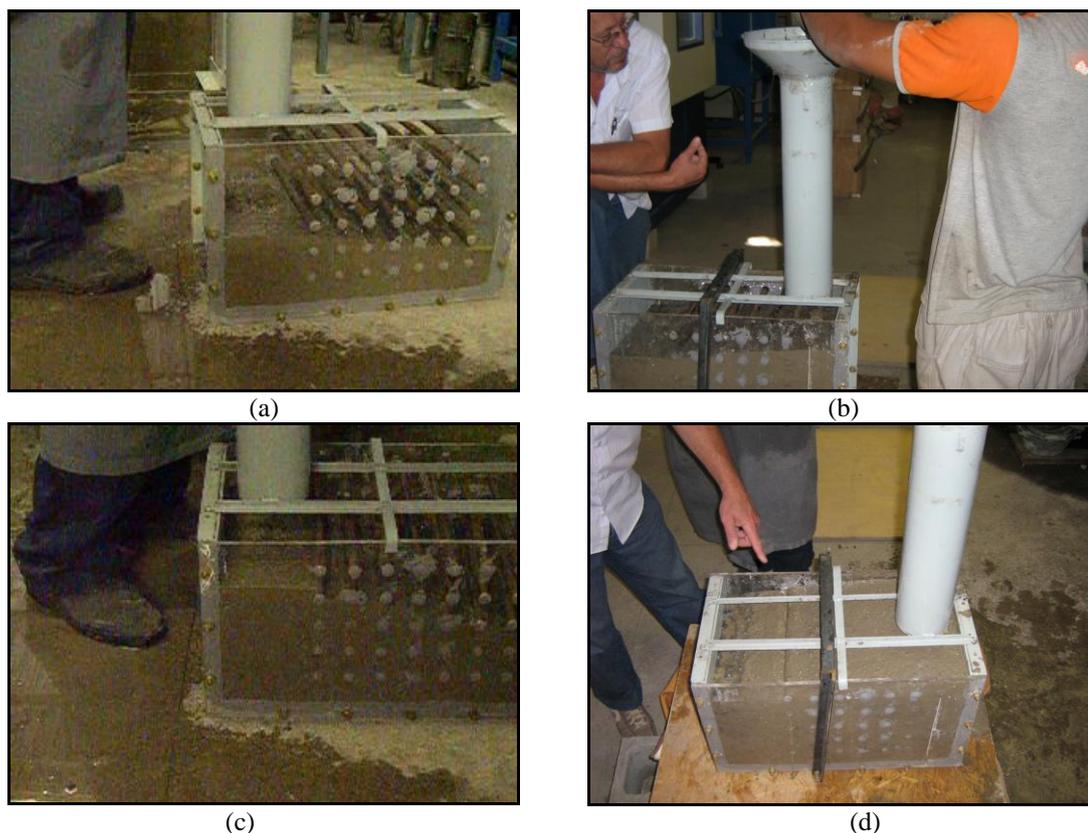


Figura 3.37 – Seqüência de execução do ensaio da caixa de preenchimento.

3.5.2.1.7 Ensaio do Tubo U

O ensaio do tubo U foi executado com adaptações do procedimento adotados por outros pesquisadores como Gomes (2002), Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006). Esse procedimento adaptado é descrito na seqüência a seguir.

- a) As amostras de concreto fresco destinadas ao ensaio foram colhidas de acordo com a NBR NM33 (ABNT, 1998). Foram necessários aproximadamente 32 litros de concreto para a execução do ensaio;
- b) o tubo foi colocado em um suporte de madeira para que ficasse em posição vertical durante o endurecimento do concreto e as superfícies interiores do tubo foram devidamente umedecidas;
- c) o tubo foi preenchido com concreto por uma de suas extremidades, com auxílio de um funil, até que sua outra extremidade fosse igualada sem adensamento (Figura 3.38a-b);
- d) o concreto descansou durante aproximadamente 3 horas, pelo fato de que o cimento utilizado é de pega rápida (Figura 3.38c-d);

e) quanto o concreto já se encontrava no estado de semi-endurecimento, o tubo foi aberto em quatro lugares e foram retirados discos de 10 cm de espessura: P_1 - no início do tubo de entrada, o segundo no início do trecho; P_2 - no início do trecho horizontal; P_3 - no final do trecho horizontal do tubo e; P_4 ¹ - no final do tubo de entrada (Figura 3.38 e-g);

f) primeiramente os discos foram pesados assim que foram retirados (massa de argamassa + massa de agregados). Isso foi feito, para calcular a taxa de agregado por partes, uma vez que é bastante difícil retirar os discos exatamente com 10 cm de espessura (Figura 3.38h);

g) feito isso, foi realizada a lavagem dos discos separadamente, sobre a peneira de 5 mm para a retirada da argamassa e a obtenção do agregado gráudo limpo. A superfície dos agregados provenientes das quatro amostras foi enxuta com auxílio de uma toalha e pesados. Assim, obteve-se a massa de agregado saturada (Figura 3.38i-l);

h) a massa da amostra P_1 serve como referência. Calculou -se a relação de segregação (denominada RS), pelo quociente entre o conteúdo de agregado gráudo avaliado no concreto e o conteúdo teórico de acordo com a dosagem (Equações 3.38, 3.39, 3.40);

$$RS = \frac{P_1}{P_2} \quad \text{(Equação 3.38)}$$

$$RS = \frac{P_1}{P_3} \quad \text{(Equação 3.39)}$$

$$RS = \frac{P_1}{P_4} \quad \text{(Equação 3.40)}$$

i) a taxa de agregado foi calculada conforme a Equação 3.41;

$$\text{Taxa de agregado} = \frac{m_{\text{agrsaturado}}}{\text{massa}_{\text{arg+agr}}} \quad \text{(Equação 3.41)}$$

j) a critério de confirmação do resultado do ensaio, também foi calculada a Relação de Segregação (RS) e a taxa de agregado após a secagem das amostras em estufa, obtendo-se a massa de agregado seco.

¹ a retirada da amostra P_4 foi realizada a critério de experiência, mas o valor resultante da relação de segregação com essa amostra não foi considerado neste programa experimental.



Figura 3.38 – Sequência de execução do ensaio do tubo U.

O Quadro 3.1 resume as principais características os ensaios reológicos realizados neste programa experimental.

Nome	Objetivos	Valores recomendados	Valores projetados
<i>Slump flow</i> e T_{50}	Avaliar a capacidade de fluir e susceptibilidade à segregação do concreto. Obtém-se de forma indireta um indicativo da capacidade de preenchimento de formas em decorrência do seu peso próprio.	Diâmetro de espalhamento final (D_f) de 600 a 850 mm e T_{50} na faixa de 1 a 10 segundos.	$D_f = 75 \pm 5$ cm $T_{50} = 5 \pm 1$ s
<i>Slump flow</i> com anel J	Avaliar além da capacidade de fluir do concreto e resistência à segregação, sua habilidade de contornar as barras de armadura.	O diâmetro final (D_{fJ}) deve ser maior que o valor obtido no <i>slump flow</i> menos 50 mm. A diferença entre a altura da face superior do concreto na parte interna e externa do anel não deve superar 10 mm.	$D_{fJ} > D_f - 5$ cm $H_{int} - H_{ext} < 10$ mm
Funil V	Determinar a fluidez do concreto para um diâmetro máximo de agregado de 20 mm. A viscosidade é um parâmetro reológico que também pode ser avaliado neste ensaio.	O tempo de escoamento de 10 a 15 segundos é considerado apropriado, contudo valores de até 25 segundos podem ser aceitos para algumas aplicações.	T_V entre 10 e 15s
Caixa L	Medir a capacidade de preenchimento das formas com obstáculos que simulam a armadura. A fluidez também pode ser avaliada de uma forma indireta, entretanto este ensaio não é um bom indicador para avaliar esta propriedade.	O coeficiente de bloqueio (RB) = H_2/H_1 deve estar entre 0,80 e 1,00, $T_{L20} < 1,5$ s e $T_{L40} < 3,5$ s.	$RB > 0,80$ $T_{L20} < 1,5$ s $T_{L40} < 3,5$ s
Caixa U	Avaliar além da capacidade de preenchimento das formas, sua habilidade de passar pelas armaduras e/ou obstáculos durante sua moldagem.	Quanto mais próximo de zero for a altura de preenchimento (H_1-H_2) melhor será a capacidade de preenchimento do concreto.	$(H_1-H_2) < 10$ mm
Tubo U	Determinar a resistência à segregação do concreto, avaliando assim sua estabilidade. A segregação é avaliada através da medição do percentual de agregado graúdo em diferentes trechos do tubo.	A razão de segregação (RS) deve ser superior a 0,90. Para estes valores a tendência a segregação do concreto pode ser considerada desprezível.	$RS \geq 0,90$
Caixade preenchimento	Avaliar a capacidade de preenchimento do concreto ao transpor obstáculos (barras de armadura).	Quanto mais próximo de 100% for a taxa de preenchimento (F), melhor será sua capacidade de preenchimento.	$F \geq 95\%$

Quadro 3.1 – Quadro resumo dos ensaios reológicos.

3.5.2.2 Ensaio no concreto endurecido

Após passar pelos testes no estado fresco o CAA, por meio de corpos-de-prova cilíndricos, foi submetido a ensaios no concreto endurecido. No caso desta pesquisa, o único ensaio aqui avaliado foi a resistência à compressão aos 7 dias, por ser esse um dos requisitos, segundo Gomes (2002), para considerar o concreto auto-adensável, como de alta resistência. Outros ensaios, como resistência à tração, módulo de elasticidade e ensaios de durabilidade serão apresentados em um trabalho continuado deste, que está sendo desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES.

3.5.2.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado seguindo as orientações estabelecidas na Norma Brasileira, NBR 5739(ABNT, 1994). Os corpos-de-prova foram moldados segundo a NBR 5738(ABNT, 2003) com dimensões de 10 x 20cm (Figura 3.39), sendo preenchidos em uma só camada. Por se tratarem de concretos auto-adensáveis não houve realização de adensamento. Após 24h foram desformados e introduzidos em câmara úmida de acordo com a NBR 9479(ABNT, 1994) com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade superior a 95%, permanecendo até a data de realização do ensaio (Figura 3.40). O topo e a base foram retificados como mostrado na Figura 3.41.



Figura 3.39 – Moldagem dos corpos-de-prova.



Figura 3.40 – Cura dos corpos-de-prova em câmara úmida.



Figura 3.41 – Retificação dos corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão.

Foram moldados quatro corpos-de-prova para a idade de 7 dias e, após esse período, as amostras foram ensaiadas utilizando-se a prensa hidráulica AMSLER com capacidade para 200 toneladas mostrada na Figura 3.42. Na Figura 3.43 apresenta-se um corpo-de-prova de 10cm x 20cm em posição de ensaio de ruptura aos 7 dias, para obtenção da propriedade mecânica de resistência à compressão dos concreto.



Figura 3.42 – Prensa hidráulica utilizada.



Figura 3.43 – Corpo-de-prova no momento da ruptura.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios de finos, pastas, argamassas e concretos no estado fresco e a resistência à compressão aos 7 dias, além da obtenção do esqueleto granular. Nessa seqüência, são apresentadas as etapas de obtenção do CADAR utilizando a escória de aciaria LD e as demais adições minerais.

Para um melhor entendimento destes resultados adotou-se as siglas descritas no Quadro 4.1.

Sigla	Descrição
P:	Pastas
ARG:	Argamassas
CONC:	Concreto
100EALD:	100% de escoria de aciaria LD
70EALD30EGAF:	70% escória de aciaria LD e 30% de escória granulada de alto-forno
85EALD15CV:	85% escória de aciaria LD e 15% cinza volante
100CAL:	100% fíler calcário

Quadro 4.1 – Siglas utilizadas para descrever os resultados.

Dessa forma, os resultados as misturas são apresentados, por exemplo, como no Quadro 4.2.

Tipo	% das adições	Teor de pasta	Teor de SP	Relação f/c
P	100CAL	-	-	-
ARG	100EALD	42	0,85	0,40
CONC	80EALD15CV	40	1,20	0,40

Quadro 4.2 – Exemplo da apresentação dos resultados.

4.1 Finos

Nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 se encontram os resultados dos ensaios de espalhamento e funil V para as misturas de cimento, de escória de aciaria LD isolada, das composições de escória de aciaria com escória granulada de alto-forno e cinza volante e da mistura com fíler calcário.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de cimento Portland.

100CIMENTO						
V_a/V_c	Cimento (g)	Água (g)	R_m	T_{esc} (s)	\varnothing_f (mm)	Γ_m
1,5	2.533,5	1.241,5	6,58	1,52	190	2,61
1,6	2.436,1	1.273,4	7,81	1,28	220	3,84
1,7	2.345,9	1.302,8	9,62	1,04	256	5,55
1,8	2.262,1	1.330,2	10,87	0,92	284	7,07
1,9	2.184,1	1.355,7	12,50	0,80	315	8,92

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de escória de aciaria LD.

100EALD						
V_a/V_f	EALD (g)	Água (g)	R_m	T_{esc} (s)	\varnothing_f (mm)	Γ_m
1,1	3.083,1	1.083,9	3,58	2,79	198	2,92
1,2	2.943,0	1.128,7	7,09	1,41	257	5,60
1,3	2.815,0	1.169,6	7,69	1,30	294	7,64
1,4	2.697,7	1.207,0	8,20	1,22	323	9,43
1,5	2.589,8	1.241,5	11,11	0,90	355	11,60

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios em finos para mistura com 70% de escória de aciaria LD e 30% escória granulada de alto-forno.

70EALD30EGAF							
V_a/V_f	EALD (g)	EGAF (g)	Água (g)	R_m	T_{esc} (s)	\varnothing_f (mm)	Γ_m
1,1	2104,8	902,0	1083,9	5,95	1,68	181	2,28
1,15	2055,8	881,1	1106,8	6,58	1,52	198	2,92
1,2	2009,1	861,0	1128,7	8,93	1,12	237	4,62
1,3	1921,8	823,6	1169,6	11,36	0,88	277	6,67
1,4	1841,7	789,3	1207,0	11,36	0,88	302	8,12

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios em finos para mistura com 80% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante.

85EALD15CV							
V_a/V_f	EALD (g)	CV (g)	Água (g)	R_m	T_{esc} (s)	\emptyset_f (mm)	Γ_m
1,1	2506,3	442,3	1083,9	6,58	1,52	170	1,89
1,2	2392,3	422,2	1128,7	8,33	1,20	215	3,62
1,3	2288,3	403,8	1169,6	9,62	1,04	267	6,13
1,4	2193,0	387,0	1207,0	9,62	1,04	291	7,47
1,5	2105,3	371,5	1241,5	10,42	0,96	327	9,69

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios em finos para mistura com 100% de fíler calcário.

100 CAL						
V_a/V_f	Calcita (g)	Água (g)	R_m	T_{esc} (s)	\emptyset_f (mm)	Γ_m
1,1	2.691,0	1.083,9	4,10	2,44	198	2,92
1,2	2.568,6	1.128,7	10,00	1,00	257	5,60
1,25	2.511,6	1.149,6	11,36	0,88	265	6,02
1,3	2.457,0	1.169,6	13,16	0,76	288	7,29

A partir dos resultados de diâmetro final de espalhamento (\emptyset_f), espalhamento relativo (Γ_m) foi possível observar a linearidade entre as variáveis, através de regressão linear e obter os valores de β_p e E_p para as composições de finos utilizadas na pesquisa conforme é apresentado na Tabela 4.6 e no gráfico da Figura 4.1.

Tabela 4.6 – Valores de β_p e E_p e água da pasta de consistência normal.

Adição	β_p	E_p	Água da pasta da consistência normal (%)
100CIM	1,35	$6,28 \times 10^{-2}$	30%
100EALD	0,95	$4,70 \times 10^{-2}$	27%
70LD30AF	0,99	$4,84 \times 10^{-2}$	29%
85LD15CV	1,01	$5,11 \times 10^{-2}$	29%
100CAL	0,96	$4,59 \times 10^{-2}$	31%

De acordo com o gráfico e os resultados mostrados na Tabela 4.6, o fino que apresentou maior β_p foi o cimento, concordando com os trabalhos de Calmon *et. al.*(2006) e Domone e Hsi-Wen (1997). O menor valor absoluto de β_p foi observado na mistura 100EALD, indicando ser esta composição a que necessita de menos água para iniciar o espalhamento. Entretanto, todas as composições com exceção do cimento, possuem valores absolutos de β_p muito próximos, tendendo a serem estatisticamente semelhantes. Também observa-se que não existe relação direta entre β_p e a água da pasta consistência normal para as diferentes composições.

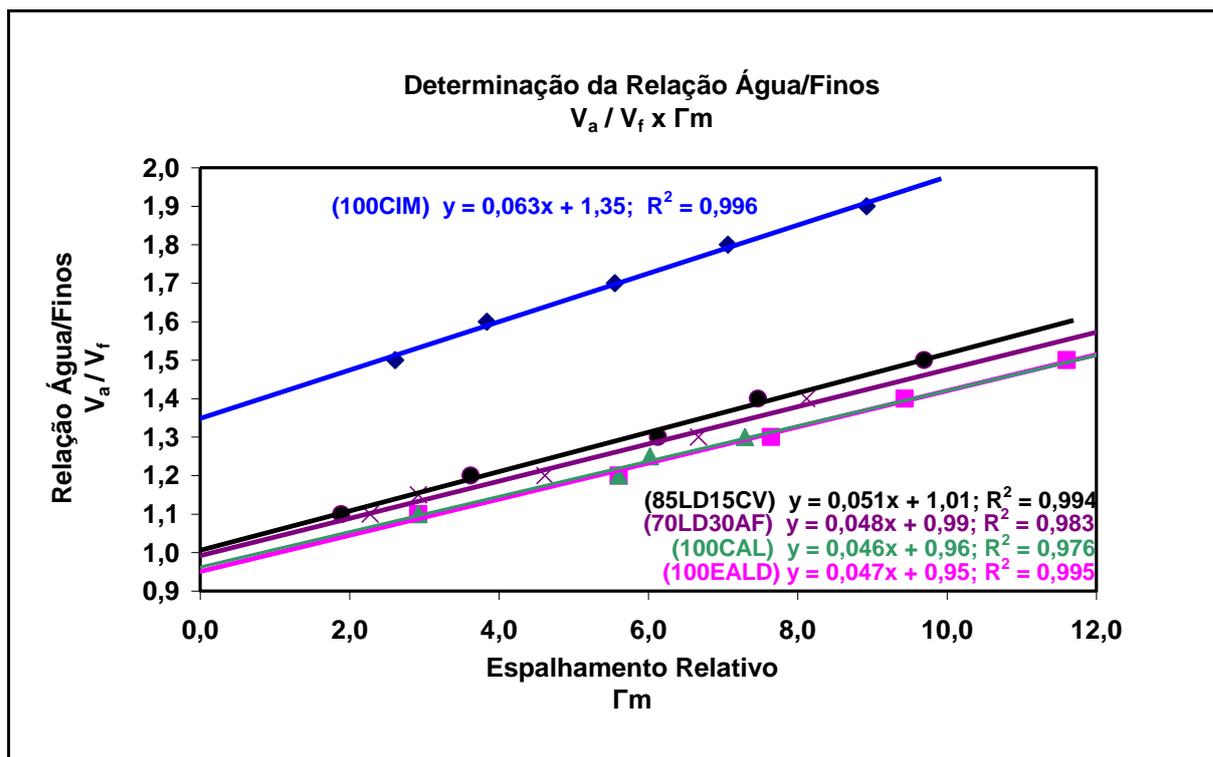


Figura 4.1 – Gráfico $V_a/V_f \times \Gamma_m$

No que diz respeito ao coeficiente angular da reta (E_p), o maior valor encontrado foi do cimento, seguido da composição 85LD15CV. Isto demonstra que estes finos têm menos sensibilidade a água. A adição 100CAL é a mais sensível à água, seguida de 100EALD, 70LD30AF e 85LD15CV. A sensibilidade do fino à água foi explicada através do gráfico genérico na seção 3.4.1.1 e fazendo uma analogia, observa-se que com uma relação V_a/V_f de 1,50, por exemplo, a mistura de 100CIM apresenta um espalhamento relativo de 2,61, bastante inferior aos valores de espalhamento das composições de 100EALD, 70EALD30EGAF, 85EALD15 e 100CAL para mesma quantidade de água, que são de 11,60, 10,62, 9,69 e 11,73, respectivamente. Nota-se ainda que os valores de Γ_m para a mistura 100EALD e 100CAL são muito próximos, como pode ser verificado também pela sobreposição das linhas no gráfico da Figura 4.1. Com isso, pode-se afirmar que a mistura com 100EALD apresentou o mesmo espalhamento que a adição de referência (100CAL).

As Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram o espalhamento relativo das composições com as adições em estudo, para diversos valores de V_a/V_f . Nota-se que para a mistura de 100CIM (Figura 4.2) uma maior necessidade de água para espalhamento. Para um valor de V_a/V_f de 1,70 obteve-se um Γ_m de apenas 5,55 enquanto as demais misturas não necessitaram dessa mesma quantidade de água para alcançar valores semelhantes (Tabela 4.1).

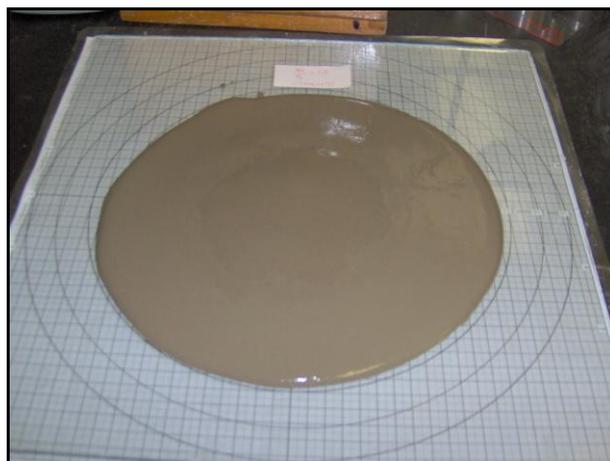
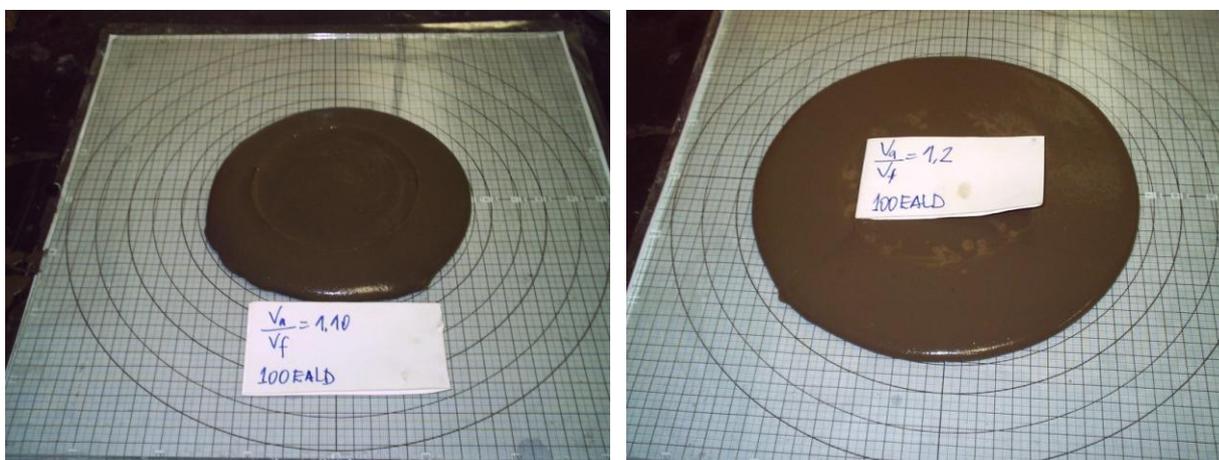


Figura 4.2 – Espalhamento para mistura de cimento com $V_a/V_f = 1,70$.

A Figura 4.3 corresponde ao ensaio de espalhamento da mistura com 100EALD, que também pode ser verificado na Tabela 4.2. Observa-se que para um valor de V_a/V_f de 1,10 o espalhamento relativo foi de 2,92 (Figura 4.3a) enquanto que para a composição de 70EALD30EGAF foi (Figura 4.4a). Para V_a/V_f de 1,20 o Γ_m foi de 5,60 (Figura 4.3a) neste fino. Na mesma proporção de água na amostra de 85EALD15CV o espalhamento foi de 3,62 (Figura 4.5a), indicando uma menor sensibilidade deste em relação a mistura com somente escória de aciaria LD.



(a) $V_a/V_f = 1,10$

(b) $V_a/V_f = 1,20$

Figura 4.3 – Espalhamento das misturas com 100% EALD para diversos valores de V_a/V_f .

Na Figura 4.4 têm-se os espalhamentos relativos das amostras de 70EALD30EGAF. Para V_a/V_f de 1,30 tem-se um espalhamento de 6,67. Com o mesmo teor de água nas misturas de 85EALD15CV (Figura 4.4c) e 100CAL (Figura 4.5b) os espalhamentos são de 6,13 e 7,29 respectivamente, indicando que esses finos são sensíveis à água igualmente. Para V_a/V_f de 1,15 o Γ_m foi de 2,92 (Figura 4.4b).



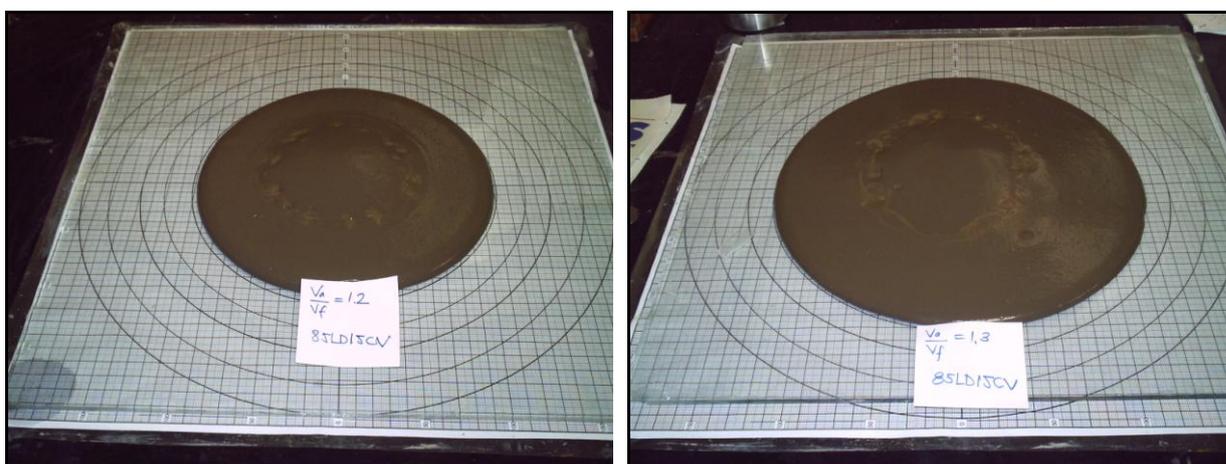
(a) $V_a/V_f = 1,10$

(b) $V_a/V_f = 1,15$

(c) $V_a/V_f = 1,30$

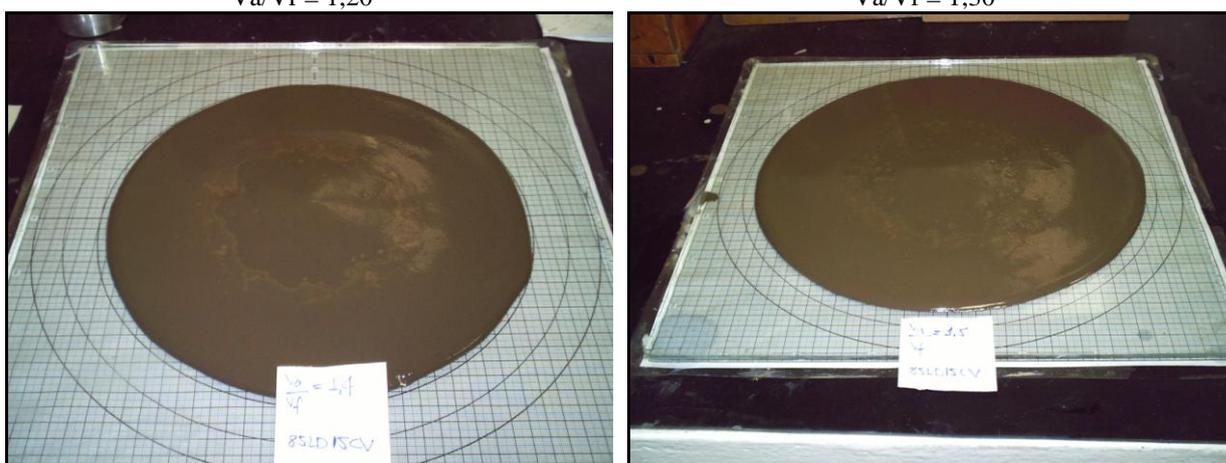
Figura 4.4 – Espalhamento para as misturas com 70EALD30EGAF para diversos valores de V_a/V_f .

Na composição com 85EALD15CV observou-se assim como na mistura de cimento, menor sensibilidade à água, no entanto, em menor grau. Para valores de V_a/V_f de 1,40 (Figura 4.5c) e 1,50 (Figura 4.6d) os espalhamentos relativos ficaram em torno de 7, 47 e 9,69, respectivamente.



$V_a/V_f = 1,20$

$V_a/V_f = 1,30$

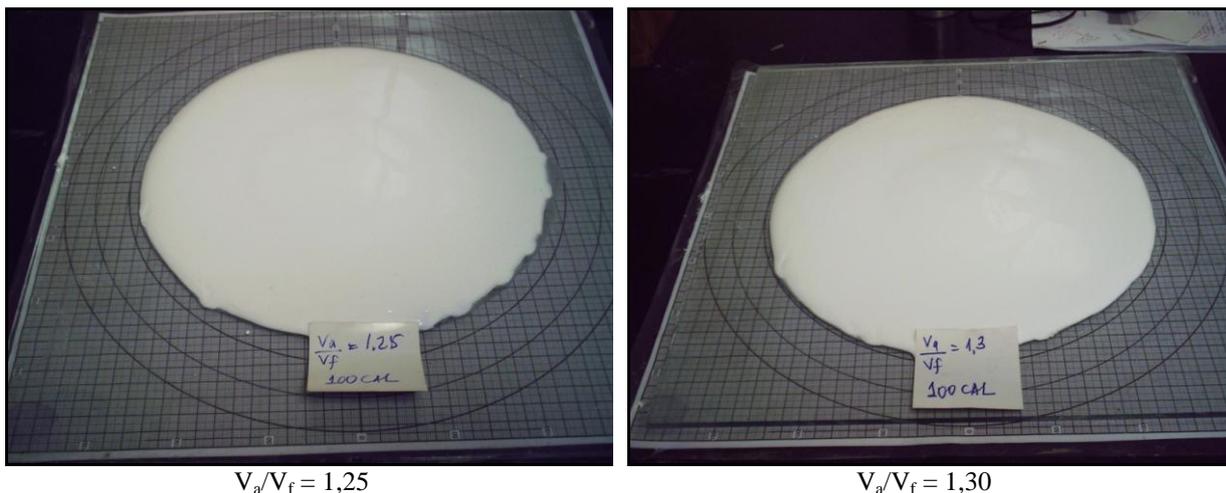


$V_a/V_f = 1,40$

$V_a/V_f = 1,50$

Figura 4.5 – Espalhamento para as misturas com 85EALD15CV para diversos valores de V_a/V_f .

Para a adição de referência, 100CAL, um V_a/V_f de 1,25 (Figura 4.6) proporcionou um espalhamento de 6,02. Essa mistura se mostrou bastante sensível a água, semelhante a 100EALD.



$V_a/V_f = 1,25$ $V_a/V_f = 1,30$
Figura 4.6 – Espalhamento para as misturas com 100CAL para diversos valores de V_a/V_f .

É válido acrescentar que verificou-se que a introdução de finos reativos como a cinza volante e escória granulada de alto-forno aumentam a tensão de escoamento, reduzindo a deformabilidade da mistura. No entanto, nas proporções propostas, essa redução da tensão, quando comparada com a mistura 100EALD, não é significativa.

O gráfico da Figura 4.7 é referente ao ensaio de funil V, realizado para as misturas de finos com os mesmos intervalos de V_a/V_f utilizados no ensaio de espalhamento (V_a/V_f de 1,1 a 1,5).

Os resultados desse ensaio são também mostrados nas Tabelas 4.1 a 4.5. O gráfico a seguir foi construído utilizando os valores de V_a/V_f e R_m calculado a partir do tempo de escoamento das misturas no funil V. Observa-se que a mistura mais fluida foi 100CAL. Isso é demonstrado, tomado um valor de V_a/V_f de 1,30, por exemplo, onde a mistura 100CAL apresenta um valor de tempo de escoamento de 0,76 segundos e R_m de 13,16, enquanto as composições com 100EALD, 70EALD30EGAF e 85EALD15CV obtiveram tempos de escoamento de 1,30 ($R_m = 7,69$), 0,88 ($R_m = 11,36$) e 1,04 ($R_m = 9,62$) segundos, respectivamente. Isto também pode ser constatado ao analisar o coeficiente angular em cada intervalo $\Delta V_a/V_f$. Contudo para as adições 70LD30AF e 85LD15CV observa-se uma tendência de estabilização do tempo de escoamento a partir de $V_a/V_f = 1,3$ o que não é tão visível para as adições 100CAL e 100EALD.

A mistura de cimento também se apresentou bastante fluida, com tempos de escoamento de 0,80 a 1,52 segundos. No entanto, esse tempo foi obtido com maiores valores V_a/V_f , demonstrado pelo afastamento da linha dessa mistura das demais no gráfico.

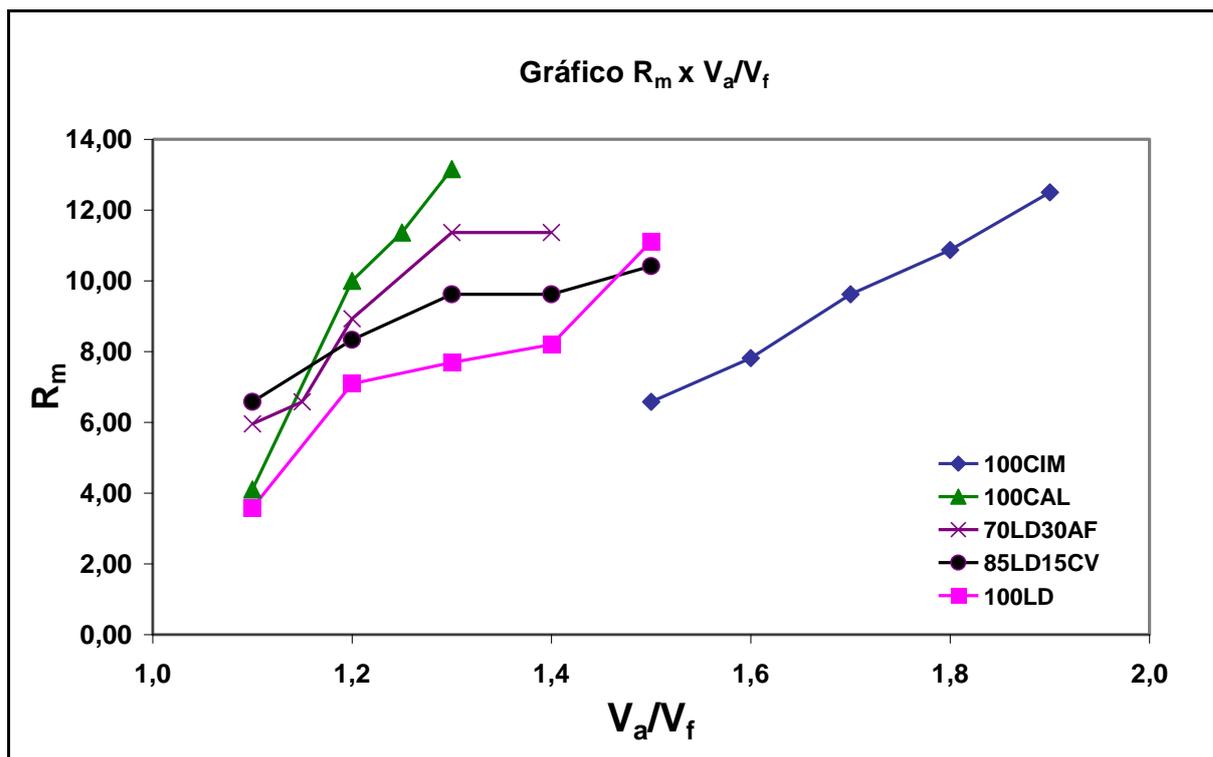


Figura 4.7 – Gráfico $R_m \times V_a/V_f$.

É importante acrescentar que maiores de R_m indicam misturas mais fluidas uma vez que esta é uma grandeza inversamente proporcional ao tempo de fluidez.

4.2 Pastas

Os resultados obtidos nos ensaios de cone de Marsh e mini-*slump* para as pastas dessa pesquisa são mostrados e comentados na seqüência a seguir.

4.2.1 Pasta P100EALD

Na Figura 4.8, apresentam-se às curvas das pastas P100EALD com relações f/c de 0,10 a 0,60, dos ensaios de cone de Marsh e na Figura 4.9 as curvas com as mesmas relações f/c para os ensaios de mini-*slump*.

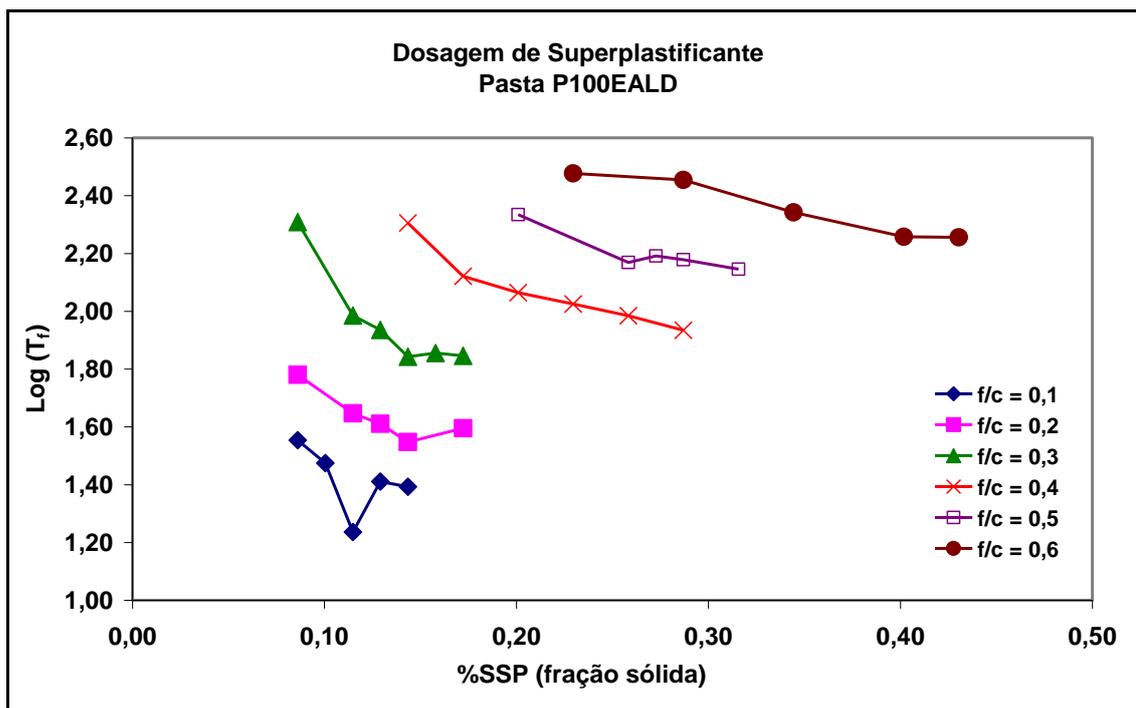


Figura 4.8 – Gráfico da dosagem de superplastificante (P100EALD).

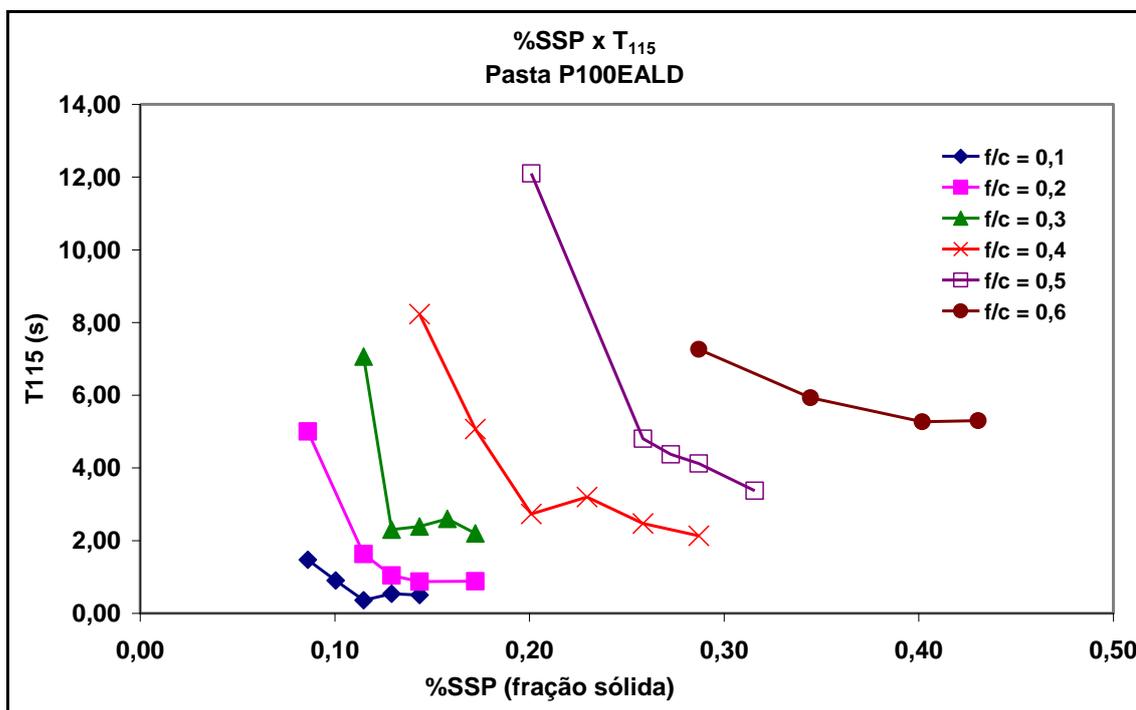


Figura 4.9 -Gráfico %SSP x T_{115} (100EALD).

Observa-se na Figura 4.8 que as pastas não apresentaram pontos de dosagem ótima bem definidos, havendo a necessidade de interpolação dos dados para obtenção dos ângulos próximos a $140^\circ \pm 10^\circ$, estabelecido por Gomes (2002). Para as pastas com f/c de 0,10, o ponto de saturação ocorreu na porcentagem de superplastificante na fração sólida de 0,11

correspondendo a uma % SP de 0,40. O diâmetro de espalhamento final foi de 182,6 mm, dentro da faixa de 180 ± 10 . No entanto o tempo T_{115} foi baixo, em torno de 0,36 segundos, demonstrando a elevada fluidez da pasta.

Nas pastas com relações f/c de 0,20 e 0,30 os pontos de saturação foram igualmente de 0,14% (%SP=0,50) de superplastificante. No mini-*slump* apresentaram um diâmetro de espalhamento de 189,7 e 154,2mm e T_{115} de 0,87 e 2,39 segundos (Figura 4.9), respectivamente. A pasta com f/c de 0,40 apresentou dosagem ótima com %SSP de 0,17 (%SP = 0,60), diâmetro de espalhamento final de 145,3mm e tempo T_{115} foi de 5,07 segundos.

A pasta com 0,50 de f/c obteve a dosagem ótima de superplastificante em 0,26% (%SP = 0,90), no entanto, o diâmetro de espalhamento final não correspondeu aos parâmetros estabelecidos por Gomes (2002), apresentando um mini-*slump* de 156,4 mm e T_{115} de 4,80 segundos. Nesta mesma pasta, observou-se que com uma dosagem de superplastificante de 0,32% na fração sólida (%SP=1,10) o espalhamento final foi de 181,8 mm e o T_{115} de 3,37 segundos, estando esses valores na faixa dos parâmetros de Gomes (2002) de 180 ± 10 mm e 3 ± 1 s. Por esse motivo, a pasta P100EALD com %SP de 1,10 foi adotada como sendo a ideal para a fabricação dos concretos CON100EALD.

A Figura 4.10 obtida pela captura de imagens mostra os três momentos da realização do ensaio mini-*slump* para pasta tida como ideal.

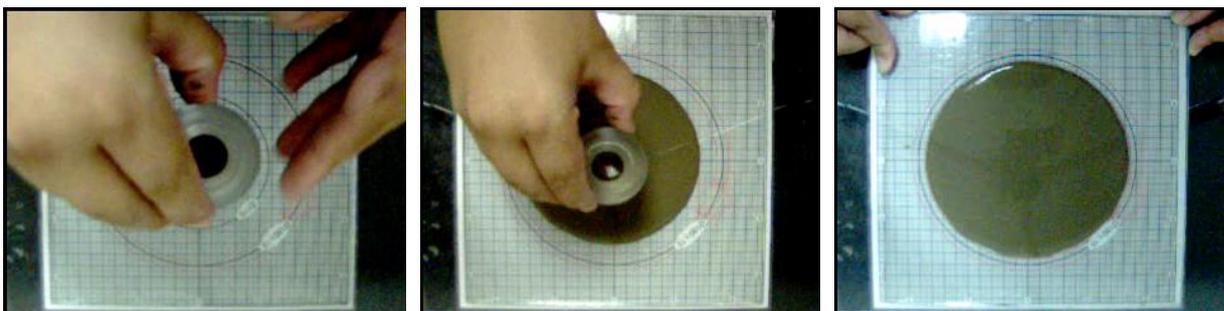


Figura 4.10 – Seqüência de obtenção dos valores de T_{115} e espalhamento final para P100CAL ideal.

4.2.2 Pasta P70EALD30EGAF

As curvas das Figuras 4.11 e 4.12 correspondem aos resultados dos ensaios de cone de Marsh e mini-*slump* para as pastas P70EALD30EGAF com as relações f/c variando de 0,10 a 0,60.

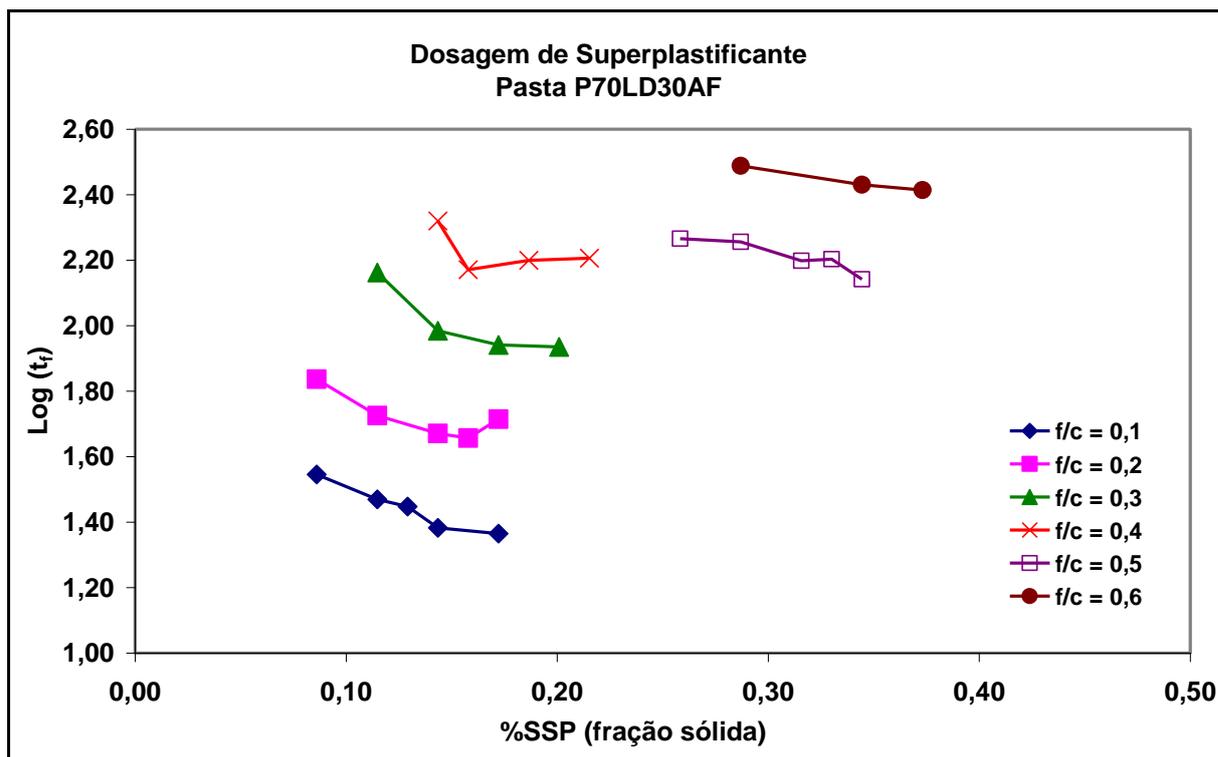


Figura 4.11 – Gráfico da dosagem de superplastificante (P70EALD30EGAF).

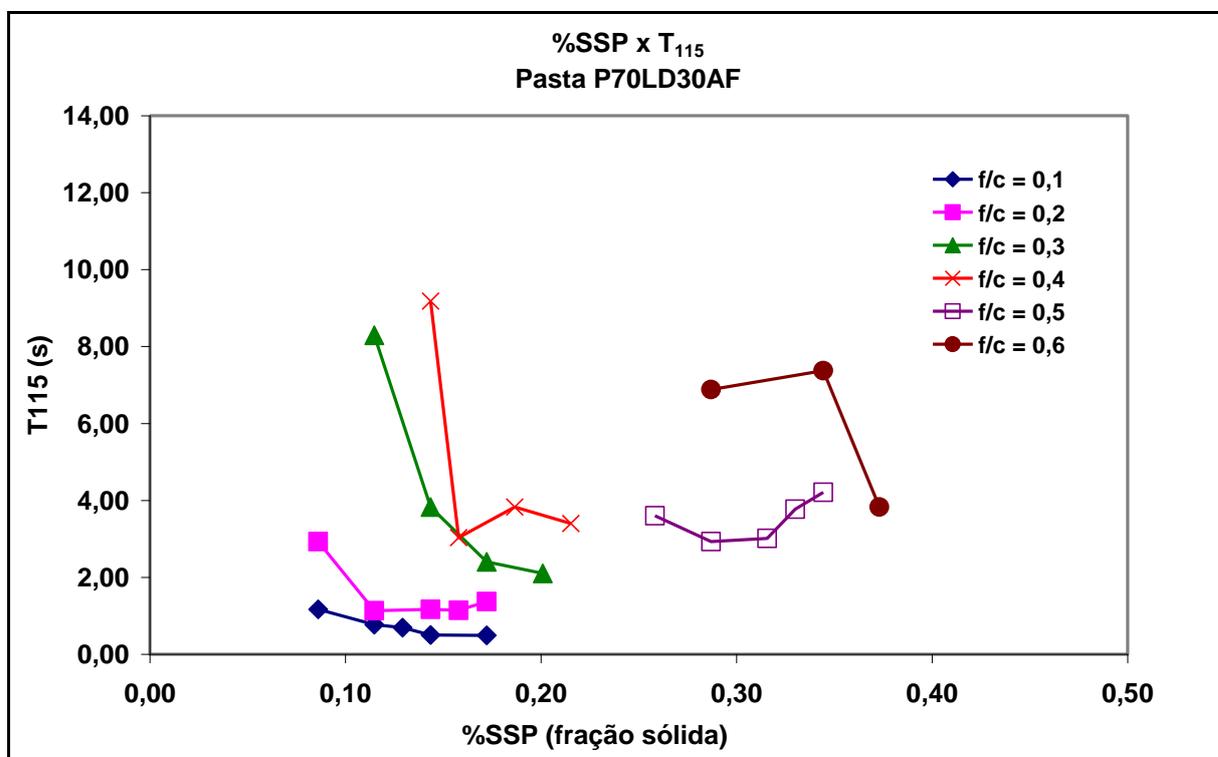


Figura 4.12 - Gráfico %SSP x T₁₁₅ (P70EALD30EGAF).

Observa-se no gráfico da Figura 4.11 que as amostras de P70EALD30EGAF apresentaram pontos de dosagem ótima de superplastificante melhores definidos que as pasta P100EALD, aproximando-se mais do ângulo de $140^\circ \pm 10^\circ$ estabelecido por Gomes (2002).

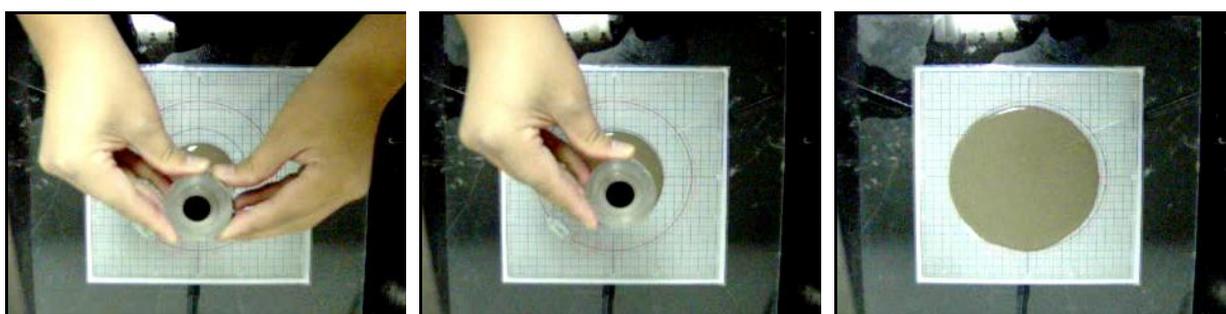
Para as pastas com relação fíler/cimento de 0,10 e 0,20, os pontos de saturação do superplastificante na fração sólida foram de 0,14 (%SP de 0,50) e 0,16 (%SP de 0,55), respectivamente, não apresentando após estes pontos maior fluidez ou deformabilidade. Os tempos T_{115} foram de 0,50 e 1,14 segundos e diâmetros de espalhamento foram de 197, 0 e 192 mm, bastante distantes dos valores estabelecidos por Gomes (2002).

A pasta com 30% de fíler em relação a massa de cimento apresentou dosagem ótima em 0,17% de fração sólida de superplastificante, com um ângulo de $136,5^\circ$. Apesar disso, o diâmetro de espalhamento final não alcançou a faixa dos 180 ± 10 mm, estando em torno de 165 mm. Já o T_{115} apresentou um valor de 2,40 segundos correspondendo aos critérios de Gomes (2002).

O ponto de saturação da pasta com f/c de 0,40 ocorreu em 0,19% da fração sólida de superplastificante, isto é, 0,65% do total de aditivo. Os valores de mini-*slump* e T_{115} para esta pasta foram de 157 mm e 3,83 segundos.

Na pasta com f/c de 0,50 a dosagem ótima foi em 0,32% (%SP=1,10) e apresentou um espalhamento de 176 mm e tempo T_{115} de 3,01 segundos, sendo concordante com os valores propostos por Gomes (2002) e, por isso foi definida como a pasta ideal.

A Figura 4.13 ilustra o procedimento de execução do ensaio de mini-*slump* para a pasta tida como ideal.



(a) início do espalhamento (b) Medida do T_{115} (c) espalhamento final.
Figura 4.13 - Seqüência de obtenção dos valores de T_{115} e espalhamento final para P70EALD30EGAF.

4.2.3 Pasta P85EALD15CV

Nas Figuras 4.14 e 4.15 apresentam-se as curvas das pastas P85EALD15CV com relações fíler/cimento variando de 0,10 a 0,50.

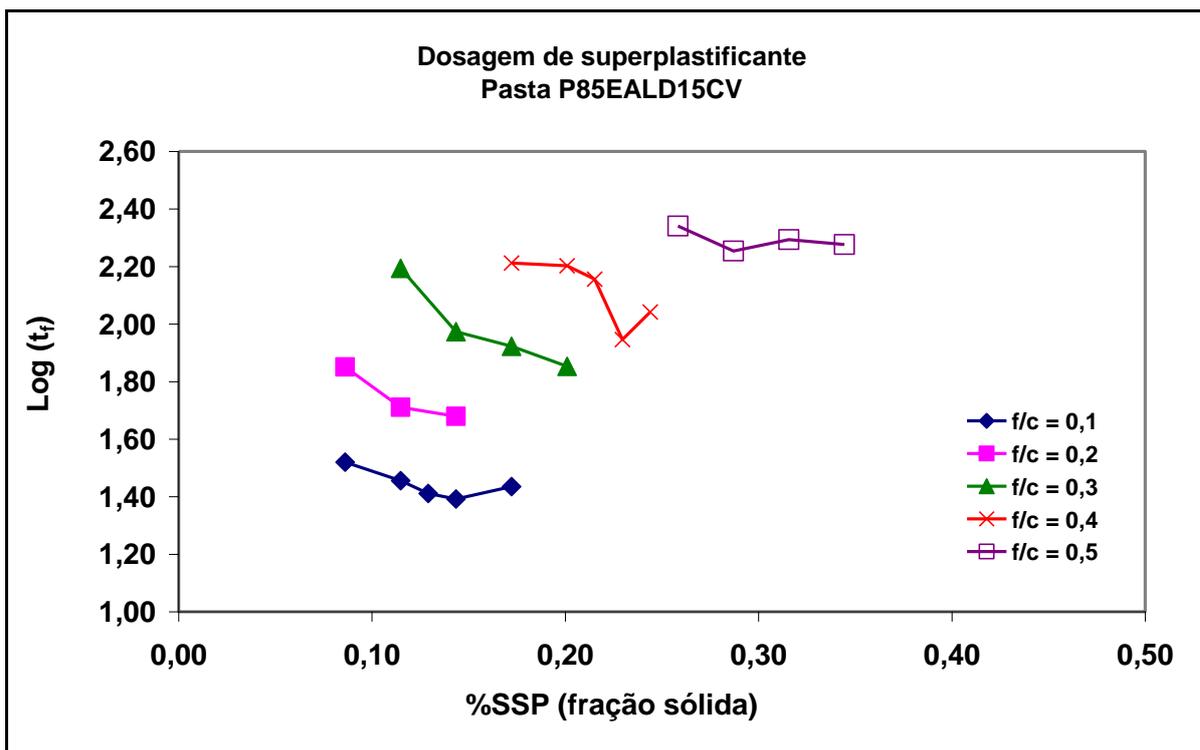


Figura 4.14 – Gráfico da dosagem de superplastificante (P85EALD15CV).

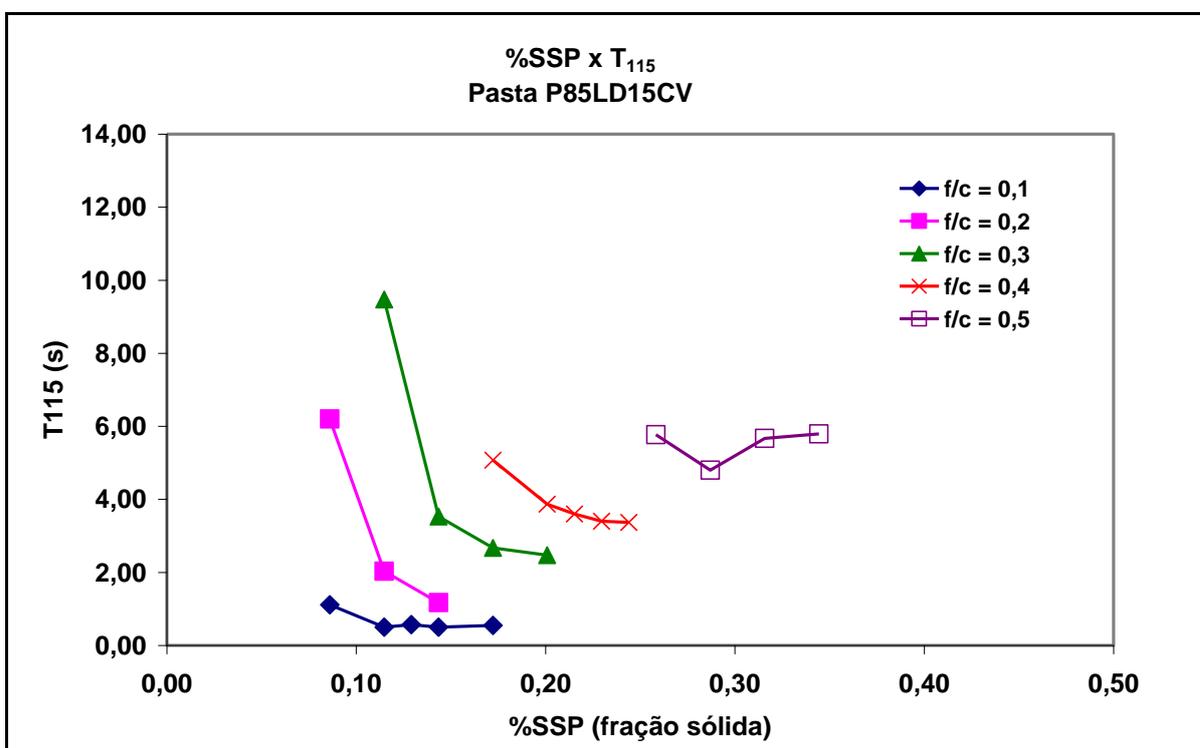


Figura 4.15 - Gráfico %SSP x T₁₁₅ (P85EALD15CV).

De acordo com o gráfico da Figura 4.14 as pastas com relações f/c de 0,10 e 0,20 apresentaram dosagem ótima de superplastificante em 0,14 e 0,11% de fração sólida,

respectivamente. No ensaio de *mini-slump* (Figura 4.15) os espalhamentos finais foram de 196 e 152 mm e tempos T_{115} de 0,50 e 2,03 segundos.

Para a pasta com f/c de 0,30 o ponto de saturação ocorreu em 0,14% (fração sólida), com um *slump* de 154 mm e T_{115} de 3,52 segundos. Já para pasta com f/c de 0,40 a dosagem ótima de superplastificante foi em 0,23% (fração sólida), correspondendo a um teor total de 0,80% de aditivo. Nesta pasta, o espalhamento foi de 163 mm e o tempo T_{115} de 3,40. No entanto, nota-se que além do *slump* não ter atingido a faixa de valores proposta por Gomes (2002), o gráfico 4.14 apresenta uma discrepância neste ponto, provavelmente devido algum erro na dosagem do aditivo. Dessa forma, optou-se por considerar o ponto de saturação em 0,24 % da fração sólida, com espalhamento de 176 mm e T_{115} de 3,37 segundos. Essa pasta foi tida como a ideal e é mostrada na Figura 4.16.



Figura 4.16 - Sequência de obtenção dos valores de T_{115} e espalhamento final para P85EALD15CV.

4.2.4 Pasta P100CAL

Na Figura 4.17, apresentam-se às curvas das pastas P100EALD com relações f/c de 0,10 a 0,60, dos ensaios de cone de Marsh e na Figura 4.18 as curvas com as mesmas relações f/c para os ensaios de *mini-slump*.

De acordo com o gráfico da Figura 4.17 as pastas com relações f/c de 0,10 e 0,20 apresentaram dosagem ótima de superplastificante nas porcentagens de 0,13 (%SP=0,45) e 0,14 (SP=0,50), respectivamente. Ambas obtiveram nesta dosagem diâmetros de espalhamento e T_{115} (Figura 4.18) muito distantes dos parâmetros estabelecidos por Gomes(2002), que foram de 205 e 196 mm e 0,70 e 1,84 segundos.

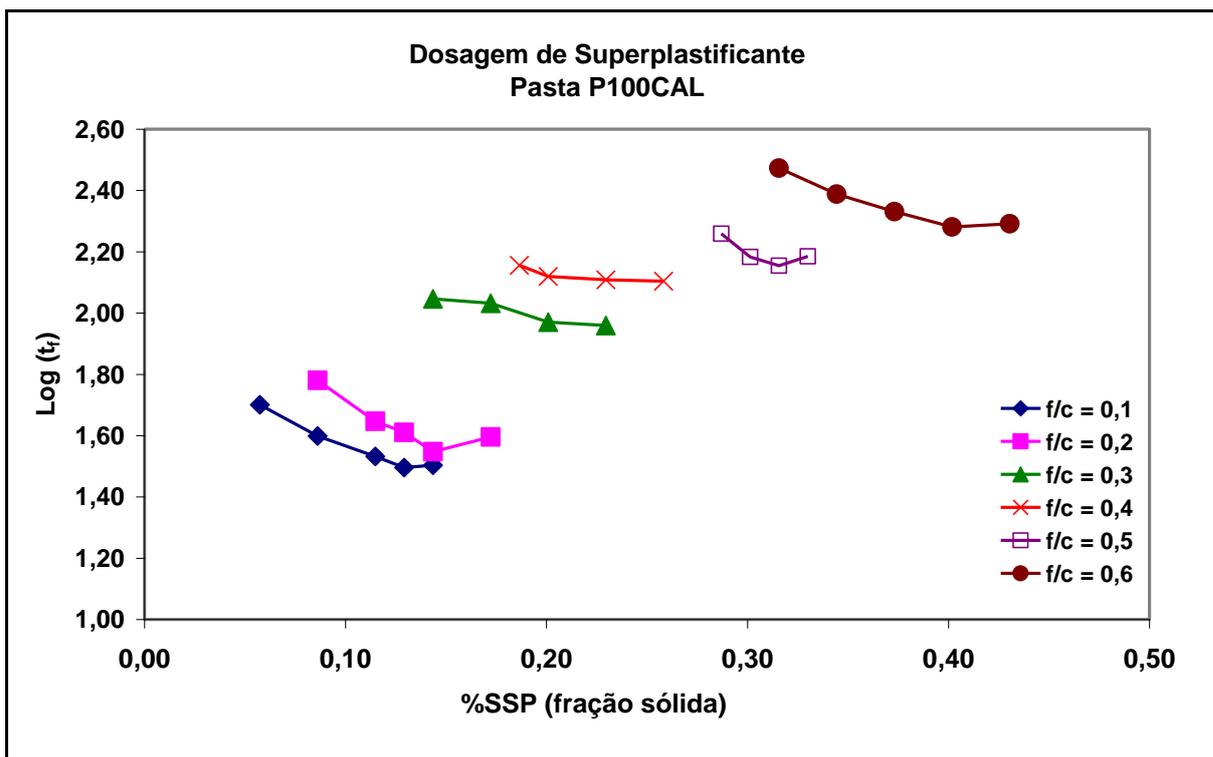


Figura 4.17 - Gráfico da dosagem de superplastificante (P100CAL).

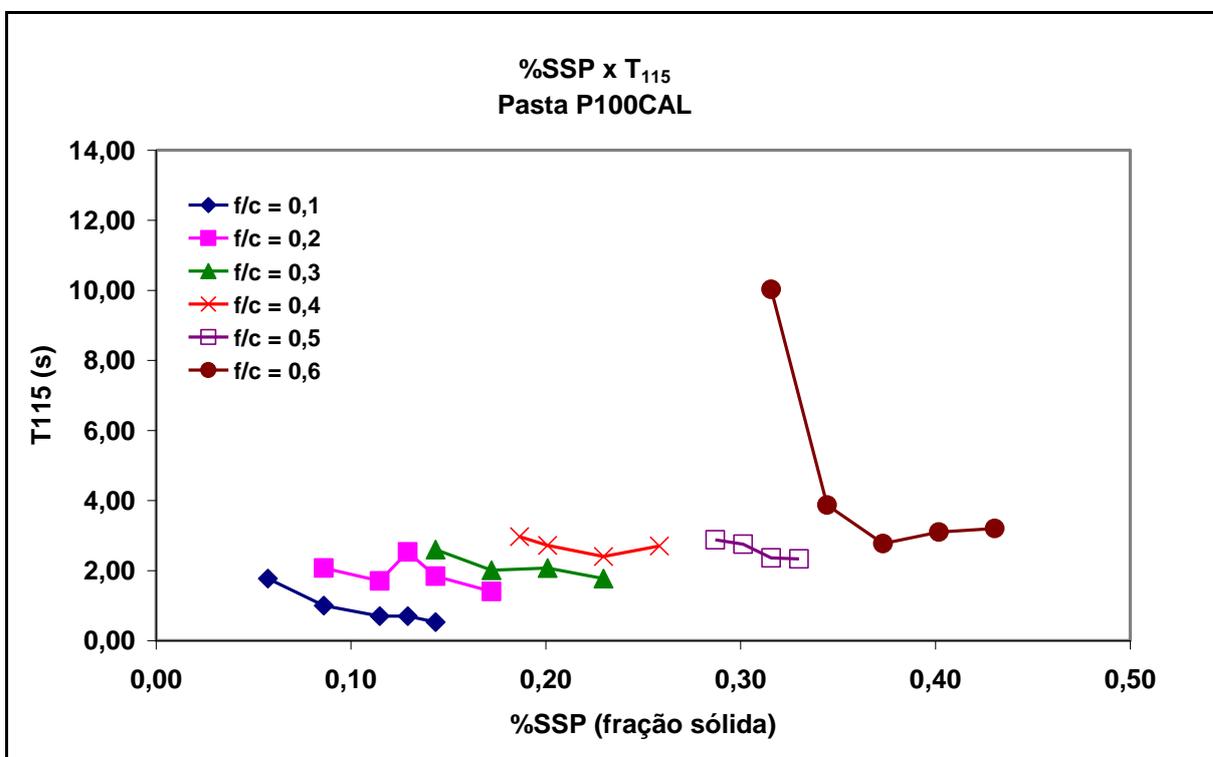
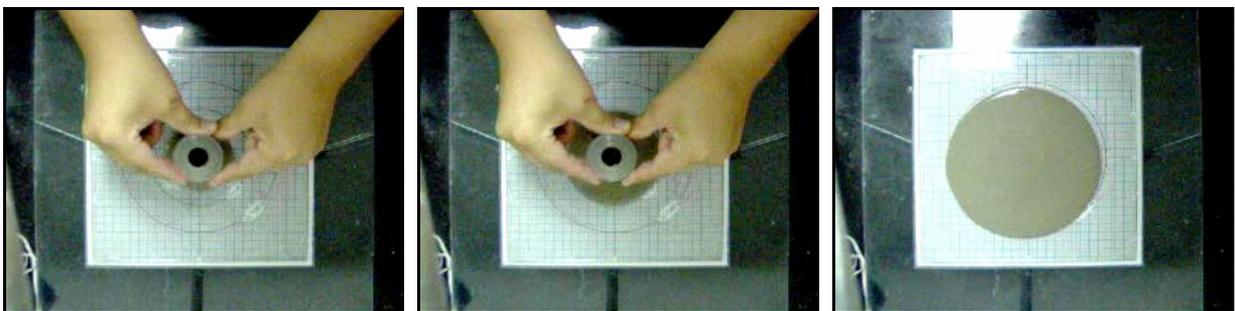


Figura 4.18 - Gráfico %SSP x T₁₁₅ (100CAL).

O ponto de saturação da pasta P100CAL com 0,30 de teor de filler ocorreu em 0,20% da fração sólida de superplastificante, apresentando neste ponto um *slump* de 201 mm e tempo T_{115} de 2,07.

Para a pasta com relação f/c de 0,40 a dosagem ótima de superplastificante ocorreu em 0,20 % da fração sólida (%SP=0,70), em um ângulo de 150°. O diâmetro de espalhamento final foi de 184 mm e o T_{115} de 2,72 segundos. Todos os valores apresentados neste ponto satisfizeram os parâmetros da metodologia de Gomes (2002).

A pasta com relação f/c de 0,50 apresentou o ponto de saturação em 0,30 % da fração sólida (%SP = 1,05) e diâmetro de espalhamento final de 190 mm. O T_{115} foi de 2,75 segundos. Embora todos os valores obtidos para esta pasta estejam dentro dos parâmetros estabelecidos por Gomes (2002), optou-se por adotar como pasta ideal aquela que apresentou dosagem ótima de superplastificante em 1,00%, *slump* de 182mm e T_{115} de 2,88 segundos. Essa escolha foi feita porque esta pasta apresentou valores mais consistentes. A Figura 4.19 ilustra a obtenção dos resultados do ensaio de mini-*slump* para a P100CAL otimizada.



(a) início do espalhamento

(b) Medida do T_{115}

(c) espalhamento final.

Figura 4.19 - Seqüência de obtenção dos valores de T_{115} e espalhamento final para P100CAL.

4.2.5 Pasta 100CIM

O ensaio de cone de Marsh na pasta com composição de apenas cimento e aditivo foi realizado a fim de se verificar a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento. Os resultados desse ensaio são mostrados no gráfico da Figura 4.20.

Nota-se através do gráfico que após a dosagem de 0,20% de superplastificante a pasta P100CIM não apresenta modificação de fluidez, situando no tempo final de escoamento de aproximadamente 25 segundos. Dessa forma, este ponto é estabelecido como ponto de saturação da pasta com cimento, que também apresenta um ângulo de 136, 3°.

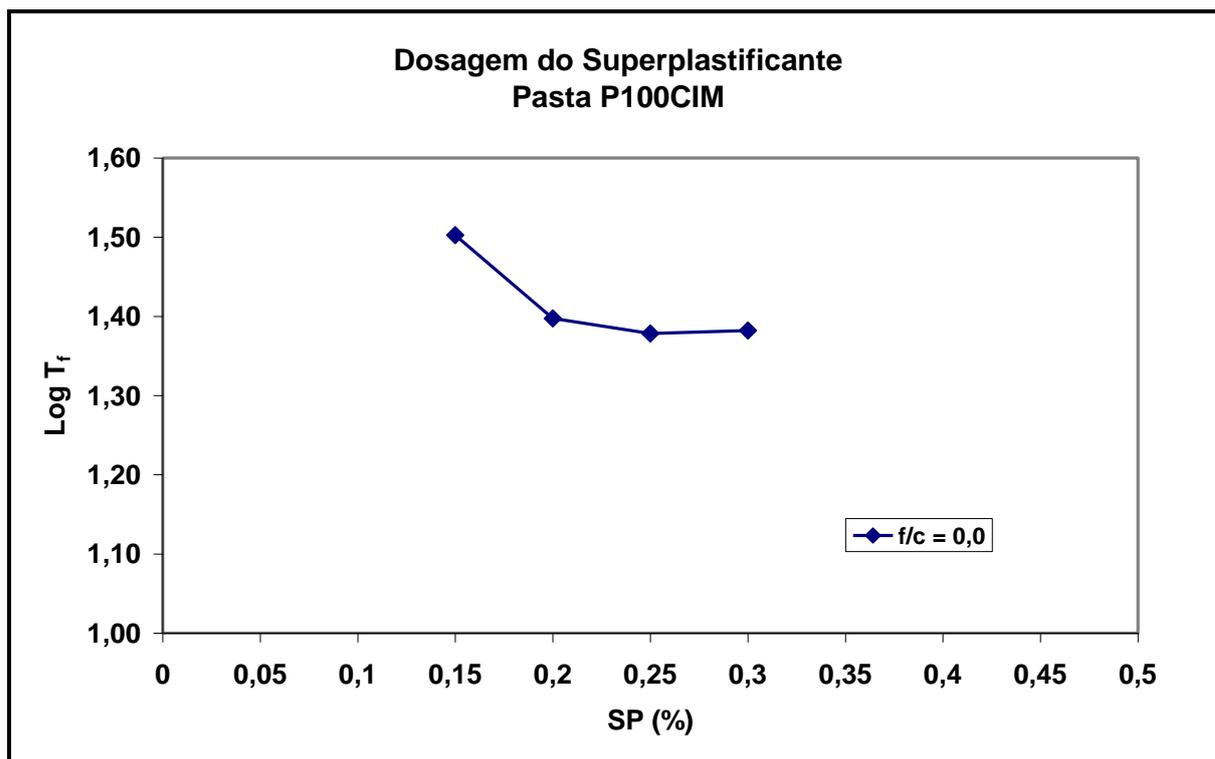


Figura 4.20 - Gráfico da dosagem de superplastificante (P100CIM).

4.2.6 Comparação dos resultados

De acordo com os resultados obtidos no ensaio do cone de Marsh, observou-se que o aumento da relação fíler/cimento (f/c) aumentou a demanda do superplastificante em todas as adições estudadas estando de acordo com o trabalho de Gomes (2002). Foram considerados como fator de corte os pontos (f/c) com tempo de escoamento superior a 300s e fluxo descontínuo no cone de Marsh. Ainda segundo Gomes (2002), as pastas ideais para a produção de concretos auto-adensáveis devem apresentar um diâmetro final de espalhamento no *mini-slump* de 180 ± 10 mm e $T_{115} = 3 \pm 1$ s.

A Figura 4.21 apresenta o aumento da dosagem de saturação do superplastificante ao se aumentar o teor de finos na pasta. A adição de finos na pasta de cimento aumenta a sua coesão fazendo com que o ponto de saturação do superplastificante varie. Contudo, pode-se verificar que estes pontos de saturação para as pastas estudadas são próximos, concordando com o estudo de finos, que apresentou a sensibilidade à água destas misturas também muito semelhantes.

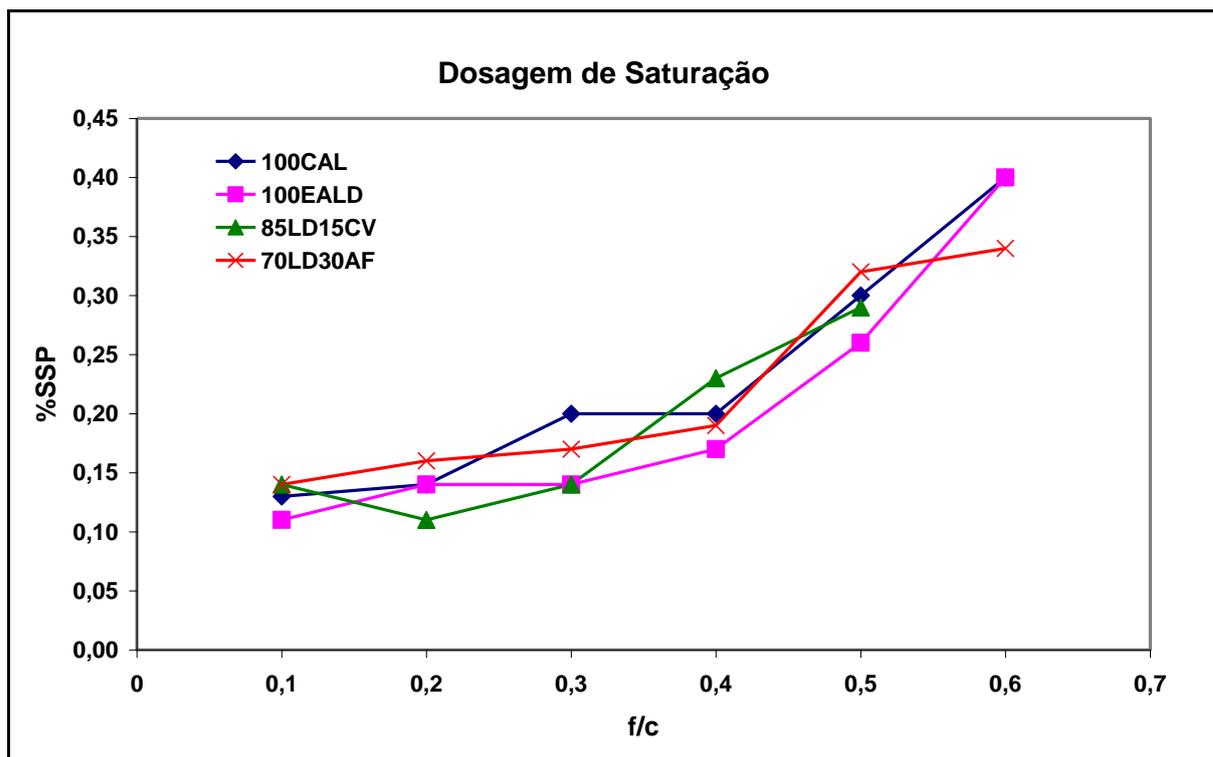


Figura 4.21 – Dosagem de saturação das pastas.

Para relações f/c de 0,1 a 0,2 a pasta que fluiu mais lentamente foi a composta por fíler calcário (Figura 4.22d), estando de acordo com o estudo de finos, que apresentava esta adição como a menos sensível à água. As demais adições (100EALD, 85LD15CV, 70LD30AF) apresentaram tempos de fluidez bem próximos como é apresentado nas Figuras 4.22(a-c).

Observa-se que existe uma tendência a estabilização ou aumento no T_{115} após a dosagem de saturação do superplastificante. Verificou-se também ao longo da pesquisa, que em fatores f/c maiores que 0,5 ao se incrementar a dosagem de superplastificante, conduzem a um aumento no espalhamento final das pastas, entretanto, os valores de T_{115} , não reduzem significativamente. Os gráficos das Figuras 4.22 e 4.23 ilustram, de forma mais clara, a comparação dos resultados para a relação f/c e dosagem ótima de superplastificante. As pastas que irão compor os concretos auto-adensáveis da pesquisa são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Pastas selecionadas.

Adição	f/c	%SP	D_{FMC} (mm)	T_{115} (s)
P100EALD	0,5	1,10	181	3,37
P85LD15CV	0,4	0,85	176	3,37
P70EALD30EF	0,5	1,15	181	3,77
P100CAL	0,5	1,00	182	2,88

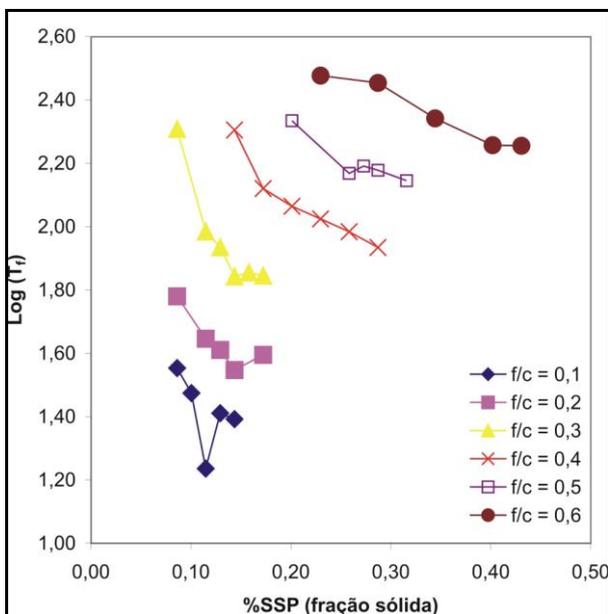


Figura 22 (a) – Gráfico da Dosagem de superplastificante (P100EALD)

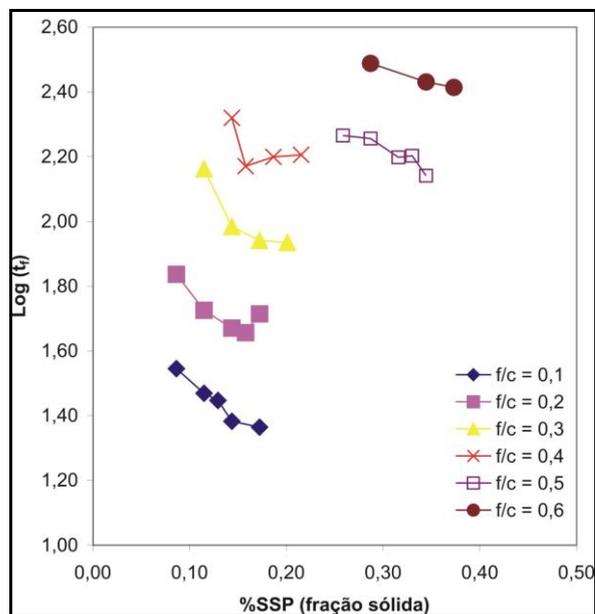


Figura 22(b) -Gráfico da Dosagem de superplastificante (P70EALD30EGAF)

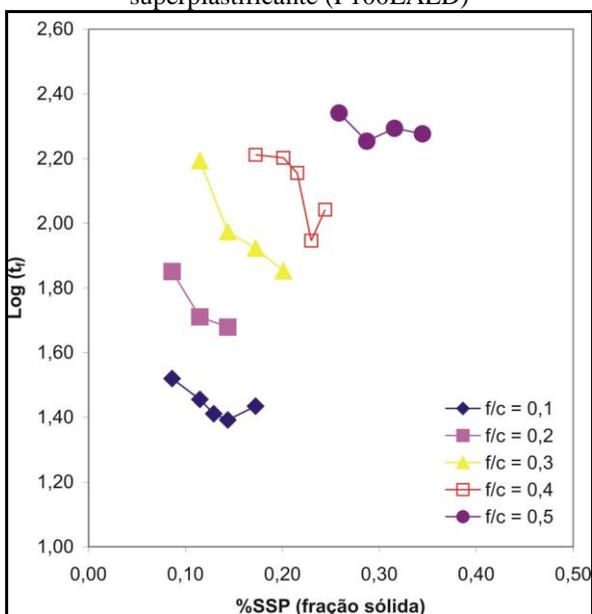


Figura 22(c) - Gráfico da Dosagem de superplastificante (P85LD15CV)

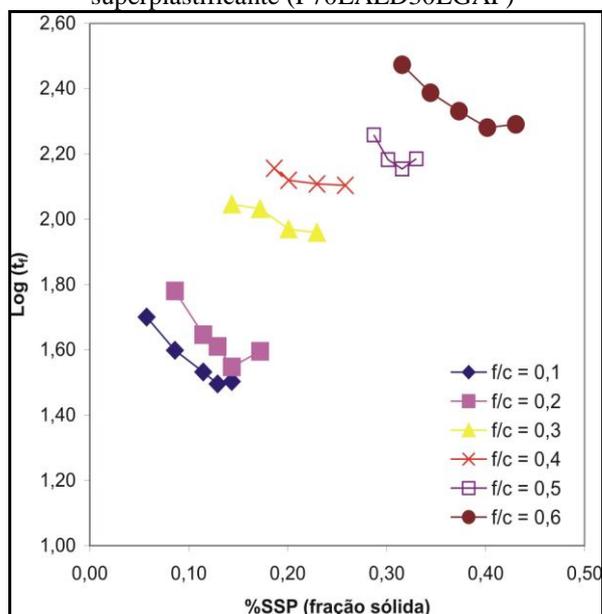


Figura 22(d) – Gráfico da Dosagem de superplastificante (P100CAL)

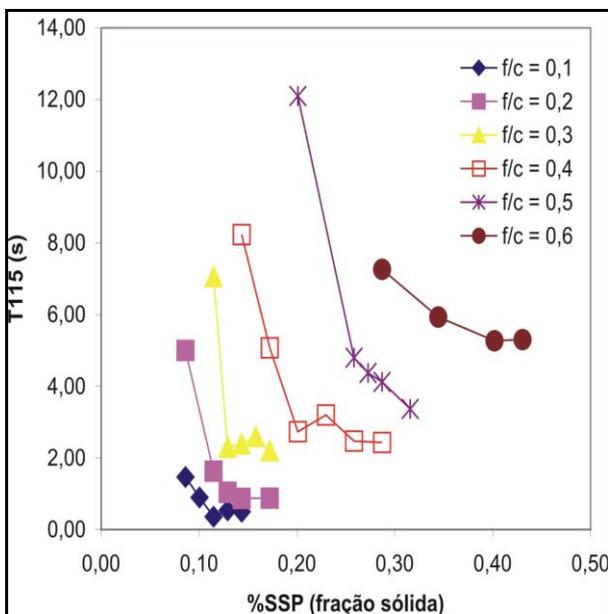


Figura 23(a) – Gráfico %SP x T_{115} (P100EALD).

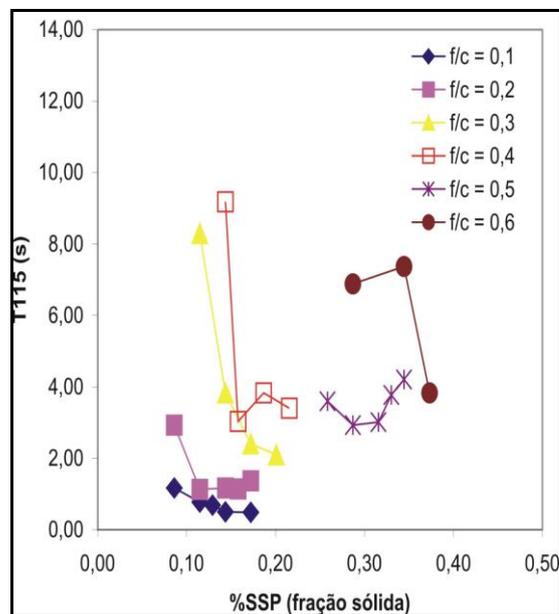


Figura 23(b) – Gráfico %SP x T_{115} (P70EALD30EGAF).

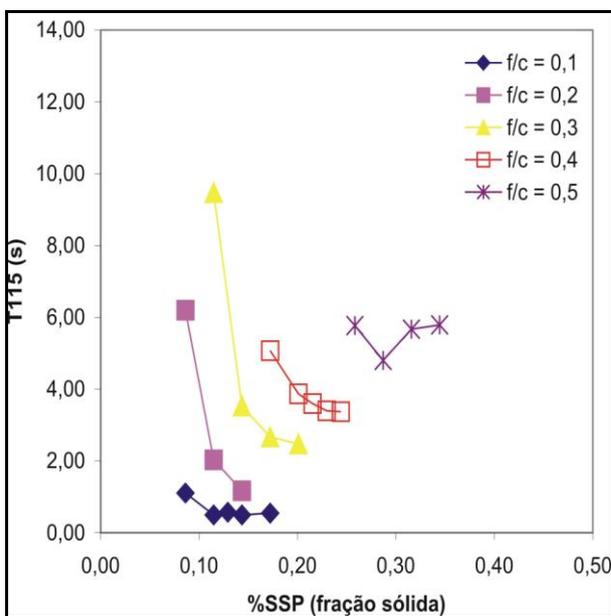


Figura 23(c) – Gráfico %SP x T_{115} (P85EALD15CV).

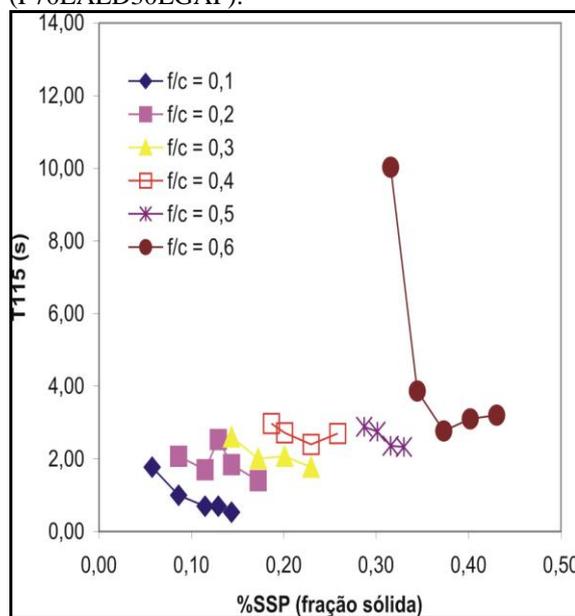


Figura 23(d) – Gráfico %SP x T_{115} (P100CAL).

4.3 Argamassas

Como já mencionado no Capítulo 3 houve a necessidade de adequação da relação f/c e dosagem de superplastificante obtidas na fase de otimização da pasta. Este procedimento evitou a fabricação de uma quantidade demasiada de concreto. É importante salientar novamente que para a obtenção dos concretos de melhor características de auto-adensamento várias modificações foram feitas ao longo da pesquisa

Dessa forma, os traços dos concretos foram calculados para teores de pastas que variavam de 38% a 44%, realizando-se os ensaios de o cone de consistência e o funil V para as argamassas presentes nestes concretos com os teores de pastas especificados. Verificou-se que as pastas selecionadas inicialmente (Tabela 4.7) não atendiam aos parâmetros propostos neste estudo. A opção tomada foi reduzir a relação f/c , pois as argamassas apresentavam coesão e viscosidade excessiva, o que caracterizaria o mesmo comportamento no concreto.

Dessa forma, optou-se por reduzir f/c de 0,5 para 0,4 e recalculou o traço dos concretos para esta relação, além de utilizar a dosagem de saturação do aditivo superplastificante para a pasta correspondente. O processo foi repetido e verificou-se que as argamassas obtidas não atendiam ao espalhamento especificado, o que resultou num incremento da dosagem de aditivo superplastificante. Este procedimento foi feito até que os parâmetros de fluidez e espalhamento fossem atendidos. É importante ressaltar a preocupação quanto a possibilidade de segregação das argamassas, contudo isto não foi verificado para os teores de aditivo utilizados para a produção dos concretos. Neste trabalho serão apresentados na Tabela 4.8 apenas os resultados das argamassas produzidas com a adição 100EALD com relação $f/c=0,4$ (Figura 4.24).

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios em ARG100EALD.

% Pasta	%SP = 0.85		%SP = 1.20	
	Espalhamento (mm)	Tesc (s)	Espalhamento (mm)	Tesc (s)
38	145	> 30s	236	12.9
40	168	> 30s	260	10.9
42	187	> 30s	273	8.3
44	201	> 30s	298	7.1

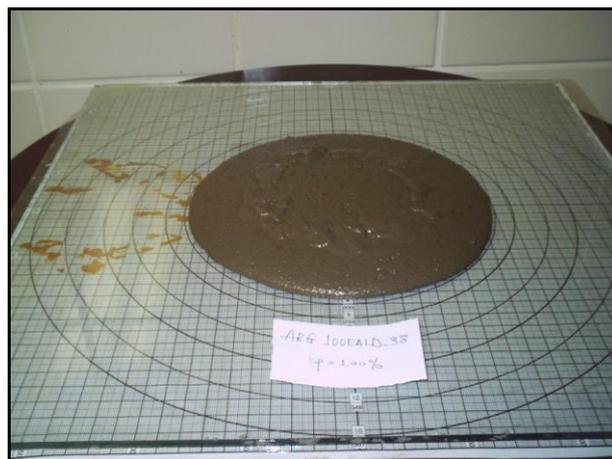


Figura 4.24 – Ensaio de espalhamento para ARG100EALD com 38% de pasta.

4.4 Concretos

4.4.1 Esqueleto Granular

O esqueleto granular foi definido de acordo com a metodologia proposta por Gomes (2002). A relação encontrada para o menor volume de vazios entre a areia (2,4 mm) e a brita (12,5 mm) foi de 50% e 50% como mostra o gráfico da Figura 4.25.

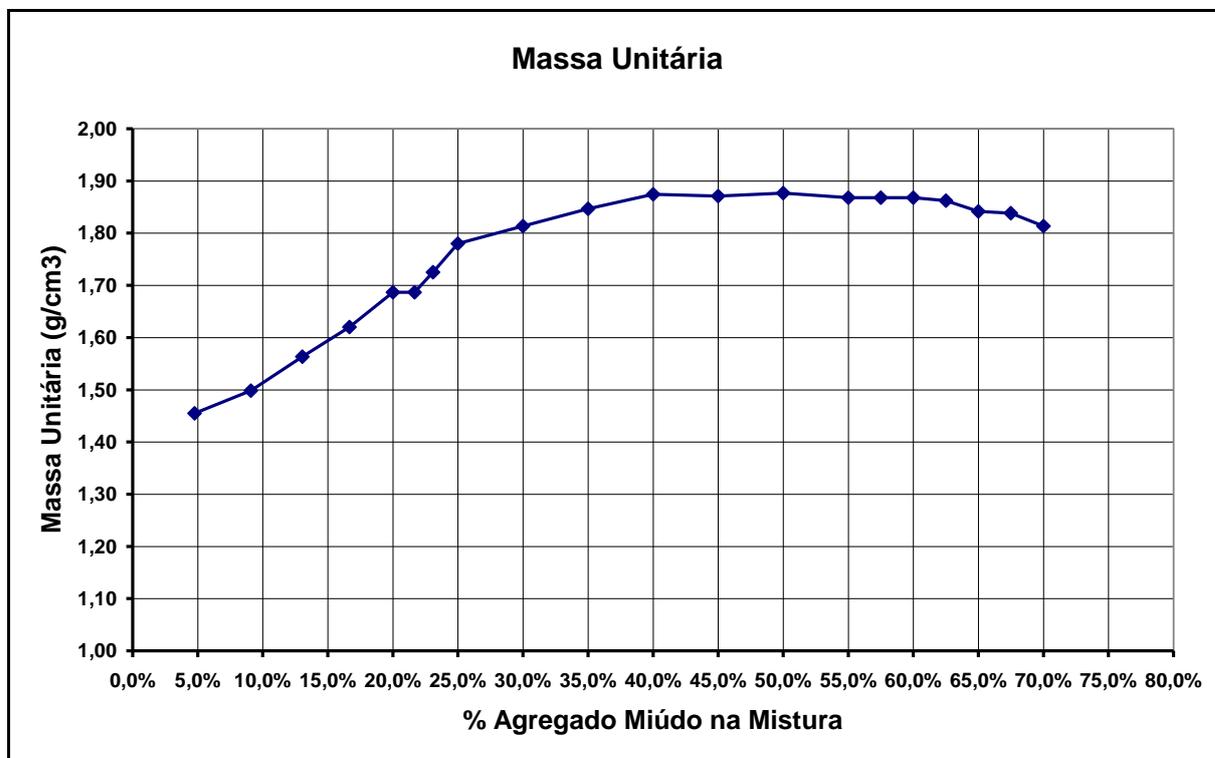


Figura 4.25 – Composição do esqueleto granular

4.4.2 Resultados dos ensaios de auto-adensamento

4.4.2.1 Concretos com 100% de escória de aciaria LD

A Tabela 4.9 apresenta as proporções das misturas em kg/m^3 e os resultados dos ensaios reológicos e resistência à compressão dos concretos fabricados com 100% de escória de aciaria LD como fíler. O teor de pasta nesses concretos variou de 38 a 44% para uma relação f/c de 0,4. A alteração da quantidade de fíler de 0,50 para 0,40 foi determinada conforme já discutido na seção 4.4. Da mesma forma que houve a necessidade da adequação da dosagem de superplastificante de 1,10 (Tabela 4.7) para 1,15 e 1,20.

Tabela 4.9 – Proporções e resultados da mistura com 100%EALD.

Proporções da mistura (kg/m^3)						
Volume de pasta	38		40	42		44
Teor de aditivo	1,15	1,20	1,20	1,15	1,20	1,20
Cimento	471	471	496	520	520	545
Adição 100%EALD	188	188	198	208	208	218
Água adicionada	161	161	169	178	178	186
Aditivo superplastificante	5,41	5,65	5,95	5,98	6,24	6,54
Areia	810	810	783	756	756	729
Brita	810	810	783	756	756	729
Resultados dos ensaios						
Diâmetro de espalhamento (mm)	670	580	750	730	750	760
Tempo de espalhamento T_{50} (s)	2,81	9,03	4,35	4,32	3,88	4,17
Tempo de fluidez do funil V (s)	18,5	49,5	17,19	24,06	17,47	16,9
Anel J com espalhamento	Df (mm)	500	430	690	710	760
	$h_{\text{ext}} - h_{\text{int}}$ (mm)	7,5	24,75	1,25	4	5,75
Caixa L	T_{L20} (s)	1,7	10,6	2	2,4	1,5
	T_{L40} (s)	3,8	18,2	3,4	4,7	2,5
	$RB=h_2/h_1$	0,82	0,59	0,90	0,87	0,89
Caixa U	h_2-h_1 (mm)	32	75	15,5	4,5	14
Tubo U	RS	-	-	-	-	1,20
Caixa de preenchimento (%)	-	-	-	-	-	92,6
Massa específica (kg/m^3)	2457	2463	2457	2416	2418	2425
Ar incorporado (%)	1,75	1,55	1,35	2,10	2,40	1,75
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)						
Cilindros de 100 mm x 200 mm						
Média dos três cilindros	-	-	-	-	74,9	-
Desvio padrão	-	-	-	-	2,1	-

De acordo com a Tabela 4.9 o concreto com 38% de pasta e teor de superplastificante de 1,20 (CONC_38_1,20_0,40) apresentou os resultados menos satisfatórios em todos os ensaios executados. O *slump flow* foi de 580 mm com um T_{50} de 9,03 segundos. No funil V o tempo de fluidez chegou a quase 50 segundos. No ensaio de espalhamento (*slump flow*) em conjunto com o anel J a diferença da altura externa e interna foi de 24,75 mm (Figura 4.26), bastante

superior a recomendada pela literatura que é de no máximo 10mm. Da mesma forma que o diâmetro de espalhamento final com o anel J, foi de 430mm. Os valores obtidos nesses ensaios indicaram uma alta viscosidade do concreto, elevada tensão de cisalhamento e bloqueio do agregado. Nos ensaios da caixa – L e U, os resultados foram igualmente elevados, com um T_{20} de 10,6 segundos e T_{40} de 18,2 segundos, a relação de bloqueio foi de 0,59, indicando novamente que houve bloqueio do agregado nas barras que simulam as armaduras. A diferença das alturas na caixa – U foi de 75 mm, sinalizando também para alta viscosidade e tensão de cisalhamento, bem como menor habilidade de passagem.



Figura 4.26– Ensaio de *slump flow* com anel J para CON100EALD_38_1,20_0,40.

Diminuindo a dosagem de superplastificante de 1,20% para 1,15% os resultados dos ensaios se mostraram mais coerentes com os valores encontrados na literatura. No *slump flow*, por exemplo, o diâmetro de espalhamento final foi de 670 mm e o T_{50} de 2,81 segundos. O tempo de fluidez no funil V foi de 18,5 segundos. Os valores nos ensaios de *slump flow* com anel J e caixa U foram de 500 mm e 7,5 mm de diferença entre alturas. Na caixa – L os resultados de T_{20} e T_{40} foram um pouco superiores aos parâmetros de auto-adensamento, no entanto, se mostraram razoáveis. A relação de bloqueio (RS) foi de 0,82, estando na faixa de valores encontradas por diversos autores.

No concreto com 40% de pasta e 1,20% de superplastificante os valores encontrados para o *slump flow* (Figura 4.27) e T_{50} foram de 750 mm e 4,32 segundos, estando dentro dos parâmetros estabelecidos pela literatura. No ensaio de espalhamento em conjunto com o anel J o espalhamento final foi de 690 mm e a diferença entre as alturas interna e externa ao anel foi de 1,25 mm. O tempo de fluidez do funil V de 17,19 segundos se mostrou um pouco elevado para atingir os parâmetros de auto-adensamento do CAA. No ensaio da caixa – L, os tempos T_{20} e T_{40} tiveram valores bem próximos ao estabelecido pela literatura, e a relação de

bloqueio foi de 0,90, não indicando bloqueio do agregado. Na caixa – U a altura de preenchimento foi de 15,5 mm.



(a) Medida do diâmetro de espalhamento

(b) Espalhamento final.

Figura 4.27 – Ensaio de *slump flow* para CONC100EALD_40_1,20.

Na sequência de concretos com volume de pasta de 42% com 1,15 e 1,20% de teor de aditivo, os resultados do *slump flow* foram de 730 e 750 mm (Figura 4.29a), respectivamente, concordando com os valores encontrados na literatura que vão de 600mm a 800mm. No entanto, no ensaio do funil V a amostra CONC_42_1,15_0,40 apresentou tempo de fluidez foi de 24,06 segundos, indicando alta viscosidade, elevada tensão de cisalhamento e tendência ao bloqueio do agregado, enquanto a amostra CONC_42_1,20_0,40 apresentou um valor mais razoável que foi de 17,47 segundos. No ensaio de espalhamento com anel J, os valores foram de 710 mm (Figura 4.28) e 740 mm, ambos superiores ao valor do *slump* sem o anel J, menos 50 mm.



(a) Medida da altura externa

(b) Diâmetro final de espalhamento.

Figura 4.28 – Execução do ensaio *Slump flow* com anel J para CON100EALD_42_1,15.

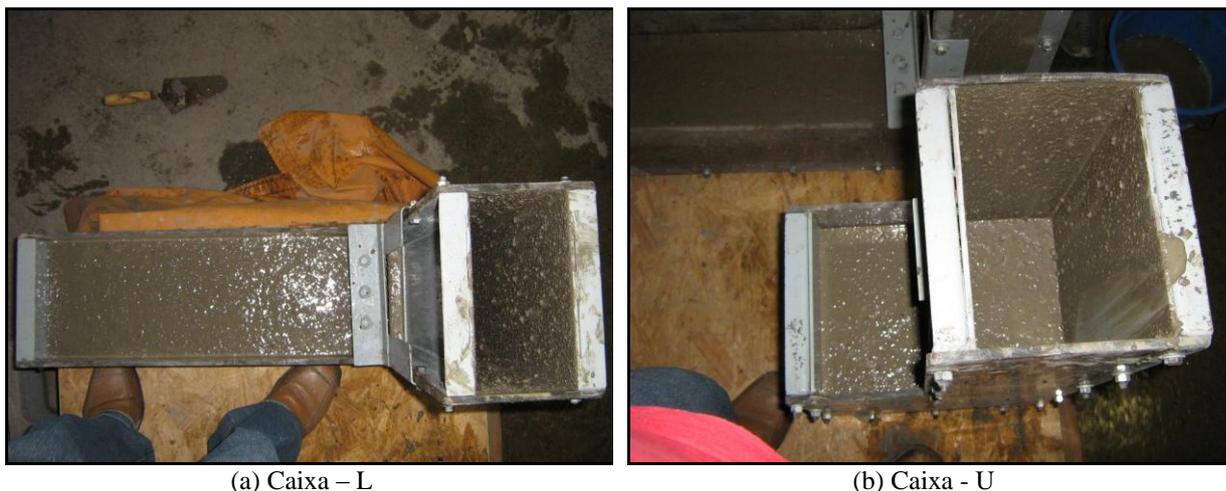
Na caixa – L, os tempos T_{20} foram de 2,40 segundos para ambos e T_{40} de 4,7 e 4,3 segundos respectivamente. As relações de bloqueio encontradas foram de 0,87 e 0,89 (Figura 4.29b), respectivamente, estando esses últimos valores dentro da faixa que é de 0,80 a 1,00. A caixa – U mostrou resultados de 4,5 e 7 mm, que indicam que não houve bloqueio do agregado.



Figura 4.29 – Resultado do ensaio de espalhamento e caixa – L para CON100EALD_42_1,20_0,40.

O concreto com 44% de teor de pasta e 1,20% de superplastificante apresentou-se satisfatório, atingindo os parâmetros de auto-adensamento. O diâmetro final de espalhamento nesse concreto foi de 760 mm e o tempo de fluidez no funil V foi de 16,90 segundos. Esses valores foram determinantes para adotar este concreto como o ideal e assim, realizar a segunda sequência de ensaios que é composta pelo caixa de preenchimento e o tubo U.

Os demais resultados obtidos nos outros ensaios demonstraram as excelentes propriedades de auto-adensamento, como por exemplo, um T_{20} e T_{40} de 1,5 e 2,5 segundos e relação de bloqueio igual a 1 (Figura 4.30a), indicando que a amostra de concreto fluiu perfeitamente. Na caixa – U (Figura 4.30b) houve uma diferença de alturas de 14 mm, mostrando que não houve bloqueio do agregado.



(a) Caixa – L
(b) Caixa - U
Figura 4.30 – Resultados dos ensaios de Caixa L e U para CONC_44_1,20_0,40.

Nos ensaios da caixa de preenchimento (Figura 4.31) e tubo U, a amostra do concreto apresentou uma porcentagem de preenchimento de 92,6% e relação de segregação de 1,20. Para certificação dos resultados da relação de segregação no tubo U foi elaborada a Tabela 4.10 que mostra a taxa de agregados por partes retiradas do tubo U. Nota-se que a taxa de agregado situou-se em 23% de agregados por cada parte, com exceção da parte 4 que foi de quase 26%. Com a igualdade entre essas taxas pode-se concluir que o agregado ficou bem distribuído ao longo do tubo U.



Figura 4.31 – Ensaio da caixa de preenchimento.

Tabela 4.10 – Taxa de agregado para o concreto com 100EALD.

	Massa agreg. + arg (Kg)	Massa agreg. saturado (Kg)	RS	Taxa de agreg. (%)	Massa agreg. seco (Kg)	RS	taxa agreg. (%)
Parte 1	4.537,6	1.023,2	1,21	22,55	1.013,5	1,21	22,33
Parte 2	3.630,8	846,8	1,47	23,32	838,3	1,47	23,1
Parte 3	2.967,3	694,6	1,06	23,41	686,5	1,04	23,31
Parte 4	3.774,6	979,0		25,9	974,0		25,8

4.4.2.2 Concretos com 70% de escória de aciaria LD e 30% de escória de alto-forno

Após o estudo realizado nas argamassas com a composição de 70% de escória de aciaria LD e 30% de escória granulada de alto-forno houve a necessidade da modificação dos traços do concreto. Novamente o teor de fíler foi alterado de 0,50 para 0,40 e a porcentagem de aditivo foi elevada para 1,35%. Na Tabela 4.11 são mostradas as proporções e resultados dos ensaios nos concretos com essas adições.

Tabela 4.11 – Proporções e resultados da mistura com 70%EALD30%EGAF.

Proporções da mistura (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	38	40	42
Teor de aditivo	1,35	1,35	1,35
Cimento	469	493	518
Adição 70%EALD	131	138	145
Adição 30%EGAF	56	59	62
Água adicionada	160	168	176
Aditivo superplastificante	6,33	6,66	6,99
Areia	810	783	756
Brita	810	783	756
Resultados dos ensaios			
Diâmetro de espalhamento (mm)	780	810	790
Tempo de espalhamento T ₅₀ (s)	7,94	5,07	4,59
Tempo de fluidez do funil V (s)	32,7	30,1	14,8
Anel J com espalhamento	Df (mm)	820	760
	h _{int} -h _{ex} (mm)	2,25	0,5
Caixa L	T _{L20} (s)	4	2
	T _{L40} (s)	7	3
	RB=h ₂ /h ₁	0,95	0,97
Caixa U	h ₂ -h ₁ (mm)	15	7,5
Tubo U	RS	-	0,82
Caixa de preenchimento (%)	-	-	99,62
Massa específica (kg/m ³)	2429	2420	2435
Ar incorporado (%)	2,65	2,30	1,65
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)			
Cilindros de 100 mm x 200 mm			
Média dos três cilindros	-	-	82,3
Desvio padrão	-	-	0,4

Novamente o concreto com um teor de pasta de 38% apresentou os resultados menos satisfatórios, caracterizados, principalmente por tempos de fluidez elevados nos ensaios de funil V (32,7 segundos), T₅₀ (7,94 segundos) e T₂₀, T₄₀ de 4 e 7 segundos. Tanto o diâmetro de espalhamento com e sem o anel J se mostraram dentro da faixa de valores recomendados na literatura, sendo esses valores de 780 e 820 mm (Figura 4.32), respectivamente. A relação de bloqueio na caixa – L foi de 0,95, indicando que o concreto fluiu sem obstrução do

agregado. Na caixa U a diferença entre as alturas de preenchimento foi de 15 mm, sinalizando que não houve bloqueio dos agregados nas barras do aparato.

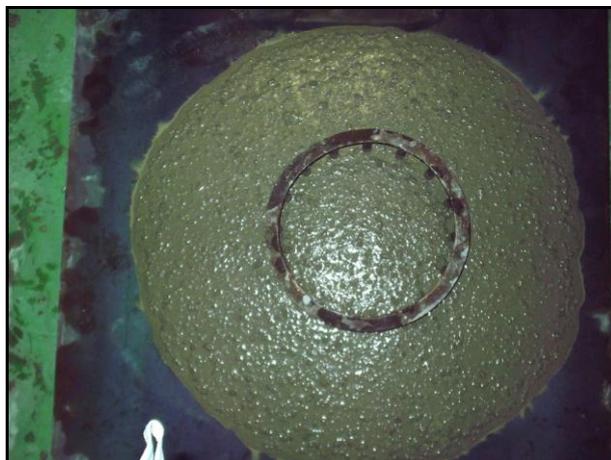


Figura 4.32 – *Slump flow* com anel J de CON70EALD30EGAF_38_1,35_0,40.

O concreto com percentual de pasta de 40% também não se apresentou com bons parâmetros de auto-adensamento nos ensaios que medem tempo de fluidez. No funil V, por exemplo, a tempo de escoamento foi de 30,10 segundos, indicando alta viscosidade da pasta e elevada tensão de cisalhamento. O T_{50} foi de 5,07 segundos e os tempos T_{20} e T_{40} de 2 e 6 segundos, sendo esse último valor bastante elevado. O *slump flow* foi de 810 mm e com o anel J (Figura 4.33a) este valor foi de 740 mm, com uma diferença de altura interna e externa próxima aos 10 mm (7,25 mm). Tanto a relação de bloqueio na caixa – L como a diferença de altura de preenchimento na caixa-U (Figura 4.33b) foram satisfatórias e indicaram que não houve obstrução do agregado.



(a) *Slump flow* com anel J



(b) Caixa U

Figura 4.33 – Ensaios no concreto CON70EALD30EGAF_40_1,35.

Elevando o teor de pasta para 42% melhores resultados nos ensaios reológicos foram encontrados. O diâmetro de espalhamento final foi de 790 mm (Figura 4.34a) e T_{50} de 4,59

segundos. O tempo de fluidez no funil – V foi o menor encontrado entre os demais concretos (14,8 segundos), levando a escolha do concreto composto com esse teor de pasta como o ideal. O diâmetro de espalhamento com anel J foi de 760mm e diferença de alturas interna e externa de 0,50 mm (Figura 4.34b).



(a) Diâmetro de espalhamento

(b) *Slump flow* com anel J.

Figura 4.34 – *Slump flow* e *slump flow* com anel J para CONC70EALD30EGAF_42_1,35_0,40.

O resultado da relação de segregação do tubo U (Figura 4.35a) foi menor que 0,90, porém calculando-se a taxa de agregados (massa do agregado/massa do agregado+argamassa) das amostras retiradas do tubo U verificou-se que as partes 1, 2 e 3 apresentaram uma taxa em torno de 25% (Tabela 4.12). Do mesmo modo, a porcentagem de preenchimento (Figura 4.35b) para este concreto foi excelente, ficando bem próxima aos 100%.



(a) Caixa de preenchimento

(b) Tubo U

Figura 4.35– Ensaio realizado no concreto CON70EALD30EGAF_42_1,35.

Tabela 4.12 – Taxa de agregado para o concreto com 70EALD30EGAF.

	Massa agreg. + arg (Kg)	Massa agreg. saturado (Kg)	RS	Taxa de agreg. (%)	Massa agreg. seco (Kg)	RS	taxa agreg. (%)
Parte 1	4.249,5	1.075,6	0,86	25,31	1.005,5	0,85	23,66
Parte 2	4.524,7	1.239,6	0,82	27,4	1.171,8	0,82	25,9
Parte 3	4.901,6	1.303,4	0,87	26,6	1.220,0	0,87	24,9
Parte 4	4.515,1	1.224,6		27,12	1.152,8		25,53

4.4.2.3 Concretos com 85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante

Os teores de pasta nos concretos com 85% de escória de aciaria LD e 15% de cinza volante variaram de 38 a 42% como mostra a Tabela 4.13. A relação f/c foi mantida da Tabela 4.7, isto é, 0,40. Entretanto o teor de superplastificante foi alterado para 1,35%.

Tabela 4.13 – Proporções e resultados da mistura com 85%EALD15%CV.

Proporções da mistura (kg/m³)				
Volume de pasta		38	40	42
Teor de aditivo		1,35	1,35	1,35
Cimento		470	494	519
Adição 85%EALD		160	168	176
Adição 15%EGAF		28	30	31
Água adicionada		160	168	177
Aditivo superplastificante		6,34	6,67	7
Areia		810	783	756
Brita		810	783	756
Resultados dos ensaios				
Diâmetro de espalhamento (mm)		690	760	820
Tempo de espalhamento T ₅₀ (s)		8,1	7,62	4,51
Tempo de fluidez do funil V (s)		49,7	23,5	16,5
Anel J com espalhamento	Df (mm)	660	720	820
	H _{int} -H _{ext} (mm)	8,5	3	0,4
Caixa L	T _{L20} (s)	4	2	2
	T _{L40} (s)	9	4	4
	RB=h ₂ /h ₁	0,88	1	0,96
Caixa U	h ₂ -h ₁ (mm)	12	4	0
Tubo U	RS	-	-	0,92
Caixa de preenchimento (%)		-	-	100
Massa específica (kg/m ³)		2427	2428	2402
Ar incorporado (%)		2,25	1,90	2,35
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)				
Cilindros de 100 mm x 200 mm				
Média dos três cilindros		-	-	76,9
Desvio padrão		-	-	1,2

Da mesma forma que as demais adições o concreto com 38% de pasta apresentou os resultados menos satisfatórios. O tempo de escoamento no funil V foi muito elevado, 49,7 segundos. Esse concreto também apresentou um tempo T₅₀ de 8,10 segundos e tempos T₂₀ e

T_{40} de 4 e 9 segundos, respectivamente, o que indica uma alta viscosidade e elevada tensão de cisalhamento da pasta. No *slump flow* sem o anel J (Figura 4.36a), o diâmetro de espalhamento final foi de 690 mm e, com o anel (Figura 4.36b), de 660 mm. Neste último ensaio a diferença entre as alturas internas e externas ao anel foi de 8,50 mm, evidenciando que houve bloqueio do agregado.

(a) *Slump flow*(b) *Slump flow* com anel J.**Figura 4.36** – Resultados dos ensaios para CON85EALD15CV_38_1,35.

O concreto com 40% de pasta também apresentou um elevado tempo de fluidez no funil V (23,5 segundos). O diâmetro de espalhamento (Figura 4.37a) e T_{50} foram de 760 mm e 7,62 segundos. No *slump flow* com anel J (Figura 4.37b), o espalhamento situou-se em 720 mm e a diferença entre alturas foi de 3 mm. No ensaio de caixa L (Figura 4.37c) os tempos T_{20} e T_{40} foram de 2 e 4 segundos, respectivamente, e a relação de bloqueio foi igual a 1, evidenciando que este concreto fluiu perfeitamente dentro da caixa, sem obstrução do agregado nas barras que simulam as armaduras. A altura de preenchimento na caixa – U (Figura 4.37d) obteve um valor 0, caracterizando que não houve nenhum tipo de bloqueio.

Os resultados da Tabela 4.13 mostram que o concreto com 42% de pasta apresentou melhores propriedades de auto-adensamento. No *slump flow* com e sem o anel J (Figura 4.38), os resultados foram satisfatórios, indicando a boa deformabilidade do concreto. Quanto à fluidez, obteve-se valores muito próximos a faixa de valores recomendadas por Gomes (2002) e EFNARC (2002). A relação de bloqueio (RS) foi próxima de 1, o que indica que o concreto ficou praticamente nivelado dentro da caixa L. Da mesma forma, a diferença na altura de preenchimento foi zero, evidenciando que este concreto fluiu perfeitamente dentro da caixa U, sem bloqueio do agregado.



(a) Slump flow



(b) Slump flow com anel J



(c) caixa – L

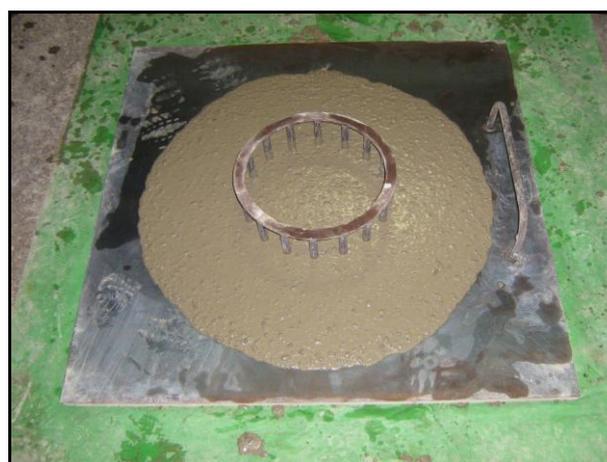


(d) caixa - U

Figura 4.37 – Ensaio para CON85EALD15CV_40_1,35.



(a) Slump flow



(b) Slump flow com anel J

Figura 4.38– Resultados dos ensaios para CON85EALD15CV_42_1,35.

Como o concreto com o teor de pasta de 42% e dosagem de aditivo de 1,35% apresentou as melhores características de auto-adensamento, admitiu-se, dentro dos parâmetros do método de Gomes(2002) como a mistura ideal e por isso, foram executados os ensaios do tubo – U e caixa de preenchimento.

Tanto a relação de segregação (RS) quanto a porcentagem de preenchimento (caixa de preenchimento), apresentaram resultados satisfatórios como mostram a Figura 4.39 e a Tabela 4.14.



Figura 4.39 – Caixa de preenchimento para CONC85EALD15CV_42_1,35_0,40.

Tabela 4.14 – Taxa de agregado para o concreto com 85EALD15CV.

	Massa agreg. + arg (Kg)	Massa agreg.saturado (Kg)	RS	Taxa de agreg. (%)	Massa agreg. seco (Kg)	RS	taxa agreg. (%)
Parte 1	4.439,0	1.236,2	0,97	27,8	1.088,4	0,89	24,52
Parte 2	4.664,2	1.270,5	0,92	27,24	1.221,5	0,88	26,2
Parte 3	4.578,3	1343,1	0,83	29,33	1.224,8	0,80	26,75
Parte 4	4.330,3	1482,6		34,23	1359,9		31,4

4.4.2.4 Concretos com 100% de fíler calcário (referência)

Nos concretos com 100% de fíler calcário (referência) os teores de pasta foram de 40 e 44% com uma relação f/c de 0,30 e 42% com f/c de 0,40 (Tabela 4.15). Essa redução da relação f/c se deu ao fato de que os concretos produzidos f/c de 0,40 e um teor de superplastificante maior que 1,20 apresentaram espalhamento excessivo (>1000mm) e segregação como mostra a Figura 4.40.

Tabela 4.15 – Proporções e resultados da mistura com 100% CAL.

Proporções da mistura (kg/m ³)				
Volume de pasta	40	42		44
Relação fíler/cimento	0,30	0,30	0,40	0,30
Teor de aditivo	0,85	0,95	1,20	0,85
Cimento	516	542	520	568
Adição 100% CAL	156	163	208	170
Água adicionada	178	186	178	195
Aditivo superplastificante	4,39	5,15	6,24	4,82
Areia	783	756	756	789
Brita	783	756	756	789
Resultados dos ensaios				
Diâmetro de espalhamento (mm)	720	840	810	780
Tempo de espalhamento T ₅₀ (s)	6,5	3,6	5,2	4,8
Tempo de fluidez do funil V (s)	39,9	15,22	35,9	12,5
Anel J com espalhamento	Df (mm)	630	800	770
	h _{ext} - h _{int} (mm)	8,5	3,0	2,5
Caixa L	T _{L20} (s)	5	1	3
	T _{L40} (s)	10	3	6
	RB=h ₂ /h ₁	0,93	0,98	0,95
Caixa U	h ₂ -h ₁ (mm)	13	2	0
Tubo U	RS	-	0,81	-
Caixa de preenchimento (%)	-	99,8	-	-
Massa específica (kg/m ³)	2419	2387	2423	2405
Ar incorporado (%)	2,20	0,80	1,62	1,85
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)				
Cilindros de 100 mm x 200 mm				
Média dos três cilindros	-	70,5	-	-
Desvio padrão	-	1,2	-	-



(a) espalhamento excessivo



(b) segregação

Figura 4.40 – Concreto produzido com 100% de fíler calcário e 1,25% de superplastificante.

A otimização dos concretos iniciou-se com o volume de pasta de 42%, dosagem de superplastificante de 1,20 e relação fíler/cimento de 0,40 (100CAL_42_1,20_0,40). Nesse concreto o valor do *slump flow* foi de 810 mm (Figura 4.41a) e T₅₀ de 5,20 segundos. O tempo de fluidez no funil V foi bastante elevado, de 35,90 segundos, o que caracteriza uma alta

viscosidade, elevada tensão de cisalhamento e bloqueio desse concreto. No ensaio de *slump flow* com anel J, o concreto apresentou resultados satisfatórios, com um espalhamento de 770 mm e diferença de altura de 2,5 mm. Na caixa – L (Figura 4.41b), os tempos T_{20} e T_{40} foram elevados concordando com o ensaio do funil V. No entanto a relação de bloqueio de 0,95 não indicou que houve obstrução do agregado. Da mesma forma, na caixa – U, esse concreto apresentou um excelente resultado (0), evidenciando que a mistura fluiu perfeitamente dentro da caixa.



Figura 4.41 - Ensaio para CON100CAL_42_1,20_0,40.

O concreto com 40% de pasta, 0,85% de dosagem de superplastificante e relação f/c de 0,30 apresentou os resultados menos satisfatórios nos requisitos de auto-adensamento. O *slump flow* foi de 720 mm e T_{50} de 6,5 segundos. Nos ensaios que medem tempos de fluidez, como o funil V e T_{20} e T_{40} , apresentaram os valores mais elevados de todos os concretos ensaiados, caracterizando alta viscosidade e tensão de cisalhamento, além de indicação de bloqueio. Os demais resultados foram satisfatórios.

O concreto CON100CAL_44_0,85_0,30 apresentou um *slump flow* de 780 mm (Figura 4.42a) e tempo T_{50} de 4,8 segundos. Este mesmo ensaio realizado em conjunto com o anel J (Figura 4.42b) teve um diâmetro de espalhamento de 720 mm e diferença de altura interna e externa de 3,8 mm, ou seja, dentro dos parâmetros de auto-adensamento definidos por Gomes (2002). O resultado do ensaio do funil V foi de 12,5 segundos, demonstrando a alta fluidez e moderada viscosidade da pasta. Na caixa – L (Figura 4.42c), o T_{20} e T_{40} foram de 1 e 3 segundos, respectivamente, e a relação de bloqueio foi 1,0, o que significa que esse concreto fluiu como água dentro da caixa. O resultado do ensaio da caixa – U (Figura 4.42d) foi de 5mm, confirmando as excelentes propriedades de auto-adensamento dessa mistura.

(a) *Slump flow*(b) *Slump flow com anel J*

(c) caixa-L



(d) Caixa - U

Figura 4.42 – Ensaio realizado no CON100CAL_44_0,85_0,30.

Apesar do concreto ensaiado anteriormente ter atendido os parâmetros de auto-adensamento estabelecidos pela literatura, optou-se por também executar a bateria de ensaios no concreto com 42% de pasta, dosagem de superplastificante de 0,95 e relação f/c de 0,30. Esse fato é devido ao intuito de verificar se concretos com um mínimo de teor de pasta também atendem as propriedades de capacidade de preenchimento, resistência a segregação e habilidade de passar por entre os obstáculos e barras de armadura.

Dessa forma, os resultados do *slump flow* e *slump flow* com anel J (Figura 4.43) foram de 840 mm e 800 mm, respectivamente. O tempo T_{50} foi de 3,60 segundos e a altura interna e externa ao anel J foi de 3,0 mm. No funil V o tempo de escoamento (15,2 segundos) da mistura foi superior a mistura CON100_44_0,85_0,30. Os tempos T_{20} e T_{40} na caixa – L foram respectivamente de 1 e 3 segundos. A relação de bloqueio alcançada foi de 0,98. Na caixa – U, a amostra apresentou uma altura de preenchimento próxima a zero.



Figura 4.43 – Slump flow com anel J.

Levando em consideração que essa mistura apresentou resultados dentro dos parâmetros de auto-adensamento com um menor volume de pasta, realizou-se a segunda seqüência de ensaios que consistiu no tubo U (Figura 4.44a) e na caixa de preenchimento (Figura 4.44b), obtendo-se valores de relação de segregação de 0,81 e porcentagem de preenchimento de 99,8%. O valor encontrado no tubo – U foi abaixo do encontrado na literatura, que deve ser igual ou superior às 0,90 para concretos auto-adensáveis (Tabela 4.16).



(a) Tubo U



(b) Caixa de preenchimento

Figura 4.44 – Ensaios para CON100CAL_42_0,05_0,30.

Tabela 4.16 - Taxa de agregado para o concreto com 100CAL.

	Massa agreg. + arg (Kg)	Massa agreg. saturado (Kg)	RS	Taxa de agreg. (%)	Massa agreg. seco (Kg)	RS	taxa agreg. (%)
Parte 1	4.242,3	1.020,3	0,81	24,0	1.015,2	0,81	23,93
Parte 2	4.269,2	1.254,0	0,85	29,4	1.241,1	0,86	29,1
Parte 3	4.228,5	1.189,3	1,11	28,12	1.177,2	1,11	27,84
Parte 4	4.082,6	921,0		22,56	913,5		22,37

4.4.2.5 Resumo dos resultados

Os concretos selecionados dentro dos parâmetros de auto-adensamento são mostrados na Tabela 4.17. Os resultados dos ensaios de espalhamento e Funil V foram os principais parâmetros que definiram a escolha da dosagem ótima de pasta para os concretos, já que mesmo concretos produzidos com teores de pasta inferiores apresentaram boa capacidade de preenchimento sem obstrução pelas armaduras quando medidos pelos ensaios de Caixa L e Caixa U.

Tabela 4.17 – Concretos auto-adensáveis selecionados

Proporções da mistura (kg/m³)				
	100EALD	70EALD30EGAF	85EALD15CV	100CAL
Volume de pasta (%)	44	42	42	42
Relação f/c	0,40	0,40	0,40	0,30
Teor de aditivo	1,20	1,35	1,35	0,95
Cimento	545	518	519	
EALD	218	145	176	-
EGAF	-	62	-	-
Cinza Volante	-	-	31	-
Fíler Calcário	-	-	-	163
Água adicionada	186	176	177	186
Aditivo superplastificante	6,54	6,99	7	5,15
Areia	729	756	756	756
Brita	729	756	756	756
Resultados dos ensaios				
Diâmetro de espalhamento (mm)	760	790	820	840
Tempo de espalhamento T ₅₀ (s)	4,17	4,59	4,51	3,6
Tempo de fluidez do funil V (s)	16,9	14,8	16,5	15,22
Anel J com espalhamento	Df (mm)	760	760	820
	h _{ext} - h _{int} (mm)	5,75	0,50	0,4
Caixa L	T _{L20} (s)	1,5	2	2
	T _{L40} (s)	2,5	3	4
	RB=h ₂ /h ₁	1	0,97	0,96
Caixa U	h ₂ -h ₁ (mm)	14	7,5	0
Tubo U	RS	1,20	0,82	0,92
Caixa de preenchimento (%)	92,6	99,62	100	99,8
Massa específica (kg/m ³)	2425	2435	2402	2387
Ar incorporado (%)	1,75	0,4	2,35	0,80
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)				
Cilindros de 100 mm x 200 mm				
Média dos três cilindros	-	82,3	76,9	70,5
Desvio padrão	-	0,4	1,2	1,2

Como pode ser visto na Tabela 4.17, verifica-se que todos os concretos produzidos apresentaram alto conteúdo de finos, entretanto similares aos apresentados por Gomes (2002) para o mesmo $a/c = 0,35$. O consumo elevado de cimento ($> 500\text{Kg/m}^3$) é um fator que deve ser analisado cuidadosamente. Sabe-se que teores elevados de cimento podem contribuir para o aumento na retração e no calor de hidratação destes concretos, limitando sua aplicação. Contudo, uma melhor escolha nos agregados, considerando sua forma, granulometria e outros aspectos que influenciam significativamente nas propriedades do estado fresco, além de pequenas alterações nas proporções da mistura podem conduzir a concretos com propriedades reológicas semelhantes, com um consumo menor de cimento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se primeiramente, as considerações gerais a respeito dos objetivos sobre os quais foi traçado o programa experimental dessa pesquisa. Em seguida, são mostradas as considerações específicas relativas a cada fase do trabalho, encerrando-se com sugestões para futuros trabalhos na área de concretos auto-adensáveis.

5.1 Aspectos gerais

Do ponto de vista reológico, o objetivo de obter concretos com propriedades auto-adensáveis, utilizando escórias de aciaria LD como fíler, foi alcançado.

O concreto com 100% de escória de aciaria LD atingiu as três principais propriedades de auto-adensamento. No que diz respeito à capacidade de preenchimento, apresentou resultados satisfatórios que foram avaliados através dos ensaios de espalhamento (*slump flow*), fluxo de espalhamento (T_{50}) e funil V. Quanto a capacidade de passagem, pode-se afirmar que não houve o bloqueio dos agregados, o que foi observado nos ensaios da caixa – L, caixa-U, espalhamento com anel J e na caixa de preenchimento. Verificou-se também, através do tubo – U, a boa estabilidade da mistura. Além disso, este concreto apresentou características de

auto-adensamento comparáveis ao concreto de referência (CON100CAL) e aos demais concretos desenvolvidos na pesquisa. Pode-se afirmar também, que os resultados dos ensaios reológicos foram similares aos parâmetros apresentados por alguns autores da área de CAA.

A metodologia proposta por Gomes (2002), utilizada para produção de CADAR, mostrou-se eficiente e objetiva. Entretanto, foi necessário adequações no teor de finos e na dosagem ótima de aditivo. Neste caso, o estudo de argamassas foi eficiente e conduziu a uma redução da necessidade de produção de grandes volumes de concreto, otimizando o tempo e economizando materiais.

Para todos os concretos o tempo de fluidez no funil – V e os tempos T_{20} e T_{40} , medidos na caixa-L, foram fatores decisivos para determinação do concreto com melhores características de auto-adensamento. Se por um lado o elevado teor de finos contribuiu para o aumento da tensão de cisalhamento e viscosidade da mistura, por outro lado resultou em concretos com alta deformabilidade, alcançando valores de *slump flow* da ordem de 800 mm, sem segregação.

Todos os concretos alcançaram resistência à compressão superiores a 50 MPa aos sete dias, o que os classifica como concretos auto-adensáveis de alta resistência (CADAR), segundo o método de Gomes (2002). Como era esperado, as misturas com escória de aciaria LD e adições reativas (cinza volante e escória granulada de alto-forno) apresentaram maiores resistências à compressão que o concreto 100EALD e o de referência.

5.2 Estudo de finos

O estudo de finos foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento das adições com água. Dessa fase da pesquisa obteve-se as conclusões foram as seguintes:

- a) verificou – se que o fino que necessita de maior quantidade de água para o início do espalhamento é o cimento. Ao contrário, a mistura com 100% de escória de aciaria LD apresentou um valor de β_p menor, significando que esta adição necessita de menos água para iniciar o espalhamento;
- b) as composições 100EALD, 70EALD30EGAF, 85EALD15CV e 100CAL apresentaram valores de β_p bem próximos, sendo considerados estatisticamente semelhantes. A maior discrepância só foi verificada no cimento;

- c) no estudo, a composição mais sensível a água, representado pelo menor valor de E_p , foi a 100EALD. O maior valor de E_p foi obtido no cimento seguido pela composição de 85EALD15CV;
- d) observou-se que não existe relação direta entre o valor de β_p e a água da pasta de consistência normal;
- e) a área específica de Blaine por si só não é um parâmetro suficiente para prever o comportamento do fino quanto ao espalhamento e fluidez. No entanto, observou-se que a incorporação de finos mais reativos, tais como a cinza volante e a escória de alto-forno, elevam a tensão de escoamento da mistura, conduzindo a uma redução na deformabilidade;
- f) a mistura 100CAL (referência) apresentou o mesmo espalhamento relativo que a mistura com 100% de escória de aciaria LD.

5.3 Otimização das pastas

Dentro dos parâmetros propostos de $f/c = 0,50$, $D_{FMC} = 180 \pm 10 \text{mm}$ e $T_{115} = 3 \pm 1$ seg. para a otimização das pastas de CAA, conclui-se que:

- a) os resultados obtidos no estudo de pastas foram consoantes com os obtidos no estudo de finos. Isso comprova que com a utilização da metodologia proposta por Domone e Hsi-Wen (1997), para estudos de finos, pode-se prever o comportamento das pastas;
- b) de um modo geral as pastas não apresentaram pontos de saturação bem definidos, havendo a necessidade da utilização de mecanismos de interpolação de dados para seleção das pastas;
- c) as curvas obtidas nos ensaios de cone de Marsh e *mini-slump* foram extremamente importantes para determinar a dosagem ótima de superplastificante e medir a capacidade de todas as pastas de fluir;
- d) desde o início, a intenção foi utilizar o maior teor de resíduo possível, no entanto, as pastas selecionadas nessa fase, não foram utilizadas conforme o planejado, havendo a necessidade, conforme a metodologia adaptada neste trabalho, de adequação tanto no teor de finos quanto na dosagem de superplastificante. Dessa forma foi possível obter

concretos com melhores características de auto-adensamento com uma quantidade de resíduo considerável;

- e) a mistura de escória de aciaria LD com adições pozolânicas como a cinza volante e a escória de alto-forno granulada nos teores propostos, não prejudicou o comportamento reológico das pastas ou misturas quando comparadas com a escória de aciaria LD sozinha.
- f) a técnica utilizada para análise de imagens mostrou-se ser perfeitamente viável do ponto de vista econômico e técnico, devido ao seu baixo custo e precisão dos resultados, principalmente no estudo de espalhamento das pastas e de escoamento no estudo de finos.

5.4 Estudo de argamassas

O estudo de argamassas foi necessário para adequar as proporções da pasta para a produção de concretos auto-adensáveis. O fato das pastas selecionadas inicialmente não terem conduzido às propriedades requeridas para a produção de CAA, não invalida a metodologia de dosagem proposta por Gomes (2002). Aspectos como forma dos grãos, rugosidade, teor de finos e outras características físicas e químicas dos materiais empregados influenciaram significativamente nas propriedades reológicas do CAA. Ressalta-se que apesar das pastas selecionadas terem atendido os parâmetros propostos pela metodologia de Gomes (2002), nas argamassas elas apresentaram elevada coesão, havendo a necessidade de reduzir a quantidade de finos na mistura. Para isto, a solução seria a substituição da areia empregada ou reduzir a relação f/c , sendo esta a opção tomada. Este estudo foi importante, pois evitou a produção de uma série de concretos pilotos, tornando-se mais um parâmetro que visa auxiliar na dosagem dos CAA's.

5.5 Desenvolvimentos dos concretos

De acordo com os resultados dos ensaios reológicos, para a família de concretos auto-adensáveis com 100% de escória de aciaria LD a mistura que melhor atendeu os parâmetros de auto-adensamento foi aquela com relação $f/c = 0,4$, composto por 44% de pasta e teor de superplastificante de 1,20%, tendo apresentado as melhores características, dentro dos parâmetros propostos neste trabalho. Esse concreto foi selecionado para a realização de mais

ensaios reológicos como caixa de preenchimento, caixa U, tubo U onde obteve resultados igualmente satisfatórios.

A introdução de outras adições como a escória de alto-forno granulada e a cinza volante em conjunto com escória de aciaria LD, contribuiu para um pequeno aumento na dosagem de aditivo e menor percentual de pasta quando comparado com o CONC100EALD. Entretanto, o CONC100EALD com 1,20% de aditivo superplastificante e 42% de pasta poderia perfeitamente ser utilizado em algumas aplicações, já que o fator determinante para a escolha do CONC100EALD com 44% de pasta foram os tempos de fluxo obtidos na Caixa L. Todos os demais parâmetros foram similares. Assim, os CONC100EALD com 42% de pasta, CONC70LD30AF e o CONC85LD15CV, possuem proporções e características reológicas semelhantes.

O CONC100CAL foi o que apresentou menor tempo de fluidez no Funil V, estando dentro da faixa considerada como ideal. Contudo a redução da relação f/c resultou num aumento médio de 10% no consumo de cimento quando comparado com os demais.

5.6 Sugestões para futuras pesquisas

Após a utilização da escória de aciaria LD como fíler, com sucesso na composição do CADAR, conseguindo atender suas características no estado fresco e alcançar bons resultados no estado endurecido, essa pesquisa necessita de prosseguimento. Desta forma apresentam-se sugestões de continuação deste trabalho:

- a) melhorar a viscosidade e a coesão do concreto auto-adensável com escória de aciaria LD obtido neste trabalho, utilizando um percentual de agente modificador de viscosidade;
- b) estudar o CAA com escória de aciaria LD com resistências normais;
- c) estudar as características das pastas e argamassas através de viscosímetros e reômetros;
- d) aplicar as dosagens de CAA encontradas neste trabalho em peças pré – fabricadas, fazendo um estudo comparativo de custos reais, com a fabricação das mesmas peças em concreto convencional de mesma resistência;

- e) estudar as propriedades dos concretos auto-adensáveis obtidos, no estado endurecido, tais como resistência à tração, absorção, permeabilidade, retração, módulo de elasticidade entre outras propriedades mecânicas;
- f) estudar a durabilidade dos concretos auto-adensáveis obtidos, realizando ensaios de penetração de cloretos, absorção, carbonatação, teor de ar incorporado, microscopia de varredura, difração de raios – X e outros;
- g) estudar a evolução do comportamento da escória de aciaria LD na matriz de concreto ao longo do tempo;
- h) estabelecer dosagens de CAA com adições através de todos os métodos de dosagens existentes para tal, para que se possa determinar o mais econômico, o mais simples e eficiente;
- i) avaliar os custos dos CAA's estudados, comparando com concretos convencionais.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Neste capítulo, são apresentadas todas as referências realizadas ao longo do texto. Ainda, é apresentada a bibliografia consultada durante a pesquisa que, no entanto, não foi citada no texto da dissertação. Também constam a bibliografia de normas técnicas nacionais e internacionais, além dos procedimentos internos de Furnas Centrais Elétricas S. A. que foram utilizadas no programa experimental.

Bibliografia Referenciada

ABREU, A.G.de. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004.171 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AÏTCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2000.

ALMEIDA FILHO, F. M.. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 292 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2006.

AMBROISE, J.; PERA, J. Properties of Self-Leveling Concrete: influence of a Viscosity Agent and Cement Content. In: FIFTH INTERNATIONAL CANMET/ACI CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 2001. **Proceedings...ACI** p. 367-380.

ARAÚJO, L.A. de. **Manual de Siderurgia – Produção**. São Paulo: Arte & Ciência, 1997. v.1. 470 p.

ARAUJO, J. L.; BARBOSA, N.P.O; SANTOS, S.B. ; REGIS, P.A. Concreto auto-adensável com materiais locais no nordeste brasileiro. In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003, 19 p.

ARAÚJO, J.; GEYER, A.; CASTRO, A.; ANDRADE, M. Influência das adições nas propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. In: 49°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON, 2007, 11p.

ASSOCIATION FRANÇAÏSE DE GÉNIE CIVIL (AFGC). **Betons Auto-Plaçants : Recommandations Provisoires**, 2000, 63p.

AZEVEDO, C.S. Contribuição das adições minerais para a resistência à corrosão da armadura do concreto. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

BALDUINO, F. **Experiência da Herckett MultiServ na aplicação de escória de aciaria em CBUQ**. In: WORKSHOP: GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SETOR MÍNERO – METALÚRGICO, 2004, Rio de Janeiro. Apresentação em MS Power Point – 80MB Disponível em:< <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download.asp>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

BANFILL, P. F. G. The theology of fresh cement and concrete: a review. In: 11th INTERNATIONAL CEMENT CHEMISTRY CONGRESS, 2003, Durban. **Proceedings...**Durban: Portland Cement Association, 2003, 13 p.

BARBOSA, M.P.; BOSCO, A.R.C.; BERTO, R.B.; SALLES, F.M. Um estudo das características e propriedades do concreto auto-adensável (CAA). In: 44°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2002, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 16p.

BARBOSA, M.P.; SILVA, L.M.; MENOSSI, T.; SALLES, F.M.; RÓS, P.S. A influência da adição de finos basálticos nas características reológicas e mecânicas dos concretos auto-adensáveis (CAA), 2004, Florianópolis. **Anais...**Florianópolis: IBRACON, 2004, v.2, p.7-12.

BARTOS, P. J. M.; GRAUERS, M.. **Self-compacting concrete**. Concrete, v. 33, n. 4, 1999.

BARTOS, P. J. M.; SÖDERLIND, L. **Environment and ergonomics**. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.5, p. 1-31, 2000.

BARTOS, P.J.M. Measurement of Key Properties of Fresh Self-compacting Concrete. In: CEN/STAR PNR WORKSHOP ON MEASUREMENT, TESTING AND STANDARDISATION: FUTURE NEEDS IN THE FIELD OF CONSTRUCTION MATERIALS, 2000, Paris. **Proceedings...**Paris: CEN/STAR, 2000, 6 p.

BERNABEU; LABORDE. **Production system for civil engineering**. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.3, p.1-40, 2000.

BILLBERG, P.; PETERSSON, Ö.; NORBERG, J. Full scale casting of bridges with self-compacting concrete. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, Stockholm, 1999. **Proceedings...**Stockholm: RILEM, 1999.

BRAMESHUBER, V.; UEBACHS, S. Self-Compacting Concrete – Application in Germany. In: 6th. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Germany, 2002. **Proceedings...**Germany: Leipzig University, v.2, p. 1503-1514, 2002.

BRANCO, V.T.F.C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n. 33, p. 1279-1286, 2003.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

BOUZOUBAÂ, N.; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. **Cement and Concrete Research**, v. 31, Pergamon, p. 413-420, 2001.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y; SHAH, S.. **Rheological model for self-consolidating concrete**. In: **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 6, p. 549-559, nov.-dec. 2002.

CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S. Estudos de finos e pastas para produção de concreto auto adensável de alta resistência. In: 48°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 16 p.

CALMON, J.L.; TRISTÃO, F.A.; GIACOMETTI, M.; MENEGUELLI, M.; MORATTI, M. Estudo de finos e pastas para produção de concreto auto-adensável de alta resistência como fíler de escória de aciaria e outras adições. In: 49°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON, 2007, 16 p.

CAMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Utilização de concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto convencional**. 12°. Concurso Falcão Bauer, 2005, p. 1-15.

CAMÕES, A. Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco. **Revista da Engenharia Civil da Universidade do Minho**, Guimarães, Portugal, n.24, 2005, p. 29-44.

CANALLE, J. H. Seminario de tecnología del concreto: experiencias Recientes. Concretos Autonivelantes. In: SEMINARIO. RECIENTES TECNOLOGÍAS DEL CONCRETO, agosto 2004, Lima. **Anais...** Lima: Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM), 2004.

CASCUDO, O.; HELENE, P.R.L. Produção e obtenção de barras e fios de aço para concreto armado. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – BT/PCC/256**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000. 17p.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L. Initial Rheological Description of High Performance Concretes. **Materials Research**, v. 9, n. 4, p. 405-410, 2006.

CAVALCANTI, D. J. H.. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 140 P. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 20, n.2-3, p.103-112, 1998.

COLLEPARDI, M. A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC). In: SOSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY: Supplementary Volume of the Proceedings of Three – Day CANMET/ACI INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2001, San Francisco: **Proceedings...**San Francisco: CANMET/ACI, 2001, 20p.

COLLEPARDI, M. Innovative concrete for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. In: WORKSHOP ON NEW TECHNOLOGIES AND MATERIAL IN CIVIL ENGINEERING, 2003, Milan.**Proceedings...**Milan. p.1-8.

COLLEPARDI, M.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S.; TROLI, R. Recent Developments of Special SCC's. In: SEVENTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 26-29 may., Las Vegas. **Proceedings...**Las Vegas, 2004, p.1-18.

COMPANHIA SIDERÚRGICA TUBARÃO (CST). **Escória de aciaria. A excelência na utilização do material de múltiplas aplicações**. Vitória, 2003a. Apresentação em Power Point. Disponível em:< <http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

COMPANHIA SIDERÚRGICA TUBARÃO (CST). **Utilização de escória de aciaria LD – NP**. Manual de utilização. Vitória, 2003b

COMPANHIA SIDERÚRGICA TUBARÃO (CST). Processo de Produção. Disponível em: < <http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: jan. 2007.

CORRÊA, M.L.T.; MELLO, J.W.V.; AGRIZZI, E.J.; BORGES, L.L. **Avaliação do uso agrícola de escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos.** In: SEMINÁRIO ESCÓRIA DE ACIARIA – A EXCELÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL DE MÚLTIPLAS APLICAÇÕES-CST Vitória, 2003. Disponível em: <<http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In:____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, cap. 12, p. 345-379.

DATAPOINT. Version 0.61. Missouri:Saint Charles Community College, 2001. Samah Applied Science & Engineering. Disponível em: www.stchas.edu/faculty/gcartson/physics.

DE LA PEÑA, B.R. Hormigón autocompactante: Nueva tecnología para la construcción con hormigón. **Revista Bit**, Chile, p. 41-42, Corporación de Desarrollo Tecnológico y Camara Chilena de la Construcción, jun. 2000a.

DE LA PEÑA, B.R. Consideraciones para el diseño y colocacion de hormigón. **Revista Bit**, Chile, p. 14-16, dic. 2000b. Corporación de Desarrollo Tecnológico y Camara Chilena de la Construcción.

DE LARRARD, F; HU, C.;SEDRAN, T. SZITZAR, J.C.; JOLY, M.; CLAUX, F. DERKX, F.A. A New Rheometer for Soft-to Fluid Fresh Concrete. *ACI Materials Journal*, v.94, n.3, p.81-90, 1997.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F; SEDRAN, T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, v. 31, p. 494-498, 1998.

DEHN, F.; HOLSCHEMACHER, K.;WEIBE, D. Self-Compacting Concrete (SCC) – Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour. **Lacer**, n.5, p. 115-124, 2000.

DOMONE, P.L.; HSI-WEN, C. Design testing of self-compacting concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, Glasgow, 3-5 june 1996. **Proceedings...**Glasgow: RILEM, 1996, p.223-236.

DOMONE, P.; HIS-WEN, C. Testing of Binders for High Performance Concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, v. 27, n.8, p. 1141-1147, 1997.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, Elsevier, p.1-12, 2006a.

DOMONE, P.L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, v.28, Elsevier, p.197-208, 2006b.

DRUTA, C. **Tensile Strength and Bonding Characteristics of Self-Compacting Concrete**. 2003. 115 p. Thesis (Master of Science in Engineering Science) – Department of Engineering Science, Louisiana State University, Louisiana, 2003.

ERLIEN O.; HEIMDAL, E. High performance self – compacting concrete Norwegian experiences. In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, v.2, Sandefjord, Norwegian, **Proceedings...**Sandefjord: Norwegian Concrete Association, 1999, p. 758-769.

ESPING, O. **Methods for characterization of fillers and fines for self-compacting concrete**. In: THIRD INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, PRO 33, 17-20 aug.2003, Reykjavik. **Proceedings...**Reykjavik: RILEM, 2003.

ESPING, O. **Early age proprieties of self-compacting concrete**: effects of fine aggregate and limestone filler. 2007. 111 p. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy) - Department of Civil and Environmental Engineering, Building Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007a.

ESPING, O. Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Submitted for publication in Cement and Concrete Research**, 8 p., 2007b.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Reino Unido: EFNARC, 2002, 32 p.

FERRARIS, C.F. Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: state of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, p. 461-468, 1999.

FERRARIS, C.F.; OBLA, K. H.; H.R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n. 31, p. 245-255, 2001.

FERREIRA, V.; ZANOTTO, E.D.; SCUDELLER, L.A.H. Nanovitrocera mica de escória de aciaria. **Química Nova**. v. 25, n. 5, p. 731-735, 2002.

FERREIRA, R.B.; LIMA, M.B.; PEREIRA, A.C.; SILVA, M.V.A.; ANDRADE, M.A.S. Comparativo de Custo entre o Concreto Convencional e o Concreto Auto-Adensável na Região de Goiânia/GO. In: 48^o.CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 15p.

FERREIRA, R.B.; LIMA, M.B.; PEREIRA, A.C.; ANGELIM, R.R.; ANDRADE, M.A.S. Avalia o do Módulo de Elasticidade de Concretos Auto-Adensáveis com Diferentes Consistências e Níveis de Resistência. In: 48^o.CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 15p.

GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. **Waste Management**, Pergamon, v.16, n.1-3, p. 59-63, 1996.

GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su Caracterización**, 2003, 64 p. Departamento de Ingeniería de la Construcción E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Polit cnica de Catalu a, Barcelona, Espa a. Informe C4745/1, 2003.

GEYER, A.L.B.; S , R. R. de. Concreto auto-adensável: uma nova tecnologia   disposi o da constru o civil de Goiânia. **Informativo técnico REALMIX**, ano 1, n. 1, 8 p., abr. 2005.

GEYER, R. T.; DAL MOLIN, D. ; VILELA, A. C. F. Caracteriza o de escórias de aciaria para utiliza o como adi o ao cimento Portland. In: 42^o. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2000, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: IBRACON, 2000.

GEYER, R. M. T.. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GOBBO, C.C.A.S; GEYER, R.T.; ALBUQUERQUE, A.C.; ANDRADE, M.A.S.; ANDRADE, W.P. Utilização da escória de aciaria como adição ao concreto compactado com rolo (CCR). In: 45°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: IBRACON, 2003.

GOMES, V. **Obtenção de material vitrocerâmico utilizando escória de aciaria**. 1999. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GOMES, P. C. C.. **Optimization and characterization of high-strength self compacting concrete**, 2002. 139 p. Tesis (Doctoral em Enginyeria) - Departament D`Enginyers de Camins, Canal I Ports, Universitat Politècnica de Calalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável: um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: 45°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003, 15 p.

GOMES, P.C.C.; UCHOA, S.B.B.; BARROS, A.R. Propriedades de durabilidade do Concreto Auto-adensável. In: 48°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006,10p.

GRAFFITTI, D.F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica**. 2002. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GREISSER, A.. **Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures. Reology, Phase Compositon, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems**. 2002. 162 p. Dissertation (degree of Doctor of Technical Sciences), Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2002.

GUJAR, A.H. **Mix Design and Testing of Self-consolidating Concrete Using Florida Materials**. Final Report Submitted to the Florida Department of Transportation, Report n. BD 503, 2004, 111 p.

GUMIERI, A. G.. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUMIERI, A. G.; DAL MOLIN, D.C.C; VILELA, A. C. F. Caracterização de escória de aciaria granulada visando o uso em cimento. In: 45°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003. p.

HAMILTON, T. **Structural Evaluation of AASHTO Type II Girders constructed with Self-Consolidating Concrete**. Palestra apresentada na 17°. Session of Conference of AASHTO, Orlando, EUA, 2004.

HO, D.W.S.; TAM, C.T.; SHEINN, A.M.M. Some Major Issues of Self-Compacting Concrete. **Conspectus**, p.74-81, 2001a.

HO, D. W. S.; SHEINN, A.M.M.; TAM, C.T. The sandwich concept of construction with SCC. **Cement and Concrete Research**, New York, n. 31, Pergamon, p. 1377-1381, 2001b.

HO, D. W. S.; SHEINN, A. M. M.; TAM, C. T. The use of quarry dust for SCC applications. **Cement and Concrete Research**, n. 32, Pergamon, p. 505-511, 2002.

HOLSCHEMACHER, K.; KLUG, Y. A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC. **Lacer**, n.7, p.123-134, 2002.

IBS, INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS – **Estatísticas – Produção de aço bruto por processo**, 2007. Disponível em:<<http://www.ibs.org.br/estatisticas2.asp>>. Acesso em: 2.jan.2007.

InToo MPEG Encoder. Versão: 2.1.55 build – 1024b for RN – 47660 – Copyright 2003-2005. Software Studio.

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 200p.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000.133 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M-A. Chemical admixture-cement interactions : phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 20, n. 2-3, p. 87-101, 1998.

KANTRO, D. L. Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Pastes – A miniature slump test. **Cement Concrete Aggregates**, v. 2, p. 95-102, 1980.

KHAYAT, K.H.; GUIZANI, Z. Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 4, p. 332-340, 1997.

KHAYAT, K. H. Viscosity- Enhancing Admixtures for Cement-Based Materials – An Overview. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, n. 20, p.171-188, 1998.

KHAYAT, K.H.; HU, C.; MONTY, H. Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1999, Stockholm. **Proceedings...**Stockholm: RILEM Publications, 1999, p.143-152.

KHAYAT, K. H.; DACZKO, J.A. **The holistic approach to self-consolidating concrete**. In: FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE, 2002, Chicago. **Proceedings...**Chicago: Center for Advanced Cement-Based Materials, 2002, v.1, p. 9-13.

KHRAPKO, M. Self Compacting Concrete – a Solution for Technology Hungry Concrete Construction. In: CONVENTION INVESTING IN THE FUTURE – VISION 20/20, 2007, Auckland, New Zealand. **Proceedings...**Auckland: Institution of Professional Engineers New Zealand (IPENZ), 2007. 9p.

KIHARA, U.; CENTURIONE, S.L. O Cimento Portland. In:____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005, v.1, cap. 10, p. 295-322.

KIM, J-K.; HAN, S.H.; PARK, Y.D.; NOH, J.H. Material properties of self flowing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.10, n.4, 1998.

KLUG, Y.; HOLSCHEMACHER, K. Comparison of hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. In: THIRD INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2003, Reykjavik. Proceedings...Reykjavik: RILEM Publications, 2003, p. 596-605.

KOEHLER, E.P.; FOWLER, D.W. FERRARIS, C.F. Summary of Concrete Workability Test Methods. ICAR **Report 105.1: Measuring the Workability of High Fines Concrete**. International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin, 92 p., 2003.

LACHEMI, M.; HOUSSAIN, K.M.A.; LAMBROS, V.; NKINAMUBANZI, P-C.; BOUZOUBAÂ, N. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n.34, p.185-193, 2003.

LANA, P.G. Escória de aciaria: mitos e realidade e o papel da tecnologia na escória de aciaria. In: SEMINÁRIO ESCÓRIA DE ACIARIA A EXCELÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL DE MÚLTIPLAS APLICAÇÕES. Vitória, 2003. **Apresentação em Power Point**. Disponível em: <<http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

LIMA, L. A. **Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. 1999. 243 p. Tesis (Doctoral em Enginyeria) - Departament D'Enginyers de Camins, Canal I Ports, Universitat Politècnica de Calalunya, Barcelona, 1999.

LISBÔA, E.M.; GOMES, P.C.C.; LIMA, F.B. de; BARBOZA, A.S.R.; LAMEIRAS, R.M. Obtenção de pastas e argamassas altamente fluidas com resíduo da serragem dos blocos de granito para utilização em concretos auto-adensável. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo. **Anais...**São Paulo:ENTAC, 2004, 13 p.

LISBÔA, E. M.. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 115. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

MACHADO, A.T. **Estudo Comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MALHOTRA, V.M. Properties of fresh and hardened concrete incorporating groud, granulated blast-furnace slag. In: SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS FOR CONCRETE, 1987, Ottawa. **Proceedings...**Ottawa: Canadian Government Publishing Centre, p.291-333.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances in Concrete Technology**, v.1, 1996.

MANUEL, P. J. M.. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis.** 2005. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MARAGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço.** 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARTIN, J.F. Aditivos para concreto. In:____. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, cap.13, p.381-406.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição do cimento.** 2001. 252 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994, 573p.

MELO, K. A.. **Contribuição à dosagem do concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, K.A.; SILVA, W.R.L.;REPETTE, W.L. Concreto auto – adensável: avaliação do teor de aditivo superplastificante para garantia da fluidez em pasta, argamassa e concreto. In: 47°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005, Recife. **Anais...** Recife: IBRACON, 2005. p. 467 – 480.

MELO, K. A.; REPETTE, W.L. Influência do teor de finos nas propriedades do concreto auto-adensável com adição de fíler calcário. In: 47°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005, Recife. **Anais...** Recife: IBRACON, 2005. p. 945 – 956.

MELO NETO, A. A.. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MOORE, C.; MARSHALL, R.I. **Steelmaking**. London: The institute of Metals, 1991. 172 p.

MOOSBERG-BUTNES, H. Characterization of filler. In: THIRD INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2003, Reykjavik. **Proceedings...**Reykjavik: RILEM, 2003, p. 540-550.

MOREIRA, D. B; LANA, M. F. **Geração de escória de aciaria LD pelo método de convertedor com o sopro de oxigênio**. 200-?. CST, Companhia Siderúrgica de Tubarão. Apresentação em Power – Point. Disponível em:<<http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag opportunity to save natural resources. **Waste Management**, Pergamon Press, v. 21, p.85-93, 2001.

MUNDIN, M.J. **Tecnologia de fabricação do aço líquido – aciaria LD**. 3ª. ed. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1985.v.2, 255p.

MURPHY, J.N; MEADOWCROFT, T.R.; BARR, P.V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian Metallurgical Quarterly**, Canada, v. 36, n.5, p.315-31, 1997.

MUSEU IBERÊ CAMARGO. Imagem. Disponível em: < www.archinet.com>. Acesso em: 15 set. 2007.

NAGAI, T.; KOJIMA, T.; MIURA, T. Application of highstrength/superworkable concrete to thin-wall prestressed Concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 51, n.3,1999.

NAGATAKI, S. Concrete technology in Japan. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 1995, Sapporo, Japão. **Proceedings...**Sapporo: RILEM ACI, 1995.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NISHIZAKI, T.; KAMADA, F.; CHIKAMATSU, R.; KAWASHIMA, H. Application of high-strength self-compacting concrete to prestressed concrete outer Tank for LNG storage. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, Stockholm, 1999. **Proceedings...**Stockholm: RILEM, 1999, p.629-638.

NOGUCHI, J.; OH, S.G.; TOMOSAWA, F. Rheological Approach Passing Ability between Reinforcing bars of self compacting concrete. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1999, **Proceedings...**Stockholm: RILEM Publications, 1999, p. 83-94.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. **Concrete International**, v. 19, n. 7, p. 50-54, jul. 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Japan, v. 1, n. 1, p. 5-15, apr. 2003. Japan Concrete Institute.

OUCHI, M. Self-Compacting Concrete: Development, Applications and Investigations. **Nordic Concrete Research**, n. 23, 5 p., 1999.

OUCHI, M.; NAKAMURA, S-A.; OSTENBERG, T.; HALLBERG, S-E.; LWIN, M. **Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States.** ISHPC, 2003, 20p.

PENA, D.C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** 2004. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

PEREIRA, E.A.C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas à coque. **Metalurgia & Metais**, p. 122-128, fev. 1995.

PERSSON, B. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. **Cement and Concrete Research**, n.31, p. 193-198, 2001a.

PERSSON, B. **Assessment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost resistance, salt frost, scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete.** Lund Institute of Technology, Division of building materials, Lund University, Lund, 2001b. 93p.

PERSSON, B. Sulphate resistance of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n.33, p.1933-1938, 2003.

PETERSSON, Ö.; BILLBERG, P.; VAN, B.K. A Model for Self-Compacting Concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Glasgow. **Proceedings...**Glasgow: RILEM, 1996, p. 483-492.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** 2001. 187 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2001.

PILEGGI, R.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M.. **Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas.** In: **e-Mat** – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. v. 3, n. 2, p. 62-76, Nov. 2006.

PIMENTA; A. LIMA, E.O. O lastro ferroviário – alternativa econômica e ambiental. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA: A EXCELÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DO MATERIAL DE MÚLTIPLAS APLICAÇÕES. Vitória, 2003. Tubarão. Apresentação em Power – Point. Disponível em:< <http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

POON, C. S., HO, D. W. S.. A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC (Short communication). **Cement and Concrete Research**, 2004, p. 1-3.

POPPE, A-M.; SCHUTTER, G.D. Cement hydration in presence of high filler contents. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, n.35, 2005, p.2290-2299.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI). **Interim Guidelines for the Use Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants**, TR-6-03, Illinois, Chicago, 165 p., apr. 2003.

RAMSBURG, P. The SCC Test: Inverte dor Upright?. **The Concrete Producer**, Hanleywood LLC, p. 1-5, july, 2003.

REPETTE, W.L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In:_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005, v.2, cap.49, p. 1509-1550.

REPETTE, W.L. Self Compacting Concrete – Properties and application – Reporting a Brazilian experience. In: II SIMPÓSIO ÍBERO-AMERICANO SOBRE “CONCRETO ESTRUTURAL”, set. 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 10 p.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Final report of RILEM TC 188-CSC: Casting of self compacting concrete. **Materials and Structures**, France, n. 39, p. 937-954, 2006.

RIXOM, M.R.; MAILVAGANAM, N.P. **Chemical admixtures for concrete**. Third Edition. New York: E & FN Spon, 1999.437p.

ROLS, S.; AMBROISE, J.; PÉRA, J. Effects of Different Viscosity Agents on the Properties of Self-Leveling Concrete. **Cement and Concrete Research**, v.29, p. 261-266, 1999.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: implications for high performace concretes. 2000. 189 p. Thesis (Doctoral), Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica superior d'enyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona. Barcelona, June, 2000.

ROSSI, L.A. A escória de aciaria e a política ambiental da CST. In: SEMINÁRIO DE ESCÓRIA DE ACIARIA – CST, Vitória, 2003. Apresentação em Power Point. Disponível em:< <http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 429-439, 2001.

SAKATA, N.; MARUYAMA, K.; MINAMI, M. Basic properties and effects of welan gum on self-consolidating concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, Glasgow, 3-5 june 1996. **Proceedings...**Glasgow: RILEM, 1996, p. 237-254.

SAKATA, K.; AYANO, T.; TAKEMURA, I. Effect of an Admixture on Properties of Self-Compacting High-Performance Concrete. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, Supplementary Papers, 1997, Roma. **Proceedings...**Roma: CANMET/ACI, 1997, p.297-309.

SCHLAGBAUM, T. Economic Impact of Self-Consolidating Concrete (SCC) in Ready-Mixed Concrete. In: FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE, 2002, Chicago. **Proceedings...**Chicago: Center for Advanced Cement-Based Materials, 2002, 7 p.

SCHLUMPF, J. Self-compacting concrete structures in Switzerland. (Abstract). **Tunnelling and Underground Space Technology**, Elsevier, v.19, 1p., 2004.

SEDRAN, T.; DE LARRARD, F.; HOURST, F.; CONTAMINES, C. Mix design of self-compacting concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Glasgow. **Proceedings...**Glasgow: RILEM, 1996, p. 439-450.

SEDRAN, T. Rheology. **Final Report**. Brite EuRam Program, LCPC, Task 3, 30 p., 2000.

SELF – COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP (SCCEPG). **The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. Reino Unido: EFNARC, 2005. 63p.

SHIH, P.; WU, Z.; CHIANG, H. Characteristics of bricks made from waste steel slag. **Waste Management**, Elsevier, v.24, p. 1043-1047, 2004.

SHINDOH, T.; YOKOTA, K.;YOKOI, K. Effect of mix constituents on rheological properties of super workable concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Glasgow, 3-5 june. **Proceedings...**Glasgow: RILEM, 1996, p.263 – 270.

SILICA FUME ASSOCIATION (SFA). **Silica fume** – User’s Manual. U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration – April, 2005. Technical Report, Lovettsville, 194p.

SILVA FILHO, L.C.P.; DAL MOLIN, D.C.C.; KIRCHHEIM, A.P.; PASSUELO, A.; PASSA, V.F. Uso do concreto branco estrutural: museu Iberê Camargo. In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES – NOVOS MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES, 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME, 2004, 11p.

SILVA, V.A.M.; LEITE; P.P.N. Tratamento de escória de aciaria LD para produção de acerita. 200-?. **Apresentação em Power Point**. Disponível em: <<http://www.arcelor.com/br/cst/>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

SONEBI, M.; BARTOS, P.J.M.; ZHU, W.; GIBBS, J.; TAMIMI, A. **Properties of hardened concrete**. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 4, p.1-73, 2000.

SU, N.; HSU, K-C.; CHAI, H-W. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, v.31, p. 1799-1807, 2001.

TRANSPORTATION ENGINEERING CONFERENCE, 12 Feb. 2007. Self compacting concrete: setting a new standard for cast in place concrete. **Apresentação em power point**. Louisiana: Lafarge Corporation, February 12, 2007. 85 slides, color.

TUTIKIAN, B.F. **Método de dosagem para concretos auto-adensáveis**, 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B.F.; KUHN, R.O.; BRESCOVIT, J.; DAL MOLIN, D.C.C.; CREMONINI, R.A. Comparação da evolução da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias, do consumo de cimento e penetração íons cloretos dos concretos auto-adensáveis com finos pozolânicos e não pozolânicos. In: 47º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005, Recife. **Anais...** Recife: IBRACON, 2005a, p. 363-371.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.; CREMONINI, R. **Viabilização Econômica do Concreto Auto-adensável**. CAMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). 12º. Concurso Falcão Bauer. 2005b. p. 1-15.

UMEHARA, H.; HAMADA, D.; YAMAMURO, H.; OKA, S. Development and usage of self-compacting concrete in precast concrete field. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, Stockholm, 1999. **Proceedings...** Stockholm: RILEM, 1999.

WORLD TRADE CENTER – SAN MARINO. **Imagem**. Disponível em: <http://www.edilportale.com/>>. Acesso em: 15 set. 2007.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of power content and W/C ratio. *Cement and Concrete Research*, n. 35, 2005, p. 532-539.

ZHU, W.; BARTOS, P.J.M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n.33, 2003, p.921-926.

ZITZER, L.; FORNASIER, G.; MANSILLA, G.; BIBÉ, L. Experiencia argentina em hormigones autocompactantes. In: ENCUENTRO IBEROAMERICANO DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO, 13-17 sept. 2004, Cartagenas de Índias, Colombia. **Apresentação em power point...** Cartagenas de Índias: Federación Iberoamericana del Hormigón Premezclado (FIHP), 2004. 64 slides, color. Disponível em <http://www.hormigonfihp.org/evento/memorias/leonardo_zitzer_experiencia_argentina_hormigones_autocompactantes.pdf>. Acesso em: fev. 2008.

Bibliografia consultada

CAMPION, M. J.; JOST, P.. Self-Compacting Concrete: Expanding the Possibilities of Concrete Design and Placement. **Concrete International**, v. 22, n. 4, 2000, p. 31-34, 2000.

COELHO, M. A. M.. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. 2002. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

COLLEPARDI, M.. Il Calcestruzzo “reoplastico”. **Il Cemento**, n.4, p. 195-204, 1975.

COLLEPARDI, M. Self-Consolidating Concrete in the presence of fly-ash for massive structures. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE – DEVELOPMENT WITH EMPHASIS ON INFRASTRUCTURE, 27 feb. – 3 mar., Hyderabad. **Proceedings...**Hyderabad, India: CANMET/ACI, 2005, p.597-604.

COLLEPARDI, M. Self compacting concrete: what is new? In: SEVENTH CONMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHERMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 10-24 oct., Berlin. **Proceedings...**Berlin: CANMET/ACI, 2003, p. 1-16.

DOMONE, P. The Slump Flow Test for High-Workability Concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, v. 28, n.2, p. 177-182, 1998.

DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W.; MINGSHU, T. Durability Study of Steel Slag. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, New York, v. 27, n. 7, p. 983-987, 1997.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC).**Specification, Production and Use**. Reino Unido: EFNARC, may. 2005, 68 p.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for concrete**. Reino Unido: EFNARC, Sept. 2006, 12 p.

KHAYAT, K. H. Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 346-353, 1999.

MARTIN, D.J. Economic Impact of SCC in Precast Applications. In: FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE, 2002, Chicago. **Proceedings**...Chicago: Center for Advanced Cement-Based Materials, Nov. 2002, 7p.

MONSHI, A.; ASGARANI, M.K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone, **Cement and Concrete Research**, Pergamon, New York, v. 29, p.1373-1377, 1999.

PILEGGI, R. G. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários**. 1996. 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 1996.

RHODE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo Laboratorial**. 2002.101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos: guia para alunos, professores e pesquisadores da UFES**. 7.ed.Vitória: A Biblioteca, 2005, 71 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Guia para Normalização de Referências: NBR 6023: 2002.3.ed**.Vitória: A Biblioteca, 2005, 61p.

XUEQUAN, W.; HONG.; XINKAI, H.; HUSEN, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, New York, v. 29, p.1103-1106, 1999.

Bibliografia de normas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3432: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200) – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735:** Cimento Portland de alto- forno – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5743:** Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5744:** Cimento Portland – Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregado para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13320:** Materiais refratários: Determinação da fluidez de concretos convencionais e de fluência livre. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados: amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland: determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Procedimento 1.02.135** – Análise Química por fluorescência por raios X.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Procedimento 1.02.31** – Determinação de Álcalis Totais por espectrofotometria de absorção atômica.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Procedimento 4.15.03** – Operação do Difratorômetro de Raios-X.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Procedimento 4.15.04** - Preparação de Amostras para Difratomia de Raios-X;

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Procedimento 4.15.11** - Análise por Difração de Raios-X.

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](#)