

ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD EM CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS¹

Marcelo Meneguelli²
João Luiz Calmo,³
Fernando Avancini Tristão³
Marcela Giacometti⁴

Resumo

No desenvolvimento constante da tecnologia de produção de concretos, o concreto auto-adensável (CAA) vem ganhando destaque no cenário nacional e internacional. Na sua dosagem torna-se necessário o uso de aditivos modificadores de viscosidade ou a incorporação de teores maiores de finos objetivando garantir sua estabilidade e coesão. A utilização de finos provenientes de resíduos ou subprodutos industriais é uma opção que visa além de atender aos principais parâmetros reológicos e mecânicos propostos pela literatura científica, auxiliar no desenvolvimento sustentável do setor industrial minimizando os seus impactos ambientais. O setor siderúrgico tem como características o alto consumo de matérias primas e energia, bem como a geração de grandes quantidades de resíduos. A escória de aciaria e a escória de alto forno estão entre os principais resíduos gerados na produção de aço. Assim, este artigo avalia CAA de alta resistência produzidos com quatro tipos de adições (escória de aciaria LD, escória de alto forno, cinzas volante e fíler calcário) através dos ensaios reológicos: V-Funnel Test, Slump flow Test e L-Box Test, e mecânicos: resistência à compressão axial, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade. Além dos resultados apresentados neste trabalho, a pesquisa caminha para um estudo mais amplo das propriedades mecânicas e de durabilidade de CAA produzidos com escória de aciaria LD. Busca-se com esta pesquisa dar contribuição para o desenvolvimento sustentável dos setores envolvidos.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável; Escória de aciaria LD; Adições; Reologia.

SELF-COMPACTING CONCRETE WITH BOF STEEL SLAG ADDITION

Abstract

With constant development of technology for production of concrete, the self-compacting concrete (SCC) has been gaining prominence in national and international scene. In its determination becomes necessary the use of additives viscosity modifiers or the incorporation of higher levels of fine aiming to ensure its stability and cohesion. The use of fines from industrial waste or by-products is an option that aims to more than meet the main mechanical and rheological parameters proposed by the scientific literature, assist in the sustainable development of the industrial minimizing their environmental impacts. The steel industry has characteristics such as the high consumption of raw materials and energy, and the generation of large quantities of waste. The steel slag and blast furnace slag are among the main waste generated in the production of steel. Thus, this article evaluates high resistance SCC produced with four types of additions (BOF steel slag, blast furnace slag, fly ash and limestone fillers) through the rheological tests: V-Funnel Test, Slump flow test and L-Box Test, and mechanical: compressive resistance, indirect tensile strength and elasticity modulus. In addition to the results presented in this paper, the search moves to a broader study of the mechanical properties and durability of SCC produced with BOF steel slag. Search of this research was to give contribution to sustainable development of the sectors involved.

Key words: Self-compacting concrete; BOF steel slag; Additions; Reology.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Prof. Eng. Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – Cefetes, Mestrando Prog. Pós-Graduação em Eng. Civil, Univ. Fed. Espírito Santo – PPGEC/UFES, email: meneguelli@ct.ufes.br, meneguelli@cefetes.br.*

³ *Prof. Dr. Depto. Eng. Civil, UFES, email: calmont@npd.ufes.br, fernandoavancini@ct.ufes.br.*

⁴ *Eng. Civil, Pref. Municipal de Vitória, Mestranda PPGEC/UFES, email: marcelaufes@yahoo.com.br.*

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais características do setor da construção civil é o consumo de grandes quantidades de matéria prima e energia, e a geração significativa de resíduos. Por outro lado, dentro de suas atividades, permite-se a reciclagem ou a reutilização dos resíduos por ele gerados ou de outros setores industriais. Nas últimas décadas, duas relevantes atividades da indústria da construção: o cimento portland e o concreto com cimento portland, vêm passando por significativas transformações. A utilização de novos materiais a serem incorporados na produção de cimento ou concreto, em sua grande maioria resíduos ou subprodutos industriais, tem contribuído significativamente para a melhoria de suas principais propriedades e conseqüentemente no desempenho dos produtos por eles confeccionados ao longo do seu ciclo de vida. Neste contexto, as questões ambientais, principalmente as que tratam do desenvolvimento sustentável dos diversos segmentos do setor industrial e não apenas da construção civil, vem ganhando importância e iniciativas dos setores envolvidos e governamentais. Os aspectos técnicos que antes norteavam as discussões e as tomadas de decisão destes setores, atualmente compartilham com os aspectos ambientais igualdade de importância. Hoje, exige-se a necessidade da compatibilidade de ambos para que muitos projetos sejam implementados ou dêem prosseguimento.

Segundo Mehta e Monteiro⁽¹⁾ o concreto é o segundo material mais consumido no mundo perdendo apenas para a água. Na importância deste material e no desenvolvimento contínuo da engenharia de materiais, ambientam-se os concretos de alto desempenho e mais especificamente o concreto auto-adensável (CAA). Este é resultado principalmente de pesquisas envolvendo os aditivos para concretos. Na sua dosagem, o uso de aditivos superplastificantes, modificadores de viscosidade ou o ajuste ideal da quantidade de finos a serem incorporados são condições necessárias para atingir os parâmetros principalmente reológicos de sua produção. Estes elementos, combinados com os demais componentes da mistura, irão garantir a coesão, viscosidade e tensão de escoamento necessárias para estabilidade, capacidade de preenchimento das formas devido a ação única de seu peso próprio e fluidez como propriedades reológicas fundamentais do concreto auto-adensável.^(2,3)

Outra característica da dosagem do CAA é a utilização de um teor maior de finos, não apenas para garantir as propriedades reológicas já mencionadas como também contribuir para um melhor desempenho no seu estado endurecido. Estes finos podem ser provenientes da seleção do agregado miúdo ou do uso de adições inertes, pozolânicas ou cimentíceas. Estas contribuirão não apenas nas propriedades do estado fresco ou endurecido, como também proporcionarão ganhos ambientais significativos, já que boa parte destes materiais são subprodutos ou resíduos industriais. Merecem destaque: a escória de alto forno granulada, a cinza volante, o fíler calcário, a sílica ativa e vários outros.⁽³⁾

O setor siderúrgico, similar à construção civil, demanda grandes quantidades de recursos naturais como matéria prima e gera altos volumes de resíduos ou subprodutos. Em média, para cada tonelada de aço líquido são gerados de 100 a 150kg de escória de aciaria.⁽⁴⁾ Em 2007, estima-se a geração de 3,5 milhões de toneladas de escória de aciaria para uma produção de 34 milhões de toneladas de aço. Deste total, aproximadamente 26 milhões de toneladas foram produzidos pelo processo LD.⁽⁵⁾ Devido às justificativas apresentadas, esta pesquisa baseada em outras realizadas na viabilidade do uso da escória de aciaria como adição a

cimentos ou concretos convencionais,^(6,7) propõe a utilização da escória de aciaria LD como adição a concretos auto-adensáveis, quer como mistura binária ou ternária com o cimento portland. Assim, vêm sendo desenvolvidas pelo Núcleo de Desenvolvimento da Construção Civil (NDCC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pesquisas que buscam a viabilidade do uso da escória de aciaria LD como adição a concretos auto-adensáveis de alta resistência (CAAAR) através dos estudos de suas propriedades reológicas, mecânicas e durabilidade.

Este artigo apresenta resultados de propriedades do estado fresco e endurecido da produção de quatro dosagens de concretos auto-adensáveis de alta resistência utilizando a escória de aciaria LD, escória de alto forno granulada, cinza volante e fíler calcário como adições ao concreto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Cimento e adições minerais

Foi definido como principal aglomerante para esta pesquisa o cimento CP V-ARI (CIM) atendendo a NBR 5733⁽⁸⁾ por possuir em sua composição apenas material carbonático como adição. Esta decisão foi tomada objetivando neutralizar a adição ao cimento como uma variável da pesquisa. As Tabelas 1 e 2 apresentam sua caracterização física e química.

As adições minerais utilizadas foram: escória de aciaria LD (EALD), escória de alto forno granulada (EGAF), cinza volante (CV) e fíler calcário (CAL). A Figura 1 apresenta fluxograma do beneficiamento e tratamento da escória de aciaria empregada e a Figura 2 parte do seu beneficiamento. Maiores informações sobre esta etapa podem ser encontradas em Calmon *et al.*⁽⁹⁾ As características físicas e químicas das adições estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Características físicas das adições e do cimento empregado

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

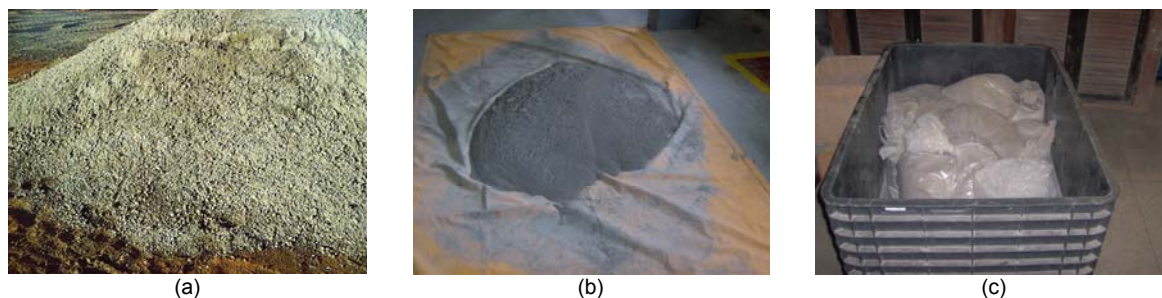


Figura 1. Fluxograma resumo do beneficiamento da escória de aciaria LD

Tabela 2. Composição química das adições utilizadas

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

* a determinar

**Figura 2.** Material transportado para realização do peneiramento após amostragem no pátio de escória (a), homogeneização e quarteamento da escória após moagem, estocagem final da escória como adição (c).

Para a determinação da massa específica do cimento e das adições foi utilizada a NBR NM 23⁽¹⁰⁾ que trata de materiais em pó. A análise mineralógica foi realizada por difratometria de Raios-X, sendo as amostras pulverizadas e utilizada a fração passante na peneira 325 mesh Tyler (0,043mm) através do método do pó não-orientado (Figura 3). A composição granulométrica das adições pode ser visualizada na Figura 4.

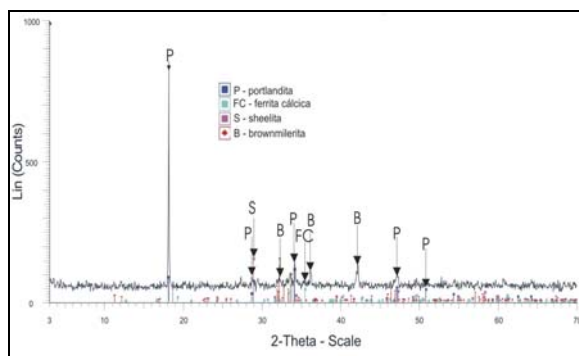


Figura 3. Difratograma da escória de aciaria moída

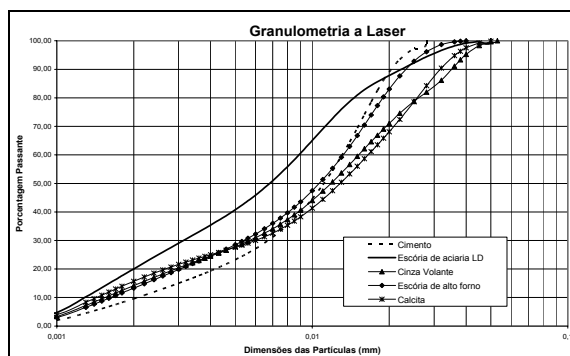


Figura 4. Composição granulométrica das adições

2.1.2 Agregados

Foram utilizados como agregado gráudo brita de origem granítica e miúdo uma areia quartzosa natural, atendendo a NBR NM 7211.⁽¹¹⁾ A Tabela 3 apresenta suas características físicas.

Tabela 3. Características físicas dos agregados utilizados

Característica	Norma		Agregado Gráudo	Agregado Miúdo
Distribuição Granulométrica	NBR NM 248 ⁽¹²⁾	Abertura	% retida acumulada	% retida acumulada
		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	NBR NM 248 ⁽¹²⁾		12,5 mm	2,4 mm
Módulo de finura	NBR NM 248 ⁽¹²⁾		5,77	1,97
Classificação	NBR NM 248 ⁽¹²⁾		Zona 4,75/12,5	Zona utilizável
Massa específica	NBR NM 52 ⁽¹³⁾ NBR NM 53 ⁽¹⁴⁾		2,748 g/cm ³	2,653 g/cm ³
Absorção	NBR NM 53 ⁽¹⁴⁾ NBR NM 30 ⁽¹⁵⁾		0,37%	0,21%

2.1.3 Aditivos

Como aditivo foi empregado um superplastificante à base de policarboxilatos, marca comercial Glenium 51, massa específica de 1,065 g/cm³ e teor de sólidos de 26,7%, se apresentando na forma líquida viscosa.

2.2 Programa Experimental

O desenvolvimento do programa experimental foi realizado nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo e o fluxograma (Figura 5) apresenta sua síntese.

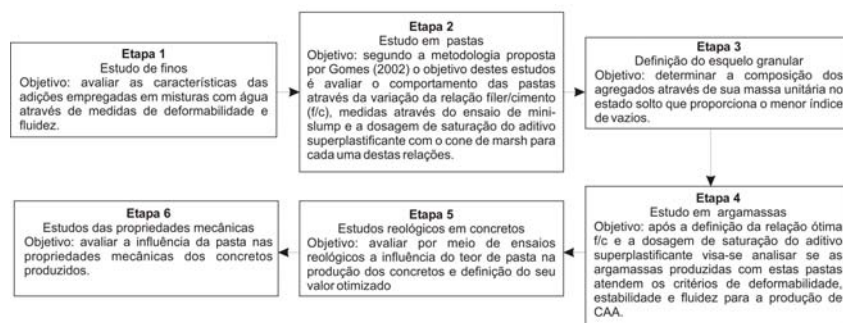


Figura 5. Fluxograma da pesquisa

Não serão apresentados neste trabalho resultados das Etapas 1 a 4, contudo podem ser encontradas em Calmon *et al.* ^(9,16)

A dosagem dos concretos foi realizada utilizando a metodologia desenvolvida por Gomes⁽¹⁷⁾ na Universitat Politècnica de Catalunya, chamada de método de dosagem da UPC. Este consiste na determinação de uma pasta que atende determinados parâmetros de deformabilidade e fluidez e uma composição granulométrica dos agregados que resultem no menor índice de vazios no estado solto. Para esta determinação foi utilizado o método apresentado na NBR NM 45.⁽¹⁸⁾

De acordo com o método proposto, que visa a dosagem de concretos auto-adensáveis de alta resistência, foi estabelecido o fator $a/c = 0,35$ e os teores de pasta variando de 38% a 44% em volume.

É importante salientar que a proporção das misturas das adições foi estabelecida após revisão da literatura visando não apenas o ponto de vista reológico, como também o comportamento da escória de aciaria em conjunto com adições hidráulicas (escória de alto forno granulada) e pozolânicas (cinza volante) na busca de materiais que em contato com o óxido de cálcio livre, caso existente em teores elevados na escória de aciaria LD, propicie em parte sua inertização, transformando-o em outros compostos que colaborem para uma melhoria da durabilidade das pastas confeccionadas com estas adições. Teores elevados de óxido de cálcio livre têm como característica provocar expansões na escória de aciaria quando em contato com ar ou umidade. Entretanto, outros fatores também podem colaborar para o fenômeno da expansão das escórias.^{(4), (6), (7)} Para analisar este fator um dos ensaios realizados foi o método das agulhas de Le Chatelier estabelecido na NBR 11582 ⁽¹⁹⁾. Este método é utilizado para avaliar possíveis expansões em pastas de cimento devido a presença de óxido de cálcio livre ⁽⁴⁾. A NBR 5732⁽²⁰⁾ estabelece o limite de 5mm para abertura das agulhas.

A Tabela 4 apresenta os ensaios reológicos propostos e os valores esperados recomendados em EPG⁽²⁾ e Gettu e Agulló.⁽³⁾

Tabela 4. Ensaios Reológicos propostos

Ensaio		Objetivos	Valores Projetados
Nº.	Nome		
1	Slump flow e T_{50}	Avaliar a capacidade de fluir e susceptibilidade à segregação do concreto.	$D_f = 75 \pm 5$ cm $T_{50} = 5 \pm 1$ s
2	Slump flow com anel J	Avaliar além da capacidade de fluir do concreto e resistência à segregação, sua habilidade de contornar as barras de armadura.	$D_{fJ} > D_f - 5$ cm $H_{int} - H_{ext} < 10$ mm
3	V-Funnel Test	Determinar a fluidez do concreto e de forma indireta a sua viscosidade.	T_v entre 10 e 15s
4	Caixa L	Medir a capacidade de preenchimento das formas com obstáculos que simulam a armadura.	$RB > 0,80$ $T_{L20} < 1,5$ s $T_{L40} < 3,5$ s

Os traços que atenderam aos parâmetros apresentados na Tabela 4 tiveram suas propriedades mecânicas analisadas. Aqui serão apresentados os resultados da resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, atendendo as normas NBR 5738,⁽²¹⁾ NBR 5739,⁽²²⁾ NBR NM 8⁽²³⁾ e NBR 8522.⁽²⁴⁾ Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizadas formas metálicas com dimensões de 10x20cm, e a moldagem ocorreu em uma só camada sem adensamento. Os corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram retificados para a regularização das bases. Os equipamentos utilizados para a determinação da resistência à compressão e tração foi uma prensa hidráulica AMSLER com capacidade de 200 toneladas de carga e para o módulo de elasticidade uma prensa hidráulica EMIC para 300 toneladas, sistema eletrônico de aquisição de dados e extensômetros eletrônicos.

3 RESULTADOS

Para uma melhor interpretação, os concretos com adição de fíler calcário serão denominados CONC100CAL, com adição de escória de aciaria CONC100EALD, com substituição de 15% em massa da adição de escória de aciaria por cinza volante CONC85LD15CV e finalmente os concretos com substituição de 30% em massa da escória de aciaria por escória de alto forno CONC70LD30AF.

3.1 Relativos às Propriedades Reológicas

As Tabelas 5, 6, 7 e 8 apresentam os resultados do estudo reológico dos concretos produzidos.

Tabela 5. Resultados CONC100CAL

Proporções (kg/m³)					
Volume de pasta (%)		40	42		44
f/c		0,30	0,30	0,40	0,30
Teor de aditivo (%)		0,85	0,95	1,20	0,85
Cimento		516	542	520	568
Fíler calcário		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
Tempo slump flow - T ₅₀ (s)		6,5	3,6	5,2	4,8
V funnel Test (s)		39,9	15,2	35,9	12,5
Slump flow com anel-J	D _f (cm)	63	80	77	72
	H _{int} - H _{ext} (mm)	8,5	3,0	2,5	3,8
Caixa L	T _{L20} (s)	5,0	1,0	3,0	1,0
	T _{L40} (s)	10,0	3,0	6,0	3,0
	RB=H ₂ /H ₁	0,93	0,98	0,95	1,00
Massa específica (kg/m ³)		2419	2387	2423	2405
Ar incorporado (%)		2,20	0,80	1,62	1,85

Tabela 6. CONC100EALD

Proporções (kg/m³)						
Volume de pasta (%)		38	40	42		44
Teor de aditivo (%)		1,15	1,20	1,15	1,20	1,20
Cimento		471	496	520	520	545
Escória de aciaria LD		188	198	208	208	218
Água adicionada		161	169	178	178	186
Aditivo superplastificante		5,41	5,95	5,98	6,24	6,54
Areia		810	783	756	756	729
Brita		810	783	756	756	729
Resultados dos ensaios reológicos						
Slump flow (cm)		67	75	73	75	76
Tempo slump flow - T ₅₀ (s)		2,81	4,35	4,32	3,88	4,17
V funnel Test (s)		18,50	17,19	24,06	17,47	16,90
Slump flow com anel J	D _f (cm)	50	69	71	74	76
	H _{int} - H _{ext} (mm)	7,50	1,25	4,00	5,00	5,75
Caixa L	T _{L20} (s)	1,7	2,0	2,4	2,4	1,5
	T _{L40} (s)	3,8	3,4	4,7	4,3	2,5
	RB=H ₂ /H ₁	0,82	0,90	0,87	0,89	1,00
Massa específica (kg/m ³)		2457	2457	2416	2418	2425
Ar incorporado (%)		1,75	1,35	2,10	2,40	1,75

Tabela 7. CONC70LD30AF

Proporções (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	38	40	42
Teor de aditivo (%)	1,35	1,35	1,35
Cimento	469	493	518
Escória de aciaria LD	131	138	145
Escória granulada de alto forno	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 reológicos			
Slump flow (cm)	78	81	79
Tempo slump flow - T ₅₀ (s)	7,94	5,07	4,59
V funnel Test (s)	32,7	30,1	14,8
Slump flow com anel J	D _f (cm)	82	74
	H _{int} - H _{ext} (mm)	2,25	7,25
Caixa L	T _{L20} (s)	4,0	2,0
	T _{L40} (s)	7,0	6,0
	RB=H ₂ /H ₁	0,95	0,98
Massa específica (kg/m ³)	2429	2420	2435
Ar incorporado (%)	2,65	2,30	1,65

Tabela 8. CONC85LD15CV

Proporções (kg/m³)			
Volume de pasta (%)	38	40	42
Teor de aditivo (%)	1,35	1,35	1,35
Cimento	470	494	519
Escória de aciaria LD	160	168	176
Cinza volante	28	30	31
Água adicionada	160	168	177
Aditivo superplastificante	6,34	6,67	7,00
Areia	810	783	756
Brita	810	783	756
Resultados dos ensaios reológicos			
Slump flow (cm)	69	76	82
Tempo slump flow - T ₅₀ (s)	8,1	7,62	4,51
V funnel Test (s)	49,7	23,5	16,5
Slump flow com anel J	D _f (cm)	66	72
	H _{int} -H _{ext} (mm)	8,5	3,0
Caixa L	T _{L20} (s)	4,0	2,0
	T _{L40} (s)	9,0	4,0
	RB=H ₂ /H ₁	0,88	1,00
Massa específica (kg/m ³)	2427	2428	2402
Ar incorporado (%)	2,25	1,90	2,35

3.2 Relativos às Propriedades Mecânicas e Análise Dimensional

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8 e os parâmetros propostos na Tabela 4 foram definidos os concretos para a verificação de suas propriedades mecânicas. A Tabela 9 apresenta os concretos selecionados e as Figuras 6 a 8 os valores médios dos resultados encontrados das propriedades mecânicas estudadas.

Tabela 9. Traços selecionados para análise das propriedades mecânicas

Concreto	% pasta	f/c	% SP	Slump flow (cm)	Funil V (seg)	Traço em massa (cim:ad1:ad2:ag:am:a/c:sp%)*
CONC100EALD	42	0,4	1,20	75	17,5	1:04:1,45:1,45:0,35:1,20%
CONC70LD30AF	42	0,4	1,35	79	14,8	1:0,28:0,12:1,45:1,45:0,35:1,35%
CONC85LD15CV	42	0,4	1,35	82	16,5	1:0,34:0,06:1,45:1,45:0,35:1,35%
CONC100CAL	42	0,3	0,95	84	15,2	1:0,3:1,45:1,45:0,35:0,95%

* cim = cimento, ad1 = adição 1, ad2 = adição 2, ag = agregado graúdo, am = agregado miúdo, sp = superplastificante, a/c = fator água/cimento

Para o ensaio com as agulhas de Le Chatelier foram preparadas misturas em massa na proporção de 50% de cimento e 50% das adições empregadas, sempre mantendo entre as adições a proporcionalidade em massa de 100EALD, 85LD15CV e 70LD30AF. Foram confeccionadas sete agulhas para este ensaio. A Tabela 10 apresenta os resultados encontrados e a Figura 9 aparência final das agulhas após ensaio a quente.

Tabela 10. Resultados Expansibilidade agulhas Le Chatelier

CARACTERÍSTICA	MISTURA		
	100EALD	70LD30AF	85LD15CV
Água da pasta da consistência normal (%)	27	29	29
Expansibilidade a quente - abertura das agulhas (mm) – (média ± desvio padrão)	0,8 ± 0,8	1,0 ± 0,3	0,8 ± 0,5
Expansibilidade a frio – abertura das agulhas (mm) – (média ± desvio padrão)	1,0 ± 0,5	1,2 ± 0,4	0,5 ± 0,5

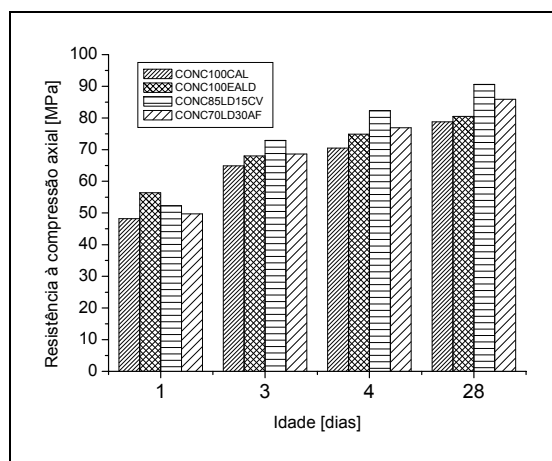


Figura 6. Resistência à compressão

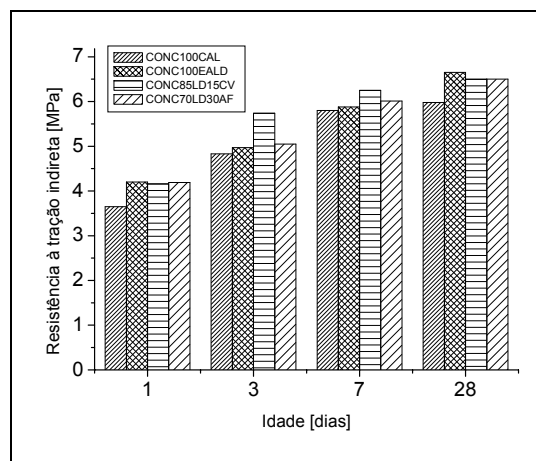


Figura 7. Resistência à tração por compressão diametral

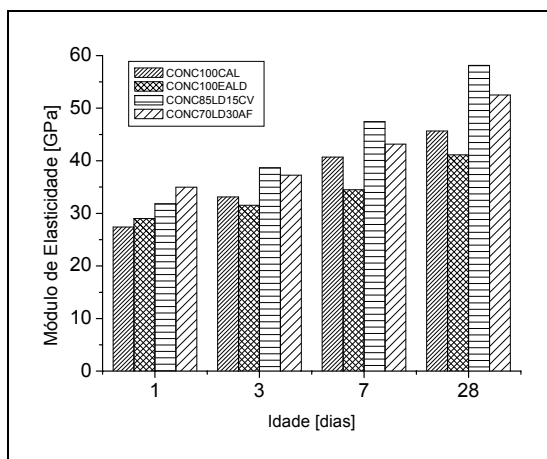


Figura 8. Módulo de elasticidade



Figura 9. Agulhas após ensaio 100LD

4 DISCUSSÃO

Com relação a deformabilidade dos concretos avaliada no ensaio de slump-flow test, verifica-se que todos com teores de pasta superior a 40% atenderam ao espalhamento proposto na Tabela 5. Importante salientar que os concretos com teores de pasta de 42% submetidos a este ensaio apresentarem alta deformabilidade, em torno de 80cm, mas sem nenhuma segregação visual. O uso da cinza volante e da escória de alto forno substituindo parte da massa de escória de aciaria contribuiu para o aumento da dosagem do aditivo superplastificante. Isto pode ser explicado devido a diferença de massa específica destes materiais que proporciona a introdução de um volume superior de adição quando comparados proporcionalmente com a substituição em massa. Esta mesma justificativa pode explicar o uso da menor relação f/c do concreto produzido com fíler calcário e conseqüente aumento do consumo de cimento. Contudo este aumento do consumo não foi tão significativo e próximo aos valores apresentados por Gomes⁽¹⁷⁾ em sua revisão para esta faixa de resistência e fator a/c . Verifica-se também que a substituição da escória de aciaria LD pela escória de alto forno e cinza volante contribuiu, para um mesmo teor de pasta e relação f/c , para um aumento na dosagem de aditivo superplastificante. A alta viscosidade dos concretos produzidos avaliada indiretamente no ensaio V-Funnel Test foi outra característica comum a todos eles. O elevado teor de finos provenientes das adições empregadas e do agregado miúdo utilizado contribuiu para aumentar a viscosidade da mistura proporcionando tempos de fluidez superiores aos recomendados por Gettú e Agulló⁽³⁾. Entretanto de acordo com EPG⁽²⁾ estes concretos se localizam dentro de uma faixa de aplicações em que poderiam ser empregados. Quanto a capacidade de preenchimento avaliada no ensaio com a Caixa-L, todos os concretos apresentaram taxa de bloqueio (RB) superior a 0,8 atendendo a uma das principais características do CAA: habilidade de preencher as formas sem necessidade de vibração passando por obstáculos sem bloqueio dos agregados.⁽²⁾

Quanto à resistência à compressão axial e à tração indireta, os concretos com adição de escória de aciaria LD (CONC100EALD, CONC85LD15CV, CONC70LD30AF) apresentaram valores médios superiores aos concretos com fíler calcário (CONC100CAL). Contudo uma análise de significância para todas as propriedades mecânicas estudadas levando em consideração os desvios encontrados torna-se necessário para uma melhor interpretação estatística dos

resultados. Fato significativo trata da análise do módulo de elasticidade. O concreto com fíler calcário (CONC100CAL) apresentou para a idade de 1 dia valor inferior ao concreto com escória de aciaria (CONC100EALD), entretanto para as demais idades a sua curva de crescimento foi superior, ultrapassando os valores encontrados em CONC100EALD. Um resultado esperado foi o aumento dos valores da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade devido à substituição de parte da escória de aciaria por escória de alto forno e cinza volante. Este resultado está de acordo com estudos apresentados por Gomes⁽¹⁷⁾ e Aitcin⁽²⁵⁾. Deve-se lembrar que estas adições são reativas (hidráulicas e pozolânicas) e contribuem para uma melhor microestrutura da pasta e da zona de transição com os agregados. A utilização de técnicas de análise microestrutural auxiliará numa melhor interpretação destes resultados.

Em relação aos resultados com as agulhas de Le Chatelier verificou-se que todas as pastas apresentaram aberturas inferiores aos limites estabelecidos para o cimento portland..^(19,20) Contudo este método para análise de expansibilidade em escórias de aciaria é bastante discutido por Machado⁽⁴⁾ e Gumieri⁽⁶⁾. Ressalta-se que nesta pesquisa outros métodos para análise dimensional em matrizes cimentícias estão sendo realizados e não serão apresentados neste trabalho. Contudo este ensaio é utilizado por diversos autores como Gumieri⁽⁶⁾, Geyer⁽⁷⁾, Machado⁽⁴⁾ além de outros citados por todos eles como um método para detecção de possíveis expansões causada principalmente pelo óxido de cálcio livre remanescente na escória de aciaria. A avaliação por meio de outros métodos que visem analisar a estabilidade dimensional é fundamental para caracterizar as pastas, argamassas e os concretos produzidos com escória de aciaria.

5 CONCLUSÕES

É possível produzir concretos auto-adensáveis com a metodologia proposta. Contudo como apresentado em Calmon *et al*⁽¹⁶⁾ ajustes tornam-se necessários para que os parâmetros reológicos estabelecidos sejam alcançados. Todos os concretos selecionados apresentaram como proposto por Gomes⁽¹⁷⁾ e para esta pesquisa resistência à compressão média superior a 50MPa aos 7 dias e 80MPa aos 28 dias. Tanto o comportamento como o desempenho no estado fresco e endurecido está de acordo com a literatura técnico-científica apresentada. Tanto no ponto de vista reológico como no mecânico os concretos produzidos com escória de aciaria apresentaram desempenho similar ou superior aos produzidos com fíler calcário. Isto aponta para sua viabilidade como adição a concretos auto-adensáveis, contudo um estudo amplo e detalhado visando não apenas analisar outras propriedades reológicas e mecânicas, mas principalmente relacionadas à durabilidade destes concretos é fundamental para esta conclusão.

Este trabalho apresentou resultados parciais de um estudo que objetiva caracterizar a influência da escória de aciaria LD como adição nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade de concretos auto-adensáveis de alta resistência.

Agradecimentos

Agradecemos aos técnicos do LEMAC–UFES, às empresas: Arcelor Mittal Tubarão, Holcim, Cimento Pozosul, Cimento Mizu, Basf Construction Chemicals, Vamtec S/A, Furnas Centrais Elétricas e outros que contribuíram para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994.
- 2 SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP (EPG). *The European guidelines for self compacting concrete*. Reino Unido, 2005.
- 3 GETTU, R.; AGULLÓ, L. *Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- 4 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, 2000.
- 5 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Produção siderúrgica brasileira*. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 7 abr. 2008.
- 6 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 Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- 7 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 de Minas, Materiais e Metalurgia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733: cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991.
- 9 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*. [S.l.]: Ibracon, 2007.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2000.
- 11 _____. *NBR 7211: Agregado para concreto - especificação*. Rio de Janeiro, 2005.
- 12 _____. *NBR NM 248: Agregados: determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- 13 _____. *NBR NM 52: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2003.
- 14 _____. *NBR NM 53: Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2003.
- 15 _____. *NBR NM 30: Agregado miúdo: determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001.
- 16 CALMON, J. L.; GIACOMETTI, M.; MENEGUELLI, M.; TRISTÃO, F.A. Studies of pastes and mortars in the production of high-strength self-compacting concrete with BOF steel slag filler. In: SPANISH CONGRESS ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1., 2008. [S.n.t.].
- 17 GOMES, P.C.C. *Optimization and characterization of high-strength self compacting concrete*. 2002.139 p. Tesis (Doctoral em Engenharia) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.
- 18 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
- 19 _____. *NBR 11582: Determinação da expansibilidade Le Chatelier*. Rio de Janeiro, 1991.
- 20 _____. *NBR 5732: Cimento Portland comum: especificação*. Rio de Janeiro, 1991.
- 21 _____. *NBR 5738: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2003.
- 22 _____. *NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.
- 23 _____. *NBR NM 8: Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro, 1994.
- 24 _____. *NBR 8522: Concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*. Rio de Janeiro, 2003.
- 25 AÏTCIN, P.-C. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: PINI, 2000.