

Influence of foundry sand residues on the fresh and hardened properties of mortars produced with portland cement

Influência do emprego de areia de fundição residual nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas cimentícias



W. R. L. DA SILVA ^a
wilsonecv@gmail.com

E. TOCHETTO ^b
eduardo_tochetto@hotmail.com

L. R. PRUDÊNCIO JR. ^c
prudenciouk@hotmail.com

A. L. OLIVEIRA ^d
alexandre@ifsc.edu.br

Abstract

The foundry sand waste (FSW) derives from moulds used in the metallurgical industries. The present experimental study was developed to evaluate the influence of the use of FSW on concrete properties. The mixtures were produced with cement CPV-ARI-RS, water reducing admixture, FSW, natural and crushed aggregates. The properties on the fresh state were evaluated by means of flow table test and the determination of the incorporated air content. On the hardened state, compressive strength tests were performed. The initial results have shown that the use of FSW leads to an increase in the air content and cracking, caused by expansive reactions. As a result of that, a reduction in the compressive strength has been noticed. In order to define the origin of the presented trends, a complementary study was developed using FSW with different compositions. However, regardless the composition of the FSW, the obtained results presented trends which were similar to the ones previously observed. Finally, considering the materials herein used, the addition of FSW in concrete is considered inadequate since this leads to a decrease not only in the compressive strength, but also in the durability of the material.

Keywords: residues, foundry sand waste, expansive reactions

Resumo

A areia de fundição residual (AFR) consiste em um resíduo arenoso proveniente dos moldes utilizados no processo de fundição de metais. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência do uso da AFR nas propriedades concreto. Para tanto, utilizou-se cimento CPV-ARI RS, aditivo plastificante, AFR e areias fina, média natural e de britagem. As propriedades no estado fresco foram avaliadas através da determinação da consistência e teor de ar incorporado. No estado endurecido avaliou-se a resistência à compressão axial. Os resultados indicaram que o uso da AFR resulta no aumento do teor de ar incorporado, fissuração por reações expansivas e conseqüente redução de resistência. Visando investigar a origem das tendências observadas, realizou-se um estudo complementar empregando AFR de diferentes composições. Todavia, independente da composição utilizada, os resultados indicaram tendência semelhante à observada anteriormente. Por fim, considerando os materiais empregados nesta pesquisa, conclui-se que a utilização da AFR em concreto é inadequada, pois prejudica não apenas a resistência mecânica, mas também a durabilidade do material.

Palavras-chave: areia de fundição residual, resíduos, reações expansivas.

^a MSc. Civil Engineer, Czech Technical University in Prague – CTU, Faculty of Civil Engineering, wilsonecv@gmail.com, Thakurova 7, 166 29 Prague 6 Czech Republic.

^b Civil Engineer, Justiça Federal do Paraná – JFPR, eduardo_tochetto@hotmail.com, Av. Anita Garibaldi 888, 80540-180 Curitiba/PR Brazil.

^c Professor, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Civil, prudenciouk@hotmail.com, Campus Universitário, s/n – Engenharia. Civil, Bloco B, r.114, 88040-970 Florianópolis/SC Brazil.

^d Professor, Instituto Federal de Educação – IFSC, Departamento Acadêmico de Construção Civil, alexandre@ifsc.edu.br, Rua Mauro Ramos 950, 88020-300 Florianópolis/SC Brazil.

1. Introdução

A fundição consiste em um processo de fabricação onde um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado em um molde que contém uma cavidade com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida. O método de moldagem em areia é o mais utilizado para a produção de peças fundidas. Estima-se que 85 a 90% das peças produzidas utilizam moldes feitos de areia aglomerada, cuja composição é dada por um material granular refratário (areia base), água e aditivos orgânicos e/ou bentonitas como ligantes. Tal processo é conhecido como moldagem em areia verde e é limitado a aplicação na produção de peças de pequeno e médio porte.

Além do processo descrito anteriormente, cerca de 10 a 15% da produção de peças metálicas faz uso do processo de moldagem em areia de macho. Este processo consiste em uma mistura de areia, bentonita, elementos orgânicos e produtos sintéticos, por exemplo, resinas fenólicas e furânicas, e óleos secativos (óleo de macho, óleo de linhaça, entre outros). Tais componentes são misturados e secados a temperaturas entre 150 - 250°C.

Um dos problemas inerentes a ambos os processos é o fato de que, após um determinado número de utilizações, a areia utilizada perde as propriedades necessárias para a fabricação de outros moldes, gerando, desse modo, significativa quantidade de resíduo.

A produção de uma tonelada de metal fundido gera, aproximadamente, uma tonelada de resíduo [1]. Dados da Associação Brasileira de Fundição [2] indicam que a produção de fundidos no Brasil excedeu os três milhões de toneladas no ano de 2007. Logo, constata-se que, só no ano de 2007, a indústria brasileira de fundição gerou aproximadamente três milhões de toneladas de resíduo.

A legislação ambiental brasileira determina que estes resíduos devem ser depositados em aterros industriais ou incinerados. Tal necessidade gera um sério problema ambiental, devido não apenas ao elevado volume de resíduo produzido, mas também às substâncias tóxicas neles encontradas, visto que a areia fica

Tabela 1 – Agregados empregados no estudo proposto	
Nomenclatura	Descrição
AM	Areia média de rio
AF	Areia fina de duna
AB	Areia de britagem
AFRV	Areia fundição residual verde

contaminada por elementos e compostos químicos, tais como: arsênio, cádmio, chumbo, fenóis, mercúrio, sódio, entre outros [3]. Além do problema ambiental, o grande volume de resíduos também preocupa os empresários do setor devido ao elevado custo para gestão e destinação dos mesmos. De modo geral, a areia de fundição residual tem código de identificação A016 e é classificada como um resíduo não perigoso – Classe II [4]

Nesse contexto, as empresas do setor têm buscado alternativas para reaproveitar a areia de fundição residual, o que diminuiria o custo de disposição do resíduo e implicaria em menor impacto ambiental. Uma alternativa em potencial para o reaproveitamento da areia de fundição residual é utilizá-la como agregados na produção de concreto, tendo em vista que os agregados ocupam cerca de três quartas partes do seu volume. No que tange à aplicação de areia de fundição residual em concreto, destacam-se os estudos desenvolvidos por Khatib & Ellis [5], Naik et al. [6, 7], Siddique et al [8], Tikalsky et al [9], e Kraus et al [10]. Além destes, Fiore & Zanetti [11] investigaram o emprego de areia de fundição residual na produção de concreto reciclado. Em outros estudos, como por exemplo, Klinsky [3], Bakis et al. [12] e Javed et al. [13], estudou-se o emprego de areia de fundição residual em concreto asfáltico.

Tabela 2 – Areia de fundição residual verde - análise do extrato lixiviado segundo (16)

Parâmetros	Amostra	Valor de referência definido em (4)	Limite de detecção
Arsênio (mg/L)	<0,001	1,0	0,001
Bário (mg/L)	0,061	70,0	0,008
Cádmio (mg/L)	<0,0001	0,5	0,0001
Chumbo (mg/L)	0,003	1,0	0,001
Cromo (mg/L)	0,027	5,0	0,001
Fluoreto (mg/L)	0,150	150,0	0,05
Mercúrio (mg/L)	<0,0001	0,1	0,001
Prata (mg/L)	<0,0001	5,0	0,0001
Selênio (mg/L)	<0,001	1,0	0,001
pH inicial	4,6	-	0,01

O emprego do resíduo em questão na produção de concreto e materiais a base de cimento Portland contribuiria não apenas para a eliminação da necessidade de disposição dos resíduos em aterros industriais, mas também para redução do volume de areia extraído de cavas e rios destinado a produção de concreto. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do uso da areia de fundição residual proveniente do processo de moldagem em areia verde nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais empregados na produção das misturas

Previamente à apresentação dos materiais e programa experimental é importante salientar que os testes realizados no presente

trabalho foram desenvolvidos em argamassas em função da boa correlação que vem sendo encontrada com os resultados de concretos [14].

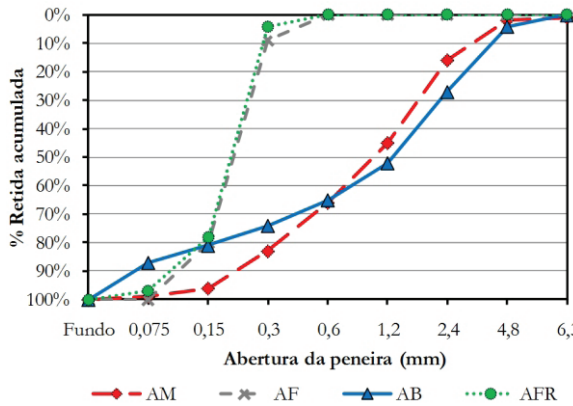
Na produção das misturas de argamassas utilizadas ao longo do estudo realizado foi empregado cimento CPV ARI RS [15], de massa específica de 3,00 kg/dm³, e aditivo redutor de água (polifuncional), de massa específica de 1,08 kg/dm³. Além destes, foram empregados três diferentes tipos de agregados miúdos. A descrição de cada um dos tipos de agregados empregados e a respectiva nomenclatura utilizada ao longo do presente trabalho é apresentada na Tabela 1.

No que tange à areia fundição residual verde (AFRV), destaca-se que esta corresponde à areia fina de duna (AF) imediatamente após o processo de moagem dos moldes utilizados no processo de fundição de metais. Neste caso, a AF é misturada com carvão

Tabela 3 – Areia de fundição residual verde - análise do extrato solubilizado segundo (17)

Parâmetros	Amostra	Valor de referência definido em (4)	Limite de detecção
Alumínio (mg/L)	0,540	0,200	0,001
Arsênio (mg/L)	<0,001	0,010	0,001
Bário (mg/L)	0,019	0,700	0,008
Cádmio (mg/L)	<0,0001	0,005	0,0001
Chumbo (mg/L)	0,001	0,010	0,001
Cianeto (mg/L)	<0,004	0,070	0,004
Cloreto (mg/kg)	16,3	250,0	0,500
Cobre (mg/L)	0,042	2,000	0,001
Cromo (mg/L)	0,006	0,050	0,001
Fenol (mg/L)	<0,01	0,010	0,010
Ferro (mg/L)	2,830	0,300	0,005
Fluoreto (mg/L)	<0,05	1,500	0,200
Manganês (mg/L)	0,070	0,100	0,003
Mercúrio (mg/L)	<0,0001	0,001	0,001
Nitrato (mg/L)	<0,20	10,0	0,200
Prata (mg/L)	<0,0001	0,050	0,000
Selênio (mg/L)	<0,001	0,010	0,001
Sódio (mg/L)	506,0	200,0	0,005
Sulfato (mg/L)	15,7	250,0	2,000
Surfactantes (mg/L)	<0,05	0,500	0,050
Zinco (mg/L)	0,154	5,000	0,001
Umidade (%)	0,10	-	-
pH final	11	-	-

Tabela 4 - Características físicas dos diferentes tipos de agregados utilizados

# (mm)	% Retida acumulada				Curva granulométrica dos agregados
	Agregados				
	AM	AF	AB	AFRV	
6,30	1,0	0,0	0,0	0,0	
4,80	2,0	0,0	4,0	0,0	
2,40	16,0	0,0	27,0	0,0	
1,20	45,0	0,0	52,0	0,0	
0,60	66,0	0,0	65,0	0,0	
0,30	83,0	9,0	74,0	4,0	
0,15	96,0	80,0	81,0	78,0	
0,075	99,0	100,0	87,0	97,0	
Fundo	100,0	100,0	100,0	100,0	
MF	3,08	0,90	3,04	0,82	
% puerulento	1,18	0,12	13,3	2,83	
d (Kg/dm ³)	2,619	2,646	2,970	2,606	

moído, silicato de sódio (NaSiO₂) e CO₂ para obtenção dos mol-des. Posteriormente à produção das peças metálicas, o molde é então moído resultando, por sua vez, na AFRV.

Os resultados obtidos na análise de toxicidade e solubilização [16, 17] da AFRV empregada neste estudo são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Quanto à toxicidade, observou-se que nenhum dos parâmetros avaliados ultrapassou o limite especificado em [4], logo a AFRV consiste em um resíduo não tóxico. Quanto à solubilização, os resultados indicaram que os seguintes parâmetros ultrapassaram o limite máximo especificado em [4]: Alumínio, Ferro e Sódio. Assim sendo, o resíduo é classificado com Classe II A – não inerte.

As características físicas de cada um dos agregados foram determinadas segundo os procedimentos de ensaio especificados em [18, 19, 20 e 21] e são apresentadas na Tabela 4.

2.2 Programa experimental

O programa experimental utilizado para avaliação do emprego da AFRV em misturas cimentícias foi dividido em duas etapas. A primeira etapa diz respeito às análises das argamassas produzidas com composições entre os agregados AM, AF e AFRV. A segunda etapa diz respeito às análises das argamassas produzidas com composições entre os agregados AB, AF e AFRV. Os detalhes referentes à cada uma das etapas citadas são discutidos nos itens 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 Etapa 1

A etapa 1 foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o potencial

Tabela 5 - Porcentagens volumétricas dos agregados utilizados nas argamassas da etapa 1

Nomenclatura	Agregados		
	AM	AF	AFRV
Ref	50%	50%	-
A1-1	50%	-	50%
A1-2	35%	-	65%
A1-3	20%	-	80%

Tabela 6 - Consumo de material empregado para as argamassas da etapa 1

Material (Kg/m ³)	Ref	A1-1	A1-2	A1-3
Cimento	451	451	451	451
AM	722	722	505	289
AF	729	-	-	-
AFRV	-	718	934	1149
Água	298	298	298	298
Aditivo ⁽¹⁾	3,2	3,2	3,2	3,2
Relação a/c	0,66			

⁽¹⁾ Aditivo redutor de água - teor de 0,7% em relação a massa de cimento.

Tabela 7 – Porcentagens volumétricas dos agregados utilizados nas argamassas da etapa 2

Nomenclatura	Agregados		
	AF	AB	AFRV
A2-1	50%	50%	-
A2-2	40%	60%	-
A2-3	30%	70%	-
A2-4	-	50%	50%
A2-5	-	60%	40%
A2-6	-	70%	30%

do uso da areia de fundição residual na produção de concretos. Nesta etapa foram estudadas misturas de argamassa produzidas com cimento CP V ARI RS e composições entre os agregados AM, AF e AFRV.

A argamassa produzida com a composição entre AM e AF foi considerada como mistura de referência. Destaca-se que esta tem traço unitário em massa de 1:3,22:0,66 (cimento : agregado miúdo : água). Nas demais misturas, as frações AM e AF foram substituídas volumetricamente por AFRV nas proporções apresentadas na Tabela 5. Na mesma tabela são destacadas

ainda as nomenclaturas utilizadas para cada uma das misturas produzidas nesta etapa.

O consumo de material das argamassas utilizadas no estudo proposto na etapa 1 são apresentadas na Tabela 6.

As propriedades no estado fresco das misturas produzidas foram determinadas com base na determinação do teor de ar incorporado e da consistência, através da mesa de espalhamento. Neste caso, determinou-se o diâmetro de espalhamento logo após a remoção do molde ($Flow_0$) e após o emprego de 10 golpes ($Flow_{10}$).

Os detalhes referentes aos procedimentos dos ensaios de determinação do teor de ar incorporado e espalhamento podem ser verificados, respectivamente nas normas [22, 23].

Após os ensaios de caracterização no estado fresco, para cada mistura foram moldados 3 corpos-de-prova de 5,0 x 10,0cm (diâmetro x altura) com o objetivo de avaliar a resistência à compressão aos 7 dias. Os moldes utilizados são fabricados em PVC.

2.2.2 Etapa 2

A etapa 2 foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o potencial de emprego da areia de fundição, em composição com uma areia de britagem, para emprego em concretos estruturais de resistências mais elevadas.

Visando cumprir os objetivos da etapa 2, foram produzidas argamassas com o cimento CPI V ARI RS, aditivo polifuncional e agregados AF, AB e AFRV. Na Tabela 7 são apresentadas

Tabela 8 – Consumo de material empregado para as argamassas da etapa 2

Material (Kg/m ³)	A2-1	A2-2	A2-3	A2-4	A2-5	A2-6
Cimento	451	451	451	451	451	451
AB	819	983	1147	819	983	1147
AF	730	584	438	-	-	-
AFRV	-	-	-	719	575	431
Água	298	298	298	298	298	298
Aditivo ⁽²⁾	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Relação a/c	0,66					

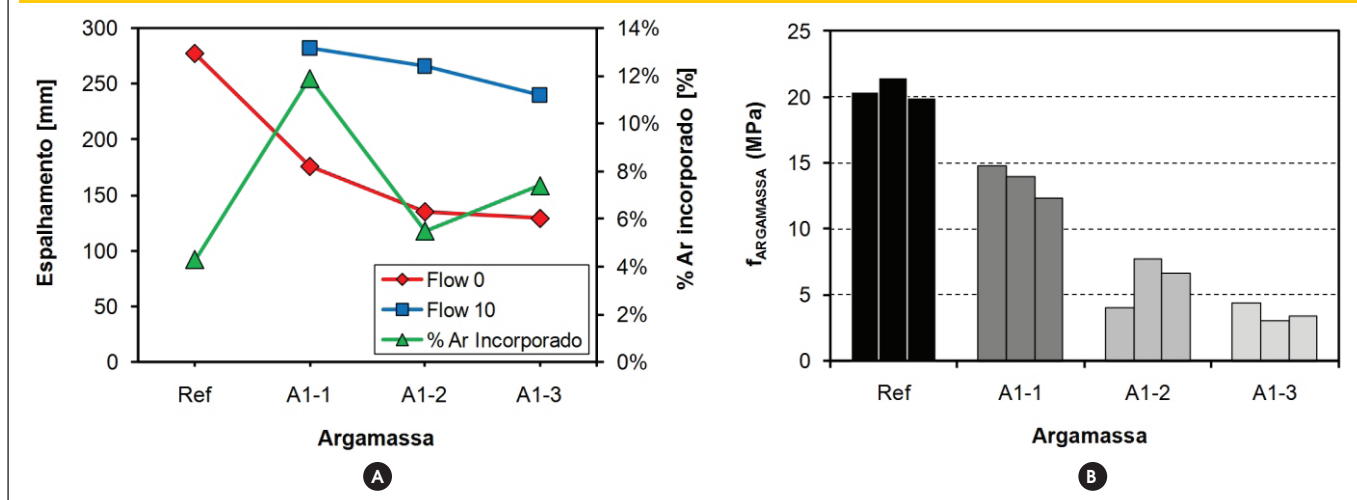
⁽²⁾ Aditivo redutor de água - teor de 0,7% em relação a massa de cimento.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido - etapa 1

Nomenclatura	Flow ₀ (mm)	Flow ₁₀ (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de ar incorporado(%)	Resistência à compressão (MPa) ⁽³⁾
Ref	277,0	-	2106,0	4,3%	21,4
A1-1	176,0	282,5	1930,0	11,9%	14,8
A1-2	135,5	266,0	2068,0	5,5%	7,7
A1-3	129,5	240,0	2027,0	7,4%	4,4

⁽³⁾ Resistência potencial: maior valor dos corpos-de-prova ensaiados.

Figura 1 – Resultados dos ensaios da etapa 1: (a) estado fresco e (b) estado endurecido



as nomenclaturas utilizadas para as diferentes composições de agregados empregados nesta etapa.

O traço utilizado para a produção das argamassas na etapa 2 tem por base a composição empregada na etapa 1, ou seja, 1:3,22:0,66. Com base neste, efetuou-se a substituição volumétrica da AM por AB, obtendo-se assim o traço inicial de 1:3,43:0,66 (cimento: agregado miúdo: água). O consumo de material das argamassas utilizadas no estudo proposto na etapa 2 são apresentadas na Tabela 8.

Quanto aos ensaios utilizados para a avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido, destaca-se que estes são idênticos aos empregados na etapa 1.

3. Resultados e discussões

3.1 Resultados da etapa 1

Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização das argamassas da etapa 1 no estado fresco são apresentados na Tabela 9 e Figura 1a.

Com base nos resultados dispostos na Tabela 9 e Figura 1a, nota-se que a adição da areia de fundição resultou no aumento do teor de ar incorporado em relação à argamassa Ref. Contudo, não foi

Figura 2 – Observação visual da expansão sofrida pelas argamassas (A1-3) que continham areia de fundição em sua composição: (a) expansão da mistura; (b) detalhe da abertura de fissura de $\approx 1,0\text{mm}$

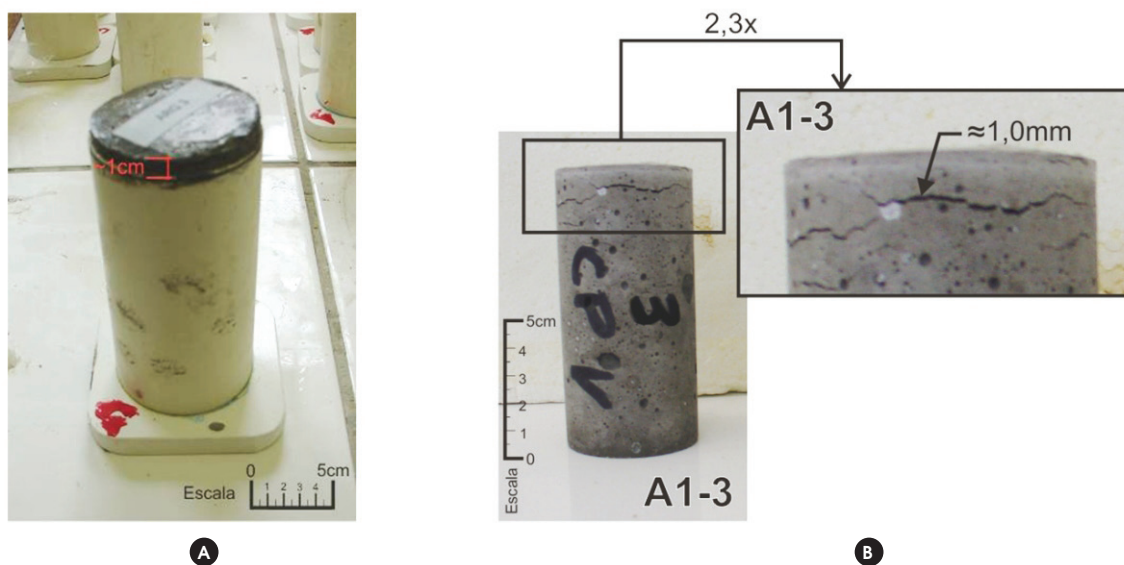


Tabela 10 - Resultados dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido - etapa 2

Nomenclatura	Flow ₀ (mm)	Flow ₁₀ (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de ar incorporado(%)	Resistência à compressão (MPa) ⁽⁴⁾
A2-1	202,0	300,5	2203,0	4,1%	24,3
A2-2	198,5	299,5	2196,0	5,2%	23,9
A2-3	190,5	288,0	2233,0	4,3%	24,2
A2-4	162,5	280,5	2087,0	8,8%	14,8
A2-5	149,0	265,5	2094,0	9,2%	15,3
A2-6	168,5	280,0	2167,0	6,9%	20,9

⁽⁴⁾ Resistência potencial: maior valor dos corpos-de-prova ensaiados.

observada uma tendência definida no que diz respeito à relação teor de ar incorporado e adição de AFRV.

No que tange à fluidez das misturas, observa-se que o aumento do teor de substituição da AF pela AFRV contribuiu para a redução significativa da fluidez da argamassa.

Em outras palavras, pode-se afirmar que o emprego de misturas semelhantes em concreto exigirá uma maior quantidade de água para a obtenção de uma dada trabalhabilidade. Tal necessidade resulta no aumento da relação água/cimento dos concretos e conseqüente redução da resistência à compressão dos mesmos.

Os resultados dos ensaios propostos no estado endurecido obtidos para as argamassas produzidas na etapa 1 são apresentados na Tabela 9 e Figura 1b.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9 e Figura 1b pode-se verificar que o uso da AFRV influenciou significativamente a resistência à compressão das argamassas. Comparando-se a argamassa Ref. com A1-1, que diferem apenas pela substituição da AF pela AFRV, nota-se uma redução de resistência de 31%. Tal redução foi ainda maior conforme o aumento do teor AFRV nas misturas.

A observação visual dos corpos-de-prova das argamassas com AFRV, realizada previamente a execução do ensaio de resistência

à compressão, indicaram a presença de reações expansivas que, por sua vez, resultaram em fissuração do material conforme indicado na Figura 2. Cabe destacar que as expansões observadas foram tão maiores quanto maior o teor de AFRV nas misturas.

Com base nos resultados da Tabela 9 e Figura 1, observa-se que apesar das misturas A1-2 e A1-3 apresentarem menor teor de ar incorporado, a resistência destas é inferior à obtida para A1-1, que apresenta maior teor de ar incorporado. Assim sendo, pode-se afirmar que a expansão provocada pelo uso da AFRV tem contribuição mais significativa na redução da resistência à compressão do que a incorporação de ar propriamente dita.

Em uma primeira aproximação, acredita-se que o efeito de expansão excessiva possa ter sido causado pela presença de pó-de-carvão, silicato de sódio juntamente com o CO₂, e principalmente pela presença de alumínio na AFRV durante o processo de fundição.

3.2 Resultados da etapa 2

Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização das argamassas da etapa 2 no estado fresco são destacados na Tabela 10 e Figura 3a.

Figura 3 - Resultados dos ensaios da etapa 2: (a) estado fresco e (b) estado endurecido

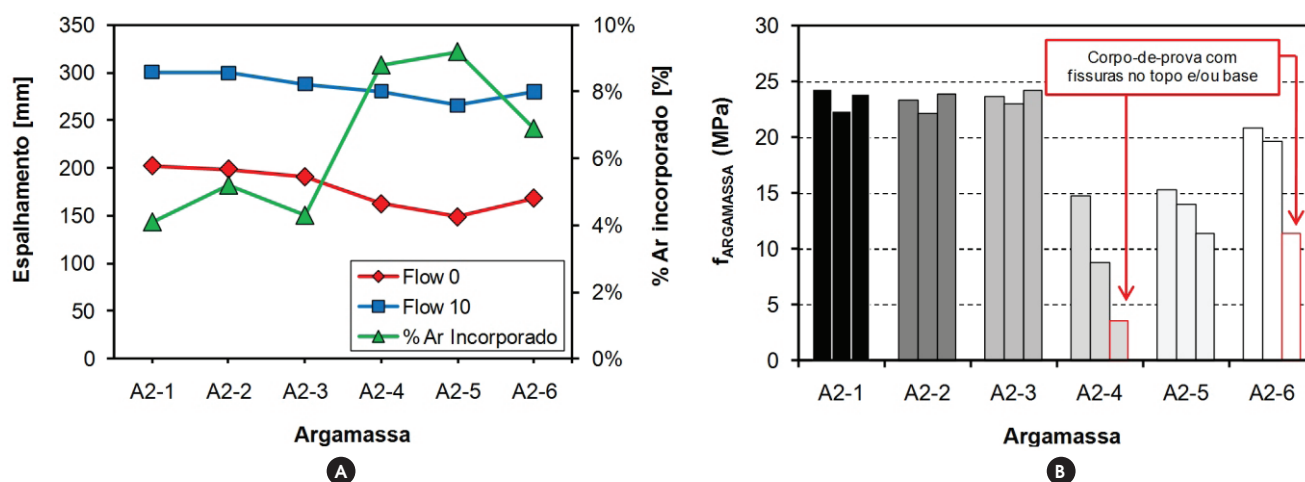


Tabela 11 – Porcentagens volumétricas dos agregados utilizados nas argamassas da etapa 3

Nomenclatura	AM	AF	AFRV	Componentes presentes na AFRV
Ref-2	50%	50%	-	-
A3-1	50%	-	50%	Silicato + Pó de Carvão + CO ₂
A3-2	50%	-	50%	Silicato + CO ₂
A3-3	50%	-	50%	Foumann + Pó de Carvão + CO ₂

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam que o emprego da AFRV resulta em perda de fluidez das misturas e aumento do teor de ar incorporado. Todavia, assim como observado na etapa 1, não foi possível estabelecer uma relação entre o teor de adição de AFRV e o teor de ar incorporado.

Os resultados dos ensaios propostos no estado endurecido obtidos para as argamassas produzidas na etapa 2 são apresentados na Tabela 10 e Figura 3b.

Com relação à resistência à compressão aos 7 dias (Tabela 10 e Figura 3b), novamente notou-se uma queda de resistência decorrente do emprego da AFRV. Identicamente ao observado na etapa 1, verifica-se que o aumento do teor da areia de fundição na mistura resulta em uma maior redução na resistência à compressão. Neste caso, a argamassa produzida com o maior teor de AFRV (A2-4) teve redução de 39% em relação à mistura A2-1, seguida por uma redução de 36% para A2-5 em relação à A2-2 e 14% para A2-6 em relação à A2-3.

Os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 vão de encontro aos apresentados por [8] e [9], que avaliaram o emprego de areia de fundição residual na produção de concreto e constataram que o uso desta não resulta em queda de resistência à compressão. Da mesma forma, os resultados apresentados por [13] indicam que o uso da areia de fundição em substituição parcial ao agregado miúdo é apropriada para a produção de concreto asfáltico.

Contudo, se comparados com os resultados publicados por [10], nota-se uma tendência similar à obtida no presente trabalho, ou seja, o aumento do teor de areia de fundição resultou no aumento do teor de ar incorporado e redução significativa da resistência à compressão.

A diferença entre os resultados obtidos neste trabalho para com os resultados publicados em outros deve-se principalmente à exis-

tência de variações de composição química entre as areias de fundição utilizadas. Neste caso, destaca-se que o teor de carvão da areia de fundição residual empregada por [8] é de 5,15%, enquanto que na areia utilizada por [10] é de 22,0%.

Quanto à observação de reações expansivas, vale ressaltar que o nível de expansão obtido nos testes com areia artificial não foi tão acentuado a ponto de se verificar o aumento de volume nos corpos-de-prova moldados, como observado na etapa 1 (Figura 2). Todavia, apesar da expansão menos expressiva, acredita-se que a queda de resistência observada pode ter ocorrido pelos mesmos motivos levantados para os resultados da etapa 1.

Em função dos resultados obtidos nas etapas 1 e 2, optou-se pela realização de estudos complementares cujos objetivos, métodos e resultados obtidos são apresentados no item que segue.

4. Etapa complementar

A etapa de estudo complementar tem por objetivo detectar a possível origem das reações expansivas e, conseqüente redução de resistência à compressão das misturas com AFR.

Em uma primeira aproximação, as hipóteses levantadas para explicar a queda de resistência observada nas etapas 1 e 2 estão associadas à presença dos seguintes elementos na AFRV: pó de carvão, NaSiO₂ e CO₂ ou resquícios de metais, provenientes do processo de fundição. Em função disso, na presente etapa foram produzidas argamassas com AFRV compostas pelos seguintes materiais: a) AF + NaSiO₂ + pó de carvão + CO₂ – d₁=2,652 kg/dm³; b) AF + NaSiO₂ + CO₂ – d₂=2,660 kg/dm³; c) AF + Foumann + pó de carvão + CO₂ – d₃=2,654 kg/dm³.

Os valores de massa específica dos diferentes tipos de AFRV apresentados anteriormente foram determinados com base nas

Tabela 12 – Quantidade de material (em gramas) empregada para a confecção das argamassas da etapa 3

Materiais (Kg/m ³)	Ref-2	A3-1	A3-2	A3-3
Cimento	466	466	466	466
AM	746	746	746	746
AF	754	-	-	-
AFRV	-	755	757	756
Água	275	275	275	275
Aditivo ⁽⁵⁾	3,3	3,3	3,3	3,3
Relação a/c		0,59		

⁽⁵⁾ Aditivo redutor de água - teor de 0,7% em relação a massa de cimento.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios no estado fresco obtidos para as argamassas

Argamassa	Flow ₀ (mm)	Flow ₁₀ (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)	Resistência à compressão (MPa) ⁽⁶⁾
Ref-3	186,5	295,5	2064,0	7,9%	21,1
A3-1	183,0	288,5	1995,0	11,0%	17,8
A3-2	203,5	306,0	2062,0	8,1%	18,6
A3-3	167,5	278,5	1976,0	11,9%	11,0

⁽⁶⁾ Resistência potencial: maior valor dos corpos-de-prova ensaiados.

recomendações dispostas em [19]. O componente denominado Foumann presente na mistura A3-3 corresponde à um novo produto que esta sendo testado como substituto do NaSiO₂. Cabe salientar que todas as amostras de AFRV utilizadas na presente etapa do estudo experimental não foram submetidas ao derame de metal, ou seja, os moldes para o processo de fundição foram produzidos, porém não foram utilizados no processo de produção das peças de ferro fundido.

As proporções entre os agregados empregados na produção das argamassas, bem como as respectivas nomenclaturas são apresentadas na Tabela 11. Nesta, são destacados ainda os materiais presentes na AFRV utilizada para cada uma das misturas.

O consumo de material das argamassas utilizadas no estudo proposto na etapa complementar é apresentado na Tabela 12.

Quanto à avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, destaca-se que se fez uso dos mesmos ensaios empregados nas etapas anteriores.

4.1 Análise dos resultados da etapa complementar

Na Tabela 13 e Figura 4a são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização no estado fresco.

Com base nestes resultados, pode-se verificar que o desempenho da argamassa A3-3 foi o pior dentre as argamassas ensaiadas,

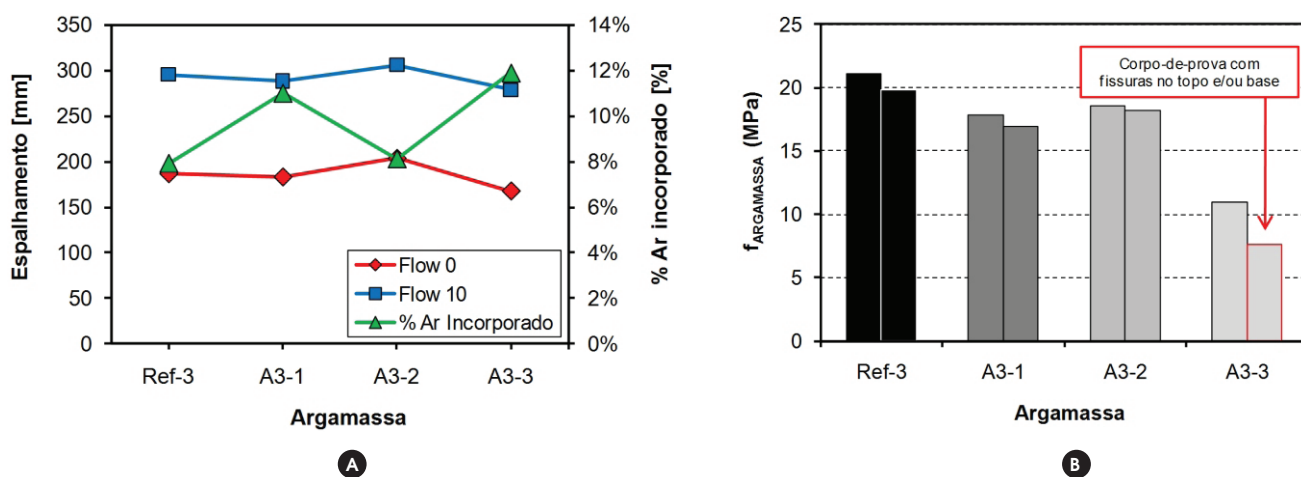
tanto no ensaio de espalhamento, quanto no teor de ar incorporado. Quanto à argamassa A3-1, quando comparada com a argamassa Ref 3, nota-se que apesar destas apresentarem desempenho semelhante no ensaio de espalhamento, a argamassa A3-1 possui um maior teor de ar incorporado.

Por fim, a mistura A3-2 apresentou o melhor resultado dentre as argamassas produzidas com AFRV. Os resultados desta indicam teor de ar incorporado semelhante à argamassa Ref 3 e elevada fluidez. Destaca-se ainda que a expansão observada em A3-2 foi a menor dentre as argamassas produzidas com AFRV. Tal resultado indica uma considerável contribuição do pó-de-carvão na ocorrência de reações expansivas. Contudo, nota-se que o CO₂ presente na AFRV também contribuiu, em menor grau, para estas reações, pois a mistura A3-2 também apresentou indícios de expansão.

No que tange às propriedades no estado endurecido, os resultados dos ensaios de resistência à compressão são dispostos na Tabela 13 e Figura 4b. Com base nestes resultados, pode-se verificar que a argamassa A3-3 apresentou o pior desempenho dentre as argamassas ensaiadas (redução de 48% na resistência em relação à Ref-3). As argamassas A3-1 e A3-2 tiveram desempenhos semelhantes a queda de aproximadamente 15% em relação à argamassa Ref-3.

Comparando os resultados desta etapa (Tabela 13 e Figura 4b) com aqueles obtidos na etapa 1 (Tabela 9 e Figura 1b), verifica-se

Figura 4 - Resultados dos ensaios da etapa 3: (a) estado fresco e (b) estado endurecido



que a queda na resistência à compressão para as argamassas produzidas com a AFRV na etapa 1 é mais acentuada do que a queda observada nesta etapa. Assim sendo, pode-se afirmar que a presença de resquícios de metal na AFRV consiste em um fator contribuinte para a ocorrência de reações expansivas e consequente redução da resistência à compressão.

5. Conclusões

As conclusões obtidas neste trabalho, limitadas aos materiais empregados no mesmo, são apresentadas nos parágrafos que seguem. Inicialmente, pode-se concluir que o emprego da AFRV exerce influência significativa no desempenho das argamassas tanto no estado fresco como no estado endurecido. Todavia, constatou-se que esta influência é função da composição do resíduo utilizado. Os testes em argamassas mostraram que parece haver uma influência significativa do pó-de-carvão, comparado com o NaSiO_2 e CO_2 , no que diz respeito à resistência à compressão. Quando a areia empregada possui resíduos de material metálico, principalmente devido a presença de alumínio, essa influência é ainda maior, resultando em expansão excessiva e redução acentuada na resistência à compressão, se comparada com uma mistura de referência.

Os testes realizados para a areia de fundição composta por um novo produto (Foumann) em substituição ao NaSiO_2 não apresentaram bom desempenho, pois apesar de reduzidas as reações expansivas, a redução na resistência à compressão foi considerável. Em função dos resultados apresentados, nota-se que o emprego de AFRV para a produção de concreto resulta em ocorrência de reações expansivas. Tais reações causam fissuração na estrutura do material e contribuem para uma redução substancial na resistência à compressão do mesmo. Assim sendo, se somados os efeitos expansivos com a ocorrência de fissuração e queda de resistência do material, pode-se concluir que a aplicação de misturas constituídas com AFRV passa a ser arriscada quanto aos requisitos de durabilidade.

Entretanto, as conclusões obtidas neste trabalho não podem ser generalizadas, pois determinadas pesquisas [8, 9, 13] apresentaram resultados satisfatórios que comprovam a possibilidade do emprego deste resíduo em substituição parcial aos agregados na produção de concreto.

Assim sendo, em todos os casos é aconselhável a realização de ensaios preliminares com o objetivo de verificar os efeitos gerados pelo emprego da areia de fundição.

6. Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa de produtividade de pesquisa Prof. Dr. Prudêncio. Rheoset pelo aditivo polifuncional. Colina pelo fornecimento da areia de fundição residual.

7. Referências bibliográficas

- [01] MCINTYRE, S. W. et al. Beneficiation and reuse of foundry sand residuals: a preliminary report. Transactions of the American Foundry men's Society, Volume 100, p. 201-208.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Apresenta informações sobre o mercado de fundidos no Brasil. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br>>. Acesso em: 25 Jan. 2010.
- [03] KLINSKY, L. M. G.. Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 215 p..
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR10004 – Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro (2004).
- [05] KHATIB, J. M., ELLIS, D. J.. Mechanical properties of concrete containing foundry sand. ACI special publication SP-200. American Concrete Institute; 2001. p. 733-48.
- [06] NAIK, T. R., KRAUS, R. N., CHUN, Y. M., RAMME, W. B., SINGH, S. S.. Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 15, Issue 4, 2003, p. 400-407
- [07] NAIK, T. R., KRAUS, R. N., CHUN, Y. M., RAMME, W. B., SIDDIQUE, R.. Precast concrete products using industrial by-products. ACI Materials Journal, Volume 101, Issue 3, 2004, p. 199-206.
- [08] SIDDIQUE, R., SCHUTTER, G., NOUMOWE, A.. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials. Volume 23, Issue 2, 2009, p. 976-980.
- [09] TIKALSKY P, GAFFNEY M, REGAN R. Properties of controlled low-strength material containing foundry sand. ACI Materials Journal. Volume 97., Issue 6, 2000, p.698-702.
- [10] KRAUS, R. N., NAIK, T. R., RAMME, B. W., KUMAR, R.. Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete. Construction and Building Materials. Volume 23, Issue 11, 2009, p. 3439-3442.
- [11] FIORE, S., ZANETTI, M.C.. Foundry wastes reuse and recycling in concrete production. American Journal of Environmental Science, Volume 3, Issue 3, 2007, p. 135-142.
- [12] BAKIS, R., KOYUNCU, H., DEMIRBAS, A.. An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures. Waste Management Research, Volume 24, Issue 3, 2006, p. 269-274.
- [13] JAVED, S., LOVELL, C.W.. Use of waste foundry sand in civil engineering. Transport research record 1486. In: Washington, DC: Transportation Research Board; 1994. p. 109-13.
- [14] WEIDMANN, D. F., OLIVEIRA, A. L., SANTOS, J. PRUDÊNCIO JR., L. R.. Comparação da eficiência dos aditivos plastificantes e polifuncionais, In: 48º Congresso Brasileiro de Concreto, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR5737 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro (1992).
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR10005 – Procedimento para

- obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro (2009).
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro (2003).
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro (2003).
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-NM 52 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro (2003).
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278 – Argamassa de assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro (2003).
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro (2003).