

***Comportamento mecânico de argamassas com areia de descartada de fundição (ADF).***

***Mechanical behavior of mortar with waste foundry sand.***

**Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira, Prof. Dr. da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.**

gisleiva@ft.unicamp.br;

**Gabriella Macedo de Assis, Mestranda em Tecnologia e Inovação, pela Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.**

gabi.macedo@live.com

**Rosângela Cavalcanti de Melo, Graduada em Engenharia Civil, pela Universidade Nove de Julho.**

rosangela\_unicamp@hotmail.com

**Resumo**

A indústria da fundição descarta anualmente considerável volume de areia usada em moldes para peças metálicas; levando a degradação ambiental, neste contexto, estudou-se o desempenho de argamassas produzidas com areia descartada de fundição para mitigação dos impactos ambientais. O objetivo deste trabalho foi determinar o comportamento mecânico de argamassas produzidas com a substituição parcial do agregado miúdo por ADF. A etapa experimental envolveu a moldagem de corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 13279:2013), considerando dois teores de ADF (50% e 80%) e dois tipos de cimento Portland (CP II-Z e CP V-ARI). Os resultados indicaram que o teor de ADF é inversamente proporcional à resistência mecânica das argamassas. Isso pode ser justificado pela granulometria da ADF, que proporcionou aumento da área superficial dos agregados presentes nas argamassas com resíduo, resultando no aumento do consumo de água necessário à manutenção da consistência.

**Palavras-chave:** Resíduo Sólido; Areia Descartada de Fundição; Argamassa; Passivo Ambiental

***Abstract***

*The foundry industry annually discards huge volume of sand used in molds for metal parts, leading to environmental degradation, in this context, the performance of mortars produced with discarded cast sand to mitigate environmental impact was studied. The objective of this work was to determine the mechanical behavior of mortars produced with the partial replacement of the small aggregate by WFS. The experimental stage involved the molding of prismatic specimens (ABNT*

*NBR 13279:2013), considering two levels of WFS (50% and 80%) and two types of Portland cement ( C<sub>PII-Z</sub> and C<sub>VP-ARI</sub>). The results indicated that the WFS content is inversely proportional to the mechanical strength of the mortars. This can be justified by the granulometry of the WFS, which provides an increase in the aggregates present in the mortars with residue, resulting in the increase of the water consumption necessary to maintain the consistency.*

**Keywords:** Solid Waste; Waste Foundry Sand; Mortar; environmental Liability.

## 1. Introdução

A utilização de resíduos sólidos como matéria-prima de materiais que consomem recursos naturais não renováveis já está difundida em vários setores, como exemplo tem-se a construção civil. Neste mesmo contexto, está a indústria de fundição, entretanto, do outro lado, como geradora de resíduos sólidos ainda com funcionalidade para outros setores produtivos. Um dos resíduos que se destaca é a areia descartada de fundição (ADF), obtido durante os processos de moldagem de peças metálicas. Somente nos EUA ocorre a geração de 15 milhões de toneladas de ADF anualmente (American Foundrymen's Society, ano) e na Índia, esse número é de 1,71 milhão de toneladas anuais (Siddique, Singh, 2017).

Alguns estudos confirmam a possibilidade de se reutilizar a areia de fundição para produção de argamassas, embora, haja um consenso geral, que a areia de fundição por apresentar-se mais fina, demanda mais água para a manutenção da trabalhabilidade da argamassa, esse aumento no consumo de água diminui a resistência da argamassa, no estudo apresentado por Casali a maior redução, quando da substituição de 100% da areia, chegou a 57%; Casali ainda conclui “em relação aos resíduos da areia de fundição e às argamassas estudadas, foram classificados como não perigosos tanto pelo ensaio de corrosividade quanto de reatividade e não apresentaram nenhuma concentração de extratos lixiviados superior ao limite da norma”, a baixa possibilidade de corrosão é um ponto positivo, já que é considerada deletéria para estruturas de concreto armado.

Neste contexto, analisando pelo ponto de vista ambiental, vemos que a utilização deste resíduo é uma prática, que embora diminua a resistência mecânica da argamassa, ela é uma prática para mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte do resíduo em aterros. Andrade (et. al) conclui” Como avaliação final, ensaios mecânicos e de lixiviação foram realizados nos concretos de ADF e os resultados indicaram que há perda de desempenho mecânico com o aumento do teor de ADF, mas essa perda pode ser considerada pequena quando comparada com o valor ambiental da utilização da ADF como substituinte ao agregado natural na produção de concretos.

## 1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi determinar o comportamento mecânico de argamassas com substituição parcial da areia convencional por ADF.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Nesta pesquisa são utilizados dois tipos de cimento o CPV-ARI que é um cimento de alta resistência nos primeiros dias de idade, indicado para situações em que se necessita de desforma rápida e resistência aos agentes agressivos do meio ambiente, especialmente ao ataque dos sulfatos; também foi usado o CPII-Z-32 que é um cimento adequado para estrutura de concreto em contato com ambientes agressivos, ambientes úmidos e obras marítimas, ambos os cimentos são da Votorantim Cimentos S.A.

A areia natural utilizada nesta pesquisa é denominada quartzosa, formada, principalmente por grãos de quartzo com arredondamento e esfericidade variados, podendo conter diversas proporções de outros minerais, óxidos e silicatos que lhe confere uma variação na sua coloração (rosa, ocre, cinza, vermelha e branca).

A areia descartada de fundição (ADF) usada nesta pesquisa foi fornecida pela Indústria de Fundição Tupy Ltda, situada na cidade de Mauá – SP..

### 2.1 Metodologia

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos neste trabalho, o desenvolvimento da metodologia foi definido de acordo com o fluxograma apresentado na figura 1.

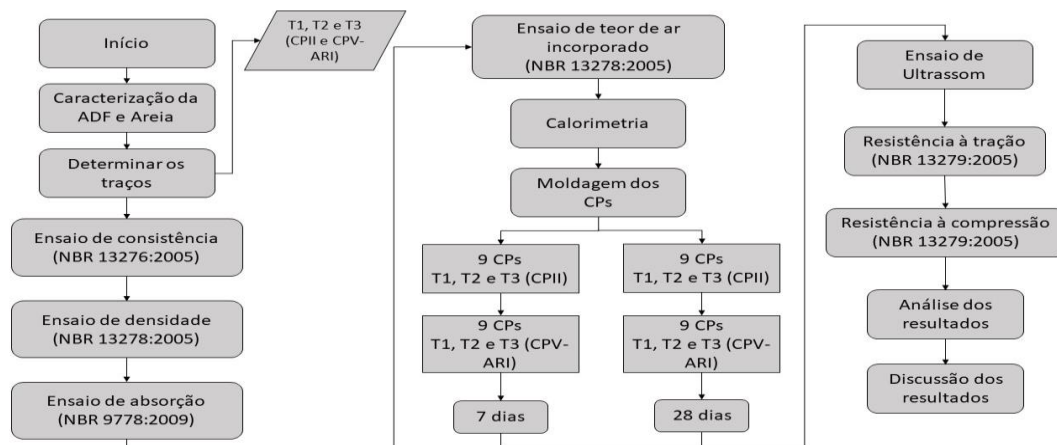


Figura 1: Fluxograma das atividades. Fonte: elaborada pelos autores

### 2.2 Estudo de dosagem

Neste estudo foram utilizados dois tipos de Cimento Portland (CPII-Z e CPV ARI) para compor os traços. Os teores de ADF foram definidos em função de trabalhos consultados na bibliografia (SILVA et al., 2011; FERREIRA et al., 2014; SARRO et al., 2015), o que resultou na substituição da areia convencional por 50% e 80% de ADF.

Em função do tipo de cimento e teor de ADF foram definidos 6 traços para esta pesquisa, os quais estão identificados como T1, T2 e T3 conforme os teores de ADF de

0%, 50% e 80%, respectivamente. Em relação ao tipo de cimento, os traços foram identificados como (CP II-Z) e V (CP V-ARI).

As relações a/c de cada traço foram definidas em função do índice de consistência, obtidos a partir da metodologia e limites prescritos na ABNT NBR 13276 (2005). As quantidades de materiais (em gramas) necessárias para a moldagem de 3 corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) de cada traço estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de materiais utilizados para a moldagem de 3 corpos de prova prismáticos de cada traço.

CP II Z 32					CP V				
Traço	Cimento (g)	Areia (g)	ADF (g)	Água (g)	Traço	Cimento (g)	Areia (g)	ADF (g)	Água (g)
T1	450	1440	0	300	T1	450	1440	0	300
T2	450	720	720	350	T2	450	720	720	350
T3	450	288	1152	425	T3	450	288	1152	400

Para a caracterização das argamassas no estado fresco determinou-se a densidade e absorção de água. Também obteve-se as curvas de hidratação (calor de hidratação x tempo) conforme metodologia descrita por autores consultados (BERALDO et al., 2013; FERREIRA et al., 2013; RODRIGUES, 2012). Para determinar a trabalhabilidade da argamassa foi realizado ensaio de retenção de água, a trabalhabilidade influencia no bom lançamento adensamento da mistura. O ensaio de hidratação serviu para certificar se a ADF altera a curva de hidratação do cimento, o que pode influenciar na resistência mecânica da argamassa.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada um dos 6 traços considerados na pesquisa, totalizando 36 corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de ultrassom, resistência à tração por flexão e resistência à compressão aos 7 dias de cura. Os corpos de prova foram mantidos submersos em um tanque com água em câmara úmida do laboratório de Materiais da FT - UNICAMP. As normas utilizadas nestas etapas da pesquisa estão apresentadas na tabela 2.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Ensaios de caracterização

Os ensaios iniciais de caracterização física estão descritos nas tabelas 2 .

Tabela 2 – Caracterização física das amostras de areia comum e ADF

Características	Areia	ADF
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,58	2,45
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,5
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,43

Modulo de Finura	2,4	1,51
DM (mm)	2,03	1,2
Classificação	Zona ótima	Zona utilizável inferior

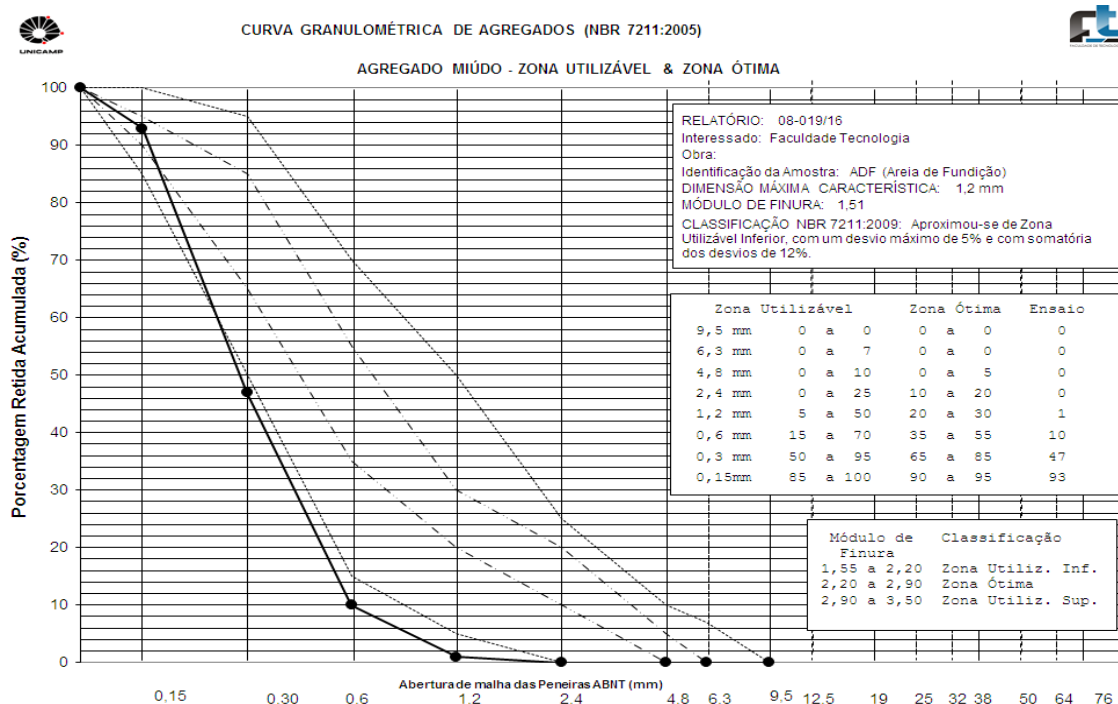


Figura 2: Curva granulométrica da areia de fundição

### 3.2 Índice de Consistência

A determinação do índice de consistência foi realizada pelo método *flow table* conforme NBR 13276:2005, tabela 3 que estabelece um índice de  $260 \pm 10$  para argamassa com consistência normal. Através deste ensaio é possível a determinação da trabalhabilidade da argamassa. Os traços com adição de ADF, por apresentarem maiores porcentagem de finos, necessitaram de adição de mais água para aumentar a fluidez da argamassa.

Tabela 3 - Índice de consistência em função da relação água/cimento

CP II-Z			CP V		
Traço	Relação a/c	Flow table (mm)	Traço	Relação a/c	Flow table (mm)
T1	0,67	250	T1	0,61	250
T2	0,78	250	T2	0,72	250
T3	0,94	250	T3	0,8	260

### 3.3 Calorimetria

De acordo com os dados obtidos através do ensaio de calorimetria (figura 3), é possível observar que as amostras de argamassas produzidas com CPII (T1, T2 e T3) apresentaram variação de temperatura entre os traços analisados de aproximadamente 1°C. Já as amostras de argamassas produzidas com CPV-ARI apenas a amostra T2 apresentou variação de 1°C das demais, sendo amostra T1 e T3 iguais. Ao compararmos o pico das curvas entre os dois tipos de cimento, observou-se que as argamassas produzidas com CPV-ARI apresentaram temperaturas de aproximadamente 42°C. Já as argamassas produzidas com CPII apresentaram temperaturas de aproximadamente 35°C, tendo uma variação de 7°C em relação ao CPV-ARI. As argamassas confeccionadas com 50% de ADF, nos dois tipos de cimento, obtiveram as maiores temperaturas em relação as demais amostras

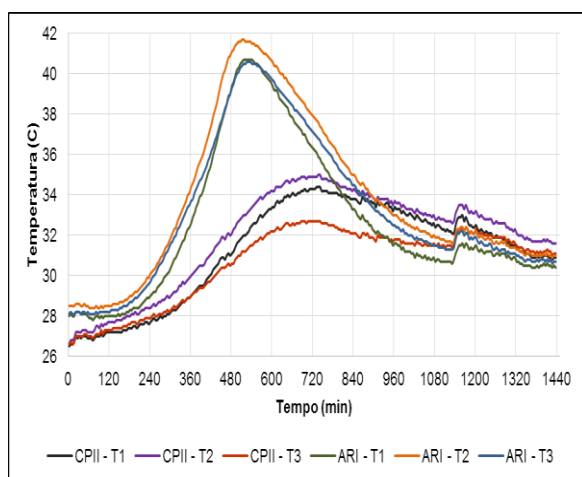


Tabela 4: Início e fim de pega

Argamassas	Início de Pega		Fim de Pega	
	min	h	min	horas
T1 – ARI	150	2,5	520	8,67
T2 – ARI	150	2,5	520	8,67
T3 – ARI	150	2,5	520	8,67
T1 – CPII	200	3,33	700	11,67
T2 – CPII	200	3,33	700	11,67
T3 – CPII	200	3,33	700	11,67

Figura 3 – Curva de hidratação das argamassas

A tabela 4, obtida através da interpretação da figura 3, indica os tempos (em minutos e horas) do início e fim de pega de cada traço. O início e fim de pega das argamassas com CPV-ARI foi de 150min (2,5 horas) e 520min (8,67 horas) respectivamente, sendo igual entre os três traços. E para as argamassas com CPII o início de pega foi de 200min (3,33 horas) e 700min (11,67 horas) respectivamente, para os três traços analisados.

### 3.4 Determinação da retenção de água

Foi realizado o ensaio de retenção de água conforme a NBR 13277:1995, para verificar sua capacidade de manter sua trabalhabilidade.

Tabela 5 - Retenção de água

NBR 13277 - Determinação da Retenção de Água

CP II			CP V		
Traço	RA (%)	Classificação	Traço	RA (%)	Classificação
T1	91,64	alta	T1	95,96	alta
T2	94,00	alta	T2	93,53	alta
T3	89,44	normal	T3	94,21	alta

### 3.5 Determinação da densidade em estado fresco

Os resultados dos ensaios de determinação da densidade em estado fresco foram realizados conforme a NBR 13278, conforme mostrado na tabela 6

Tabela 6 - Determinação da densidade no estado fresco

CP II Z 32		CP V	
Traço	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Traço	Densidade (g/m <sup>3</sup> )
T1	2,47	T1	2,49
T2	2,42	T2	2,46
T3	2,40	T3	2,41

### 3.6 Ensaio de Retenção de água

Quanto aos ensaios de capacidade de retenção de água, mostrados na tabela 7, as argamassas moldadas com CPIX, traço referência, 80% de ADF apresentam resultado “Normal capacidade de retenção” quando apresentam limites entre  $\geq 80 \geq 90$ ; já todos os traços com CPV – ARI, 0%, 50% e 80% de ADF, e os traços de 50% e 80% com CPIX apresentam resultado “alta capacidade de retenção” quando apresentam limites  $> 90$ .

Tabela 7: Resultado do ensaio de R.A.:

NBR 13277 - Determinação da Retenção de Água		
CP II	Ra (%)	Classificação
T1	91,64	alta
T2	94,00	alta
T3	89,44	normal
CP V		
T1	95,96	alta
T2	93,53	alta
T3	94,21	alta

### 3.7 Ensaios de resistência à tração e resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração e a compressão estão dispostas na tabela 8, e foram obtidos através da média dos resultados dos ensaios de rompimento de três corpos de prova. Através da análise da tabela, é possível concluir que os corpos de prova seguem um padrão, a medida que cresce o teor de ADF, a resistência tende a cair, isso ocorre devido a interação entre as partículas, onde na areia há uma melhor distribuição granulométrica, contendo partículas de tamanhos variados e na ADF a graduação é

uniforme. Conforme os requisitos descritos na NBR 13281:2005, os traços com incorporação de ADF (50% e 80%) foram classificados como argamassas tipo III ( $R_c > 8$  MPa) para a idade de 28 dias, mesma classificação do traço referência (0% de ADF).

Tabela 8 - Resistência a tração e resistência a compressão 7 dias e sua classificação.

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Classe: NBR: 13281:05	Resistência à Flexão (MPa)	Classe NBR: 13279:05
T1 – ARI	30,5	P6	6,7	R6
T2 – ARI	17	P6	4,6	R6
T3 – ARI	12,7	P6	3,2	R4, R5
T1 – CPII	11,8	P6	4	R5, R6
T2 – CPII	7	P5	2,4	R3, R4
T3 – CPII	3	P2, P3	1,4	R1, R2

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) é possível classificar as argamassas através do desempenho obtido nos ensaios de resistência à compressão (tabela 9) e à tração na flexão, como indicado na tabela 10.

Tabela 9 – Classificação das argamassas- NBR 13281:2005

Classe	Resistência à compressão (MPa)
P1	$\leq 2,0$
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	$> 8,0$

Tabela 10 – Classificação das argamassas- NBR 13279:2005

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)
R1	$\leq 1,5$
R2	1,0 a 2,0
R3	1,5 a 2,7
R4	2,0 a 3,5
R5	2,7 a 4,5
R6	$> 3,5$

A análise das figuras 4 e 5 indicam graficamente o comportamento já constatado anteriormente, onde, à medida que há uma substituição da areia pela areia descartada de fundição (ADF), os valores das resistências à compressão e à tração, caem, indicando um desajuste na curva granulométrica e influenciando diretamente no desempenho dos corpos de prova.

O desajuste na curva granulométrica aponta a ausência de partículas importantes para a interação dos grãos, fazendo com que a graduação se torne uniforme ou aberta.



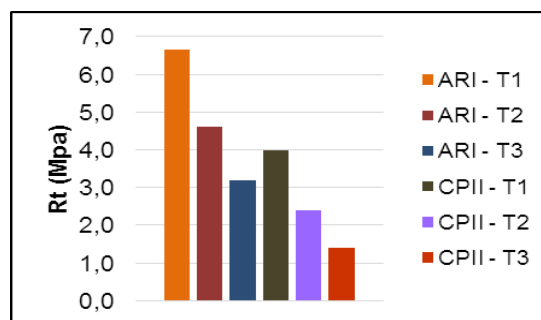
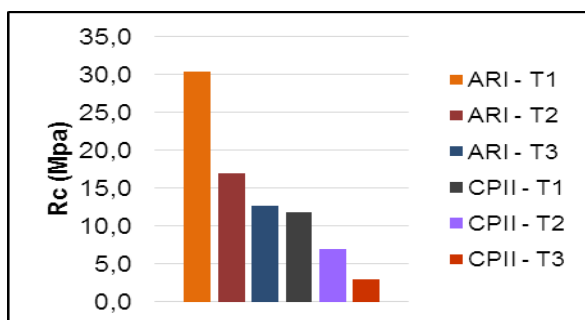


Figura 4 - Resistência à compressão (Rc) aos 7 dias

Figura 5 - Resistência à tração (Rt) aos 7 dias

### 3.8 Velocidade do pulso ultrassônico (VPU)

O ensaio não destrutivo de ultrassom, realizado previamente aos ensaios de resistência à compressão e tração, possibilita determinar a velocidade da propagação de ondas nos corpos de prova e correlaciona-las com outros parâmetros. A estrutura da metodologia para a execução dos ensaios de ultrassom seguirá os procedimentos descritos na ABNT NBR 15630 (2009)

A VPU foi determinada através da obtenção do tempo de propagação da onda ultrassônica pelo corpo de prova e aplicação da equação 1

$$VPU = \frac{L}{t} \text{ (m/s}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Onde: VPU: Velocidade do pulso ultrassônico (m/s<sup>-1</sup>)

L: Comprimento (metros)

t: Tempo (segundos)

A análise da figura 6 indica que a VPU apresenta o mesmo comportamento dos ensaios mecânicos, sendo maior nos corpos de prova com areia e caindo à medida que ocorria a substituição da mesma por ADF

Segundo Buccur (2006) alguns fatores causam distúrbios e interferências na propagação do pulso ultrassônico, como as características dos transdutores (frequência, dimensões e anatomia), as propriedades físicas do substrato (anisotropia e heterogeneidade do material), as características geométricas do material em análise (micro e macroestrutura), as condições ambientais como umidade e temperatura e as condições de medição (potência do equipamento e acoplamento).

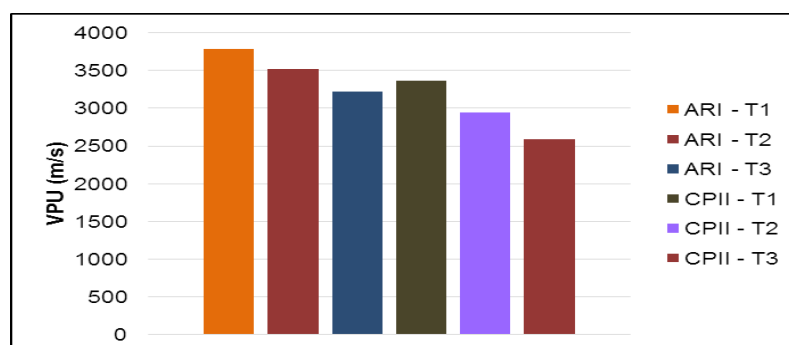


Figura 6 – Velocidade pulso ultrassônico (VPU) nos corpos de prova aos 7 dias

Os coeficientes de correlações (figura 7, 8 e 9) indicam que a VPU, Rc e Rt aumentam gradativamente. Os valores de  $R^2$  (tabela 11) indicam o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, quanto maior o valor de  $R^2$ , melhor ele representa à amostra

Tabela 11 – Valores de  $R^2$

Parâmetros	$R^2$
VPU x Rc	0,862
VPU x Rt	0,947
Rc x Rt	0,959

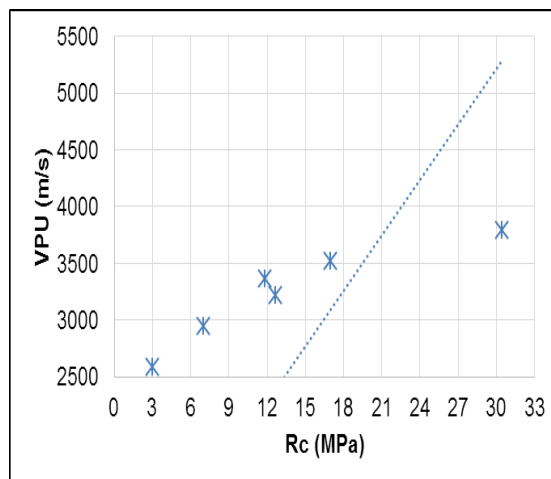


Figura 7 – Correlação entre VPU e Rc

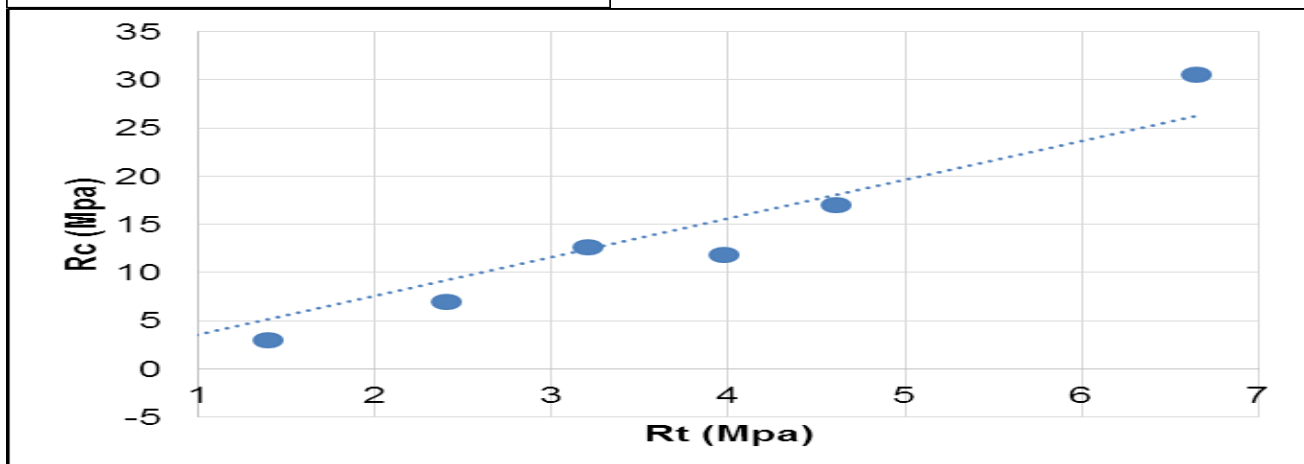
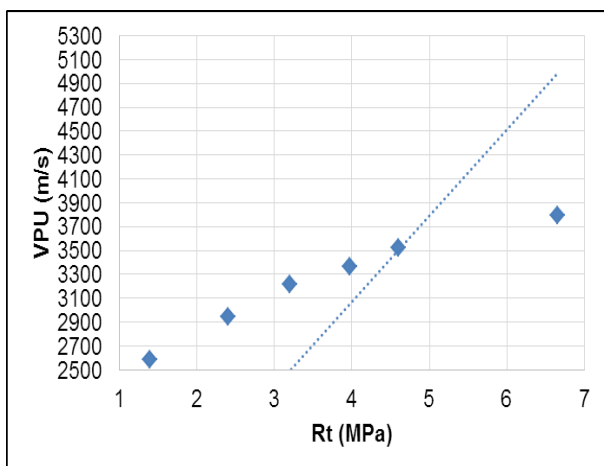


Figura 8 – Correlação entre VPU e Rt

Figura 9 – Correlação entre Rc e Rt

#### 4. Conclusão

Tendo em vista os objetivos estabelecidos para este projeto da pesquisa, pode-se concluir que é possível produzir argamassas através da substituição parcial de areia natural por areia descartada de fundição. O teor de substituição vai depender da resistência e consistência que se deseja obter.

Ao analisarmos o desempenho das argamassas quanto a resistência a compressão axial, as argamassas com substituição de areia por ADF é justificada devido a granulometria do resíduo. Como ele apresenta uma granulometria bem menor que a areia convencional, a área superficial é maior o que necessitaria de mais cimento para manter a mesma resistência mecânica. Como a concentração de cimento foi sempre a mesma, a resistência mecânica pode também ter diminuído devido ao aumento da superfície específica; e o aumento do consumo de água também foi um fator decisivo para queda da resistência mecânica, pois foi necessário adicionar água para manter a consistência da argamassa, consequentemente a trabalhabilidade. Logo podemos concluir que a areia de fundição alterou a resistência mecânica da argamassa por causa sua granulometria, mais fina que a areia natural utilizada.

#### Referências

- Andrade, L.B; Carmin, R, L.P; Pinto, R.C.A. Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado. Revista Matéria: artigo e-12160, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção da água. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004
- 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, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13278: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos- Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro.2009.

Bhardwaj, B., Kumar, P. Waste foundry sand in concrete: A review. Construction and Building Materials, Elsevier, 2017

Casali, J.M; Miguel, T.F; Felizardo, C.C; Meira, N.S; Dominguni, L; Betioli, A.M. Caracterização e influencia do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 261-279, jan./mar. 2018.

Siddique, R., Singh, G., Singh M., Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. Journal of Cleaner Production, Elsevier, 2017.