

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CLAITON CREMONEZ

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA
DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
CONVENCIONAL**

CURITIBA

2022

CLAITON CREMONEZ

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA
DESCARTADA DE FUNDIÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
CONVENCIONAL**

**Study of the partial replacement of natural sand by discarded foundry sand for
the production of conventional concrete**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



CLAITON CREMONEZ

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL POR AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO
PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO CONVENCIONAL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 20 de Junho de 2022

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 06/09/2022.

Para meus pais, minha esposa e minha filha Elis.
Olhem sempre para a lua, eu sempre estarei lá.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao cientista, amigo e orientador, o Professor Dr. Wellington Mazer, tanto pela oportunidade única de ampliar meus conhecimentos no meio científico como pela primorosa orientação durante toda esta pesquisa.

Agradeço imensamente ao professor Dr. Carlos Frederico Alice Parchen e ao professor MSc. Sandro Mendes por me fazerem entender o real significado da palavra mestre, bem como por me mostrarem a real conduta de um cientista.

À irmã que a vida me deu, Elizamary Otto, que sempre esteve ao meu lado mesmo nas horas mais difíceis.

Agradeço ainda à Dra. Thaisa Rocha que sempre lapidou meus textos e, quando tudo parecia perdido, sempre surgia do nada com um sorriso no rosto e transformava meus esboços horrorosos em um primoroso artigo científico.

Ao colega Marcos Paulo que seguramente leu esse texto em uma madrugada fria enquanto me ajudava a revisar este trabalho.

À professora Dr. Ana Paula Capraro que, enquanto esta pesquisa ainda era uma ideia vaga e aparentemente sem rumo, me ajudou a olhar para o tema com olhar científico e de forma concisa.

Agradeço também ao professor Dr. Gabriel Marinho, bem como às engenheiras Daniele Crislaine Leal de Lima, Fabiane Tais Gawlak, Renata de Oliveira Hass que em 2018 me apresentaram este tema e me fizeram ficar completamente encantado com esta ideia e com as possibilidades envoltas na pesquisa agora concluída.

A todos os integrantes da empresa Novamix concreto e argamassas, bem como à tradicional família Pilato: Almir, Ademir, Carlos, Lucenir, Eloir e, em especial, a Antonio Valdemir Pilato e Anadir Bozza Pilato, ambos *In memoriam*, que me ensinaram que mesmo quando o mercado estiver tumultuado e que tudo ao redor estiver fora dos trilhos, a ética, a dignidade e a honestidade sempre se farão presentes e que estas características são a chave para se gerir uma empresa com o coração.

Ao Vigia da Novamix Concreto e argamassas, meu grande amigo Sr. Ismael, que nas noites em que os dados desta pesquisa não pareciam conclusivos, surgia do nada com um prato de virado de feijão dizendo: *“Come meu filho, saco vazio não para em pé!”*.

Aos amigos e colaboradores da Novamix Concreto e Argamassas Adão Fernandes e Antônio Oliveira (Curiúva) que me mostraram sempre da forma mais humilde e prática possível que a palavra engenheiro descende de engenhoso e que, independentemente da formação que tivermos, o objetivo real de um engenheiro sempre deve ser o de ser engenhoso.

Agradeço também ao colaborador Paulo Diego de Conto que sempre me inspirou com sua capacidade inigualável de se envolver quinhentas coisas ao mesmo tempo e ainda assim entregar todas estas quinhentas coisas feitas corretamente e antes do prazo solicitado.

Ao meu amigo e gerente da Novamix Concreto e argamassas, Engenheiro Alfredo Motti, que me apresentou os trabalhos dos Professores Campiteli e Vitervo, indispensáveis para a conclusão desta pesquisa.

Agradeço ainda aos colegas Giuliano, Liliane e Wolney, do departamento comercial, que sempre possibilitaram a conexão entre o departamento técnico e o setor de vendas, me fazendo enxergar que sempre é preciso desenvolver um produto de excelente qualidade e, ao mesmo tempo, com preço competitivo.

Aos companheiros de jornada, Luis Carlos dos Santos e Marcos Roberto Queiroz, que ao longo de dois anos me acompanharam nesta pesquisa e ouviram meus sonhos e devaneios sobre este trabalho.

Ainda sobre o quadro de funcionários da Novamix Concreto e Argamassa, agradeço também ao operador de pá carregadeira Frederico Storrer Neto que, mesmo quando o mundo estava desabando em uma produção fabril que parecia não ter fim, pacientemente encontrou tempo para receber, armazenar e secar a areia utilizada neste trabalho.

Agradeço também aos meus sogros, Dirceu Ronqui e Ameri Garbugio, pelo apoio e paciência que tiveram comigo durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha esposa que fez o possível para que este trabalho se tornasse realidade e que, mesmo diante das situações mais adversas, sempre esteve ao meu lado durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ainda à minha pequena filha Elis, meu presente de Deus, meu combustível para o desenvolvimento deste trabalho. Espero que quando ler estas linhas, o mundo seja um lugar melhor do que este que temos hoje. Espero de todo o meu coração, minha querida, que o mundo herdado por você seja um lugar onde ideias como estas, apresentadas neste trabalho, sejam corriqueiras do seu dia-a-dia.

Desejo de coração aberto que no futuro você e seus amigos não precisem enfrentar os preconceitos e as adversidades que a minha geração enfrentou. Lembre-se sempre, minha querida, estudar é o maior ato de revolução que alguém pode realizar.

Aos meus pais que sempre acreditaram em mim e lutaram com todas as suas forças para que o seu filho conseguisse concluir um curso superior, mesmo quando isso parecia ser inatingível.

Por fim, é importante documentar que, durante a elaboração desta pesquisa, a minha geração enfrentou a mais severa pandemia dos últimos 100 anos. Somente no Brasil, durante o período de janeiro de 2020 até março de 2022, mais de 663 mil pessoas tiveram suas vidas ceifadas pela COVID-19. Neste período, eu fui contaminado e precisei de atendimento hospitalar; com a doença evoluindo, foi necessária minha internação na unidade de terapia intensiva (UTI). Nesse contexto, é imprescindível agradecer a todos os profissionais de saúde que lutaram esta guerra, em especial à equipe do centro médico hospitalar nossa saúde. Eu não sou capaz de listar aqui os seus nomes, nem mesmo de lembrar dos seus rostos em função da baixa oxigenação que me impedia de raciocinar direito e também pelos equipamentos de proteção que vocês tinham que usar. Mas sempre vou me lembrar de vocês e da forma como fui tratado. Vocês sempre serão parte de mim. Carregarei a história de vocês dentro do meu coração enquanto eu viver.

Ainda dentro desse contexto, agradeço a Deus que, por algum motivo que eu realmente não entendo, ainda me faz estar aqui.

“O tempo é a matéria prima da vida”
(Paciente anônimo que estava no leito ao meu
lado, 2021)

RESUMO

CREMONEZ, Claiton. **Estudo da substituição parcial de areia natural por areia descartada de fundição para produção de concreto convencional**. 2022. 87 f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

A indústria da construção civil é uma grande geradora de materiais poluentes. Processos simples de construção ou demolição propiciam quantidades substanciais de resíduos. Existe ainda o fato de que para se produzir matéria prima para esse setor, há um grande impacto ambiental. Jazidas para a extração de agregados e aglomerantes, por exemplo, ocupam grandes áreas e costumam causar um dano ambiental significativo. Em paralelo, as indústrias de fundição de metais produzem vários milhões de toneladas de subprodutos no mundo. Apenas no Brasil, cerca de 3 milhões de toneladas de areia descartada de fundição são produzidas anualmente. A areia descartada de fundição (ADF) é o principal resíduo da indústria de fundição de metais. Atualmente este material tem como principal destino aterros de descarte. Entretanto, a destinação de areia descartada de fundição (ADF) para aterros está se tornando um problema em função ao elevado custo de transporte e descarte. Em um esforço para usar a ADF em grande escala, pesquisas estão sendo realizadas para viabilizar sua utilização na indústria de fabricação de concreto como substituição parcial de agregado fino. Esta pesquisa foi realizada com o intuito de avaliar as propriedades de resistência mecânica de concretos, nas quais a areia natural foi parcialmente substituída por (ADF). Areia natural foi substituída com cinco percentagens (0%, 20%, 40%, 60% 80% e 100%) de ADF em massa, além de um traço de referência. O estudo envolveu a moldagem de 936 corpos de prova 10x20 cm e utilizou traços de uma concreteira da região metropolitana de Curitiba – PR. Foram abordados no estudo as relações Água / Cimento 0,40 0,50 0,60 e 0,70. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7, 28, 63, 91 e 365 dias. Além dos ensaios de resistência mecânica, também foram realizados ensaios de densidade no estado fresco e endurecido edeterminação da absorção de água por capilaridade conforme a NBR 9779:2012. Em função da grande quantidade de amostras foi possível elaborar estudos envolvendo desvio padrão e coeficiente de variação. Estes dados obtidos no estudo apontaram para uma grande confiabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Areia de Fundição. Concreto. Areia Natural.

ABSTRACT

CREMONEZ, Claiton. **Study of the partial replacement of natural sand by discarded foundry sand for the production of conventional concrete**. 2022. 87 f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

The construction industry is a major generator of polluting materials. Simple construction or demolition processes provide substantial amounts of waste. There is also the fact that to produce raw material for this sector there is a great environmental impact. Deposits for the extraction of aggregates and binders, for example, occupy large areas and often cause significant environmental damage. In parallel, the metal casting industries produce several million tons of by-products worldwide. In Brazil alone, about 3 million tons of sand discarded from foundry are produced annually. Waste foundry sand (WFS) is the main residue of the metal casting industry. Currently this material has as main destination disposal landfills. However, the disposal of waste foundry sand (WFS) to landfills is becoming a problem due to the high cost of transportation and disposal. To use WFS on a large scale, research is being conducted to enable its use in the concrete manufacturing industry as a partial replacement of fine aggregate. This research was carried out in order to evaluate the mechanical strength properties of concrete, in which natural sand was partially replaced by (WFS). Natural sand was replaced with five percentages (0%, 20%, 40%, 60% 80% and 100%) of mass WFS, in addition to a reference trace. The study involved the molding of 936 specimens 10x20 cm and used traces of a concrete mill in the metropolitan region of Curitiba - PR. Water/Cement 0.40 0.50 0.60 and 0.70 were addressed in the study. The compression strength assays were performed at the ages of 7, 28, 63, 91 and 365 days. In addition to the mechanical strength tests, density tests were also performed in the fresh and hardened state and determination of water absorption by capillarity according to NBR9779:2012. Due to the large number of samples it was possible to elaborate studies involving standard deviation and coefficient of variation. These data obtained in the study pointed to a great reliability of the results.

Keywords: Foundry Sand. Concrete. Natural Sand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de molde de fundição	19
Figura 2 - Posicionamento do macho e preenchimento do molde.....	19
Figura 3 - Preenchimento do molde com metal líquido	20
Figura 4 - Apresenta uma amostra de areia de base	22
Figura 5 - Posicionamento do macho em molde metálico	23
Figura 6 - Moldagem em casca	25
Figura 7 - Abatimento do concreto	31
Figura 8 - Gráfico da tensão por deformação.....	34
Figura 9 - Equipamento para determinação de permeabilidade.....	36
Figura 10 - Ensaio de determinação de permeabilidade	38
Figura 11 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto	39
Figura 12 - Areia descartada de fundição (A) e areia natural (B)	41
Figura 13 – Agregado graúdo dimensão máxima característica 9,5mm	41
Figura 14 - Corpos de prova em cura.....	46
Figura 15 - Concreto referência (A) Concreto 100% de ADF (B)	48
Figura 16 - Espectrometria por raios infra vermelho	59
Figura 17 - Difractometria por raios X da areia base.....	59
Figura 18 - Difractometria por raios X da areia de fundição	60
Figura 19 - Foto termográfica dos corpos de prova.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerância admissíveis.....	32
Tabela 2 - Testes exigências físicas e mecânicas do cimento	40
Tabela 3 - Massa específica e massa específica aparente	42
Tabela 4 - Composição granulométrica.....	42
Tabela 5 - Características dos corpos de prova	44
Tabela 6 - Porcentagem de areia de fundição no concreto	45
Tabela 7 – Acréscimo de aditivo para melhor trabalhabilidade	49
Tabela 8 - Massa específica - Método gravimétrico	52
Tabela 9 - Massa específica.....	54
Tabela 10 - Resultados de resistência à compressão A/C 0,40	61
Tabela 11 - Perda de resistência em relação a adição de ADF	61
Tabela 12 - Perda de resistência em relação da substituição de ADF	61
Tabela 13 - Perda de resistência em relação da substituição de ADF	61
Tabela 14 - Desvio padrão relação A/C 0,40.....	64
Tabela 15 - Coeficiente de Variação A/C 0,40	65
Tabela 16 - Desvio padrão relação A/C 0,50.....	65
Tabela 17 - Coeficiente de Variação A/C 0,50	66
Tabela 18 - Desvio padrão relação A/C 0,60.....	66
Tabela 19 - Coeficiente de Variação relação A/C 0,60.....	67
Tabela 20 - Desvio padrão relação A/C 0,70.....	67
Tabela 21 - Coeficiente de Variação relação A/C 0,70.....	67
Tabela 22 - Absorção (g/m ²).....	69
Tabela 23 - Redução da absorção por capilaridade em função da substituição de ADF	71
Tabela 24 - Custo por insumo	72
Tabela 25 - Estimativa de redução de custo com a substituição por ADF	72
Tabela 26 - Valores da redução de custo anual em Reais	74
Tabela 27 - Comparativo das porcentagens de economia anual	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição granulométrica	43
Gráfico 2 - Densidade do concreto entre 0 e 100% de ADF fresco	53
Gráfico 3 - Densidade do concreto entre 0 e 100% de ADF endurecido	55
Gráfico 4 - Massa específica A/C 0,50 em função da substituição por ADF	56
Gráfico 5 - Massa específica A/C 0,40 em função da substituição por ADF	56
Gráfico 6 - Massa específica A/C 0,60 em função da substituição por ADF	57
Gráfico 7 - Massa específica A/C 0,70 em função da substituição por ADF	57
Gráfico 8 - Comparativo de densidades, estado fresco x estado endurecido	58
Gráfico 9 - Resistência em relação a adição de ADF A/C 0,40	62
Gráfico 10 - Resistência média à compressão simples A/C 0,50	62
Gráfico 11 - Perda de resistência em relação da substituição de ADF	62
Gráfico 12 - Perda de resistência em relação da substituição de ADF	63
Gráfico 13 - Absorção (g/cm ²) / Relação água / cimento	70
Gráfico 14 - Absorção (g/cm ²) / Relação A/C	70
Gráfico 15 - Valores em R\$ da redução de custo anual	74
Gráfico 16 - Modelo de comparação da redução dos custos anuais	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira De Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ADF	Areia De Fundição
CPII E 32	Cimento Portland Composto Com Escória
CPII F 32	Cimento Portland Composto Com Fíler
CPIII 40	Cimento Portland De Alto Forno
CPV ARI	Cimento Portland De Alta Resistência Inicial
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NBR NM	Norma Brasileira Norma Mercosul
PVC	Policloreto De Vinila
UBM	Centro Universitário De Barra Mansa
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
≥	Maior Ou Igual
A/C	Relação Água Cimento
Abs	Absorção De Água
ANOVA	Análise Da Variância
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro Quadrado
fck	Resistência Característica Do Concreto À Compressão
fct	Resistência À Tração Do Concreto
fctk	Resistência Característica Do Concreto À Tração
fctm	Resistência Média À Tração Do Concreto
g	Gramas
g/cm ³	Grama Por Centímetro Cúbico
h	Hora
inf	Inferior
Kg/m ³	Quilograma Por Metro Cúbico
m	Metro
mm	Milímetros
M ³	Metro cúbico
Mpa	Mega Pascal
pH	Potencial Hidrogeniônico
R\$	Unidade Monetária Brasileira (Real)
R ²	Regressão Linear
Ref	Referência
sp	Resistência À Tração De Flexão
SSS	Condição Saturada Superfície Seca
sup	Superior
ton	Tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema da pesquisa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Processo de fundição	18
2.1.1	Areia de fundição	21
2.1.1.1	Areia-base molde	21
2.1.1.2	Areia verde	22
2.1.1.3	Areia de cimento e areia a seco	24
2.1.1.4	Areia em casca ou <i>shell molding</i>	24
2.2	Definição de resíduos sólidos	25
2.2.1	Classificação de Resíduos Sólidos	25
2.3	Utilização de areia descartada de fundição no concreto	26
2.3.1	Concreto Convencional	27
2.3.2	Aglomerante	28
2.3.3	Água	29
2.3.4	Agregados Graúdos e Miúdos	30
2.3.5	Fases do Concreto	30
2.3.6	Estado Fresco	31
2.3.7	Estado Endurecido	32
2.4	Permeabilidade	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	40
3.1.1	Cimento	40
3.1.2	Agregado Miúdo E Graúdo	40
3.1.3	Água e Aditivo	43
3.2	Determinação do traço	44
3.3	Concreto no estado fresco e endurecido	45
4	RESULTADOS	48
4.1	Concreto no estado fresco	48

4.2	Concreto no estado endurecido	54
4.2.1	Espectrometria e difração por raios X	58
4.3	Resistência a compressão do concreto	60
4.3.1	Resistência Média dos Corpos de Prova.....	60
4.3.2	Coefficiente de Variação e Desvio Padrão	64
4.3.3	Resultados de Ensaio de Absorção por Capilaridade	68
4.4	Estimativa de redução de custos	72
5	CONCLUSÃO	77
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

O ser humano, contando com sua criatividade, moldou o concreto como uma pedra artificial, não havendo limites definidos para o futuro deste material. Perante tal fato, é de extrema importância a pesquisa para um melhor aproveitamento das versatilidades desta matéria prima com o intuito de usá-la da maneira correta seguindo os conceitos da sustentabilidade (HELENE; ANDRADE, 2010).

A areia natural é amplamente aceita como agregado miúdo a fim de se preparar concreto, mas a retirada da areia do rio causa impactos ambientais e interfere na segurança dos moradores de regiões próximas (TENG *et al.*, 2019). Como existe uma grande demanda por areia limpa desses rios, acontece uma escassez deste recurso e, conseqüentemente, a elevação dos custos – o que atrai o desenvolvimento de materiais alternativos (MUTHUSAMY *et al.*, 2020). A fim de reduzir o uso de areia dos rios, pesquisadores tentam identificar como poderiam substituí-la com o uso de diversos materiais descartados (PREETHI *et al.*, 2020).

Entre outras características, o concreto possibilita a utilização de rejeitos poluidores vindos dos mais diversos setores industriais como, por exemplo, o de fundição (ISAIA, 2011). Este segmento fabril produz resíduos em função da geração de moldes para confecção de peças metálicas onde o metal em estado líquido é depositado em fôrmas de areia de fundição (também conhecida como ADF) e, após a sua solidificação, obtém-se a peça no formato desejado (ANDRADE; CARNIN; PINTO, 2017).

Durante o processo de fundição é gerada uma grande quantidade de resíduos industriais os quais, em sua maioria, são oriundos da utilização de areia para os moldes (SEDDIQUE *et al.*, 2015). Entre estas areias tem-se a areia verde, a areia macho, a areia de cimento e a areia *shell* (BALDAM; VIEIRA, 2013). Contudo, após seu uso, estas areias perdem sua capacidade plástica. Portanto, um dos principais desafios da indústria do ramo de fundição é diminuir a quantidade de resíduos de ADF (FAGUNDES *et al.*, 2010).

Conforme os estudos de Penkaitis (2012), o reuso deste tipo de resíduo pode ocorrer na indústria da construção civil podendo ser utilizado na fabricação de artefatos de concreto e pavimentações asfálticas, reduzindo assim os impactos ambientais causados pelas areias descartadas de fundição.

A utilização de resíduos em materiais como o concreto ou materiais de construção de baixa resistência, além de torná-lo econômico, ainda cria uma forma alternativa de destinação para estes subprodutos, fator que contribui para um desenvolvimento mais sustentável. Cerca de 100 milhões de toneladas de areia têm sido utilizadas anualmente por indústrias de fundição somente nos Estados Unidos. Como resultado, entre 6 e 10 milhões de toneladas se transformam em resíduos de areia de fundição (AFS-FIRST, 2013). Outros dados que podemos apresentar são os Indianos e Britânicos que geram, respectivamente, 1,71 e 1 milhão de toneladas deste material como resíduos respectivamente (SIDDIQUE *et al.*, 2011).

1.1 Problema da pesquisa

A areia descartada de fundição é oriunda do processo de fabricação industrial de componentes e peças em fundições. Devido ao volume de material descartado, tem-se analisado o reaproveitamento deste produto para a indústria da construção civil, sabendo que seu descarte pode contaminar o local de depósito (SANTOS; LOPES, 2017).

Dentro deste contexto, os pesquisadores Siddique *et al.* (2011) e Gurpreet e Singhb (2015) desenvolveram estudos para a utilização de subprodutos industriais como matéria-prima na fabricação de materiais novos. Alguns exemplos são: blocos de concreto, concretos usinados, pisos intertravados.

Diante do apresentado este estudo traz que as propriedades físicas do concreto convencional podem ser afetadas com a substituição da areia comum por areia de descarte de fundição.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da substituição parcial da areia natural por areia descartada de fundição em concretos convencionais.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar a melhor porcentagem de substituição da areia natural por ADF;
- b) Avaliar a influência da ADF nas propriedades do concreto fresco e endurecido;
- c) Analisar a influência da ADF na microestrutura do concreto;
- d) Analisar a viabilidade econômica da substituição da areia natural por ADF.

1.3 Justificativa

A utilização de recursos naturais do planeta e a geração de resíduos sempre acompanharam a existência da humanidade, uma vez que os recursos disponíveis eram abundantes e os despejos eram aceitos de forma indiferente por toda natureza. Posteriormente, em específico no começo do século XVIII, com o surgimento da Revolução Industrial, houve um aumento substancial dos problemas sociais e ambientais. Dentre eles, os resíduos oriundos da indústria metalúrgica (KHATIB, 2013).

No ano de 2012 o Brasil ocupou, no ranking mundial, o 7º lugar na fabricação de fundidos, gerando anualmente 3 milhões de toneladas desta ADF (ABIFA, 2018).

De acordo Garcia (2014), com base no ano de 2006 o custo por tonelada para descarte da ADF em aterros industriais na cidade de Curitiba é de R\$118,00. Visto tais fatos, faz-se necessário que sejam estudadas novas soluções para o descarte de ADF.

Um dos problemas ambientais que o setor da indústria de fundição enfrenta é a destinação incorreta dos resíduos, uma vez que o material em alguns casos é acumulado na empresa geradora ou descartado em aterros industriais (SCHEUNEMANN, 2005). O reaproveitamento desse resíduo proporciona benefícios diversos, tais como: reduzir a quantidade de resíduos em aterros, gastos com armazenamentos, transporte, energia e redução de danos ambientais (BARUFFI et al., 2015).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas informações técnicas sobre o material concreto e o procedimento para fundição, bem como da ADF e suas aplicações.

2.1 Processo de fundição

O processo de fundição é uma das técnicas mais utilizadas nas indústrias metalúrgicas se baseia na fusão de um metal em seu estado líquido, de forma a preencher um molde e, após sua solidificação, obtém-se uma peça em formato desejado (FAGUNDES *et al.*, 2010). No processo de fabricação de dispositivos fundidos, a etapa de modelagem visa obter uma reprodução da peça que se deseja ser fundida. Nesta etapa, o molde é confeccionado com areia (CHEGATTI, 2019).

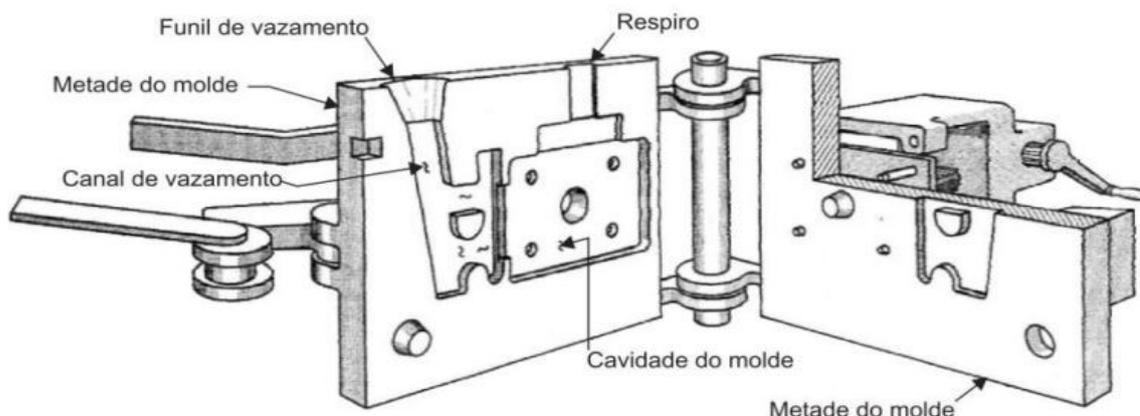
Essa areia de fundição é composta de vários elementos, dentre eles a argila, a areia silicosa e a água que, se combinados, apresentam características perfeitas para a trabalhabilidade com a moldagem (RESHMA, 2021).

Segundo Castro *et al.* (2011), sendo o molde considerado primordial na etapa do processo de fabricação, é através dele que será definido o método mais adequado de moldagem. Em função desta forma de moldagem, é possível classificá-lo em duas formas: moldes metálicos (gravidade ou pressão) e moldes não metálicos (cura frio, areia verde, *shell* e cera).

A utilização de areia é o método mais usual, uma vez que é o processo mais econômico e flexível. Após selecionar o processo de fundição, ocorre o detalhamento do projeto no qual se define as especificações dos materiais a serem empregados. Esse processo permite que se inicie sua fabricação (SOARES, 2000). Dentre essas especificações, Oliveira (1998) cita as etapas de operações em uma indústria de fundição.

O molde é um recipiente vazado com capacidade de resistir a elevadas temperaturas e com o formato da peça que será fundida (CHIAVERINI, 1986). Na Figura 1 é possível identificar os elementos que compõem o molde.

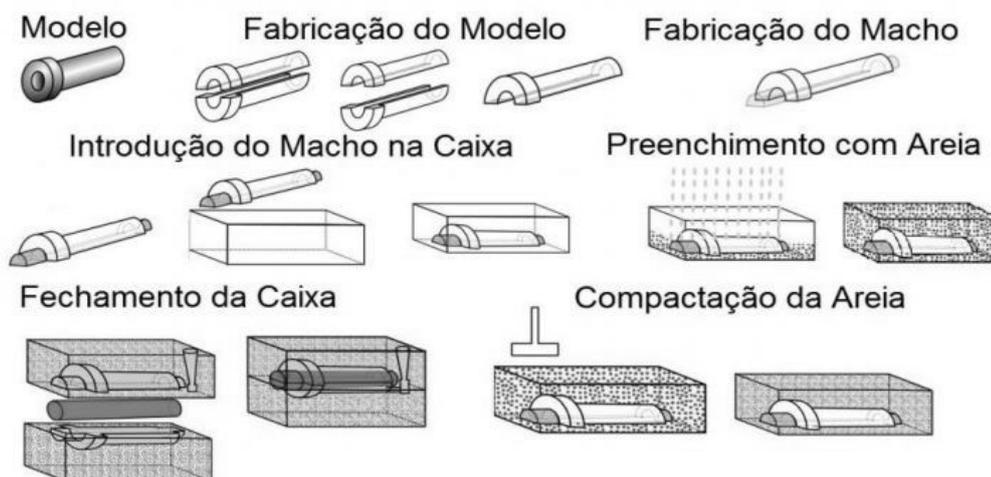
Figura 1 - Exemplo de molde de fundição



Fonte: Mouro e Auras (2007)

Os métodos mais usuais de fundição no Brasil utilizam a confecção de moldes em areia. O molde de areia verde é constituído em areia de base. Esta areia possui propriedades moldáveis que aumentam a resistência mecânica do molde. Este material é compactado com a utilização de máquinas e uma combinação refratária plástica a qual se nomeia areia de fundição (ADF) (CASSOTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Figura 2 - Posicionamento do macho e preenchimento do molde



Fonte: Higa (2019)

Antes dos moldes serem fechados, os machos são posicionados para delimitar a cavidade da peça, conforme ilustrado na Figura 2, sendo responsável por dar formato às partes internas da peça fundida, durante o vazamento o metal líquido cobre completamente o macho (OLIVEIRA, 1998).

A passagem do estado sólido do aço descartado para o estado líquido é denominada fusão, ou seja, o metal líquido é alcançado após passar por processo de derretimento do material descartado com auxílio de forno de indução. O metal é contraído enquanto ocorre a solidificação, sendo essencial a elaboração de reservatórios para repor a perda deste material, esses reservatórios são denominados “massotes” (CASSOTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011). Também se faz necessário a confecção de respiros, permitindo a saída dos gases gerados pela calcinação da areia durante a passagem do metal em elevadas temperaturas, bem como a saída do oxigênio do molde. Posteriormente, o metal líquido é despejado em velocidade constante na panela de vazamento preenchendo todo interior do molde (OLIVEIRA, 1998). A Figura 3 representa o preenchimento com o metal líquido deste molde.

Figura 3 - Preenchimento do molde com metal líquido



Fonte: Fremar (2019)

Posteriormente dentro do molde a peça fica solidificada e é feita a sua retirada controlando a temperatura – de modo a evitar eventuais trincas na peça. Neste processo, 98% das areias utilizadas nos moldes são recuperadas através de ensaios mecânicos, sendo possível seu reuso em outras atividades (CASSOTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Em seguida, ocorre a remoção de excessos de metais que acabam ficando nos canais e massotes, passando para a limpeza das peças através de jateamento automático com materiais abrasivos (granalhas). Nesta etapa o material é descartado em razão da contaminação ao longo do processo, denominando-se como areia

descartada de fundição. Por fim as peças são encaminhadas ao setor de acabamento onde são pintadas ou banhadas a óleo para evitar a corrosão (DANTAS, 2003).

2.1.1 Areia de fundição

O uso de areia na confecção de moldes em fundições responde por grande parte dos subprodutos industriais gerados durante as várias fases do processo de fundição, os quais posteriormente são descartadas (SINGH; SIDDIQUE, 2011).

Conforme Baldam Vieira (2013), a areia de moldagem está relacionada a um conjunto distinto de fatores, tais como: aglomerantes, água e um elemento refratário que habitualmente é sílica, podendo ainda apresentar traços de cromita, zirconita.

Existem diferentes métodos para a confecção do molde. Os mais empregados pela indústria estão apresentados abaixo:

- Moldagem em areia macho;
- Moldagem em areia seca;
- Moldagem em areia verde;
- Moldagem em areia de cimento;
- Moldagem em areia *shell* (ou Moldagem em casca como popularmente é conhecida) (BALDAM; VIEIRA, 2013).

A areia empregada no processo deve apresentar baixo custo, resistência ao calor e disponibilidade no mercado, além de boa plasticidade para a confecção do molde, bem como permeabilidade adequada e refratariedade (SINGH; SIDDIQUE, 2011).

As propriedades químicas e físicas das ADF's dependem do metal empregado no despejo do molde, do tipo de processo da fundição, da tecnologia empregada, dos tipos de fornos utilizados e do acabamento que se pretende.

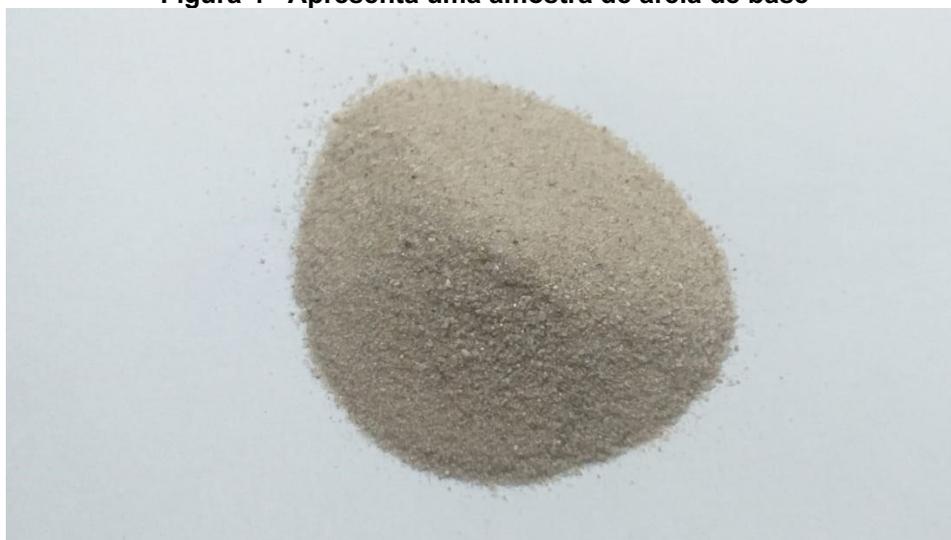
2.1.1.1 Areia-base molde

O principal componente de moldagem com areia é um agregado fino, considerado puro minerologicamente e denomina-se “areia base” sendo este misturado a um aglomerante, água dentre outros aditivos, tais como: carvão em pó,

conferindo propriedades específicas à mistura (MARIOTTO, 1978). Sendo mais utilizado como aglomerante a bentonita, que tem a característica de uma argila plástica e composta por argilominerais pertencentes ao grupo esmectitas (montmorilonítica), material que responde pela coesão quando a areia é umidificada, o qual proporciona ao molde a sua resistência (GUESSER 1982).

Este composto tem maior representatividade dentre as areias de fundição. Trata-se de uma areia refratária usualmente composta por sílica ou silicosa como apresentado na Figura 4. As composições mais comuns aplicadas nas areias de base são com sílica (quartzo), cromita, zirconita e olivina (ALVEZ, 2017).

Figura 4 - Apresenta uma amostra de areia de base



Fonte: Autoria Própria.

A areia base, sendo o principal item da areia de moldagem, encontra-se de maneira solta e granular. Esse material é refratário e retirado de leitos de rios ou barrancos, mas antes de passar para uso na fundição ela é lavada e classificada granulométrica (REBELATO *et al.*, 2017).

2.1.1.2 Areia verde

Segundo Carnin *et al.* (2010), a areia verde é resultante de um procedimento comum da fundição. Esse procedimento faz com que os moldes não passem por secagem garantindo, assim, uma resistência suficiente para atender às solicitações que irão ser aplicadas sobre os moldes. O processo consiste no adensamento de uma

mistura refratária moldável. A Figura 5 representa o posicionamento do macho e preenchimento do molde metálico com areia verde.

Figura 5 - Posicionamento do macho em molde metálico



Fonte: Zubela (2019)

Essa mistura refratária moldável é composta por água, argila, areia silicosa, poliuretanos e resinas fenólicas. Estes compostos têm a função de atuar como aglomerantes, conferindo a areia verde plasticidade e resistência mecânica para o molde fabricado (CASSOTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Segundo Ramachandra (2006), no ano de 2006 a aplicação de areia verde correspondeu a mais 70% da produção em nível mundial dos fundidos. Isso ocorre devido ao baixo custo, ao simples processo de recuperação do material e à descomplicada tecnologia adotada no processo. Entretanto, a resistência mecânica não se apresenta de maneira muito boa com a areia verde. Portanto, tem-se a necessidade da elaboração de um outro molde metálico com a função de impedir que a caixa do molde não venha a ceder com a pressão do metal em seu estado líquido.

Nos estudos de Siddique, Schutter e Noumowe (2008) eles citam que a areia verde, também conhecida por areia de fundição reciclada, se distingue pela coloração preta, característica essa justificada em referência ao seu teor de argila e carbono.

2.1.1.3 Areia de cimento e areia a seco

Segundo Baldam e Vieira (2013), a 'areia de cimento' é composta por cimento Portland, areia silicosa e água. Essa composição é muito utilizada para peças médias e grandes, pois não necessita a utilização de calor, tampouco que os moldes passem por um processo de secagem.

Pode-se comparar em partes o processo de moldagem de areia seca com a de areia verde, sendo que a diferenciação entre os processos ocorre na parte final de cada moldagem, já que os moldes em areia seca necessitam passar pela etapa de secagem em estufas e os em areia verde não necessitam desse processo (COUTINHO NETO, 2004).

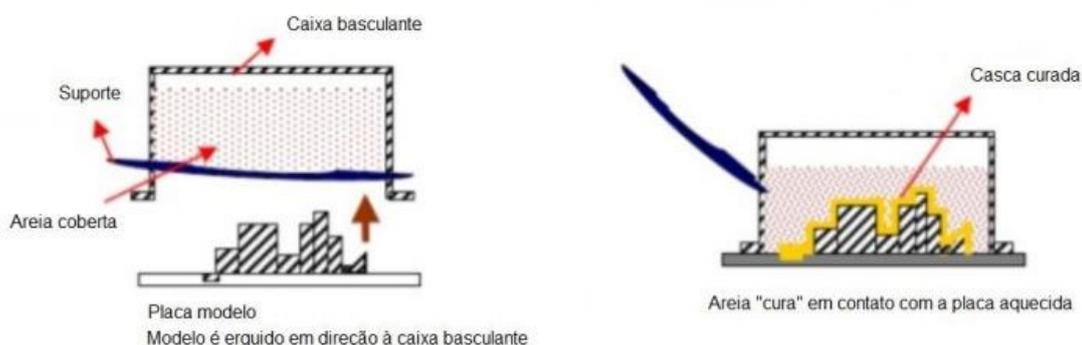
Esse tipo de moldagem aumenta a resistência à pressão do metal no estado líquido, além de conferir melhor acabamento, maior equilíbrio dimensional, maior dureza e melhor permeabilidade. O emprego dessa moldagem deve ser adotado quando a peça exigir melhor finalização, podendo ser aplicada em qualquer dimensão ou peso (CHIAVERINI, 1986).

2.1.1.4 Areia em casca ou *shell molding*

O processo de moldagem em casca foi patenteado no ano de 1944 na Alemanha. Esse processo foi mantido em segredo pelo governo alemão até junho do mesmo ano, quando o processo de moldagem entrou em execução na produção industrial. Os detalhes desse processo de fundição só foram apresentados em 1947 em um relatório do serviço secreto norte-americano, onde informava que havia um processo de fabricação de moldes e machos com paredes finas e uniformes, preenchidos pela mistura de areia com alguns tipos de resinas (SIEGEL, 1985).

Conforme ilustra a Figura 6, a moldagem em casca é baseada na mescla de resina sintética com areia sobre uma placa metálica aquecida, sobre essa placa forma-se uma pequena casca (JONES E YUAN, 2003).

Figura 6 - Moldagem em casca



Fonte: Souza (2015)

A composição das areias utilizadas nesse processo de fundição pode apresentar sílica, zirconita e olivina. O tipo de areia que será empregado no processo vem da escolha de alguns fatores, tais como: os custos, sua origem, granulometria, o formato dos grãos, impurezas e propriedades mecânicas (SIEGEL, 1985).

2.2 Definição de resíduos sólidos

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) resíduos sólidos, são aqueles colocados para descarte em estado sólido e semi-sólido, sendo procedentes de atividades doméstica, comercial, hospitalar, industrial e/ou agrícola. Também são inclusos na definição os lodos resultantes de sistema de tratamento de água, bem como determinados líquidos os quais se julguem inviável serem lançados nas redes públicas de esgoto ou em corpos hídricos.

2.2.1 Classificação de Resíduos Sólidos

Conforme ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos são definidos em função da potencialidade dos riscos com relação ao meio ambiente e também à saúde pública. A classificação é realizada conforme a verificação da origem do resíduo, do processo, da atividade, e de sua composição.

A norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em:

- a) Resíduos classe I - Resíduos perigosos;
- b) Resíduos classe II - Resíduos não perigosos;

c) Resíduos classe II A - Resíduos não inertes;

d) Resíduos classe II B - Resíduos inertes;

As normas que têm relação com os resíduos sólidos seguem abaixo:

a) NBR 10.005/2004 – Lixiviação de Resíduos;

b) NBR 10.006/2004 – Solubilização de Resíduos sólidos;

c) NBR 10.007/2004 – Amostragem de Resíduo. Com os parâmetros apresentados nestas NBR's, as ADF's são classificadas comumente na classe II A (ABNT NBR 10.004).

2.3 Utilização de areia descartada de fundição no concreto

As areias descartadas de fundição são oriundas da confecção de moldes para a fabricação de peças de metal. O processo citado anteriormente gera um grande número de resíduos ao longo de sua ocupação na indústria (ANDRADE; CARNIN; PINTO, 2017).

A fim de aumentar a vida útil das areias de fundição, as indústrias siderúrgicas reaproveitam este material utilizando processos que envolvem elevadas temperaturas e causam a calcinação das areias. Outra alternativa é a regeneração do material através de ações mecânicas. Ambos os procedimentos buscam limpar a superfície das partículas da areia para devolvê-la ao processo fabril com as mesmas características iniciais (PENKAITIS, 2012).

Quando não há possibilidade de recuperar as propriedades da areia de base, o material retirado do setor de moldagem é descartado, sendo então classificado como areia descartada de fundição (ANDRADE; CARNIN; PINTO, 2017).

Segundo Penkaitis (2012) o descarte inadequado das ADF's pode ocasionar contaminação no solo, em águas superficiais e em subterrâneas.

Conforme os estudos de Manoharan *et al.* (2020) e Manoj, Sanjaya e Ashoke (2016), muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a intenção de aproveitar este componente como agregado na fabricação de concretos, o que pouparia a extração de recursos naturais.

O aproveitamento de areia descartada de fundição é admitido na produção de peças de concreto sem função estrutural. Este uso também é permitido para a produção de peças de solo cimento e concreto asfáltico (CONSEMA, 2008)

Para Singh e Siddique (2011) a substituição de areia natural por 15% de areia descartada de fundição ocasionou um aumento da resistência à compressão simples na fabricação de concreto, sendo aceito e classificado este concreto como concreto estrutural. Entretanto, nos teores superiores a 20% de substituição da areia natural por areia descartada de fundição, verificou-se a redução da resistência à compressão. Tal fato se deve a quantidade de finos presentes na ADF.

Já para Cavalli e Bertoldi (2016), os resultados obtidos com 20% de areia natural sendo substituídos por areia descartada de fundição não alteraram a resistência à compressão simples do concreto. No estado fresco, o concreto não precisou da adição de aditivos superplastificantes para corrigir a trabalhabilidade.

Considerando a utilização de ADF para blocos de solo cimentos, substituições acima de 20% apresentaram peças com redução de 50% na resistência à compressão. Porém, estes resultados não impedem seu uso em peças não estruturais (LEONEL *et al.*, 2017).

Conforme Maccagnan *et al.* (2013), o uso de ADF em teores acima de 16% ocasionou uma queda na resistência mecânica de 18%. Entretanto, nos teores de até 12% a substituição de areia natural por ADF não apresentou variações na resistência mecânica do concreto.

Para Penkaitis (2012) uma alternativa viável no reuso das ADF's é a fabricação de artefatos de concreto como fonte de substituição de sílica.

2.3.1 Concreto Convencional

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o concreto convencional é aquele que compreende resistências características à compressão, entre 20 e 40 MPa.

Carvalho (2014) afirma que grande parte do concreto convencional produzido no Brasil é oriundo de auto construtores ou “construtores formigas”. Isso deve-se ao fato de esses pequenos consumidores terem fácil acesso ao cimento através de varejistas locais, representando, assim, 64% do consumo de cimento nacional.

Na análise do cenário mundial para o consumo de concreto, projeções apontam que esse produto pode ocupar o topo da lista de material mais consumido a partir de 2025, ultrapassando a geração de água potável. No Brasil, acontece a mesma situação. Portanto, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) entrou em parcerias com E8 Inteligência e a UBM Brazil para realizarem uma das mais amplas pesquisas sobre o mercado nacional de concreto. Esse estudo coletou dados entre os anos de 2005 à 2012, com objetivo de projetar as tendências do setor para os próximos anos. Foi constatado que a produção de concreto dosado em central obteve um crescimento de 180% no período analisado.

Outro dado relevante é que em 2012 as concreteiras instaladas no Brasil produziram 51 milhões de m³ de concreto, detendo um consumo de aproximadamente 38 milhões de toneladas de areia produzida neste país naquele mesmo ano (SANTOS, 2013).

Sendo assim, os concretos convencionais são desenvolvidos e concebidos de acordo com o que dita a tecnologia clássica do concreto, já consagrada e difundida no meio industrial e acadêmico. Nesse contexto, é possível dividir o concreto convencional em concreto para descarga direta, concreto para operações de bombeamento, concreto para produção de artefatos, concreto superplástico, concreto de alto desempenho, entre outros (RECENA, 2017).

2.3.2 Aglomerante

Segundo Mehta e Monteiro (2014), aglomerante hidráulico é aquele caracterizado pelo processo de hidratação. Desse processo de hidratação ocorrem reações químicas propiciadas pela mistura da água e os minerais do cimento. Os cimentos são basicamente compostos por silicatos reativos de cálcio, que quando hidratados propiciam as propriedades aglutinantes ao cimento.

O cimento Portland pode ser entendido como um material de propriedades adesivas e coesivas, tendo a capacidade de conectar pedaços de minerais com outros, formando uma mistura coesa (NEVILLE, 1997). O cimento Portland até este momento é um dos materiais de construção mais consumidos pelo homem em função de seus atributos tanto em estado fresco, como em estado endurecido (CURTI, 2017).

Existem vários tipos de cimento no Brasil. Esses cimentos diferem entre si de acordo com sua composição como, por exemplo, o cimento de alto forno, o cimento composto, o cimento pozolânico, o cimento de alta resistência inicial cimento branco e o de baixo calor de hidratação. Dentre eles os mais utilizados são CPV ARI, CII E 32, CII F 32 e CIII 40 (BATTAGIN, 2011).

2.3.3 Água

A água é o componente mais utilizado na área da construção civil. Por esse motivo, deve-se atentar para as orientações estabelecidas nas normas vigentes em relação ao seu uso. Mudanças nas propriedades químicas da água podem gerar alterações na cor do concreto ocasionando manchas ou até mesmo eflorescências. Recomenda-se água potável para a produção de concreto, contanto que o pH da mesma esteja entre 6 e 8. É importante que a mesma esteja livre de impurezas biológicas, físicas e químicas (MEDEIROS *et al.*, 2015a).

A água é um fluido muito abundante no mundo, pois ela pode ser encontrada em diversas formas como a água do mar, subterrânea, de rio, de neve, de lago, gelo, de chuva e vapor. Uma característica da água é que suas moléculas são extremamente pequenas e, dessa forma, elas conseguem penetrar os poros extremamente finos. A solvência é outra propriedade da água. Ela tem uma eficácia muito superior, se comparado com outros líquidos conhecidos, em dissolver outras substâncias (METHA; MONTERO, 2014).

A NBR 15900-1 (ABNT 2009) deixa explícita as condições necessárias para se considerar adequada a água para o amassamento do concreto. Também descreve os métodos de amostragem e os procedimentos para sua avaliação. O item 3.2 da NBR 15900-1 (ABNT 2009) menciona que a água potável utilizada para consumo público é apropriada para o uso de amassamento de concreto e não necessita de ensaios laboratoriais.

2.3.4 Agregados Graúdos e Miúdos

Para Neto (2011) a definição mais plausível para agregado é que ele seja um material granular, sem volume ou geometria definidos, tendo suas dimensões e características apropriadas às obras de engenharia, em especial a produção de concreto e argamassa de cimento Portland.

Pela definição de Farias e Palmeira (2010), agregados são frações provenientes de rochas habitualmente conhecidos como "pedras" e "areias". Os fragmentos oriundos das rochas, em dimensões e características adequadas, são empregados em vários tipos de obras de infraestrutura civil, incluindo obras de barragens, pavimentação, saneamento e edificações. Contudo, é muito ampla a faixa de dimensão desses fragmentos, podendo ser na escala de centímetros, a exemplo, os blocos de "enrocamento" usual em obras de barragens, na escala milimétrica, conforme os "agregados" empregados no processo de fabricação do concreto para maioria das obras de edificação.

Acrescentamos, ainda, que a areia, conforme a NBR 7211 (ABNT 2009) agregado miúdo é um material de origem natural ou obtida através de rochas estáveis após britadas, podendo também ser a mista de ambos os materiais, cujo grãos devem passar através da peneira ABNT 4,8 mm e serem detidos na peneira ABNT 0,075 mm.

Ainda mais, a NBR 7211 (ABNT 2009) diz que agregado graúdo é o pedregulho em sua forma natural ou brita resultante de rochas estáveis após o britamento. O agregado graúdo pode ser também a mistura de ambos, devendo os seus grãos passarem pela peneira de malha, cuja abertura nominal é de 152 mm e ficarem detidos em peneira ABNT 4,8 mm.

2.3.5 Fases do Concreto

Segundo Helene e Andrade (2010), o concreto apresenta dois ciclos diferentes. O primeiro ciclo norteia o concreto no estado fresco ao qual tem espaço de tempo muito pequeno, em média é de 1h a 5h. Esse ciclo se refere à duração essencial para que o concreto seja preparado, transportado, lançado e adensado. O segundo ciclo condiz ao concreto no estado endurecido, iniciando-se com a hidratação

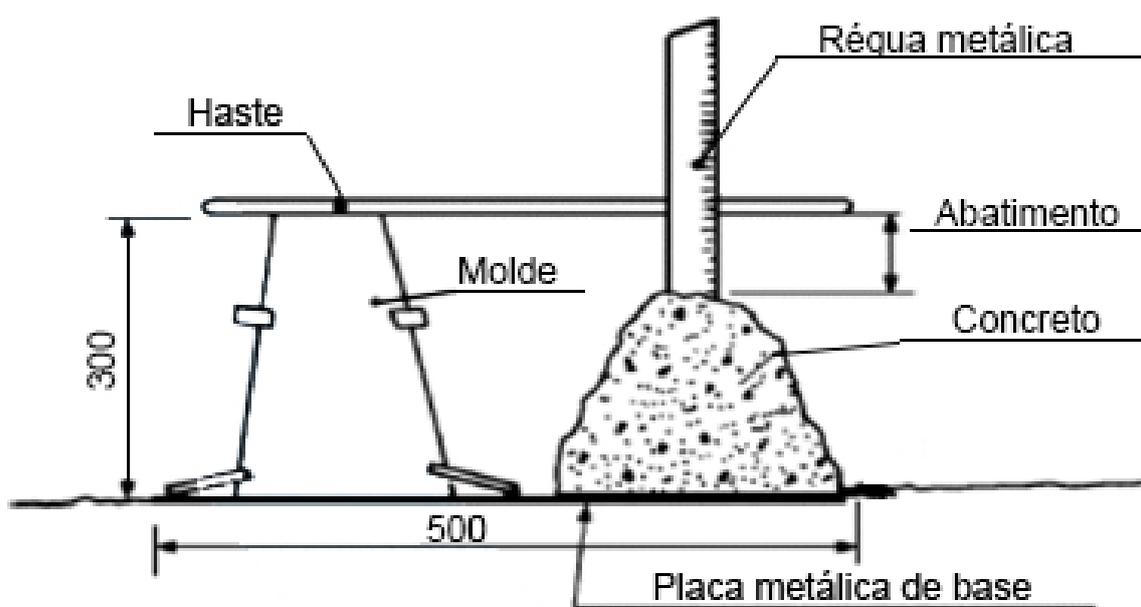
do cimento, juntamente com o endurecimento do concreto, esse ciclo se estenderá ao longo da vida útil da estrutura.

2.3.6 Estado Fresco

O concreto no estado fresco tem sua trabalhabilidade imbuída de diversos fatores inerentes, tais como: classe e consumo de cimento no concreto por metro cúbico, relação água/materiais secos, traço do concreto, teor da argamassa, geometria, tamanho e textura dos agregados. Também são considerados os fatores externos de influência, tais como a geometria da fôrma, as condições de transporte, a densidade e a distribuição das armaduras, esbeltez dos elementos estruturais e outros diversos fatores (HELENE; ANDRADE, 2010).

Mehta e Monteiro (2014) difundem que uma das razões para a imensa utilização do concreto é a simplicidade em se obter elementos estruturais por meio de uma diversidade de formas e tamanhos. Isso se deve ao concreto fresco, ao qual se atribui a consistência plástica. Essa consistência confere ao concreto um escoamento contínuo para o interior das fôrmas, medido como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Abatimento do concreto



Fonte: NBR NM 67 (ABNT 1998)

A NBR NM 67 (ABNT 1998) descreve que a consistência do concreto fresco pode ser definida implementando o ensaio de abatimento do tronco de cone. Ensaio

este que deve ser realizado tanto em obra quanto em laboratório, pois é através deste ensaio que se obtêm os dados de *slump*, a Figura 7 representa este ensaio. A mesma NBR NM 67 (ABNT 1998) também lista os equipamentos que devem ser utilizados para a realização deste ensaio.

Na Tabela 1 têm-se as tolerâncias de abatimento mínimas e máximas do concreto.

Abatimento (mm)	Tolerância (mm)
De 10 a 90	± 10
De 100 a 150	± 20
Acima de 160	± 30

Fonte: NBR NM 67 (ABNT 1998)

2.3.7 Estado Endurecido

A resistência mecânica no estado endurecido está ligada diretamente às propriedades encontradas no estado fresco. O estudo aprofundado das proporções dos agregados acarretará bons resultados no grau de adensamento e conseqüentemente bons resultados à resistência mecânica à compressão (NEVILLE, 2016).

No estado endurecido ocorre com o início da hidratação do cimento e, portanto, endurecimento do concreto, que se estende por toda vida útil da estrutura. São as principais características do concreto no estado endurecido: massa específica, módulo de elasticidade, resistência mecânica à compressão, coeficiente de dilatação térmica, resistência mecânica à tração. A resistência mecânica à compressão é determinada com base em um valor de referência de 95% das amostras ensaiadas em laboratório. Esta resistência deve ser atingida pelo concreto e os ensaios comprobatórios devem ser sistematicamente registrados e documentados ao longo da obra conforme descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018) (HELENE; ANDRADE, 2011).

Já os ensaios de resistência mecânica à tração são especificados pelas normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 12142 (ABNT 2010), sendo que a primeira estabelece as diretrizes referentes ao ensaio de resistência à compressão simples e tração à compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, f_{ct} , f_t , e a segunda estabelece métodos de ensaios para a resistência à tração de flexão para corpos de prova em formato de prismas, $f_{ct, f}$. Há uma relação matemática proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) segundo a qual a resistência mecânica à tração direta poderá ser

considerada equivalente a $0,7 f_{ct}$ ou $0,9 f_{ct, sp}$. Existem ainda três equações caso não existam ensaios para a obtenção de $f_{ct, sp}$; $f_{ct, f}$ e $f_{ct, m}$, são elas:

A Equação 1, a qual se refere à resistência característica à tração:

$$f_{ctk, inf} = 0,7 f_{ctm} \quad (1)$$

A Equação 2 é referente à resistência característica à tração superior:

$$f_{ctk, sup} = 1,3 f_{ctm} \quad (2)$$

Na Equação 3 o resultado obtido é o valor médio da resistência mecânica à tração do concreto, utilizados nas equações 1 e 2, para classes até 50 MPa:

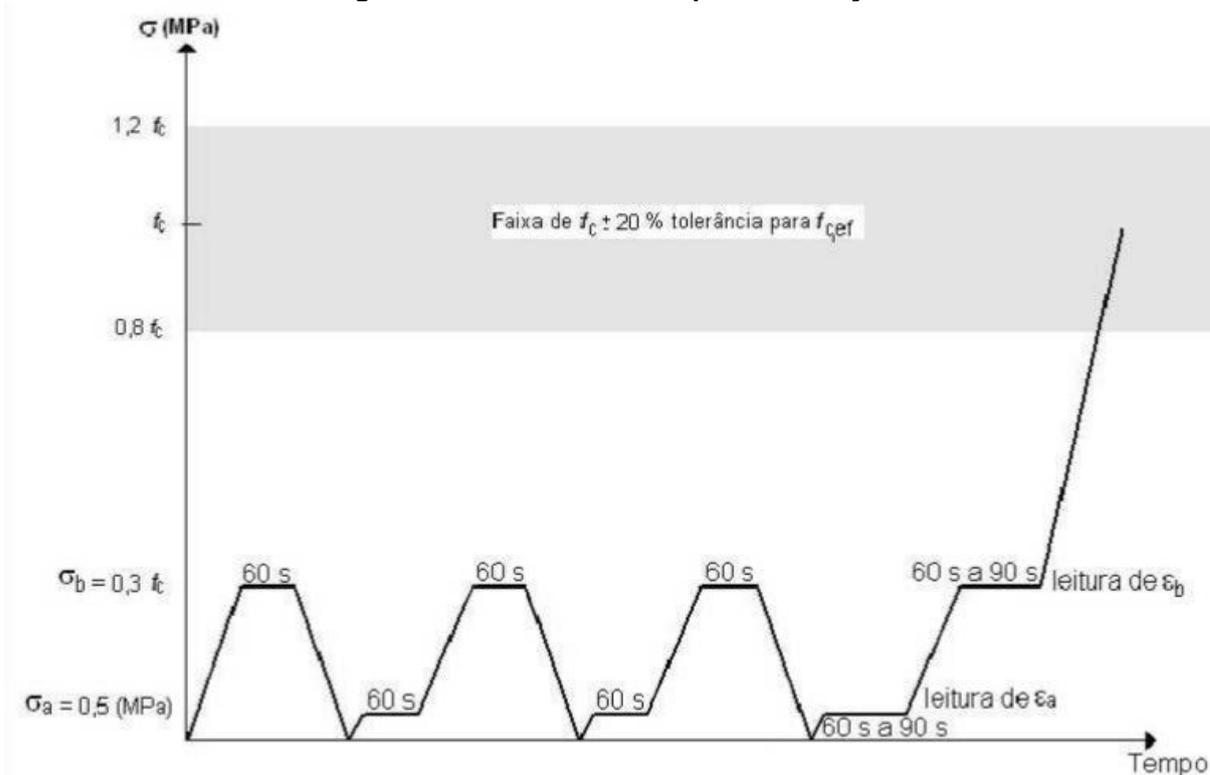
$$f_{ct, m} = 0,3 f_{ck}^2 / 3 \quad (3)$$

Para ambas as equações os valores devem ser expressos em MPa.

Entre as propriedades do concreto no estado endurecido, também merece destaque o módulo de elasticidade. Mehta e Monteiro (2014) definem módulo de elasticidade como a relação entre a carga aplicada e a deformação no instante de aplicação da carga.

O ensaio de módulo de elasticidade é realizado conforme descrito na NBR 8522 (ABNT 2017) segundo a qual os corpos de prova devem permanecer em cura imersos em água com hidróxido de cálcio conforme a NBR 5738 (ABNT 2016) até a data de ensaio. Na sequência, as amostras são levadas até a prensa e é aplicada uma carga referente a 30% da tensão de ruptura. Esta carga deve-se manter aplicada na amostra por 60 segundos. Posteriormente, a carga é baixada até 0 Mpa para, então, ser aplicada uma carga de 0,5 por um período de 60 segundos e, novamente, é aplicada a carga de 30% da tensão de ruptura por um período de 60 segundos. Este procedimento é repetido por três vezes até que, na terceira vez, o corpo de prova deve ser rompido. O gráfico resultante deste processo é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Gráfico da tensão por deformação



Ao final do ensaio se espera poder traçar o diagrama Tensão/Deformação específica com o eixo das abscissas apresentando o resultado da média das deformações e as tensões sendo apresentadas no eixo das ordenadas.

Há, também, o ensaio de compressão axial simples conforme a NBR 5739 (ABNT 2018)

2.4 Permeabilidade

Segundo Repette (2010), o transporte de fluidos no interior do concreto causa sua deterioração, fazendo com que sua durabilidade seja influenciada através da permeabilidade, sendo esta que modera o acesso e deslocamento de agentes de deterioração, comprometendo química e fisicamente à sua estrutura, havendo deterioração mesma.

Já Neville (2016) menciona que a porosidade é a proporção de volume ocupado por poros. Essa proporção é expressa em valores percentuais. Se a porosidade for muito elevada haverá a intercomunicação entre os poros o que contribuirá para o transporte de fluidos no interior do concreto. Em síntese, a

permeabilidade é a movimentação ocasionada por um diferencial de pressão de um fluido no interior de uma estrutura porosa. Essa movimentação pode ocorrer através do processo de difusão, onde o fluido se move por meio de um diferencial de concentração, ou por absorção, onde a movimentação ocorre em função de capilares abertos para o ambiente.

A formação dos poros está diretamente relacionada com a água no concreto. Por essa razão, a água deve ser vista numa perspectiva adequada pois ela atua como ingrediente de hidratação do cimento, facilitando a mistura dos insumos do concreto. Deve-se considerar também as dimensões da peça concretada, bem como o meio onde está inserida. Peças de grandes dimensões tendem a perder grandes quantidades de água, deixando vazios ou poros que podem aumentar a permeabilidade na peça concretada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Aproximadamente 50% do volume total da pasta de cimento encontra-se na zona de transição. Esta região do concreto apresenta uma microestrutura diferente das demais. A interface entre agregados e a pasta também é o principal ponto de fissuração nas primeiras idades. Por essas razões, conclui-se que o ponto onde há maior permeabilidade no concreto é a zona de transição (NEVILLE, 2016).

Os ensaios que medem a permeabilidade à água podem ser divididos em 3 grupos:

Sucção capilar;

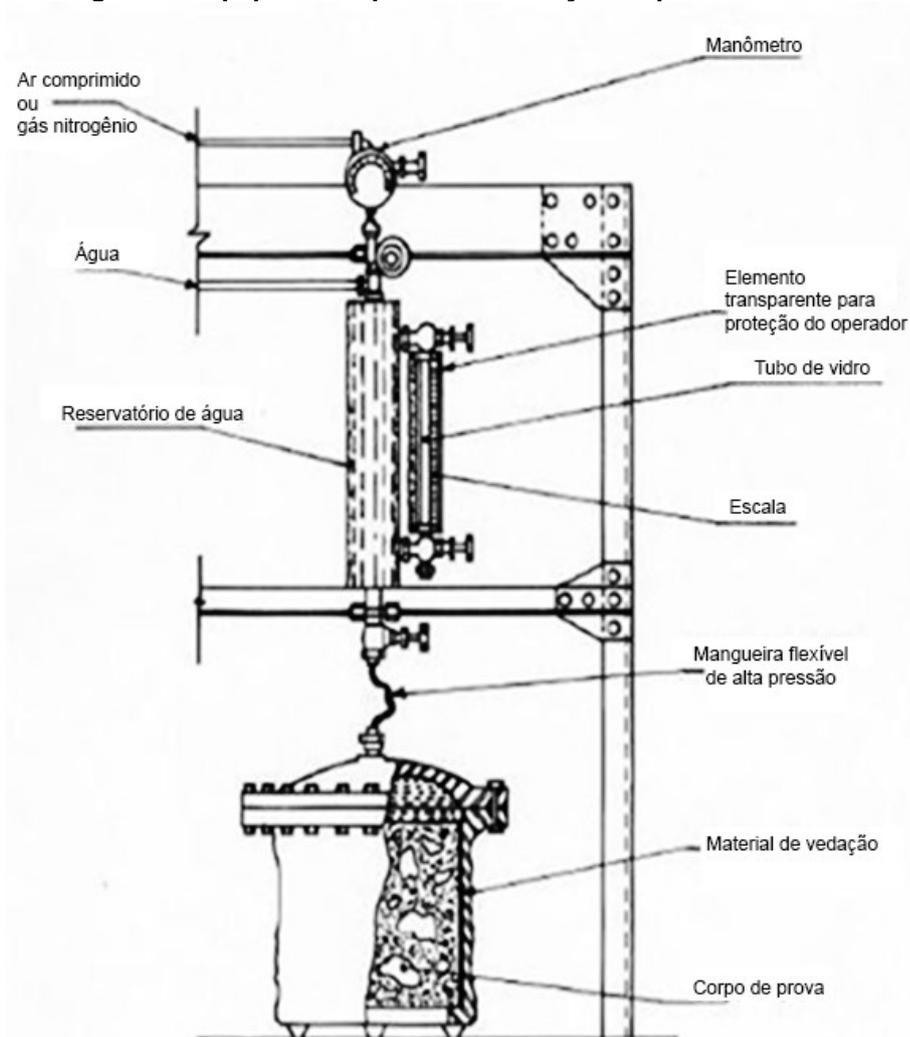
Penetração com fluxo estacionário;

Penetração com fluxo não estacionário.

No ensaio de sucção capilar, a pressão aplicada é pequena e pode ser desprezada. Dessa forma, os ensaios por sucção capilar ocorrem por ganho de massa ou ganho de área. Na maioria dos casos, este tipo de experimento é executado por infiltração. Já os ensaios estacionários são empregados com intuito de verificação ou comparação entre concretos. Os ensaios para fluxo não estacionários são os mais utilizados. Estes ensaios costumam durar entre dois dias e duas semanas dependendo da conectividade dos poros da amostra (SILVA, 2011b).

A ABNT NBR 10786/2013 estabelece o método de determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto endurecido por um período aproximado de 500 horas. Neste ensaio a pressão é provida por meio de cilindro de nitrogênio gasoso ou ar comprimido. O equipamento utilizado para a determinação da permeabilidade a água é mostrado na Figura 9a seguir:

Figura 9 - Equipamento para determinação de permeabilidade



FONTE: NBR 10786 (ABNT, 2013)

Neste ensaio o coeficiente de permeabilidade é calculado pela EQUAÇÃO 4:

$$K = \frac{Q}{A} * \frac{L}{H} \quad (4)$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

Q = Vazão de entrada (cm³/s);

L = Altura do corpo de prova (cm);

A = Área da seção transversal do CP (cm²);

H = Altura da coluna de água equivalente à pressão utilizada (cm).

(ABNT NBR 10786/2013).

Para corpos de prova prismáticos o ensaio é especificado pela ABNT NBR 10787/2011 e consiste em prender o corpo de prova entre perfis metálicos, mantendo a parte inferior em contato direto com a água sob pressão progressiva por 96 horas. A leitura de permeabilidade na amostra é feita com o corpo de prova rompido, medindo-se a maior profundidade de penetração de água na amostra.

Para os ensaios de campo existem basicamente quatro experimentos: Absorção capilar, penetração de água, permeabilidade aos gases e coeficiente de difusão de cloretos. No ensaio de absorção capilar, a água é aplicada com uma coluna de água de 200 mm sobre uma área vedada de concreto, a leitura da absorção é feita em intervalos de 30, 60, 90 e 120 minutos, através de uma proveta ligada à estrutura. O ensaio de penetração de água consiste em executar um furo perpendicular à face estudada e aplicar água sob pressão por um período compreendido entre dois e catorze dias. Ambos os ensaios são imprecisos e costumam apresentar variações, sendo mais recomendados os ensaios de e permeabilidade aos gases (SILVA, 2011b).

O ensaio utilizado neste trabalho acadêmico é prescrito pela ABNT NBR 9779/2012. Neste ensaio, a amostra é previamente seca em estufa a temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até que fique comprovada a constância de massa. Posteriormente, o corpo de prova é colocado sobre uma lâmina de 5 ± 1 mm de água. Na sequência, são feitas leituras de massa da amostra nas idades de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contadas a partir do momento em que as amostras entraram em contato com a água. Em seguida, a amostra é rompida conforme a ABNT NBR 7222/2011, a absorção capilar é expressa pela Equação 5:

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (5)$$

Onde:

C=Absorção de água por capilaridade em g/cm^3 ;

A= Massa do corpo de prova que permaneceu em contato com a água, em gramas;

B= Massa do corpo de prova seco, em gramas;

S= Área da seção transversal.

A Figura 10 apresenta o corpo de prova já imerso em água, e pode ser visualizada a absorção de água por capilaridade do concreto.

Figura 10 - Ensaio de determinação de permeabilidade



Fonte: Autoria Própria.

Mehta e Monteiro (2014) relatam que quando se adiciona sílica ao concreto são observados ganhos na resistência mecânica à compressão axial e diametral, além de uma redução significativa na absorção de água, bem como um aumento na densidade do concreto.

Existe um paralelo entre a resistência, à compressão e a absorção de água por capilaridade. Habitualmente, o que se observa é que quanto maior a resistência da amostra menor é a absorção (TUTIKIAN, 2018).

Ainda segundo Tutikian (2018), os resultados tanto de absorção por capilaridade como de resistência mecânica à compressão são mais estáveis e concisos após as idades de 28 dias. Neste período, as reações estão mais maturadas e os desvios nos ensaios são menores.

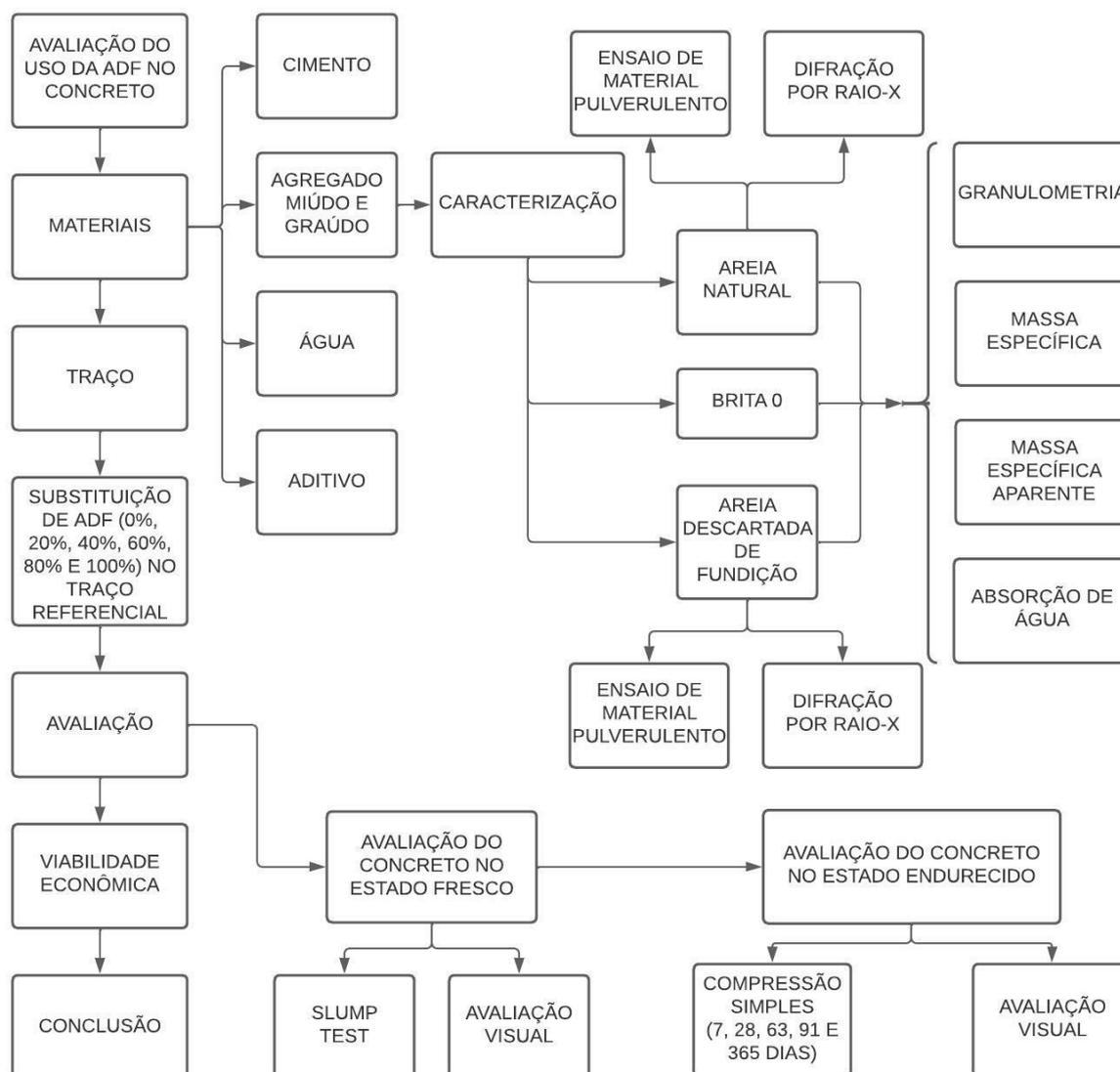
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a caracterização dos materiais, bem como os métodos utilizados na pesquisa.

A proposta deste estudo é fazer a avaliação da viabilidade técnica e econômica da substituição de areia natural por areia descartada de fundição em quatro relações água cimento distintas.

O desenvolvimento desta pesquisa será conforme o fluxograma representado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto



Fonte: Autoria Própria.

3.1 Materiais

Primeiramente serão selecionados os materiais utilizados na produção de concreto de uma concreteira em Curitiba-PR, sendo eles:

- a) Cimento;
- b) Agregado miúdo;
- c) Agregado graúdo;
- d) Aditivos;
- e) Água.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na produção do traço do concreto foi o CP II F 40, conforme material utilizado pela concreteira. Quanto às exigências físicas e mecânicas do cimento, os testes foram baseados na norma NBR 16697 (ABNT, 2018), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Testes exigências físicas e mecânicas do cimento

	# 325	Blaine (cm ² /g)	Água de Consistência (%)	Tempo de Pega		Resistência à compressão (MPa)			
				Início (min.)	Fim (min.)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limite Norma	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	N/A	≥ 15	≥ 25	≥ 40
Média	0,39	4.565	30,52	253,8	322,8	22,9	34,53	39,7	47,5
Desvio Padrão	0,22	135	0,39	10,8	17,7	1,0	0,85	0,6	0,45
Mínimo	0,20	4.410	30,00	240,0	300,0	20,8	33,00	38,9	47,0
Máximo	1,30	4.880	31,20	285,0	365,0	25,0	35,90	40,9	48,6

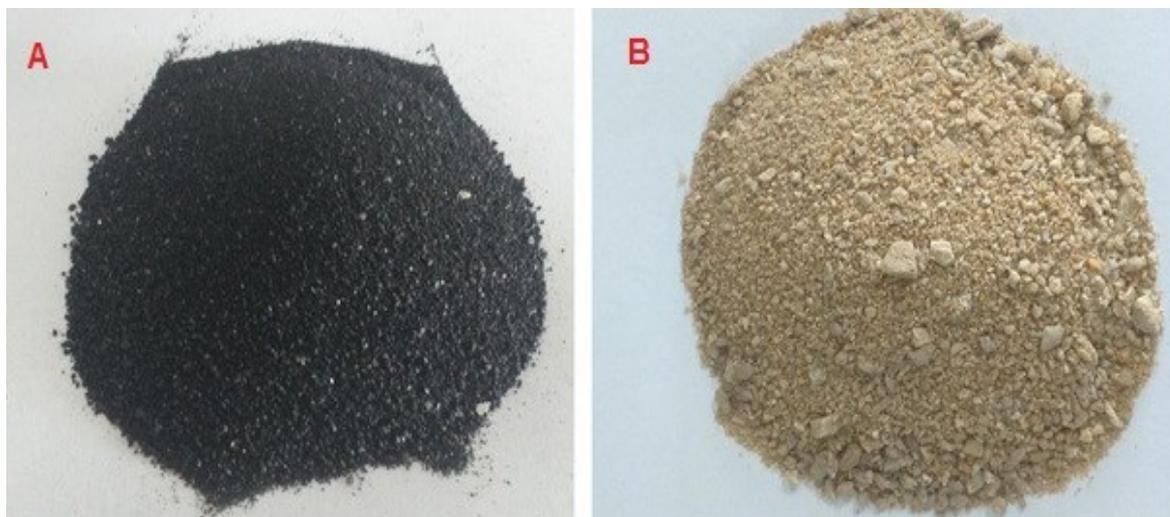
Fonte: Fabricante (2021)

3.1.2 Agregado Miúdo e Graúdo

Neste experimento foram utilizados dois agregados miúdos, sendo o primeiro de origem natural, coletado de um areal na região metropolitana de Curitiba – PR, e o segundo foi coletado em uma fundição na mesma cidade onde este estudo foi

realizado. Trata-se de areia descartada de fundição. Ambos os materiais são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Areia descartada de fundição (A) e areia natural (B)



Fonte: Autoria Própria.

Para os agregados graúdos foi utilizado brita 0, de origem calcária extraídos da jazida do município de Rio Branco do Sul-PR conforme Figura 13.

Figura 13–Agregado graúdo dimensão máxima característica 9,5mm



Fonte: Autoria Própria.

A fim de caracterizar os materiais foram realizados os ensaios determinação de massa específica e massa específica aparente segundo NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009), determinação do teor de materiais pulverulentos para os

agregados miúdos de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003) e absorção de água conforme NBR NM 30 (ABNT, 2001) e NBR NM 53 (ABNT, 2009), conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Massa específica e massa unitária

Agregados	Massa Específica (Kg/m³)	Massa Unitária (kg/m³)	Absorção (%)	Teor de material Pulverulento (%)	Módulo de Finura
Areia Natural	2620	1300	0,7	4,1	2,10
ADF	2600	1350	1,0	15,6	1,35
Brita	2740	1400	0,4	3,5	5,61

Fonte: Autoria Própria.

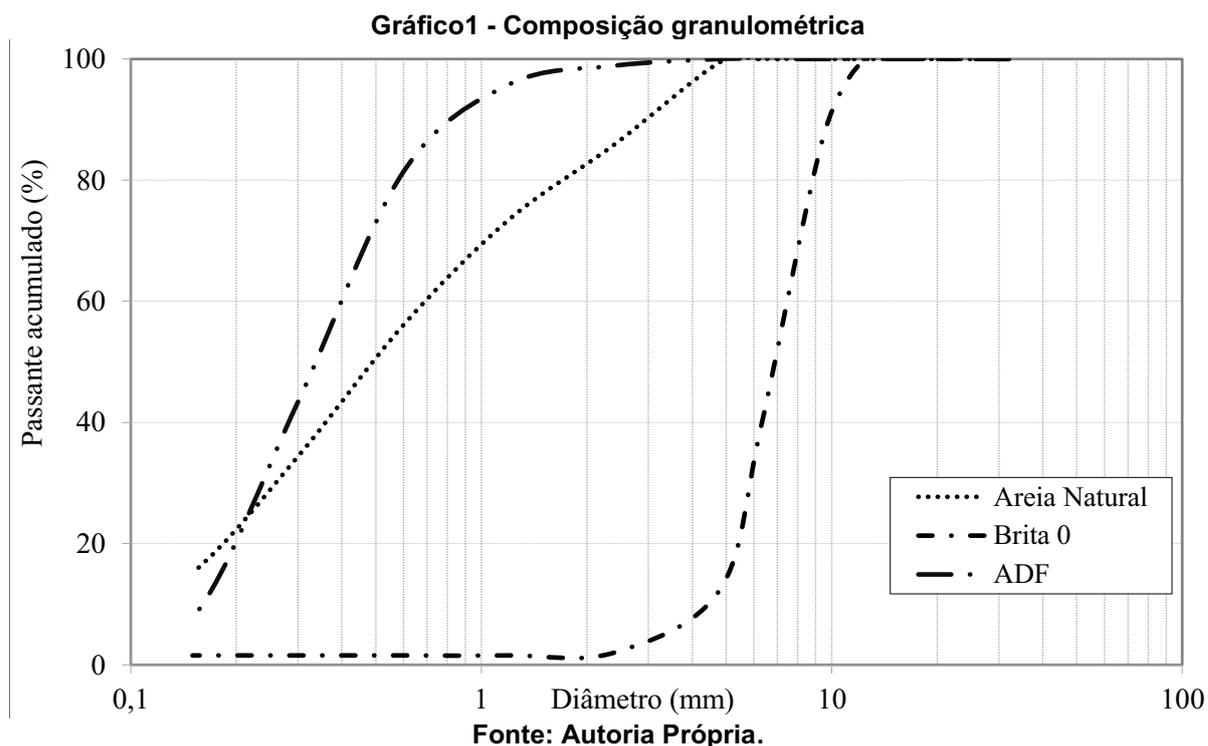
Complementando os ensaios supracitados, foi realizado também o ensaio de composição granulométrica, de acordo com a NBR 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009), conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Composição granulométrica

Abertura da peneira (mm)	% Retida Acumulada (g)		
	Areia Natural	ADF	B0
32	-	-	-
25	-	-	-
19	-	-	-
12,5	-	-	-
9,5	-	-	-
6,3	-	-	12,50%
4,8	-	-	47,73%
2,4	0,20%	1,20%	27,33%
1,2	1,80%	3,20%	10,13%
0,6	10,00%	14,40%	0,53%
0,3	30,60%	36,80%	-
0,15	37,80%	36,80%	-
0,075	19,60%	7,60%	1,77%
Total	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: Autoria Própria.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos nos estudos, foi elaborado o Gráfico 1 conforme a NBR 248 (ABNT, 2003). Neste gráfico é possível constatar a diferença na composição granulométrica entre a areia descartada de fundição, a areia natural e a brita com dimensão máxima característica de 9,5 mm.



3.1.3 Água e Aditivo

A água que constituiu o traço do concreto é proveniente de poços artesianos dispostos dentro da concreteira e atende as especificações da ANBR 15900 (ABNT, 2009), sendo realizados ensaios de potabilidade periodicamente.

O aditivo líquido empregado na mistura é do tipo plastificante e redutor de água. A dosagem de aditivo foi de 0,8%, sobre a massa de cimento, conforme orientação do fabricante. Em alguns casos, foi necessária a adição de um aditivo superplastificante de terceira geração. A aplicação deste aditivo foi variável em função da correção do *slump* e da adição de ADF.

A proporção de aditivo adicionada ao concreto visa garantir para todas as relações água cimento, bem como para todas as adições de ADF, abatimento de 100 mm mais menos 20 mm, uma vez que o abatimento representa aproximadamente 80% do concreto produzido pela referida concreteira.

3.2 Determinação do traço

O traço do concreto foi realizado com base em quatro valores de relação água/cimento (A/C), sendo elas: 0,40, 0,50, 0,60 e 0,70. A escolha destas relações A/C ocorreu em função da grande abrangência de resistências mecânicas envolvidas entre elas, bem como por ser possível executar um estudo comparativo entre as relações A/C recomendadas pela NBR 6118 (ABNT,2014) e uma relação água/cimento que ultrapasse estas recomendações.

As substituições de 20, 40, 60, 80 e 100% de areia descartada de fundição foram determinadas com base em estudos já realizados, por T.V. Reshma *et al.* (2021).

Para cada relação A/C foi realizado um traço referência utilizado pela concreteira e cinco traços com substituições parciais da areia natural, levando em conta que foram realizados 6 corpos de prova para cada idade, de modo que foram moldados 864 corpos de prova, conforme indica a Tabela 5. Os corpos de provas foram moldados com formas metálicas de formato cilíndrico, sendo suas dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

Tabela 5 - Características dos corpos de prova

A/C	Quantidade de Corpos de Prova por Idade	Idade de Ruptura (Dias)	Teor de Substituição de ADF (%)	Total
0,70	6	7, 28, 63, 91,365	0, 20, 40, 60, 80, 100	216
0,60	6	7, 28, 63, 91,365	0, 20, 40, 60, 80, 100	216
0,50	6	7, 28, 63, 91,365	0, 20, 40, 60, 80, 100	216
0,40	6	7, 28, 63, 91,365	0, 20, 40, 60, 80, 100	216
Total de Amostras				864

Fonte: Autoria Própria.

O traço referência e os traços com substituição de 0%, 20% 40% 60% 80% e 100% de ADF foram inicialmente executados conforme disposto na Tabela 6.

Tabela 6 - Porcentagem de areia de fundição no concreto

A/C	% de ADF	Cimento	ADF	Areia Natural	Brita 0	Poli funcional	Superplastificante	Água
0,4	0	1	0,0	1,5	2,2	3,72	0,000	0,4
	20	1	0,3	1,2	2,2	4,65	0,000	0,4
	40	1	0,7	0,9	2,2	4,65	0,465	0,4
	60	1	1,0	0,6	2,2	4,65	0,697	0,4
	80	1	1,4	0,3	2,2	4,65	0,697	0,4
	100	1	1,7	0,0	2,2	4,65	0,930	0,4
0,5	0	1	0,0	2,1	2,8	2,97	0,000	0,5
	20	1	0,5	1,7	2,7	3,71	0,000	0,5
	40	1	1,0	1,3	2,7	3,71	0,371	0,5
	60	1	1,4	0,8	2,7	3,71	0,557	0,5
	80	1	1,9	0,4	2,7	3,71	0,557	0,5
	100	1	2,4	0,0	2,7	3,71	0,742	0,5
0,6	0	1	0,0	2,7	3,3	2,48	0,000	0,6
	20	1	0,6	2,2	3,3	3,10	0,310	0,6
	40	1	1,2	1,6	3,3	3,10	0,310	0,6
	60	1	1,8	1,1	3,3	3,10	0,465	0,6
	80	1	2,4	0,5	3,3	3,10	0,465	0,6
	100	1	3,1	0,0	3,3	3,10	0,620	0,6
0,7	0	1	0,0	3,3	3,8	2,128	0,000	0,7
	20	1	0,7	2,6	3,8	2,660	0,000	0,7
	40	1	1,5	2,0	3,8	2,660	0,266	0,7
	60	1	2,2	1,3	3,8	2,660	0,266	0,7
	80	1	3,0	0,7	3,8	2,660	0,399	0,7
	100	1	3,7	0,0	3,8	2,660	0,532	0,7

Fonte: Autoria Própria.

É possível constatar que, em função da adição de areia descartada de fundição, houve também um aumento no consumo de aditivos. Este aumento ocorreu tanto no aditivo plastificante como no superplastificante e teve como foco manter o abatimento e trabalhabilidade do concreto.

3.3 Concreto no estado fresco e endurecido

Para a caracterização no estado fresco do concreto foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), bem como

o ensaio de massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico, conforme a NBR 9833 (ABNT 2009). Foi realizada também a análise visual do concreto antes e após a substituição de areia natural por ADF com a intenção de identificar exsudação, coloração e acabamento superficial.

Posteriormente, foram moldados corpos de prova para ensaio de compressão simples do concreto conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Estes corpos de prova foram acondicionados em um local plano e cobertos com plástico filme de PVC.

Em seguida, as amostras foram retiradas do molde e na sequência foi realizada cura submersa em água com hidróxido de cálcio e temperatura controlada, conforme NBR 5738 (ABNT 2015). As amostras permaneceram em imersão até serem ensaiadas quanto a sua compressão nas idades previamente definidas (7, 28, 63 e 91 dias) como evidencia a Figura 14. Além do ensaio de compressão, foi realizada a avaliação visual entre as amostras de referência e as amostras com substituições.

Figura 14 - Corpos de prova em cura



Fonte: Autoria Própria.

Com a ajuda dos equipamentos utilizados na referida concreteira os corpos de prova foram retificados, com intuito de diminuir o desvio padrão dos resultados. Também foi realizado o ensaio de massa específica. Todos os corpos de prova foram pesados em balança com precisão 0,1 grama e capacidade para 15 kg. Simultaneamente, com auxílio de um paquímetro foi executada a leitura de duas medidas de diâmetro e duas medidas da altura dos corpos de prova.

Depois, foi realizado o ensaio de ruptura dos corpos de prova, bem como o cálculo do desvio padrão envolvendo as amostras e a média de 6 corpos de prova do

ensaio de resistência à compressão axial, realizado com uma prensa com capacidade para 100 toneladas. Tendo como foco a durabilidade das estruturas de concreto, foram realizados também os ensaios de determinação de absorção de água por capilaridade segundo a NBR 9778 (ABNT 2012).

4 RESULTADOS

4.1 Concreto no estado fresco

Foi observado que em função do módulo de finura, bem como da quantidade de material pulverulento, a adição de ADF no concreto afetou a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

Neste estudo buscou-se manter o *slump* teste na faixa de 100 ± 20 mm pois esta é a faixa que mais representa o volume de produção da concreteira. Para atender a esta limitação sem alterar a relação água/cimento, escolhendo-se por corrigir o abatimento do concreto variando o percentual dos aditivos da mistura. Em função do custo por litro, bem como da disponibilidade no mercado, optou-se por corrigir a quantidade de aditivo polifuncional. Quando a adição suplementar deste aditivo não atendeu o *slump* especificado, foi adicionado então aditivo superplastificante até que obtivesse o *slump* desejado, conforme concreto referência.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 15 é mostrada a perda de abatimento devido a adição de ADF. Esta perda de abatimento decorre pelo aumento da superfície específica do ADF frente a areia natural, que exige maior quantidade de água para molhar todos os grãos. Nesta figura também é mostrada a diferença de coloração entre o concreto referência, sem adição de ADF (A) a qual tem coloração mais clara e o concreto com 100% de ADF (B) que a coloração é mais escura, devido a coloração diferenciada da ADF. Essa diferença

de cores pode ser observada na matriz RGB onde o concreto de referência possui a coloração 180, 177, 168, com matiz 30, Saturação 18 e luminosidade 164 e o concreto com ADF possui a coloração 149, 11, 136 com matiz 28, Saturação 11 e luminosidade 136.

Com base na Tabela 7, é possível observar que embora haja uma perda de trabalhabilidade, é admissível corrigir esta perda com aditivos. Também foi observado que para teores de adição de superplastificante iguais ou superiores a 1,5% a pasta do concreto começa a apresentar uma grande trabalhabilidade sem ter sido observada segregação nos concretos com estes teores de adição.

Tabela 7 – Acréscimo de aditivo para melhor trabalhabilidade

			(continua)
A/C	% de ADF	Correção Aditivo	Slum test (mm)
0,7	0	Não houve correção, ou seja, foi mantido o teor de 0,8% em relação à massa de cimento de aditivo polifuncional.	120
	20	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento	120
	40	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,1% de superplastificante	125
	60	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	120
	80	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	110
	100	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,20% de superplastificante	125
0,6	0	Não houve correção, ou seja, foi mantido o teor de 0,8% em relação à massa de cimento de aditivo polifuncional.	120
	20	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento	120
	40	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,1% de superplastificante	125
	60	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	120
	80	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	110
	100	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,20% de superplastificante	125

(conclusão)

0,5	0	Não houve correção, ou seja, foi mantido o teor de 0,8% em relação à massa de cimento de aditivo polifuncional.	120
	20	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento	115
	40	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,1% de superplastificante	125
	60	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	120
	80	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	110
0,4	100	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,20% de superplastificante	120
	0	Não houve correção, ou seja, foi mantido o teor de 0,8% em relação à massa de cimento de aditivo polifuncional.	120
	20	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento	115
	40	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,1% de superplastificante	125
	60	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	120
	80	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,15% de superplastificante	110
	100	mudança de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento Adição de 0,20% de superplastificante	120

Fonte: Autoria Própria.

Para todas as relações água/cimento (A/C) apresentadas na Tabela 7 foi necessário aumentar a quantidade de aditivo para manter o abatimento do concreto dentro da faixa pré-estabelecida de 100 ± 20 mm. Para a relação A/C 0,40, na substituição de 20% de areia natural por areia descartada de fundição foi necessário aumentar a dosagem do aditivo polifuncional de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento devido à maior finura da ADF. Já quando as substituições de areia natural por areia descartada de fundição atingem 40% é necessário acrescentar aditivo superplastificante, sendo observada uma adição inicial de 0,1% sobre a massa de cimento deste aditivo. Para a substituição de 60%, além da dosagem de 1% do aditivo polifuncional, foi preciso subir a dosagem de aditivo superplastificante em 0,05%, chegando a 0,15% sobre a massa cimento. Para a substituição de 80% de areia natural por areia descartada de fundição não houve a necessidade do acréscimo de

aditivos ao concreto. Porém, a leitura de abatimento caiu de 120 mm para 110 mm. Por fim, para a substituição de 100% de areia natural por areia descartada de fundição, foi utilizada uma dosagem de 0,2% de superplastificante sobre a massa do cimento para se obter o abatimento pré-estabelecido.

Dados similares são observados para a relação A/C de 0,50 onde para a substituição de 20% foi necessária uma adição suplementar de 0,2% de aditivo polifuncional sobre o peso de cimento. Novamente, assim como na relação água/cimento apresentada anteriormente, na substituição de 40% de areia natural por areia descartada de fundição além do aditivo polifuncional, foi necessário acrescentar 0,1% sobre a massa de cimento de aditivo superplastificante. Para a substituição de 60% de areia natural por areia descartada de fundição, 0,05% sobre a massa de cimento em relação à mistura anterior. Em 80% de substituição de areia natural por areia descartada de fundição não houve a necessidade de acrescentar aditivo à mistura, entretanto, foi observada uma perda de abatimento de 100 mm no concreto. Finalmente, com 100% de substituição de areia natural por ADF, foi preciso adicionar 0,20% de aditivo superplastificante em função da massa de cimento.

Assim como nos A/C apresentados acima, novamente na relação água cimento de 0,6, foi necessário acrescentar aditivos polifuncionais e superplastificantes à mistura para manter o *slump* dentro da faixa pré-estabelecida de 100 ± 20 mm. Para o traço de referência o *slump* obtido foi de 120 mm e não houve a necessidade de se elevar o percentual de aditivo na mistura. Para a substituição de 20% de Areia natural por areia descartada de fundição foi necessário elevar a dosagem de aditivo polifuncional de 0,8% para 1% sobre a massa de cimento. O *slump* medido após esta correção foi de 120 mm. Já para a substituição de 40% de areia natural por ADF, além da dosagem de 1% de polifuncional foi preciso adicionar também 1% de aditivo superplastificante ao concreto para se obter o abatimento de 125 mm. Na substituição de 60% de areia natural por areia descartada de fundição foi necessário manter a quantidade mencionada anteriormente de 1% para o aditivo polifuncional e elevar novamente a quantidade de aditivo superplastificante para 1,5% para se atingir o abatimento de 120 mm. Na substituição de 80% de areia natural por areia descartada de fundição os valores percentuais das quantidades de aditivos foram mantidos. Contudo, o abatimento registrado caiu para 110 mm. Ao substituir 100% de areia

natural por areia descartada de fundição, o aditivo polifuncional foi mantido em 1% e o superplastificante foi elevado para 2%. O abatimento registrado foi de 125 mm.

Para a relação água/cimento de 0,70 no traço de referência foi utilizada a dosagem de 0,8% de aditivo polifuncional sobre a massa de cimento. O abatimento registrado foi de 120 mm. Para manter este mesmo abatimento substituído 20% de areia natural por areia descartada de fundição foi necessário elevar a dosagem para 1% de aditivo polifuncional sobre a massa de cimento. Ao substituir 40% de areia natural por areia descartada de fundição foi preciso acrescentar também 1% de aditivo superplastificante para se atingir o *slump* de 125 mm. Já na substituição de 60 e 80% de areia natural por ADF foi necessário elevar o teor de aditivo para 1,5% obtendo os abatimentos respectivos de 120 e 110 mm. Por fim, na substituição de 100% de areia natural por areia descartada de fundição foi preciso majorar a quantidade de aditivo superplastificante em 2% para se obter o abatimento de 125 mm.

Em todos os casos ensaiados, devido à substituição da areia natural por ADF ocorreu um aumento da superfície específica dos agregados, que demanda um maior consumo de água. Para evitar a alteração da relação A/C e manter o abatimento desejado se fez necessário alterar o consumo de aditivo polifuncional e acrescentar aditivo superplastificante.

Na

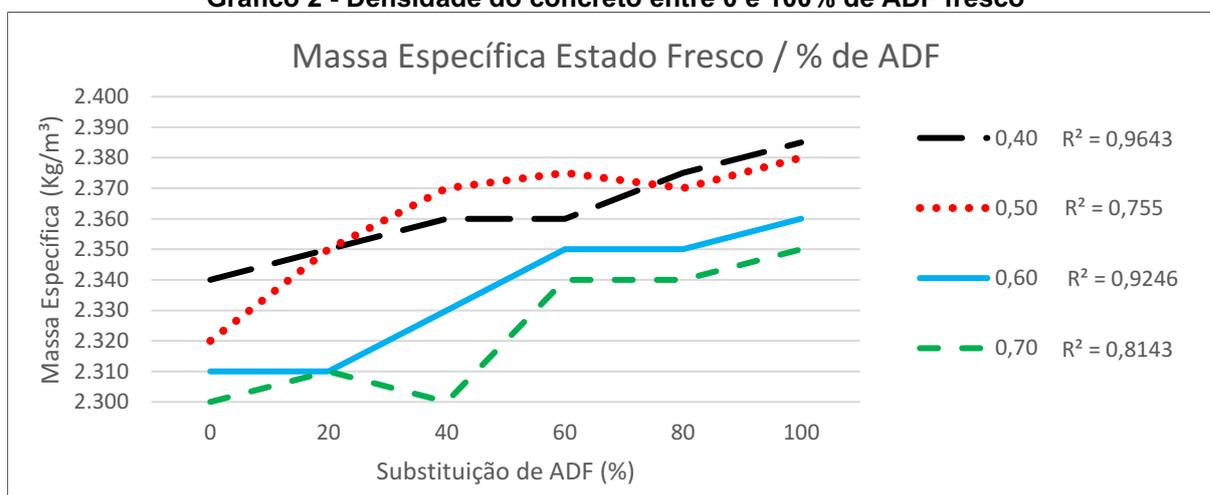
Tabela 8 e no Gráfico 2 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de determinação da massa específica pelo método gravimétrico conforme NBR 9833 (ABNT, 2006). Estes dados são referentes a média de 6 corpos por percentual de substituição.

A/C	% de ADF	Massa Específica
0,7	0	2.300
	20	2.310
	40	2.300
	60	2.340
	80	2.340
	100	2.350
0,6	0	2.310
	20	2.310
	40	2.330
	60	2.350
	80	2.350

	100	2.360
	0	2.320
0,5	20	2.350
	40	2.370
	60	2.375
	80	2.370
	100	2.380
0,4	0	2.340
	20	2.350
	40	2.360
	60	2.360
	80	2.375
	100	2.385

Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 2 - Densidade do concreto entre 0 e 100% de ADF fresco



Fonte: Autoria Própria.

No Gráfico 2, apresentado acima, fica evidenciado a elevação da densidade do concreto no estado fresco em função da substituição de areia natural por areia descartada de fundição, a qual tem massa unitária superior à areia normal. De acordo com Cechin (2019) a areia de fundição pode se apresentar contaminada com outros materiais, sendo que o alumínio e o ferro são os que aparecem em maior quantidade, podendo aparecer em quantidades que varia de 4% a 16%, alterando a massa unitária da ADF. Para as relações água/cimento de 0,40 e 0,60, os valores de R^2 obtidos por regressão linear indicam uma confiabilidade estatística elevada. Já para as relações A/C de 0,50 e 0,70, os dados obtidos por regressão linear estão inferiores a 0,90. Analisando o gráfico, pode-se supor uma anomalia nas relações água cimento 0,50 e 0,70 na substituição de 40% de areia natural por areia descartada de fundição, já que estas não acompanharam as curvas de crescimento das demais relações A/C.

4.2 Concreto no estado endurecido

Pode-se traçar um paralelo entre a massa específica obtida no estado fresco com os resultados observados no estado endurecido. Em ambos os casos, a massa específica do concreto aumenta em função da quantidade de areia descartada de fundição, conforme indicado na Tabela 9. Entretanto, neste experimento, os resultados obtidos no estado endurecido são mais lineares e apresentam um crescimento contínuo. Provavelmente essa estabilidade nos resultados está associada à precisão do equipamento utilizado, já que no estado endurecido o ensaio foi realizado conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Conforme a recomendação da norma, foi utilizada uma balança hidrostática com precisão de 0,1 gramas. É importante destacar que esta norma se refere à agregados, no entanto, o mesmo conceito pode ser aplicado a corpo de prova 10x20 cm. Inicialmente as amostras permaneceram por um período superior a 24 horas submersas em água, em seguida os corpos de prova foram secos com um pano afim de se atingir a condição saturada superfície seca (SSS).

Tabela 9 - Massa específica

A/C	% de ADF	Massa Específica
0,7	0	2.273
	20	2.259
	40	2.280
	60	2.289
	80	2.309
	100	2.319
	0,6	0
20		2.259
40		2.268
60		2.275
80		2.306
100		2.331
0,5		0
	20	2.296
	40	2.329
	60	2.341
	80	2.349
	100	2.389

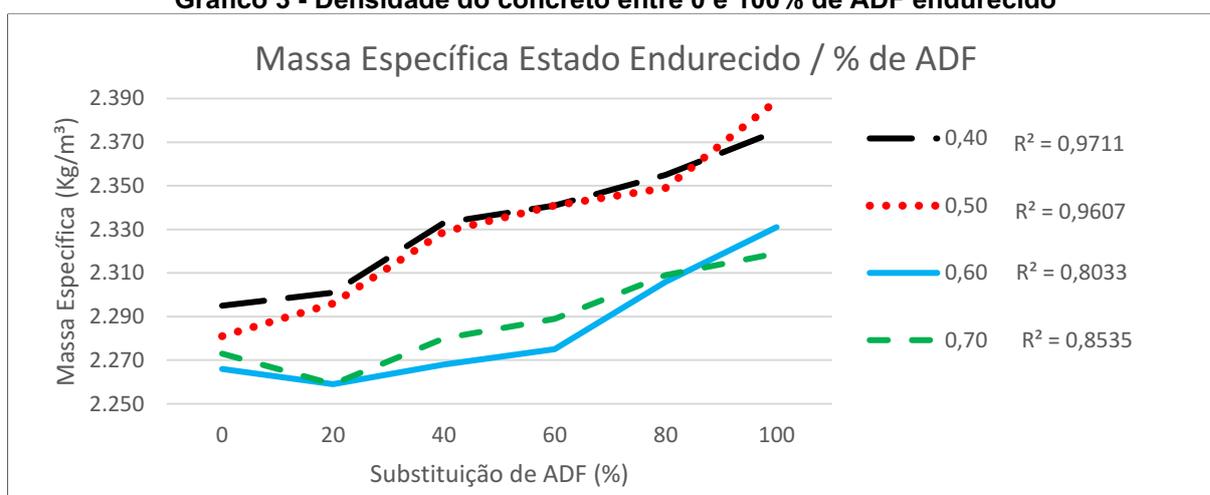
	0	2.295
	20	2.301
0,4	40	2.333
	60	2.341
	80	2.355
	100	2.375

Fonte: Autoria Própria

Segundo a NM 53 (ABNT, 2009), a condição saturada superfície seca é obtida quando a amostra não apresenta aspecto brilhoso e sua superfície. Posteriormente, foi realizada a leitura da massa dos corpos de prova e em seguida também se efetuou a medida da massa das amostras imersas em água.

Para o ensaio de massa específica no estado endurecido, quando realizado o cálculo de regressão linear, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9711 para a relação água/cimento de 0,40, 0,9607 para a relação A/C de 0,50, 0,8033 para o A/C de 0,60 e 0,8535 para o A/C de 0,70, como ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Densidade do concreto entre 0 e 100% de ADF endurecido



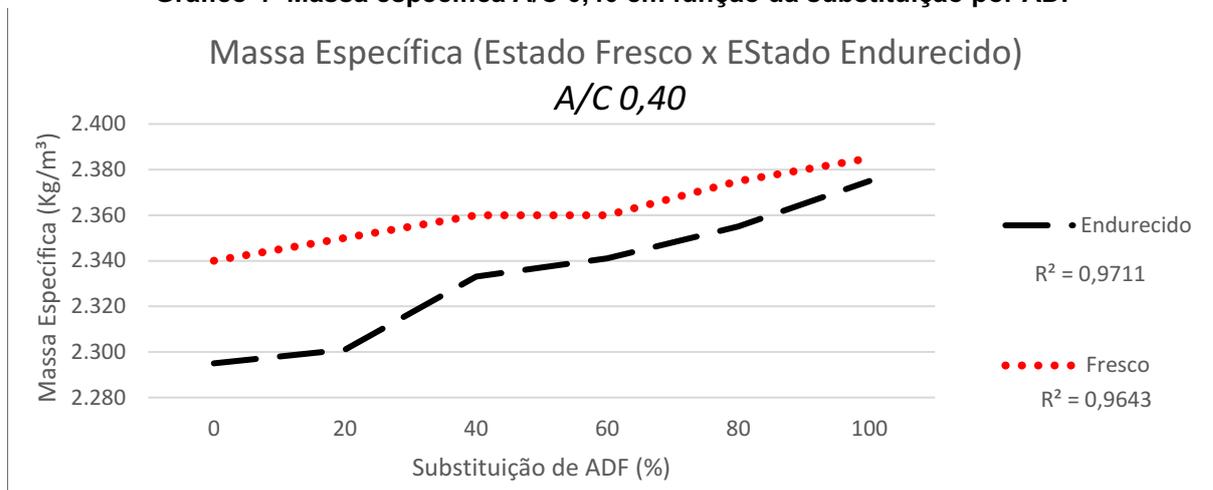
Fonte: Autoria Própria.

Embora o valor de R^2 seja ligeiramente inferior ao valor obtido no ensaio de massa específica no estado fresco, em uma análise gráfica constata-se que os valores logrados no ensaio para as duas relações água/cimento seguem praticamente paralelos. Tal fato, associado ao valor de R^2 superior a 0,9, evidenciam uma boa representação dos resultados que estão representados no Gráfico 3.

Quando comparados, os resultados de massa específica obtidos entre o concreto no estado fresco com o concreto no estado endurecido, constata-se que ambos têm aumento na massa específica em função da substituição percentual de areia natural por areia descartada de fundição.

Para a relação Água/Cimento 0,4 é possível observar, no Gráfico 4, que o aumento do teor de ADF faz que a massa específica no estado endurecido tenha valores mais próximos dos resultados obtidos no estado fresco.

Gráfico 4- Massa específica A/C 0,40 em função da substituição por ADF



Esse mesmo comportamento pode ser observado para todas as relações A/C estudadas, como ilustrado nos Gráficos 5, 6 e 7.

Gráfico 5 - Massa específica A/C 0,50 em função da substituição por ADF

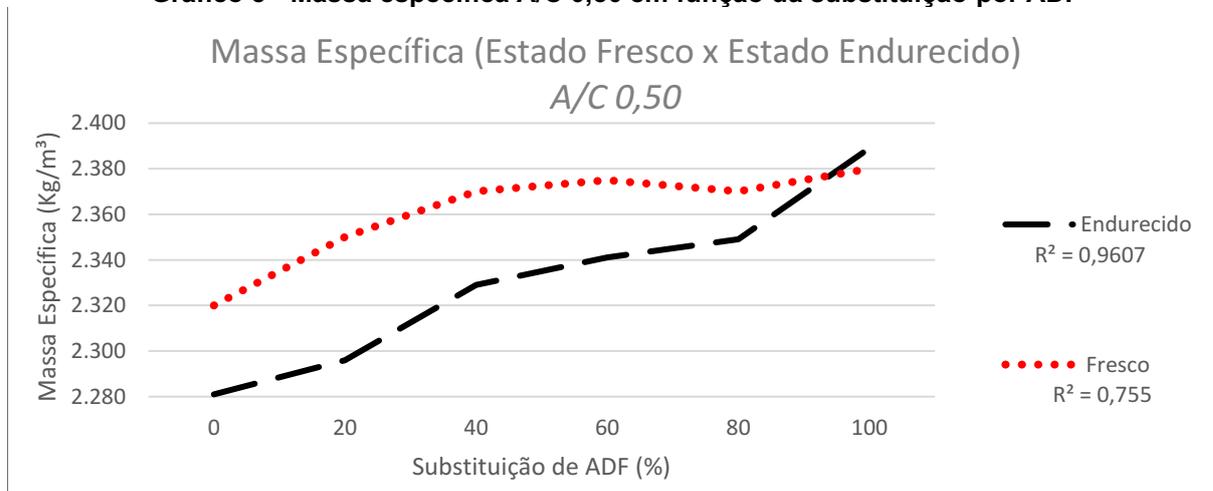
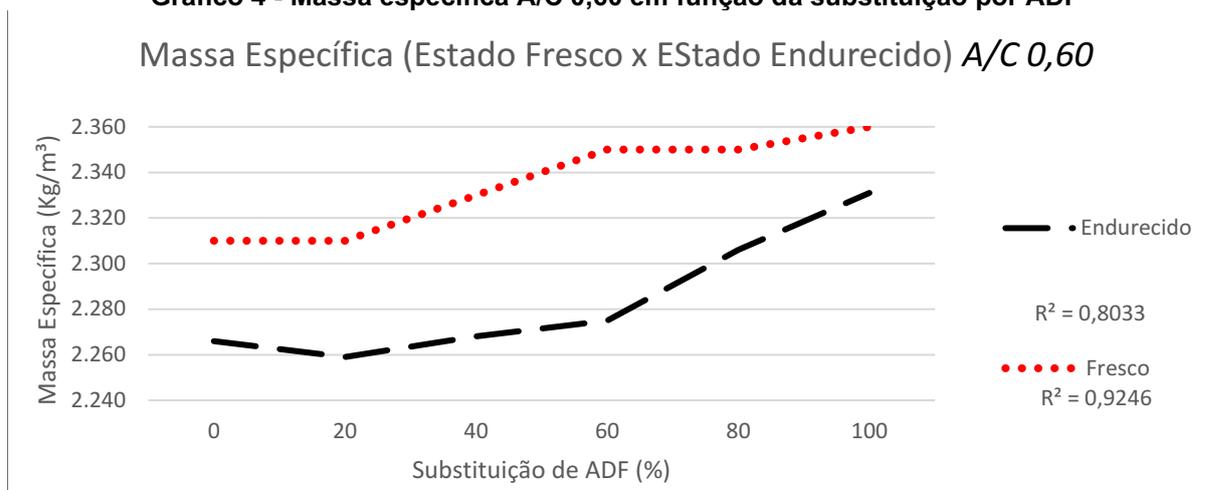
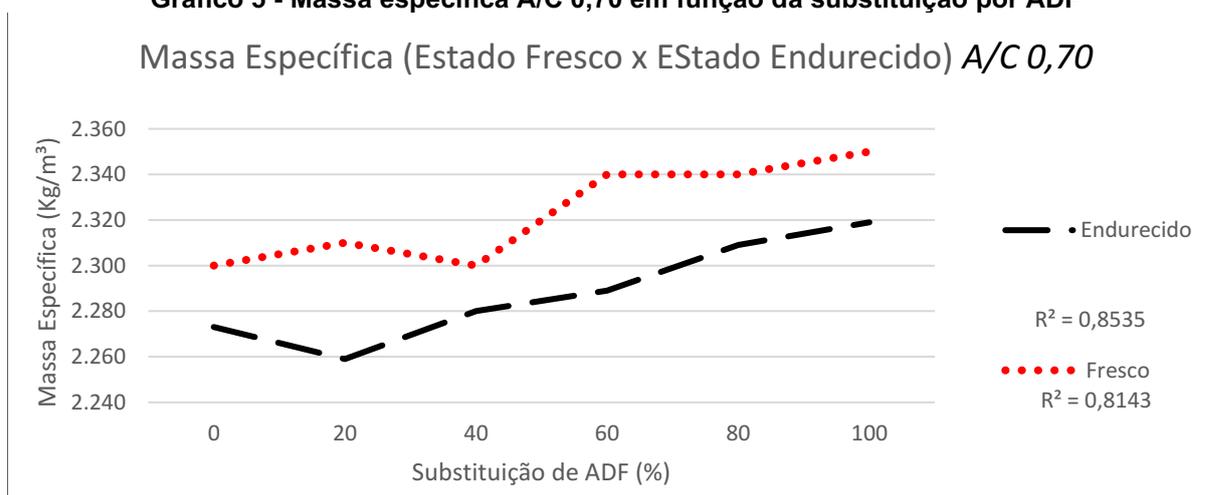
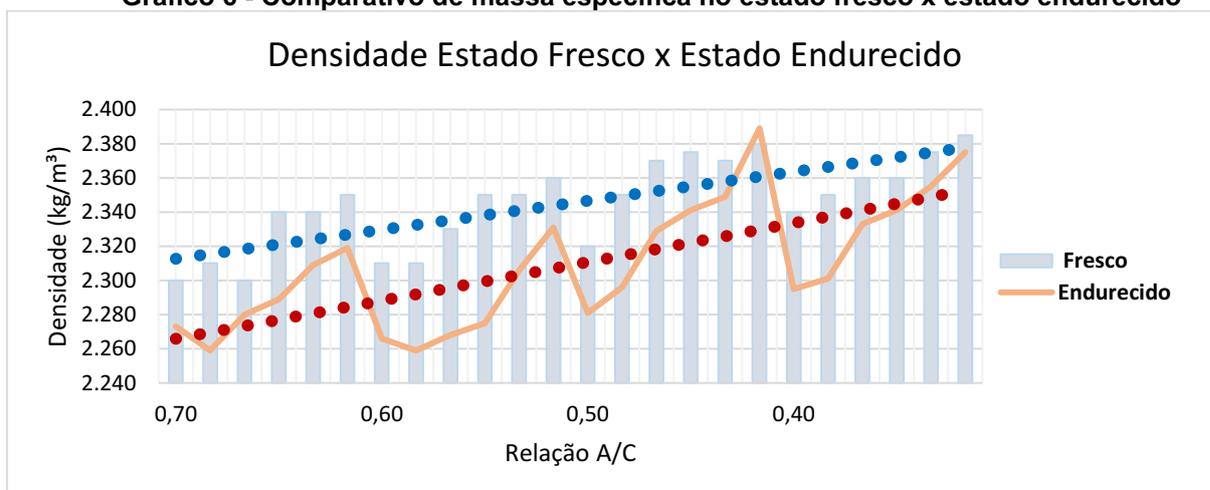


Gráfico 4 - Massa específica A/C 0,60 em função da substituição por ADF**Gráfico 5 - Massa específica A/C 0,70 em função da substituição por ADF**

Um resumo comparativo dos valores de massa específica no estado fresco e endurecido pode ser observado no Gráfico 8, onde fica evidente a tendência de crescimento dos valores com a diminuição da relação A/C, assim como a aproximação desses valores tanto com a diminuição da relação A/C quanto com o aumento do teor de ADF.

Gráfico 6 - Comparativo de massa específica no estado fresco x estado endurecido



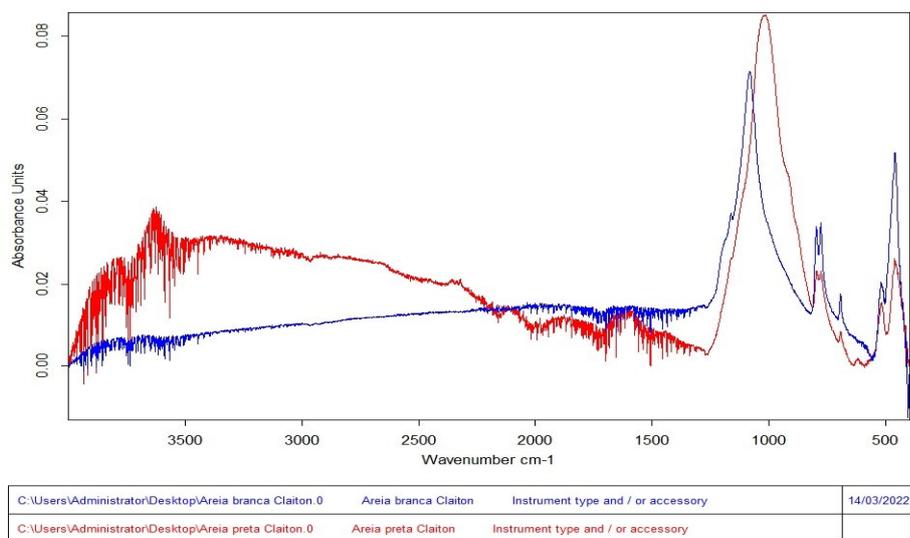
Fonte: Autoria Própria .

A diminuição da relação A/C conduz a uma diminuição da porosidade do concreto no estado endurecido devido à menor evaporação do excesso de água necessário para a moldagem dos corpos de prova, conseqüentemente ocorre um aumento da massa específica do concreto. Já o aumento da massa específica em função do aumento do teor de ADF pode ter ocorrido devido às impurezas existentes na ADF (CECHIN, 2019) que possuem massa específica superior à da areia de quartzo.

4.2.1 Espectrometria e difração por raios X

Para verificar a influência do processo de fundição sobre a areia utilizada no molde foram analisadas uma amostra da areia de base do molde, chamada de areia branca, e uma amostra da areia após todo o processo de fundição, quando a areia é descartada, denominada areia preta ou areia descartada de fundição (ADF). Na Figura 16 é apresentado o resultado da espectroscopia de infravermelho para as duas areias.

Figura 16 - Espectrometria por raios infravermelhos

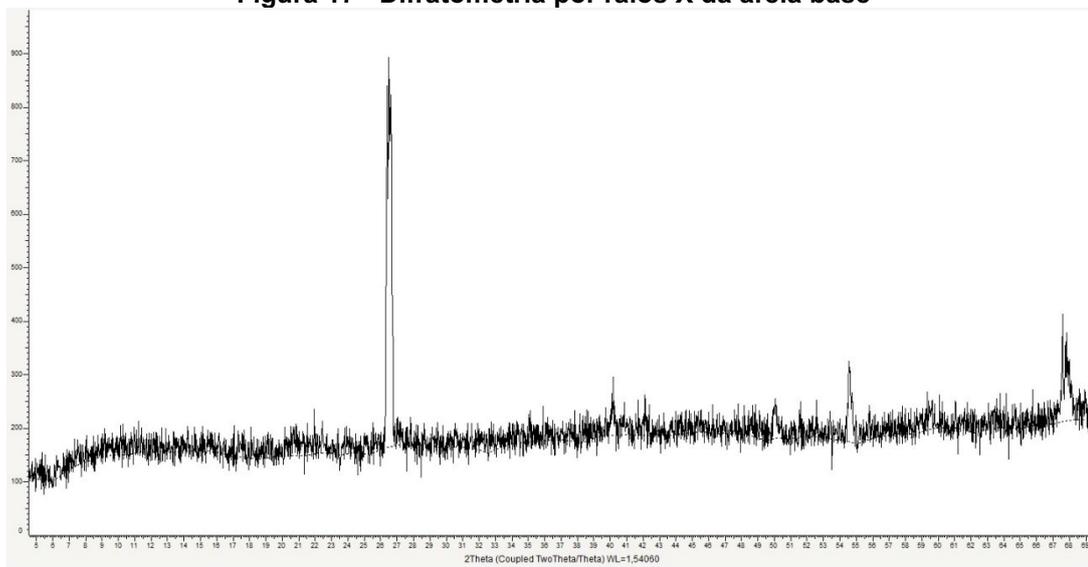


Page 1/1

Fonte: Autoria Própria .

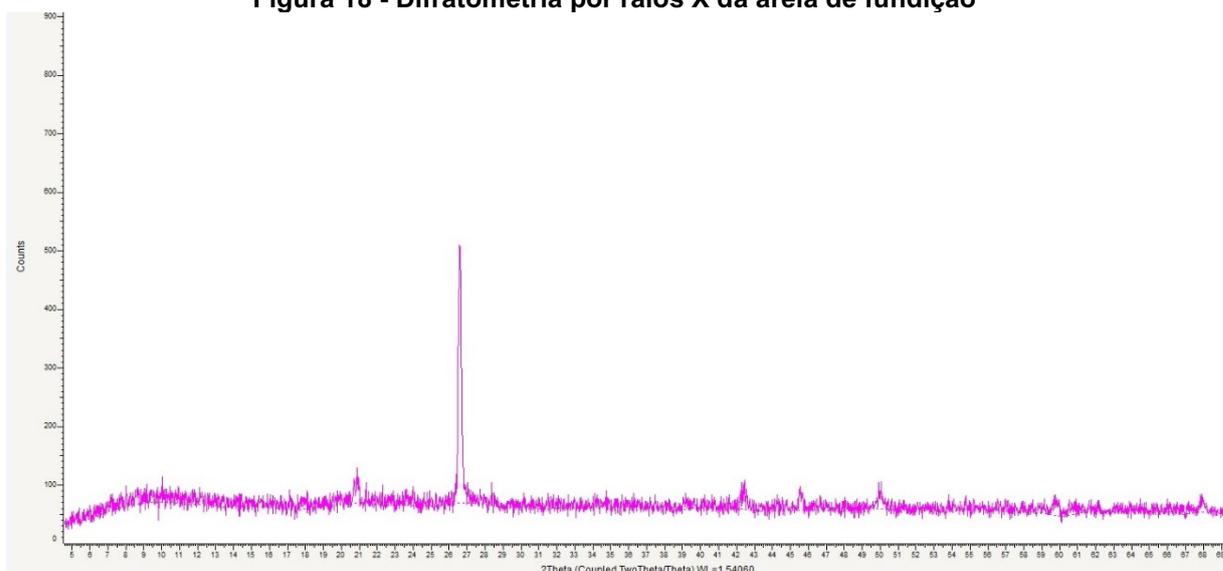
Na Figura 16 é possível observar que na areia base do molde (areia branca) existem somente picos de quartzo, com diferentes formações. Já na areia de descarte (ADF), além da presença dos picos de quartzo também se observa diferentes picos devido à contaminação sofrida no processo de fundição, em particular a presença de grafite. Resultados estes confirmados no ensaio de difratometria por raio X, indicado nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Difratometria por raios X da areia base



Fonte: Autoria Própria.

Figura 18 - Difratometria por raios X da areia de fundição



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos acompanham o que foi indicado por Siddique e Singh (2011), dizendo que a ADF tem em sua composição sílica de alta qualidade (85 a 95%), também argila de betonite (4 a 10%), aditivo carbonáceo (2 a 10%) e, por último, a água (2 a 5%), tendo como resultado uma areia de cor preta devido à sua quantidade de carbono. Podendo essas ADF carregarem vestígios de produtos químicos como MgO, K₂O e TiO₂. Está areia estudada mostrou-se com um alto teor de carbono (grafite) bem como Óxido de Silício (SiO₂), sabendo que a areia é oriunda de sílica em sua grande maioria e por ter passado por processos alterantes.

4.3 Resistência a compressão do concreto

Neste item, serão apresentados os resultados de resistência média dos corpos de prova bem como leitura do desvio padrão e verificação do coeficiente de variação de 6 corpos de prova para cada traço.

4.3.1 Resistência Média dos Corpos de Prova

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial podem ser observados nas Tabelas 10 a 13 e a visualização do comportamento dos resultados estão ilustrados nos Gráficos 9 a 12.

Tabela 10 - Resultados de resistência à compressão A/C 0,40

% de Substituição	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias	365 dias
Ref	41,9	52,9	58,2	60,0a	60,9a
20%	32,2b	40,0c	44,7dh	46,1eh	47,6f
40%	32,6b	41,0c	44,9di	45,5ei	48,5f
60%	34,0	42,7	47,0j	47,9ej	53,6g
80%	34,5	43,1	47,0k	48,3ek	53,4g
100%	31,9b	40,4c	44,9dm	46,4em	57,7

Obs.: letras iguais representam resultados estatisticamente iguais.

Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão A/C 0,50

% de Substituição	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref	33,9h	41,2j	45,5am	46,9abo	47,9bq
20%	34,3h	41,2j	44,9cm	46,2co	47,8cq
40%	27,7i	35,2	38,5dn	39,5dp	43,1r
60%	27,5i	33,4k	37,1en	38,2ep	41,9r
80%	27,7i	33,3k	36,6fn	37,8fp	42,7r
100%	26,1i	31,6k	35,0gn	35,7g	46,7q

Obs.: letras iguais representam resultados estatisticamente iguais.

Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 12 - Resultados de resistência à compressão A/C 0,60

% de Substituição	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref	27,4g	33,2j	37an	37,6aq	38,5as
20%	27,5g	32,6j	36bn	36,9bq	38,8s
40%	23,0h	27,8k	31,0co	32,3cr	35,0t
60%	22,0hi	26,6km	29,6dop	31,0dr	34,0t
80%	22,1hi	27,2k	29,4ep	30,3er	34,5t
100%	21,2i	25,4m	28,0fp	28,6f	33,6t

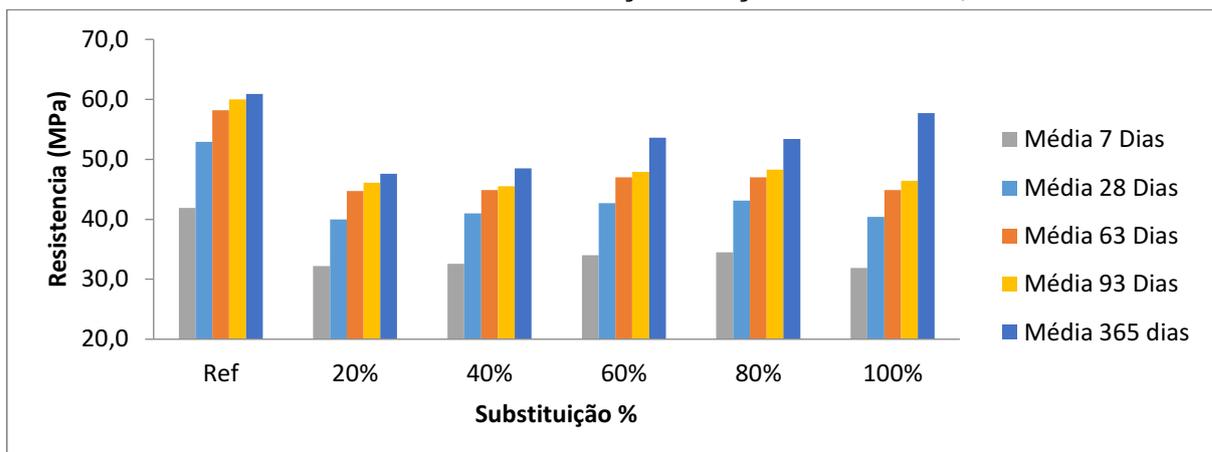
Fonte: Aatoria Própria.

Tabela 13 - Resultados de resistência à compressão A/C 0,70

% de Substituição	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref	20,7e	25,1g	27,5i	28,8ak	29,2am
20%	21,0e	24,4g	26,9bi	28,1bk	30,5m
40%	17,3f	20,8h	23,2cj	24,2cm	26,2n
60%	16,9f	20,0h	22,3j	23,9m	25,9n
80%	16,5f	20,8h	22,9dj	23,8dm	25,8n
100%	15,7f	19,0	21,3	22,5	23,8

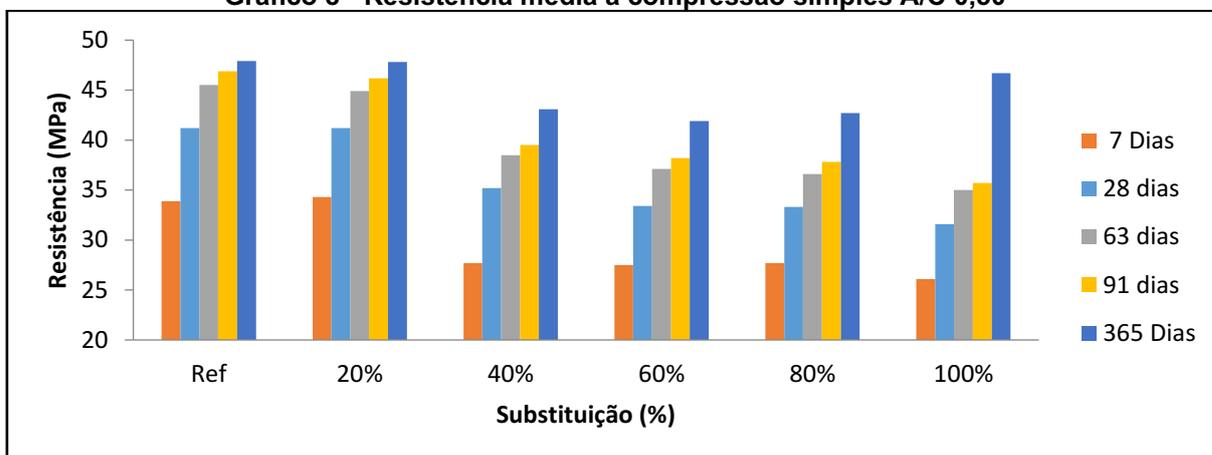
Fonte: Aatoria Própria.

Gráfico 7 - Resistência em relação a adição de ADF A/C 0,40



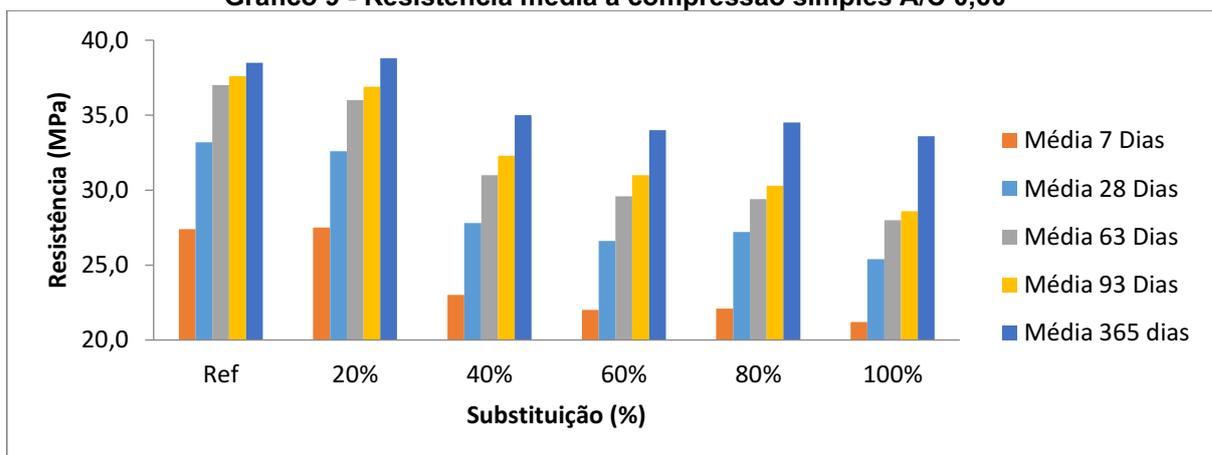
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 8 - Resistência média à compressão simples A/C 0,50



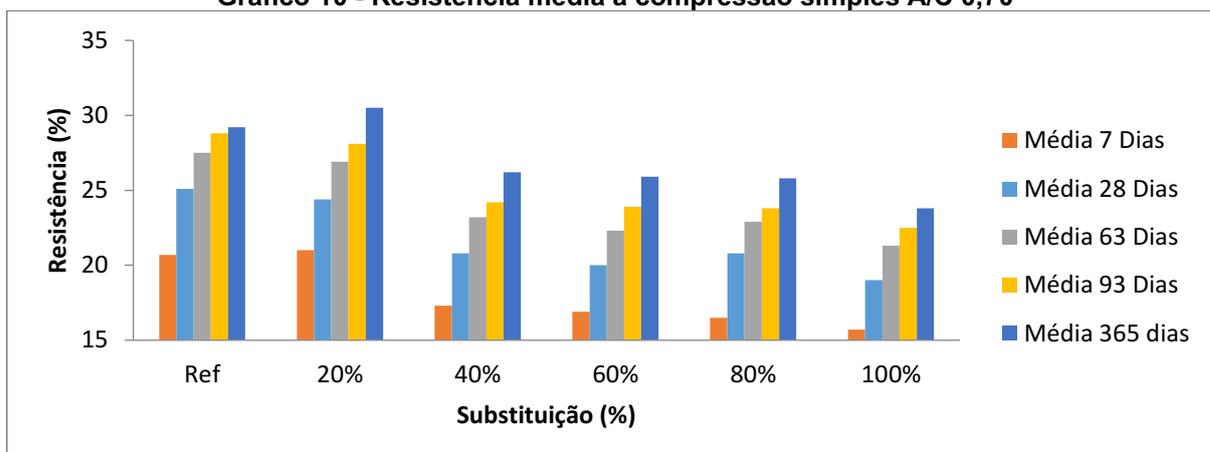
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 9 - Resistência média à compressão simples A/C 0,60



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 10 - Resistência média à compressão simples A/C 0,70



Fonte: Autoria Própria.

Com relação ao desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, foi observado que para todas as relações A/C estudadas ocorreu um aumento de resistência à compressão até a idade de 63 dias e entre as idades de 63 e 91 dias os resultados são estatisticamente iguais, a um nível de confiança de 95%. Para os corpos de prova de referência, entre as idades de 91 e 365 dias não existe diferença estatística entre as médias, porém, para todos os níveis de substituição de areia por ADF e para todas as relações A/C houve um aumento na resistência à compressão entre 91 e 365 dias de idade, com 95% de confiança. Esse aumento de resistência em idades avançadas indica que a areia de fundição possui algum composto que reagem quimicamente com os compostos do cimento hidratado. Esse aumento de resistência entre 91 e 365 dias também varia em função da relação a/c e do teor de substituição de areia por ADF, como indicado na Tabela 14.

Tabela 14 - Percentuais de ganho de resistência de 91 para 365 dias.

% de Substituição	a/c = 0,4	a/c = 0,5	a/c = 0,6	a/c = 0,7
Ref	1,5%	2,1%	2,4%	1,4%
20%	3,2%	3,5%	5,1%	8,5%
40%	6,6%	9,1%	8,3%	8,3%
60%	11,9%	9,7%	9,7%	8,4%
80%	10,5%	12,9%	13,8%	8,4%
100%	24,3%	30,8%	17,5%	5,7%

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 14 é possível observar que ocorre um aumento do percentual de ganho de resistência nessas idades até uma relação A/C=0,6. Para uma relação A/C =0,7 ocorreu um aumento percentual para um nível de substituição de 20%, ficando estabilizado em 40% e reduzindo esse percentual de ganho de resistência para os demais teores de substituição. Assim como para as relações A/C até 0,6 ocorre um

aumento do percentual de ganho com o aumento do teor de substituição, novamente isso indica a existência de alguma reação química com os compostos de cimento em idades avançadas.

Nos traços de referência de todas as relações A/C abordados nesta pesquisa, houve um crescimento médio de resistência à compressão na ordem de 14% entre as resistências de 28 e 365 dias. Já para as substituições de 100% de areia natural por areia descartada de fundição, este crescimento médio foi em torno de 30% para todas as relações A/C apresentadas. Esses dados estão em conformidade com os trabalhos dos de Singh e Siddique (2011), que evidenciam a presença de sílica na areia descartada de fundição.

Quando se avalia a influência do teor de substituição de areia natural por ADF, o comportamento da resistência à compressão não é similar para todos os traços. Para a relação A/C=0,4 já é observada uma perda de resistência da ordem de 23% para todas as idades com uma substituição de 20% de areia natural por ADF, no entanto, ao se analisar as maiores relações A/C é possível observar que para esse mesmo teor de substituição os valores de resistência à compressão são estatisticamente iguais, a um nível de confiança de 95%. Já para os demais teores de substituição é possível observar perda de resistência para todas as relações A/C.

4.3.2 Coeficiente de Variação e Desvio Padrão

Pela quantidade de corpos de prova deste experimento, se realizou a análise estatística para cada uma das idades abordadas nesta pesquisa. Na Tabela 155 é apresentado o desvio padrão dos resultados obtidos para a relação a/c 0,40.

Tabela 15 - Desvio padrão relação A/C 0,40

% de Substituição	Desvio Padrão (MPa)				
	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias	365 Dias
Ref.	0,842	0,717	0,828	1,014	1,522
20%	0,471	1,825	1,628	1,752	1,130
40%	0,455	0,802	0,940	1,280	1,222
60%	0,638	0,714	0,797	0,822	0,810
80%	0,354	0,572	0,981	1,420	0,582
100%	0,242	0,832	0,941	1,169	1,182

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 são apresentados os valores obtidos para o coeficiente de variação dos corpos de prova ensaiados para a relação Água/Cimento de 0,40. Para todos os resultados alcançados, os valores do coeficiente de variação estão menores que 5%, o que aponta para uma elevada confiabilidade dos valores obtidos.

Tabela 16 - Coeficiente de Variação A/C 0,40

% de Substituição	Coeficiente de Variação				
	7 Dias	28 Dias	63 Dias	91 Dias	365 dias
Ref.	2,01%	1,36%	1,42%	1,69%	2,50%
20%	1,46%	4,56%	3,64%	3,81%	2,37%
40%	1,40%	1,95%	2,09%	2,81%	2,52%
60%	1,87%	1,67%	1,70%	1,72%	1,51%
80%	1,03%	1,33%	2,09%	2,94%	1,09%
100%	0,76%	2,06%	2,10%	2,52%	2,05%

Fonte: Autoria Própria.

Valores similares de desvio padrão, bem como para o coeficiente de variação foram verificados na relação A/C 0,50. A Tabela 177 apresenta os resultados de desvio padrão alcançados. É provável que estes valores baixos estejam associados ao fato de que estas amostras foram moldadas em um ambiente fabril, com uma equipe treinada e com ambiente adequado para esta atividade. Nos resultados de desvio padrão, apenas um resultado ficou superior a 2,0 MPa, o que evidencia que medidas citadas anteriormente como por exemplo, cura submersa em água com hidróxido de cálcio, temperatura controlada e uso de retífica nos corpos de prova pode propiciar correlação forte entre os resultados obtidos.

Tabela 17 - Desvio padrão relação A/C 0,50

Traço	Desvio Padrão (MPa)				
	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 dias
Ref.	0,68	0,99	1,39	1,17	1,17
20%	0,90	1,17	2,05	2,30	2,42
40%	1,71	1,15	1,35	1,19	0,98
60%	0,83	0,60	1,49	1,72	0,56
80%	0,58	1,36	1,41	1,44	1,73
100%	0,27	0,85	1,11	1,27	2,62

Fonte: Autoria Própria.

Em concordância com os dados apresentados anteriormente, o coeficiente de variação da relação A/C 0,50 também apresentou resultados inferiores a 15%. Estes valores são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficiente de Variação A/C 0,50

Coeficiente de Variação					
Traço	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref.	1,99%	2,40%	3,04%	2,49%	2,42%
20%	2,62%	2,85%	4,57%	4,98%	4,51%
40%	6,16%	3,27%	3,51%	3,01%	2,30%
60%	3,01%	1,79%	4,01%	4,50%	3,74%
80%	2,11%	4,08%	3,87%	3,81%	4,04%
100%	1,05%	2,68%	3,16%	3,57%	2,62%

Fonte: Autoria Própria.

Assim como mostrado nas relações água/cimento anteriores, para o A/C 0,60 os dados de desvio padrão obtidos estão abaixo de 2,0 MPa. Apenas os dados de 365 dias da substituição de 20% apresentaram resultado discrepante, mas ainda assim é um dado confiável considerando o estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2022), conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Desvio padrão relação A/C 0,60

Desvio Padrão (MPa)					
Traço	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref.	0,866	1,048	1,479	0,963	0,731
20%	0,815	0,520	1,610	1,422	2,078
40%	0,853	0,835	0,799	0,944	0,804
60%	0,591	0,602	1,011	1,331	1,474
80%	0,383	1,662	1,123	1,275	1,152
100%	0,671	0,758	0,861	0,954	0,933

Fonte: Autoria Própria.

Tendo como norte o desvio padrão para a relação A/C de 0,60 foi calculado o coeficiente de variação das amostras apresentado na Tabela 20. Tal qual ocorreu com os dados de desvio padrão, apenas os dados referentes às amostras de substituição de 20% de areia natural por areia descartada de fundição na idade de 365 apresentou resultado ligeiramente superior a 5%.

Tabela 20 - Coeficiente de Variação relação A/C 0,60

Traço	Coeficiente de Variação (MPa)				
	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref.	3,16%	3,16%	4,00%	2,56%	1,90%
20%	2,96%	1,60%	4,47%	3,85%	5,36%
40%	3,71%	3,00%	2,58%	2,92%	2,30%
60%	2,69%	2,26%	3,41%	4,29%	4,34%
80%	1,73%	6,11%	3,82%	4,21%	3,34%
100%	3,16%	2,98%	3,08%	3,34%	2,78%

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a relação 0,70 também manteve os resultados estáveis encontrados para as outras relações água/cimento. No cálculo de desvio padrão apresentado na Tabela 211 não foram encontrados com desvio padrão maior que 2,0 MPa.

Tabela 21 - Desvio padrão relação A/C 0,70

Traço	Desvio Padrão				
	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref.	1,037	0,543	0,744	0,423	0,432
20%	0,965	0,388	0,879	0,493	1,349
40%	0,640	0,626	0,599	0,708	0,603
60%	0,438	0,455	0,723	0,806	0,794
80%	0,532	1,140	0,662	0,418	0,725
100%	0,186	0,279	0,782	1,021	1,025

Fonte: Autoria Própria.

Os dados referentes ao coeficiente de variação da relação água/cimento 0,70 também apresentaram dados confiáveis. Para esta relação A/C, apenas no traço de referência foi observado um valor superior a 5% conforme apresentado na Tabela 222.

Tabela 22 - Coeficiente de Variação relação A/C 0,70

Traço	Coeficiente de Variação (MPa)				
	7 Dias	28 dias	63 dias	91 dias	365 Dias
Ref.	5,01%	2,16%	2,71%	1,47%	1,48%
20%	4,59%	1,59%	3,27%	1,75%	4,42%
40%	3,70%	3,01%	2,58%	2,93%	2,30%
60%	2,59%	2,27%	3,24%	3,37%	3,07%
80%	3,22%	4,48%	2,89%	1,76%	2,81%
100%	1,19%	1,47%	3,67%	4,54%	4,30%

Fonte: Autoria Própria.

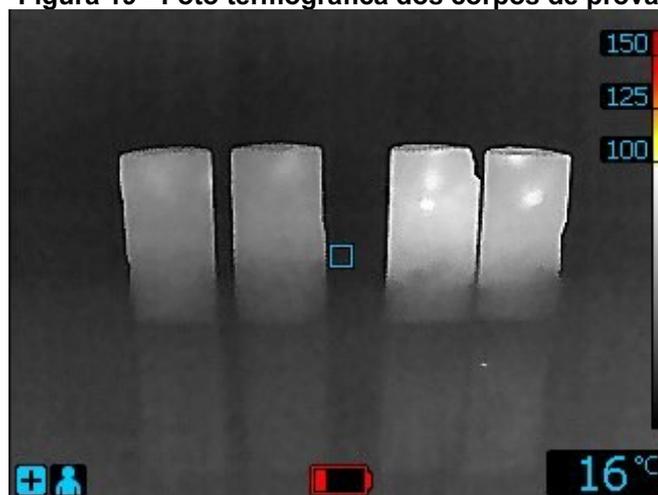
4.3.3 Resultados de Ensaio de Absorção por Capilaridade

Posteriormente à verificação da resistência à compressão, foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade conforme NBR 9779 (ABNT, 2012).

Segundo a norma, os corpos de prova ensaiados, devem permanecer em estufa até que seja comprovada a constância de massa. Essa comprovação é obtida através de pesagens realizadas em intervalos de 2 horas em que a variação dos resultados não ultrapasse 0,5% da leitura de massa anterior. Uma vez comprovada a constância de massa, os corpos de prova são depositados em um recipiente com uma lâmina de água de 5 ± 1 mm de espessura. Na sequência, os corpos de prova são pesados nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Posteriormente, é feita a ruptura das amostras à tração por compressão diametral e se registra a altura percolada da água no corpo de prova.

A seguir, a Figura 19, é uma foto termográfica comparativa entre dois corpos de prova. Esta foto é apenas para ilustração, pois a foto termográfica tem a captação por diferença de temperatura, podendo ser assim mais fácil a detecção de absorção no corpo de prova. À esquerda está uma amostra do traço de referência sem a substituição de ADF e com relação A/C de 0,70. O corpo de prova da direita tem relação água/cimento de 0,40 e substituição de 100 areia natural por areia descartada de fundição. É possível perceber que a absorção é maior na amostra da esquerda.

Figura 19 - Foto termográfica dos corpos de prova



Fonte: Autoria Própria.

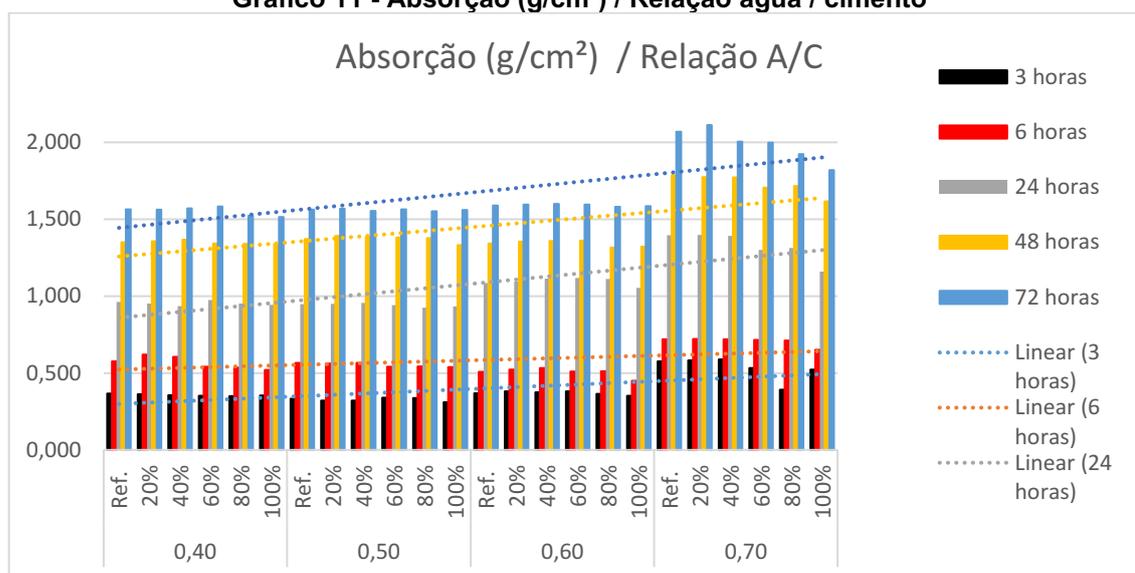
Na Tabela 23 são apresentados os resultados da média de 3 corpos de prova para o ensaio de absorção conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012).

Tabela 23 - Absorção (g/m²)

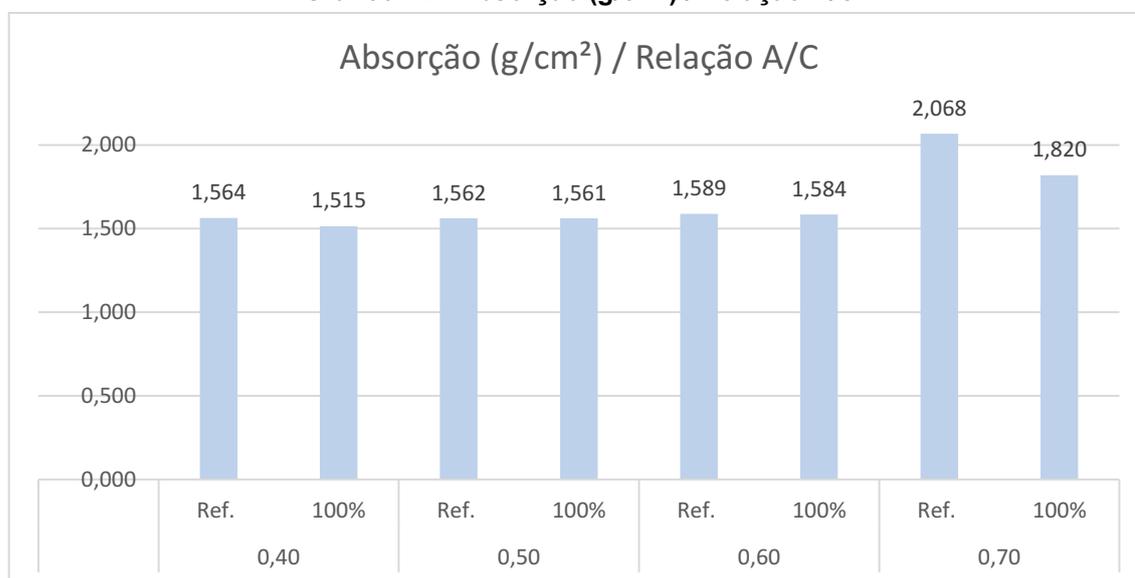
ABSORÇÃO (g/cm ²)						
A/C	Substituição (%)	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
0,40	Ref.	0,366	0,576	0,962	1,351	1,564
	20%	0,361	0,620	0,951	1,356	1,562
	40%	0,355	0,605	0,936	1,368	1,571
	60%	0,351	0,540	0,974	1,342	1,582
	80%	0,350	0,535	0,952	1,340	1,523
	100%	0,354	0,520	0,943	1,339	1,515
0,50	Ref.	0,332	0,565	0,947	1,370	1,562
	20%	0,321	0,561	0,951	1,391	1,569
	40%	0,322	0,566	0,956	1,385	1,554
	60%	0,339	0,541	0,941	1,382	1,565
	80%	0,337	0,543	0,925	1,377	1,552
	100%	0,310	0,539	0,932	1,332	1,561
0,60	Ref.	0,369	0,507	1,085	1,343	1,589
	20%	0,381	0,521	1,095	1,355	1,595
	40%	0,374	0,533	1,113	1,358	1,599
	60%	0,381	0,510	1,119	1,362	1,596
	80%	0,365	0,511	1,112	1,315	1,580
	100%	0,352	0,450	1,054	1,322	1,584
0,70	Ref.	0,577	0,719	1,395	1,786	2,068
	20%	0,581	0,722	1,398	1,774	2,113
	40%	0,588	0,718	1,391	1,771	2,004
	60%	0,532	0,716	1,300	1,705	1,998
	80%	0,390	0,710	1,314	1,715	1,923
	100%	0,522	0,651	1,159	1,615	1,820

Fonte: Autoria Própria.

Conforme apontado por Tutikian (2018), fica evidenciado na Tabela 23 que há uma redução na permeabilidade em função da redução da relação água/cimento. Para a melhor percepção desta propriedade foi elaborado o Gráfico 11, onde é possível perceber que as amostras com menores relação A/C apresentaram menores leituras de permeabilidade no ensaio de absorção por capilaridade.

Gráfico 11 - Absorção (g/cm²) / Relação água / cimento

Também foi observado que quanto maior o percentual de ADF no concreto, menor a absorção por capilaridade. O Gráfico 12 compara a absorção nos traços sem a substituição de areia natural por areia descartada de fundição com traços onde toda a areia natural foi substituída por ADF.

Gráfico 12 - Absorção (g/cm²) / Relação A/C

A Tabela 24 apresenta uma comparação percentual entre a absorção do traço de referência e para os demais traços

Tabela 24 - Redução da absorção por capilaridade em função da substituição de ADF

A/C	Substituição (%)	72 horas	Redução (%)
0,40	Ref.	1,564	0,00%
	20%	1,562	0,10%
	40%	1,571	-0,40%
	60%	1,582	-1,20%
	80%	1,523	2,60%
	100%	1,515	3,10%
0,50	Ref.	1,562	0,00%
	20%	1,569	-0,40%
	40%	1,554	0,50%
	60%	1,565	-0,20%
	80%	1,552	0,60%
	100%	1,561	0,10%
0,60	Ref.	1,589	0,00%
	20%	1,595	-0,40%
	40%	1,599	-0,60%
	60%	1,596	-0,40%
	80%	1,580	0,60%
	100%	1,584	0,30%
0,70	Ref.	2,068	0,00%
	20%	2,113	-2,20%
	40%	2,004	3,10%
	60%	1,998	3,40%
	80%	1,923	7,00%
	100%	1,820	12,00%

Fonte: Autoria Própria.

Para a relação A/C 0,40 foi observado que para os teores de substituição de 20% e de 40% não existe diferença estatística, a um nível de confiança de 05%. Já para os demais teores de substituição existe diferença estatística, sendo que para 100% de substituição ocorre uma redução de 3,1% na absorção por capilaridade. Esse mesmo efeito foi observado para a relação A/C 0,70, sendo os valores de absorção estatisticamente iguais para os teores de 20% e 40% de substituição e ocorrendo uma redução de até 12,0% para o teor de substituição de 100%. Este fato poderia ser explicado pelo alto teor de material pulverulento existente na ADF que teria colmatado os poros e diminuído a absorção, porém para as relações A/C 0,5 e

0,6 esse fenômeno não foi observado, sendo todas as absorções estatisticamente iguais às amostras de referência, com um nível de confiança de 95%.

Os dados da Tabela 24 e do gráfico 14 apontam para uma similaridade de resultados entre as relações A/C 0,50 e 0,60. Entretanto, as relações A/C 0,40 e 0,70 apresenta dados que apontam para uma redução da permeabilidade em função da substituição de areia natural por areia descartada de fundição.

4.4 Estimativa de redução de custos

Com base nos resultados de resistência à compressão do concreto, foi possível elaborar uma estimativa da redução de custo utilizando a areia descartada de fundição em uma empresa na região de Curitiba.

Os custos de cada insumo utilizado na produção de concreto são apresentados na Tabela 25 abaixo:

Insumo	Custo / Ton
Cimento	R\$ 550,00
Areia Natural	R\$ 59,00
Brita 0	R\$ 55,00
Poli Funcional	R\$ 2.700,00
Superplastificante	R\$ 7.000,00

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que o custo por tonelada é muito maior para os aditivos do que para outros insumos. Por esta razão, o custo destes insumos poderá impactar substancialmente quando for realizada a sua adição suplementar no concreto que contém a substituição por ADF. Na Tabela 26 é apresentada uma estimativa de redução de custo devido à substituição de areia natural por ADF.

A/C	% de ADF	Redução de Custo (R\$)	Redução de Custo Mensal (R\$)	Redução de Custo Anual (R\$)
	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
	20	R\$ 5,92	R\$ 1.065,96	R\$ 12.791,52
0,4	40	R\$ 10,93	R\$ 1.966,86	R\$ 23.602,32
	60	R\$ 17,62	R\$ 3.171,96	R\$ 38.063,52
	80	R\$ 25,88	R\$ 4.658,76	R\$ 55.905,12
	100	R\$ 32,57	R\$ 5.862,60	R\$ 70.351,20

	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
	20	R\$ 7,37	R\$ 5.308,99	R\$ 63.707,90
0,5	40	R\$ 14,10	R\$ 10.150,99	R\$ 121.811,90
	60	R\$ 22,06	R\$ 15.882,91	R\$ 190.594,94
	80	R\$ 31,38	R\$ 22.594,75	R\$ 271.137,02
	100	R\$ 39,35	R\$ 28.331,71	R\$ 339.980,54
	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
	20	R\$ 6,07	R\$ 8.373,84	R\$ 100.486,08
0,6	40	R\$ 15,98	R\$ 22.052,40	R\$ 264.628,80
	60	R\$ 24,81	R\$ 34.233,66	R\$ 410.803,92
	80	R\$ 34,72	R\$ 47.912,22	R\$ 574.946,64
	100	R\$ 43,55	R\$ 60.093,48	R\$ 721.121,76
	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
	20	R\$ 8,95	R\$ 33.285,07	R\$ 399.420,86
0,7	40	R\$ 17,47	R\$ 64.986,91	R\$ 779.842,94
	60	R\$ 27,85	R\$ 103.615,39	R\$ 1.243.384,70
	80	R\$ 37,31	R\$ 138.780,55	R\$ 1.665.366,62
	100	R\$ 46,76	R\$ 173.945,71	R\$ 2.087.348,54

Fonte: Autoria Própria.

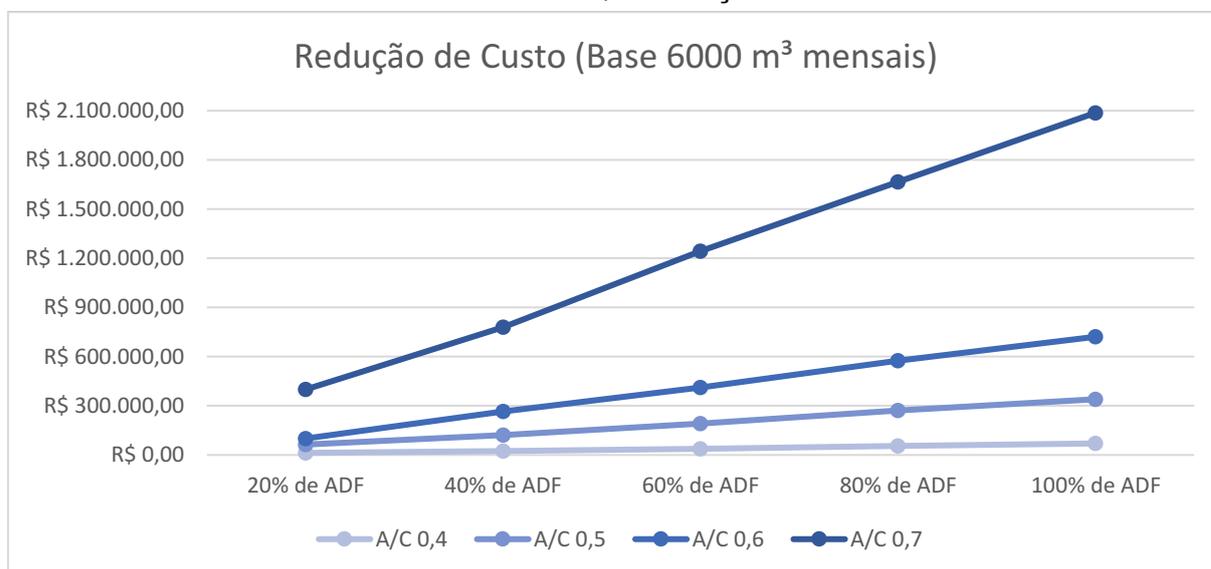
A Tabela 26 traz um demonstrativo de economia anual que a ADF pode trazer para uma concreteira de médio porte, para região de Curitiba, em que a base dos últimos sete anos vem se mostrando ser dentro de uma produção aproximada de 6000 m³ de concreto ao mês, dentro da produção desta empresa. Como o aumento da porcentagem de adição da areia de fundição também é gradativo o aumento da economia final independente da relação A/C utilizada, mesmo contando com uma amplificação do uso de aditivo.

Pode-se relatar o percentual dos concretos feitos em 3% da produção tendo relação A/C 0,4, o que causaria R\$ 70.351,20 de economia anual, a relação A/C 0,5 ocupa 12% de sua produção, gerando assim R\$ 339.980,54 de economia anual. Outros 23% são referentes a relação água/cimento de 0,6, esse podendo chegar a economizar R\$ 721.121,76 em um ano e, por fim, os outros 62% são fabricados concretos com uma relação A/C de 0,7 tendo extraordinários R\$ 2.087.348,54 economizados somente em um ano. Em todos os casos foi considerada a substituição de 100% da areia natural por ADF.

Com base na Tabela 26 foi formulado o Gráfico 13 a fim de uma demonstração visualmente melhor das diferenças entre a substituição das diversas porcentagens de

areia de fundição e seus valores de redução de custo, com base em uma empresa que nos últimos anos vem mantendo uma média de 6000 m³ de concreto fabricado mensalmente.

Gráfico 13 - Valores em R\$ da redução de custo anual



Fonte: Autoria Própria.

Considerando a produção de 6000m³ por ano e os percentuais de produção de acordo com a relação A/C, é apresentado na Tabela 27 a economia possível de se obter em função do teor de substituição de areia natural por ADF.

Tabela 27 - Valores da redução de custo anual em Reais

% de ADF	Redução de Custo Anual (R\$)
0	R\$ 0,00
20	R\$ 576.406,37
40	R\$ 1.189.885,97
60	R\$ 1.882.847,09
80	R\$ 2.567.355,41
100	R\$ 3.218.802,05

Fonte: Autoria Própria.

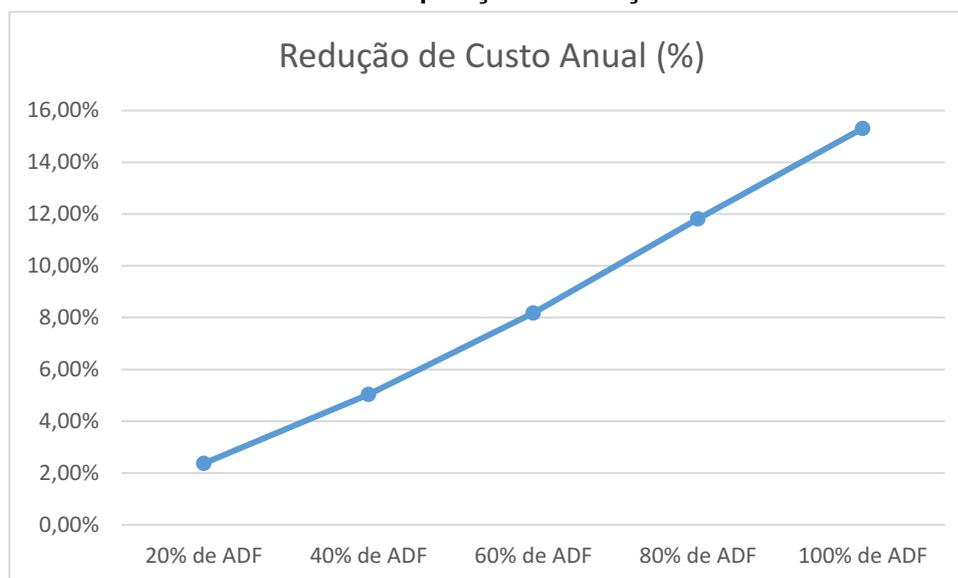
Uma opção para interesses de outrem está colocada na Tabela 28 a seguir, com a relação das porcentagens e outros dados importantes financeiramente, os quais podem ser empregados para comparativo com outras empresas do ramo de concretagem.

Tabela 28 - Comparativo das porcentagens de economia anual

A/C	% de ADF	Custos Fixos	ADF (kg/m ³)	Areia Natural (kg/m ³)	Aditivos (kg/m ³)	Custo do Traço R\$	Redução de Custo R\$	Redução de Custo %
0,4	0	R\$ 312,04	R\$ 0,00	R\$ 41,54	R\$ 10,04	R\$ 363,62	R\$ 0,00	0%
	20	R\$ 311,98	R\$ 0,00	R\$ 33,16	R\$ 12,56	R\$ 357,69	R\$ 5,92	2%
	40	R\$ 311,98	R\$ 0,00	R\$ 24,90	R\$ 15,81	R\$ 352,69	R\$ 10,93	3%
	60	R\$ 311,98	R\$ 0,00	R\$ 16,58	R\$ 17,43	R\$ 345,99	R\$ 17,62	5%
	80	R\$ 311,98	R\$ 0,00	R\$ 8,32	R\$ 17,43	R\$ 337,73	R\$ 25,88	8%
	100	R\$ 311,98	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 19,07	R\$ 331,05	R\$ 32,57	10%
0,5	0	R\$ 260,39	R\$ 0,00	R\$ 46,49	R\$ 8,01	R\$ 314,90	R\$ 0,00	0%
	20	R\$ 260,34	R\$ 0,00	R\$ 37,17	R\$ 10,02	R\$ 307,52	R\$ 7,37	2%
	40	R\$ 260,34	R\$ 0,00	R\$ 27,85	R\$ 12,61	R\$ 300,80	R\$ 14,10	5%
	60	R\$ 260,34	R\$ 0,00	R\$ 18,59	R\$ 13,92	R\$ 292,84	R\$ 22,06	8%
	80	R\$ 260,34	R\$ 0,00	R\$ 9,26	R\$ 13,92	R\$ 283,51	R\$ 31,38	11%
	100	R\$ 260,34	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 15,21	R\$ 275,55	R\$ 39,35	14%
0,6	0	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 49,56	R\$ 6,70	R\$ 282,93	R\$ 0,00	0%
	20	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 39,65	R\$ 10,54	R\$ 276,86	R\$ 6,07	2%
	40	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 29,74	R\$ 10,54	R\$ 266,95	R\$ 15,98	6%
	60	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 19,82	R\$ 11,63	R\$ 258,12	R\$ 24,81	10%
	80	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 9,91	R\$ 11,63	R\$ 248,21	R\$ 34,72	14%
	100	R\$ 226,68	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 12,71	R\$ 239,39	R\$ 43,55	18%
0,7	0	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 51,92	R\$ 5,75	R\$ 260,20	R\$ 0,00	0%
	20	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 41,54	R\$ 7,18	R\$ 251,25	R\$ 8,95	4%
	40	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 31,15	R\$ 9,04	R\$ 242,73	R\$ 17,47	7%
	60	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 20,77	R\$ 9,04	R\$ 232,34	R\$ 27,85	12%
	80	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 10,38	R\$ 9,98	R\$ 222,89	R\$ 37,31	17%
	100	R\$ 202,53	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 10,91	R\$ 213,44	R\$ 46,76	22%

Fonte: Autoria Própria.

Um resumo com a redução percentual do custo devido à substituição da areia natural por ADF pode ser visualizado no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Modelo de comparação da redução dos custos anuais

Fonte: Autoria Própria.

Como indicado na Tabela 28, a utilização de ADF em substituição à areia natural pode reduzir o custo do m³ do concreto de 2% a 22%, dependendo do teor de substituição. Quando se considera os resultados de resistência à compressão, no qual a utilização de 20% de ADF não apresenta diferença estatística nos resultados de resistência, verifica-se a viabilidade de se utilizar esse teor de substituição.

5 CONCLUSÃO

I - Os resultados deste trabalho evidenciam que é possível substituir areia natural por areia descartada de fundição em proporções de até 100% em uma indústria de concreto usinado, sem que haja impacto na densidade no estado fresco, densidade no estado endurecido e abatimento do concreto.

No que tange a resistência à compressão axial, é possível fazer a substituição de areia natural por ADF em até 20% para as relações A/C maiores que 0,4 sem perda de resistência.

II – A substituição de areia natural por ADF afeta as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo necessária a utilização de maior quantidade de aditivo para manter a mesma plasticidade.

Também ocorre um aumento na massa específica, tanto no estado fresco quanto no endurecido, com o aumento do teor de substituição da areia por ADF.

A absorção por capilaridade diminui com o aumento do teor de ADF.

Quanto à resistência à compressão, o efeito varia com a relação A/C e com a idade. Para a relação A/C 0,4 a substituição de areia natural por ADF reduz a resistência à compressão para todos os teores de substituição, já para as demais relações A/C é possível substituir até 20% de areia natural por ADF sem perda de resistência.

Quanto à idade, foi verificado um aumento de resistência, para todas as relações A/C e todos os teores de substituição, nos valores de 91 para 365 dias.

III – Foi verificado que a ADF possui resíduos de grafite em sua composição, conforme ensaio de DRX, que pode estar reagindo com compostos do cimento em idades avançadas, gerando um ganho de resistência à compressão entre as idades de 91 e 365 dias.

IV – Economicamente a substituição de areia natural por ADF se mostra viável, pois a redução no custo da areia é superior ao gasto em aditivos, tendo sido encontradas reduções de custo de até 22% em relação ao traço de referência.

V – A utilização da ADF em substituição da areia natural exerce influência tanto nas propriedades do concreto no estado fresco quanto endurecido, influenciando inclusive o custo de produção do concreto, apresentando viabilidade técnica e

econômica de sua utilização para concretos com relação A/C maior que 0,4 e com teores de substituição de até 20%.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Após as conclusões obtidas com a realização da presente dissertação, sugerimos alguns temas para trabalhos futuros:

A repetição desta pesquisa, tendo como foco as a durabilidade do concreto, bem como as possíveis manifestações patológicas ocasionadas pela adição ou mesmo a substituição de areia natural por areia descartada de fundição na produção de concreto em escala industrial;

O desenvolvimento de metodologias de qualificação e caracterização física e química da ADF ainda na indústria siderúrgica, tendo como foco a produção de concreto.

A criação de procedimentos entre a indústria siderúrgica e a indústria da produção de concreto de modo a criar procedimentos, fiscalizações e auditorias conjuntas relativas à caracterização físico-química das ADF.

Uma vez implementadas estas medidas, avaliar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABIFA 2016: **Guia ABIFA de fundição**. ago. 2018. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/revista4/>. Acesso em: 25 mai. 2021.

AFS-FIRST (2013), **Government and Regulatory, American Foundry Society**. Disponível em:

<http://www.afsinc.org/government/AFSFirst.cfm?ItemNumber=7887&navItemNumber=528>, Acessado em 11 maio 2021.

ANDRADE, L. B.; CARNIN, R. L. P.; PINTO, R. C. A. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento portland análise do agregado**. Revista Matéria, Florianópolis (SC), v. 23, n. 03, p.3-14, nov. 2018.

ANDRADE, L. B.; CARNIN, R. L. P.; PINTO, R. C. A. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento portland análise do agregado**. Revista Matéria, [s.l.], v. 23, n. 03, p.1-14, nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Nov.2004 ed. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Mai.2004 ed. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Mai.2004 ed. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Mai.2004 ed. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

_____. **NBR 10786**: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. 1 ed. São Paulo - SP: ABNT, 2013. 6 p.

_____. **NBR 10787**: Concreto endurecido — Determinação da penetração de água sob pressão. 1 ed. São Paulo - SP: ABNT, 2011. 6 p.

_____. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto parte 1 - Requisitos. Dez.2009 ed. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Jul.2018 ed. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Jan.2015 ed. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Mai.2009 ed. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 1 ed. São Paulo - SP: ABNT, 2011. 5 p.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. 1 ed. São Paulo - SP: ABNT, 2012. 3 p

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Set. 2003 ed. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____. **NBR NM 52**: Agregados miúdos – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Nov.2009 ed. Rio de Janeiro, 2009. 6 p

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Set.2009 ed. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Mar.1998. ed. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Mar.1998. ed. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

BALDAM, R. L; VIEIRA, E. A. **Fundição - processos e tecnologias correlatas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

BARUFFI, A; BORGES, J.B.G.; BERTICELLI, R.; ROSA, F.D; FERREIRA, M.C.. **Uso de areia de fundição como substituto parcial da areia natural em blocos de concreto para pavimentação**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 4º, 2015, Passo Fundo. 1º Fórum Desempenho das Edificações. Passo Fundo: Imed, 2015. p. 1 - 9.

CASSOTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 121-162, mar. 2011.

CAVALLI, R.; BERTOLDI, L.. **Reaproveitamento de resíduo sólido industrial, constituído por areia de fundição residual, na produção de concreto**. 2016. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Oeste de Santa Catarina de São Miguel do Oeste, Joaçaba, 2016.

CHEGATTI, S. **Areias descartadas de fundição: contexto, gerenciamento e impacto**. Curitiba: Appris Editora, 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (CONSEMA). 011: **Critérios para utilização de adf de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto não estrutural**. Florianópolis. 2008.

COUTINHO NETO, B. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DANTAS, J. M. **Montagem, comissionamento e operação de um sistema de recuperação de areia de fundição: regenerador térmico** - Plano de Trabalho da Fase II. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo. Nov. 2003.

FAGUNDES, A. B.; VAZ, C.R; OLIVEIRA, I.L; KOVALESKI, J.L. **Caminhos para a Sustentabilidade do Setor de Fundição no Brasil**. *Gepros: Gestão da produção, operações e sistemas*, São Paulo, v. 5, n. 2, p.27-40, abr. 2010. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/322>. Acesso em: 13 abr. 2021.

FAGUNDES, A. B; VAZ, C.R; OLIVEIRA, I.L; KOVALESKI, J.L. **Caminhos para a Sustentabilidade do Setor de Fundição no Brasil**. *Gepros: Gestão da produção, operações e sistemas*. abr. 2010. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/322>. Acesso em: 21 jun. 2021.

GARCIA, F. A crise no setor industrial e o meio ambiente, principalmente as areias descartadas de fundição - ADF. **Revista da Abifa**. ago. 2014. Disponível em: <http://abifa.org.br/wpcontent/uploads/2014/09/ABIFA-171-agosto.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. 40 p.

HIGA, S. M. **Processamento e Manufatura de Metais**. Londrina. 2019. Color.

JONES, S.; YUAN,C. Advances in Shell Moulding for Investment Casting. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 135, p. 258-265, 2003.

Jin-Guang Teng, Yu Xiang, Tao Yu, Zhi Fang, **Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete**, *Adv. Struct. Eng.* 22 (14) (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1369433219858291>.

Khairunisa Muthusamy, Mohamad Hafizuddin Rasid, Gul Ahmed Jokhio, Ahmed Mokhtar Albshir Budiea, Mohd Warid Hussin, Jahangir Mirza, Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review, **Constructuin.and Building. Materials**. 236 (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019>.

KUMAR DASH, Manoj et al. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, www.sciencedirect.com, ed. 5, 2016.

LEONEL, R. F.; Folgueras M. V.; Dalla Valentina L. V. O.; Prim S. R.; Prates G. A.; Caraschi J. C. Characterization of Soil-Cement Bricks with Incorporation of Used Foundry Sand. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 329–335, 2017.

- MACCAGNAN, B.; PELIZZARI, P.M.; DRUCK, F.; PAGNUSSAT, D.T. **Otimização do Proporcionamento de Areias de Fundição Incorporadas na Fabricação de Blocos de Concreto**. In: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Gramado, RS, 2013.
- MARIOTTO, C. L. **Curso de Areias de Moldagem**: Volume 1 e 2. 15. Ed. São Paulo: ABM, 1986.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2014. 751p.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura Propriedade e Materiais**. São Paulo - SP: IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 472 p.
- NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre - RS: Bookman, 2016. 253 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.
- OLIVEIRA, T. M. N. de. **Eco-Estratégia Empresarial no Setor Metalmeccânico da Escola Técnica Tupy**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- PENKAITIS, G. **Impacto Ambiental Gerado pela Disposição de Areias de Fundição**: estudo de caso. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- RAMACHANDRA, S. R. **Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes**. Department of Mining, Metals and Materials Engineering – McGill University, Montreal, Wastw Management Series – 7. Quebec, Canada. First Edition, 2006.
- REPETTE, Wellinton Longuini; ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil: Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo - SP: IBRACON, 2010. 835 p. (Volume 1).
- REBELATO, M. G.; SARAN, L. M.; CURY, V. B.; RODRIGUES, A. M. **Environmental performance analysis: foundry industry case report. Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, n. 2, p. 248-263, 2017.
- RECENA, F. A. P. **Dosagem e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland**. 3. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2011.
- S. Preethi, R. Tangadagi B, M. Manjunatha, A. Bharath, **Sustainable Effect of Chemically Treated Aggregates on Bond Strength of Bitumen**, out. (2020)
- SANTOS, C. C.; LOPES, D. C. Estudo da Resistência de Concretos com Areia de Fundição e Cinza de Casca de Arroz. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia**

Civil, nov. 2017. Disponível em:

<https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/46600/pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, britados e artificiais para o concreto. In: PASSUELLO, A. et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. 931 p.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de Areia de Fundição Através de Tratamento Químico Via Processo Fenton**. 2005. 85 f. Pós-graduação - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

Siddique R, Aggarwal Y, Aggarwal P, Kadri E, Bennacer R. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS).

Construction and Building Material, 2011.

SIDDIQUE, Rafat; SINGH, Gurpreet. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, www.elsevier.com/locate/resconrec, ed. 55, 2011.

SIDDIQUE, Rafat *et al.* Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. **Construction and Building Materials**, www.elsevier.com/locate/conbuildmat, ed. 83, 2015.

SIEGEL, M. **Fundição**. 15. ed. São Paulo: ABM, 1985.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of Waste Foundry Sand (WFS) as Partial Replacement of Sand on the Strength, Ultrasonic Pulse Velocity and Permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 416–422, 2011.

SILVA, Turibio J.; ISAIA, Geraldo Cechela (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo - SP: IBRACON, 2011b. 1885 p. (Volume 2).

SOARES, G. A. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia**. Ouro Preto: Internet, 2000.

SOUZA, Prof Brenno Ferreira de. **Moldagem em casca**. 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/RonaldVasconcelos2/aula-03-moldes>. Acesso em: 15 abr. 2021.

THIRUVENKITAM, Manoharan *et al.* Use of waste foundry sand as a partial replacement to produce green concrete: Mechanical properties, durability attributes and its economical assessment. **Environmental Technology & Innovation**, www.sciencedirect.com, ed. 19, 2020.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; BOLINA, Fabrício; FERNANDES, Bruno. Análise experimental do fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas. **Revista IBRACON**, São Paulo - SP, v. 4, n. 11, p.856-875, 01 ago. 2018. Mensal.

ZUBELA. **Fundição**. Disponível em: <<http://zubela.com.br/>>. Acesso em: 23 maio 2019.