

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
METALURGIA E DE MATERIAIS — PPGE3M

EMILY NORONHA MARQUES

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIA
DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO
CONVENCIONAL

Porto Alegre

2023

EMILY NORONHA MARQUES

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIA
DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO
CONVENCIONAL

Dissertação submetida ao programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais- PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica. Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coorientadora: Profa. Dra. Angela Borges Masuero

Porto Alegre

2023

EMILY NORONHA MARQUES

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIA DE
FUNDIÇÃO EM CONCRETO CONVENCIONAL COMO AGREGADO MIÚDO

Este trabalho de dissertação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Afonso Reguly

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Aprovado: Porto Alegre, ____ de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann (orientador) — UFRGS

Profa. Dra. Angela Borges Masuero (coorientadora) — UFRGS

Profa. Dra. Annelise Koop Alves — UFRGS

Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Goncalves — UFRGS

Dra. Lais Zucchetti — UFRGS

Dedico este trabalho a Deus e a minha família, sem eles certamente não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, aos meus orientadores, Carlos Bergmann e Angela Masuero, por serem exemplo de pessoas, profissionais e professores. Obrigada pela disponibilidade e paciência. Agradeço ao meu namorado por me apoiar das mais diversas formas para conclusão desta caminhada. Obrigada pelo companheirismo e por estar ao meu lado sempre. Agradeço a minha mãe e a minha irmã pelo empenho e apoio constantes para a realização e conclusão do mestrado e por se fazerem sempre presentes, mesmo a quilômetros de distância. Agradeço ao Max, Carol, Aldo e Victor por ouvirem muitas dúvidas e por discutirem muitos assuntos e resultados. Agradeço aos técnicos de laboratório, Ari, Airton e Tânia, pelo apoio e momentos de descontração. Obrigada aos bolsistas Leonardo e Renan pelo auxílio na elaboração dos ensaios e coleta de dados e a todos que, em algum momento, contribuíram para a realização dos ensaios. Agradeço ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) e ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) por disponibilizarem o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) para o desenvolvimento desta pesquisa. Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro para a realização desse trabalho (código de financiamento 001).

Eu não tenho nenhum talento especial.
Apenas sou apaixonadamente curioso.

Einstein.

RESUMO

A areia descartada de fundição (ADF) é um dos resíduos oriundos do processo de produção de peças e componentes em fundições. A ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) estima que são gerados cerca de três milhões de toneladas por ano de ADF no país. Esse resíduo é constituído basicamente por sílica e é derivado de uma composição com areia natural, bastante fino em relação aos agregados de origem natural. Ele é classificado, pela norma brasileira NBR 10004, como resíduo classe II A (resíduo não perigoso e não inerte). Diante disso, conclui-se que ele apresenta propriedades físicas interessantes para ser utilizado como material alternativo ao agregado miúdo natural na produção de concreto convencional. Em vista disso, o presente estudo tem por objetivo verificar a influência da substituição — 25%, 50% e 100% em massa — de areia natural por ADF nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Com objetivo de avaliar a viabilidade de emprego desse resíduo no concreto, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade; bem como a avaliação de aspectos relacionados à durabilidade, como o ensaio de absorção por imersão e avaliação de reação álcali-agregado. Os resultados indicaram que há ganho significativo de desempenho mecânico com o acréscimo na resistência à compressão e, no módulo elástico, conforme o aumento do teor de substituição de areia natural por ADF. No que tange aos aspectos ligados a durabilidade, os resultados demonstraram que não houve influência estatística significativa, tanto para o ensaio de absorção quanto para o ensaio de reação álcali-agregado, o que demonstra, portanto, a viabilidade técnica da utilização de ADF no concreto.

Palavras-chave: Areia descartada de fundição (ADF). Concreto. Aproveitamento de resíduo. Propriedades mecânicas. Durabilidade. Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

Waste foundry sand (WFS) is one of the residues arising from the production process of parts and components in foundries. ABIFA -Brazilian Foundry Association- estimates that around three million tons of WFS are generated per year in the country. This waste basically consists of silica, being derived from a composition with natural sand, quite fine in relation to aggregates of natural origin, and is classified, according to the Brazilian standard NBR 10004, as class II A waste (non-hazardous and non-inert waste). Therefore, it is concluded that it presents interesting physical properties to be used as an alternative material to natural fine aggregate in the production of conventional concrete. Given this, the present study aims to verify the influence of replacing – 25%, 50% and 100% by mass – of natural sand with WFS. On the mechanical and durability properties of concrete. In order to evaluate the feasibility of using this residue in concrete, axial compression resistance and elastic modulus tests were carried out; as well as the evaluation of aspects related to durability such as the immersion absorption test and evaluation of the alkali-aggregate reaction. The results indicated that there is a significant gain in mechanical performance with an increase in compressive strength and elastic modulus as the replacement content of natural sand with WFS increases; Regarding aspects linked to durability, the results demonstrated that there was no significant statistical influence, both for the absorption test and for the alkali-aggregate reaction test, which therefore demonstrates the technical feasibility of using WFS in concrete.

Keywords: Waste foundry sand (WFS). Concrete. Aggregate. Waste utilization. Mechanical properties. Durability. Alkali-aggregate reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Aspecto visual de areia verde	21
Figura 2 — Exemplo de molde de fundição	23
Figura 3 — Posicionamento do macho e preenchimento de molde	23
Figura 4 — Abatimento do concreto	34
Figura 5 — Triple Botton Line	43
Figura 6 — Esquema da reação álcali-agregado	46
Figura 7 — Fluxograma experimental	48
Figura 8 — Análise mineralógica por difração de raios-X da “areia de fundição” investigada	51
Figura 9 — Análise termogravimétrica (ATG) do material em estudo	52
Figura 10 — Aspecto superficial da fração de ADF retida na peneira 1.18mm (imagem obtida em microscópio ótico com ampliação de 0,65x)	53
Figura 11 — Análise granulométrica dos agregados miúdos utilizados	54
Figura 12 — Aspecto superficial da fração de areia natural retida na peneira 1,18 mm; (imagem obtida em microscópio ótico com ampliação de 0,65x)....	55
Figura 13 — Diagrama de dosagem em areia natural.....	56
Figura 14 — Diagrama de dosagem comparativo (dosagem com 100% ADF e dosagem em areia natural)	58
Figura 15 — Ensaio de abatimento Slump test.....	59
Figura 16 — CP com extensômetros durante o ensaio de módulo elástico ...	61
Figura 17 — Moldes vistos em planta	63
Figura 18 — Leitura das barras de argamassa no comparador de comprimento	64
Figura 19 — Influência do teor de substituição de agregado miúdo por ADF na resistência à compressão dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias	65
Figura 20 — Comparativo do ganho percentual de resistência à compressão aos 28 dias de idade para os diferentes teores de substituição testados.....	66
Figura 21 — Módulo de elasticidade dos concretos com diferentes teores de ADF aos 28 dias	67
Figura 22 — Percentual de absorção por imersão total dos concretos com ADF	69

Figura 23 — Expansão percentual por RAA de barras de argamassa com ADF	70
Figura 24 — Comparação do aspecto superficial dos concretos	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Comparativo da produção anual de fundidos por região.....	22
Tabela 2 — Propriedades físicas da areia de fundição usada em pesquisas por diferentes pesquisadores.....	29
Tabela 3 — Comparativo de granulometria das areias empregadas em diferentes pesquisas.....	29
Tabela 4 — Composição química da areia de fundição usada em pesquisas por diferentes pesquisadores.....	30
Tabela 5 — Análise química da “areia de fundição” por fluorescência de raios-X.....	51
Tabela 6 — Composição Granulométrica da areia de fundição	52
Tabela 7 — Composição granulométrica da areia natural	54
Tabela 8 — Composição granulométrica do agregado graúdo	55
Tabela 9 — Dados da curva de dosagem experimental com areia natural	56
Tabela 10 — Relação de proporcionalidade em massa dos parâmetros de dosagem dos concretos executados.....	57
Tabela 11 — Dados da curva de dosagem experimental com 100% de ADF	58
Tabela 12 — Composição granulométrica das argamassas testadas no ensaio de RAA.....	64
Tabela 13 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados de resistência à compressão	65
Tabela 14 — Tukey test: valores de p para os resultados do ensaio de resistência à compressão	66
Tabela 15 — Comparativo teórico do consumo de cimento por m ³ de concreto	67
Tabela 16 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de módulo elástico aos 28 dias	67
Tabela 17 — Teste de Tukey ensaio de Módulo Elástico	68
Tabela 18 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de absorção por imersão aos 28 dias.....	69
Tabela 19 — Análise Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de RAA	70

Tabela 20 — Concentração de contaminantes nos extratos solubilizados (ABNT NBR 1006, 2004).....	71
Tabela 21 — Concentração de contaminantes nos extratos lixiviados (ABNT NBR 1005, 2004).....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF	areia descartada de fundição
MgO	óxido de magnésio
K ₂ O	óxido de potássio
TiO ₂	dióxido de titânio
µm	micrometro
mm	milímetro
Kg/m ³	quilograma por metro cúbico
SiO ₂	dióxido de silício
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
K ₂ O	óxido de potássio
Na ₂ O	óxido de sódio
CaO	óxido de cálcio
Fe ₂ O ₃	óxido férrico
MgO	óxido de magnésio
SO ₃	trióxido de enxofre
LOI	perda ao fogo
MPa	mega pascal
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
m ³	metro cúbico
Fct,sp	resistência à tração por compressão diametral
Fct,f	resistência à tração de flexão
gel C-S-H	hidratos de silicato de cálcio
XRD	difração de raios x
CO ₂	dióxido de carbono
IDHEA	Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica
3BL	<i>triple botton line</i>
kg	quilograma
Na+	íons de sódio

K+	íons de potássio
OH-	ânion hidróxido
RAC	reação álcali-carbonato
RAS	reação álcali-sílica
Si-OH	silanol
Si-O-Si	siloxano
Ca ²⁺	cálcio
FRX	fluorescência de raios-x
DRX	difração de raios-x
ATG	análise termogravimétrica
m/cm ³	metro por centímetro cúbico
(Ca(OH) ₂)	portlandita
(CaCO ₃)	calcita
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
g	grama
mm	milímetro
NE	nordeste
MG	minas gerais
kg/kg	quilograma por quilograma
REF.	concreto referência
m_{sat}	massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura
m_s	massa da amostra seca em estufa
rpm	rotação por minuto
mL	mililitro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	Areia de Fundição	20
3.1.1	Indústria de fundição no Brasil	21
3.1.2	Processo de fundição e a geração de resíduos	22
3.1.3	Areia verde	25
3.1.4	Areias quimicamente ligadas	25
3.1.5	Areia descartada de fundição (ADF)	26
3.2	Reciclagem da areia descartada de fundição (ADF)	26
3.2.1	Propriedades físicas da areia descartada fundição	28
3.2.2	Composição química da areia descartada de fundição	29
3.3	Resíduos sólidos	30
3.3.1	Classificação de Resíduos Sólidos	30
3.4	Concreto convencional	31
3.4.1	Aglomerante	32
3.4.2	Água	32
3.4.3	Agregados miúdos e graúdos	33
3.4.4	Fases do concreto	34
3.4.5	Estado fresco	34
3.4.6	Estado endurecido	35
3.4.7	Permeabilidade	36
3.5	Areia descartada de fundição no concreto	37
3.5.1	Propriedades do concreto no estado fresco	37
3.5.2	Resistência à compressão	38
3.5.3	Módulo elástico	39
3.5.4	Absorção de água por imersão	40
4	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	42
4.1	Construção sustentável	42

4.1.1	Concreto e a sustentabilidade	44
5	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	45
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
6.1	Planejamento Experimental.....	49
6.1.1	Variáveis independentes	49
6.1.2	Variáveis de resposta	49
6.1.3	Variáveis fixas	49
6.1.4	Variáveis não controladas	50
6.2	Materiais.....	50
6.2.1	Cimento.....	50
6.2.2	Areia descartada de fundição (ADF).....	50
6.2.3	Agregados de origem natural	53
6.3	Metodologia.....	55
6.3.1	Dosagem dos traços.....	55
6.3.2	Moldagem dos corpos de prova	59
6.3.3	Cura	60
6.3.4	Ensaio de resistência à compressão axial	60
6.3.5	Ensaio de módulo elástico.....	60
6.3.6	Ensaio de absorção por imersão	61
6.3.7	Caracterização por solubilização e lixiviação.....	62
6.3.8	Ensaio de reação álcali-agregado	63
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
7.1	Resistência à compressão	65
7.2	Módulo elástico	67
7.3	Absorção por imersão	69
7.4	Reação álcali-agregado.....	70
7.5	Caracterização por solubilização e lixiviação.....	71
7.5.1	Aspecto superficial	72
8	CONCLUSÃO.....	73
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICE	82
	APÊNDICE A — ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS FRAÇÕES DAS AREIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DA FORMA DOS GRÃOS	82

APÊNDICE B —PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	83
APÊNDICE C — MEDIDAS DE EXPANSÃO DAS BARRAS PRISMÁTICAS DO ENSAIO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	84
ANEXOS.....	86
ANEXO A — RESULTADO DO ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA.....	86
ANEXO B — RESULTADO DO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA	89
ANEXO C — RESULTADO DO ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CONCRETO COM 100% ADF	91
ANEXO D — RESULTADO DO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO COM 100% ADF	94

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), a produção total de fundidos de ferro nacional foi de 904.564 toneladas, no primeiro quadrimestre de 2022, obtendo um crescimento de 12% comparado ao mesmo período do ano de 2021. Atualmente, o Brasil ocupa o 10º lugar do ranking mundial na produção de fundidos (ABIFA, 2022).

O processo mais utilizado na indústria de fundição é a moldagem em areia, isso se dá por conta dos benefícios econômicos e por permitir uma produção de qualidade. A areia utilizada nesse processo serve como molde para as peças e segue sendo reutilizada até perder propriedades físicas importantes para a moldagem, quando é então substituída. Com a substituição, é gerado um resíduo industrial denominado areia descartada de fundição (ADF) (Souza, 2021).

Sabe-se que esse resíduo é gerado em quantidades expressivas pelas indústrias de fundição nacionais. A ABIFA (2022) estima que são gerados cerca de três milhões de toneladas por ano de ADF no país. Cabe ressaltar ainda que o descarte inadequado acarreta em problemas ao meio ambiente e o descarte em aterros industriais implica em custos adicionais às indústrias (Souza, 2021).

Segundo Pinto (2013), as empresas que possuem fundição em seus processos produtivos e que, portanto, geram o resíduo ADF, têm buscado soluções que minimizem seus custos de matéria-prima e da disposição final de seus resíduos, bem como que visem atender ao crescente rigor das exigências ambientais. Pesquisas têm apontado que o processo de reciclagem pode ser o caminho para o fomento à sustentabilidade do setor de fundição no Brasil.

Os processos de reciclagem de ADF ajudam a minimizar os descartes em aterros industriais, diminuindo assim o acúmulo de passivos ambientais, além de poupar a natureza com a redução da extração dos componentes para a produção de areia nova (Pinto, 2013).

Em relação à construção civil, a reciclagem e o reuso de materiais são ótimas alternativas para a preservação de recursos naturais e conseqüentemente o lançamento de menores quantidades de poluentes no meio ambiente. Haja vista que o setor é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos (Copetti, 2021).

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo, segundo Metha e Monteiro (2014) e Caldas (2022), sendo encontrado atualmente em diversas tipologias construtivas, desde pequenas residências até obras de artes especiais, com consumo anual nacional estimado em 52,7 milhões de toneladas no ano de 2018 (SNIC, 2018).

Neste cenário, surgiram há algum tempo pesquisas abordando a substituição de recursos naturais por materiais alternativos, entre eles a reutilização da ADF. Essa areia corresponde ao maior volume de resíduos gerados por essa indústria e, com sua aplicação, haveria a possibilidade de prolongar por um maior período de tempo o ciclo de vida dos recursos naturais que são utilizados em grandes quantidades pela construção civil (Tittarelli, 2018).

Diante do exposto, o presente estudo propôs a incorporação de ADF como agregado miúdo em concreto convencional, visando analisar o potencial de reaproveitamento da areia no que tange às propriedades mecânicas, como resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade, bem como aspectos relacionados à durabilidade, como a absorção de água por imersão total e reação álcali-agregado. Além disso, por se tratar de um resíduo industrial, executou-se ainda a caracterização das amostras de ADF e concreto com 100% de adição por meio dos ensaios de lixiviação, solubilização.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e influência da utilização da ADF como agregado miúdo em substituição da areia de origem natural na produção de concreto convencional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São dois objetivos específicos:

a) analisar a influência do emprego da ADF no concreto em propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e módulo elástico) e em aspectos ligados à durabilidade por meio dos ensaios de absorção por imersão e ensaio reação álcali-agregado;

b) determinar o teor ótimo de substituição de areia natural por ADF no concreto por meio da avaliação de suas principais características mecânicas (resistência à compressão axial e módulo de elasticidade) e por intermédio da avaliação de sua durabilidade (ensaio de absorção por imersão e reação álcali-agregado).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

A areia descartada de fundição (ADF) é uma areia composta predominantemente por sílica de alta qualidade, que é um subproduto oriundo da produção de indústrias de fundição de metais ferrosos e não ferrosos. É utilizada há séculos como material de moldagem devido a sua alta condutividade térmica em várias operações de fundição juntamente com aditivos (Kumar, 2017).

Quanto à tipologia, a areia de fundição pode ser classificada da seguinte maneira: areia ligada à argila (areia verde) e areia ligada quimicamente. Considera-se a areia verde o material que utiliza argila como aglutinante e a areia ligada quimicamente o material que se vale de produtos químicos como aglutinante.

Quanto ao aspecto visual, a presença de aditivos carbonáceos confere cor preta à areia verde (Figura 1), enquanto a areia de fundição química é de cor clara. A areia de fundição verde é mais utilizada em operações de moldagem, já a areia de fundição química é usada tanto para fabricação de moldes quanto para operações de fabricação de machos, que exigem maior resistência ao calor do metal fundido (Bhardwaj; Kumar, 2017).

Figura 1 — Aspecto visual de areia verde



Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.1.1 Indústria de fundição no Brasil

A produção de materiais fundidos no Brasil se consolidou entre os anos de 1970 e 1980 em razão dos grandes investimentos feitos no país em infraestrutura concomitantemente ao crescimento da indústria automotiva (Casotti; Filho; Castro, 2011).

De acordo com dados da ABIFA, no ano de 2015, quase 60% de sua produção era destinada ao setor automotivo em diversos segmentos, o que garantiu ao Brasil a 8ª posição no ranking mundial de frota de veículos e a 7ª de maior produtor. Esses dados evidenciam a importância desse setor para a economia nacional.

Segundo balanço publicado pela ABIFA (Associação Brasileira de Fundição), em 2022 o setor produziu 2,97 milhões de toneladas de fundidos, entre ferro fundido (2,26 mil toneladas), aço (289.588) e metais não ferrosos (425.521 toneladas). O

volume de produção alcançado no acumulado de 2022 (2,97 milhões toneladas) superou em +10,1% o desempenho do setor em 2021 (2,70 milhões toneladas).

Conforme o relatório de desempenho do setor de fundição (Tabela 1), observa-se que a região sul desempenhou, nos últimos anos, uma significativa participação no que diz respeito à produção de fundidos no país.

Tabela 1 — Comparativo da produção anual de fundidos por região

Comparação interanual (2022/2021) da produção brasileira de fundidos por Região do país			
Região	2022 (t)	2021 (t)	2022/2021 (%)
Centro MG	613.755	601.075	2,1
Norte/NE	104.812	100.262	4,5
Rio de Janeiro	159.303	172.110	-7,4
São Paulo	720.531	615.854	17
Sul	1.380.292	1.217.053	13,4
Total	2.978.693	2.706.354	10,1

Fonte: ABIFA (2023).

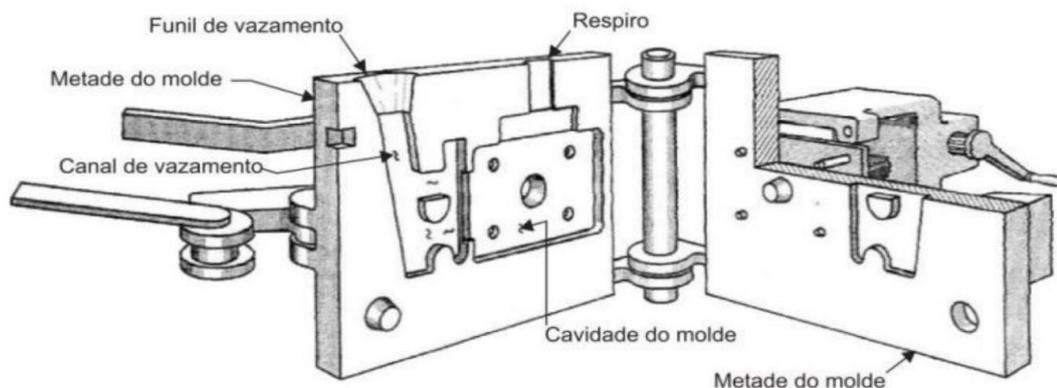
3.1.2 Processo de fundição e a geração de resíduos

O setor de produção de componentes metálicos é caracterizado pelo processamento de materiais metálicos de produção primária ou de reciclagem, na forma de sucata, para elaboração de peças moldadas em ligas ferrosas. Os elementos produzidos podem ser moldados em areia, resinas ou coquilha metálica e, posteriormente, seguem para a fase de acabamento superficial, que é a última etapa antes da entrega para uso final ou para a formação de componentes e sistemas (Copetti, 2021).

Por meio do processo de fundição, é possível que peças complexas sejam produzidas por fusão de metais ou ligas. Ele consiste em despejar metal líquido em moldes de areia e transformar esse metal líquido em material sólido após o resfriamento, normalmente, em temperatura ambiente. Nesse processo, resíduos de areia de fundição são gerados a partir dos moldes de areia utilizados (Souza; Santiciolli, 2021).

O molde é um recipiente vazado com capacidade de resistir a elevadas temperaturas e com o formato da peça que será fundida. Na Figura 2, é possível identificar os elementos que compõem o molde.

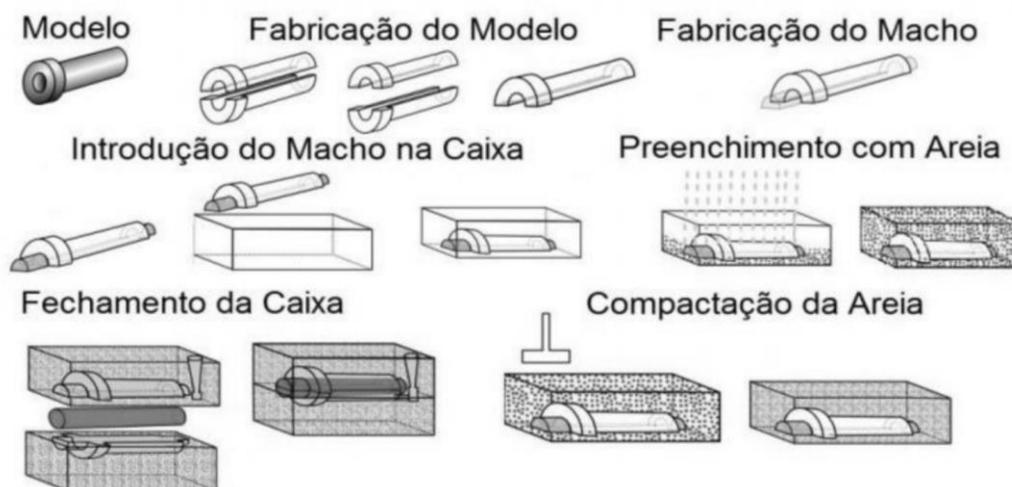
Figura 2 — Exemplo de molde de fundição



Fonte: Cremonez (2022).

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. Essa areia possui propriedades moldáveis que aumentam a resistência mecânica do molde. Esse 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 3 — Posicionamento do macho e preenchimento de molde



Fonte: Higa (2019).

Segundo Casotti, Filho e Castro (2011), as principais etapas do processo de fundição são as seguintes:

- a) produção do modelo da peça: o processo começa com a confecção do modelo com os atributos desejados para o resultado final da peça;
- b) produção do molde: o molde é feito conforme o formato desejado para a peça. É preciso que esse elemento seja capaz de resistir a altas temperaturas. O processo mais utilizado pela indústria é a utilização de areia verde para a confecção desses moldes;
- c) produção dos machos: os machos são colocados nos moldes antes do fechamento para receber o metal líquido. Esse elemento delimita a área interna da peça fundida diferentemente do molde que tem como função a delimitação da parte externa da peça;
- d) fechamento do molde: o molde é composto por duas metades que juntas envolvem o macho, nessa etapa, as metades são então unidas;
- e) fusão: nessa etapa, é realizada a fundição do metal em forno de indução.
- f) vazamento: depois de fundido, o metal líquido é transferido do forno para a panela de vazamento e posteriormente é despejado no molde por meio de um canal de descida que auxilia o processo.
- g) desmoldagem: essa etapa diz respeito à retirada da peça solidificada do interior do molde.
- h) rebarbação e limpeza: refere-se à retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida.

Depois do processo de desmoldagem, quando possível, a areia remanescente é reutilizada no mesmo processo de moldagem, o que caracteriza um processo recirculante, ao qual fica agregada de forma parcial ou total a areia que estava contida nos machos empregados no procedimento. No entanto, devido ao uso seguido da areia recirculante, ela apresenta um acúmulo de materiais residuais, fazendo-se necessária a diluição da areia contaminada com areia nova. Esse processo resulta em um volume excedente de areia de desmoldagem e, conseqüentemente, o descarte dessa parcela dispensável (Copetti, 2021).

3.1.3 Areia verde

A areia verde consiste em areia aglomerada com argila umedecida que não passa por processo de secagem antes do vazamento do metal. É composta predominantemente por areia de sílica de alta qualidade (85-95%), argila de bentonita (4-10%), aditivos carbonáceos (2-10%) e água (2-5%). Composição que resulta em uma areia de cor preta, dado o teor de carbono. Além disso, as areias verdes também podem conter vestígios de produtos químicos tais como MgO, K₂O e TiO₂ (Siddique; Singh, 2011; Singh; Siddique, 2012).

A areia composta por areia, argila e água só se estabelece em estado ótimo de organização quando os grãos são envolvidos por lamelas de água. Em decorrência do caráter bipolar, as moléculas de água se alinham rigidamente em camadas sobre a partícula sólida. Em virtude das forças externas, as lamelas formadas adjacientemente deslizam entre si. Esse mecanismo justifica a formação dos filmes argilosos formados em torno dos grãos da areia (Baldam; Vieira, 2014).

Mais de 70% da produção mundial de fundidos é elaborada pelo processo de moldagem em areia verde. Esse processo possibilita a fabricação de peças de tamanhos bem variados e permite também a conformação de praticamente todas as ligas metálicas, sendo um dos poucos processos que podem ser usados para metais de alto ponto de fusão, como aços, níquel e titânio (Adegas, 2007).

3.1.4 Areias quimicamente ligadas

As areias quimicamente ligadas possuem diversas denominações e podem ser chamadas de areias resinadas, fenólicas, de macharia ou mesmo “*no blake*”, que é assim chamada por possuir agentes químicos da areia utilizada para a produção de machos. Esse tipo de areia se diferencia das areias verdes por conterem ligantes/resinas orgânicas para a criação de machos. Os processos onde se aplicam esses ligantes foram pensados para sanar problemas de velocidade, endurecimento, resistência e capacidade do molde de colapsar e melhorar a qualidade da peça metálica produzida (Casotti; Filho; Castro, 2011).

Conforme Siddique e Sigh (2011), a areia ligada quimicamente é composta por 93-99% de sílica e 1-3% de ligante químico. Quanto aos tipos de ligantes os autores

ressaltaram que os produtos químicos mais comuns entre os sistemas aglutinantes usados são fenólico-uretanos, epóxi-resinas e silicatos de sódio.

Em se tratando de areia fenólica, utiliza-se um aglomerante sintético que consiste em uma resina fenólica para que se possa obter moldes mais resistentes. A areia empregada na moldagem pode ser recuperada e reutilizada, porém, existe um limite. Assim, depois de descartada, o resíduo de areia de fundição coletado se transforma em material de descarte e permanece em uma pilha situada no interior da empresa, que posteriormente é enviada para empresas terceirizadas e depositada em aterros industriais (Casali *et al.*, 2018)

3.1.5 Areia descartada de fundição (ADF)

A ADF é toda areia proveniente do processo de fabricação de peças fundidas, como a areia de macharia, de moldagem, areia verde, preta, de despoeiramento, de variação, entre outras areias que sejam classificadas de acordo com ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004a) como resíduo Classe II — não perigoso. Conforme observado por Singh e Siddique (2012), mais de 70% do total de material subproduto do processo de fundição consiste em areia, isso ocorre porque os moldes são feitos geralmente de areia de moldagem, que é facilmente disponível, de baixo custo, resistente a altas temperaturas e facilmente aglomeradas com ligantes ou outro material orgânico, sendo predominantes em termos de geração desse resíduo as areias do tipo areia verde e a areia de macharia. A indústria de fundição geralmente usa um tamanho específico de areia de sílica de alta qualidade para seu processo de moldagem e de fundição.

Segundo a ABNT NBR 15702 (ABNT, 2009a), a ADF é um material composto essencialmente por grãos minerais de sílica com diâmetro que varia entre 4,8 mm e 0,05 mm (Barros, 2012).

3.2 RECICLAGEM DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

A reciclagem é o processo por meio do qual um determinado corpo ou objeto é transformado em matéria prima para a confecção de outro corpo ou objeto, que pode ser semelhante ou não ao anterior (Araujo, 2014). O reaproveitamento da areia

descartada de fundição é uma alternativa que proporciona ganhos ambientais e econômicos relacionados à redução de despesas com a destinação do resíduo.

A prática do descarte de ADF em aterros deixou de ser interessante em razão da elevação dos custos e a crescente preocupação com as questões ambientais que motivaram a criação de normas e regulamentos mais rígidos no que diz respeito ao controle do descarte de resíduos industriais. Questões que tornam ainda mais atrativas as formas de reutilização e reciclagem desse tipo de resíduo (Bhardwaj; Kumar, 2017).

A Comissão de Meio Ambiente da ABIFA (2015) subdivide os processos de reciclagem em três: recuperação, regeneração e reutilização. A regeneração e a recuperação são processos de reciclagem interna da ADF, enquanto que a reutilização consiste em um método de reciclagem externa.

Conforme Martine (2017), a recuperação consiste em inserir, no processo produtivo original, as areias que já foram utilizadas no vazamento de peças anteriores. Para isso, antes da reintrodução, é realizada a remoção de resíduos grosseiros e o resfriamento, em razão da presença de materiais alterados em função do contato imediato com o metal fundido, como as argilas e carvões. A regeneração submete as areias descartadas de fundição à ação mecânica (atrição) e/ou à ação da elevação da temperatura (calcinação), visando limpar a superfície dos grãos da areia base e restituir as características da forma mais fiel possível às das areias novas. Dessa forma, é permitida a introdução das areias regeneradas no processo de moldagem.

A reutilização consiste no uso alternativo das areias descartadas de fundição, como agregado miúdo em aplicações alternativas e externas à indústria de fundidos, como na indústria da construção civil, introdução no concreto estrutural, confecção de artefatos de concreto, pavimentação asfáltica, entre outras aplicações. Nesse tipo de aplicação, as areias são utilizadas sem nenhum tipo de tratamento e/ou descontaminação, sendo empregadas nas condições em que foram descartadas (Martini, 2017).

Nesse contexto, é importante mencionar os diversos modos de reutilização e potenciais aplicações da ADF que podem ser feitos: utilização em obras rodoviárias, no preenchimento de aterros, na estabilização de solos, na fabricação de concreto e argamassa, na produção de blocos cerâmicos, blocos de solo cimento e no concreto asfáltico (Copetti, 2021)

O uso da ADF em várias aplicações como alternativa aos materiais tradicionais pode ajudar de várias maneiras na conservação dos materiais convencionais, reduzindo custos (dependendo das questões logísticas envolvidas) e a carga sobre o meio ambiente, beneficiando, assim o país e o meio ambiente (Bhardwaj; Kumar, 2017).

3.2.1 Propriedades físicas da areia descartada fundição

A areia de fundição possui formatos que variam de subangular à arredondada (Kaur; Siddique; Rajor, 2013). Dependendo do setor industrial de onde se origina, tipo de processo produtivo, tipo de aditivos utilizados para moldagem, número de vezes que a areia é reutilizada e tipo e quantidade de ligante utilizado, suas características físicas e químicas podem sofrer alterações (Naik *et al.*, 2012).

Aproximadamente 85-90% de suas partículas são menores que 100 μm . É composto principalmente de areia, o que fica evidente pelo tamanho das partículas (0,05–2 mm) de ADF. No entanto, apesar de ser bastante semelhante ao agregado miúdo natural, as partículas de ADF são muito finas quando comparadas com o material usualmente empregado em concreto, o que faz com que esse seja considerado muito fino para ser utilizado como substituto completo da areia natural para a produção de concretos.

Quanto à distribuição granulométrica, sabe-se que a distribuição granulométrica da ADF é bastante uniforme, possuindo de 85% a 95% do material retido entre as peneiras de 0,6 mm e 0,15 mm. (Naik *et al.*, 2012; Dayton *et al.*, 2010; Siddique *et al.*, 2011).

A tabela 2 mostra algumas propriedades físicas mencionadas por alguns autores e a tabela 3 propõe um comparativo das granulometrias empregadas em trabalhos anteriores.

Tabela 2 — Propriedades físicas da areia de fundição usada em pesquisas por diferentes pesquisadores

Autor da pesquisa	Propriedades físicas			
	Densidade específica	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de finura	Tamanho das partículas (%)
Siddique <i>et al.</i> (2011)	2,61	1638	1,78	50 inferiores à 33µm
Guney <i>et al.</i> (2010)	2,45	-	-	24 inferiores à 74µm
Naik <i>et al.</i> (2012)	2,58 /2,87	1746	-	2,7 e 0,2 inferior à 75µm
Siddique <i>et al.</i> (2011)	2,18	1520	1,6	8 inferiores à 75µm
Manoharan <i>et al.</i> (2018)	2,37	1811	2,37	1,1 inferior à 150µm

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Nota: sinais convencionais utilizados:

- Propriedade não abordada no estudo.

Tabela 3 — Comparativo de granulometria das areias empregadas em diferentes pesquisas

Autor	Módulo de finura ADF	Módulo de finura agregado miúdo convencional	Tipo de ADF
Manoharan <i>et al.</i> (2020)	2,37	2,6	areia ligada quimicamente
Siddique <i>et al.</i> (2011)	1,78	3,03	areia ligada quimicamente
Cremonese (2022)	1,35	2,1	areia ligada quimicamente
Tittarelli (2018)	2,36	2,6	areia ligada quimicamente

Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.2.2 Composição química da areia descartada de fundição

As propriedades químicas da areia são muito importantes, pois desempenham um papel vital nas propriedades do concreto durante o processo de hidratação. As propriedades da ADF sofrem influência direta do modo de produção a partir do qual se originam, podendo variar, principalmente, conforme o metal moldado e o tipo de aglutinante empregado. No entanto, as areias obtidas de uma única fundição geralmente não apresentam variações significativas ao longo do tempo.

A ADF é usualmente rica em sílica e revestida por uma fina película de carbono queimado, material pulverulento e aglutinantes residuais, como a bentonita, resinas ou carvão. Em razão do alto teor de sílica, esse material apresenta caráter hidrofílico, atraindo água para a sua superfície, apresenta teor de sílica inferior aos teores

encontrados em areias naturais, o que se dá em razão da presença de aditivos. A composição química, conforme relatada por vários pesquisadores, é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 — Composição química da areia de fundição usada em diferentes pesquisas

Constituintes	Autores da pesquisa				
	Basar <i>et al.</i> (2012)	Singh <i>et al.</i> (2012)	Guney <i>et al.</i> (2010)	Sandhu <i>et al.</i> (2019)	Siddique <i>et al.</i> (2011)
SiO ₂	81,85	83,8	98	86,44	87,91
Al ₂ O ₃	10,412	0,81	0,8	4,31	4,7
K ₂ O	0,494	1,114	0,04	0,28	0,25
Na ₂ O	0,764	0,87	0,04	0,39	0,19
TiO ₂	-	0,22	1,1	0,17	0,15
CaO	1,21	1,42	0,035	0,98	0,14
Fe ₂ O ₃	1,818	5,39	0,25	2,74	0,94
MgO	1,974	0,86	0,023	0,88	0,3
SO ₃	0,842	0,21	0,01	0,19	0,09
LOI	6,93	-	0,836	3,55	5,15

Fonte: elaborado pela autora (2023)

Nota: sinais convencionais utilizados:

- Propriedade não abordada ou não detectada no estudo.

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

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

3.3.1 Classificação de Resíduos Sólidos

Conforme ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos são definidos em função da potencialidade dos riscos em 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 da composição. A norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em 4 tipos:

- 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 obtidos por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização determinados nessas NBRs, as ADFs são classificadas, conforme os parâmetros normativos, comumente na classe II A (ABNT NBR 10.004).

3.4 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 autoconstrutores ou “construtores formigas”. Isso se deve ao fato de que esses pequenos consumidores têm 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 materiais mais consumidos a partir de 2025, ultrapassando a geração de água potável. No Brasil, segundo Cremonez (2022) 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 a 2012, com objetivo de projetar as tendências do setor para os próximos anos. Foi constatada 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 no 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).

3.4.1 Aglomerante

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o aglomerante hidráulico é aquele caracterizado pelo processo de hidratação. Desse processo de hidratação, ocorrem reações químicas propiciadas pela mistura da água e dos 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 no estado fresco, no estado endurecido (Curti, 2017). Existem vários tipos de cimento no Brasil. Esses cimentos diferem entre si de acordo com sua composição, como o cimento de alto forno, o cimento composto, o cimento pozolânico, o cimento de alta resistência inicial, cimento branco e o cimento de baixo calor de hidratação. Dentre eles, os mais utilizados são CPV ARI, CPII E 32, CPII F 32 e CPIII 40 (Battagin, 2011).

3.4.2 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 seu pH esteja entre 6 e 8. É importante que ela esteja livre de impurezas biológicas, físicas e químicas (Medeiros *et al.*, 2015). A NBR 15900-1 (ABNT, 2009b) 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, 2009b) menciona que a água potável utilizada para consumo público é apropriada para o uso de amassamento de concreto e não necessita de ensaios laboratoriais.

3.4.3 Agregados miúdos e graúdos

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, à produção de concreto e argamassa de cimento Portland. Pela definição de Farias e Palmeira (2010), os 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, por exemplo, os blocos de “enroscamento” usual em obras de barragens, na escala milimétrica, conforme os “agregados” empregados no processo de fabricação do concreto para a maioria das obras de edificação. Acrescentamos, ainda, conforme a NBR 7211 (ABNT 2009), o 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. Além disso, a NBR 7211 (ABNT 2009) diz que o 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.

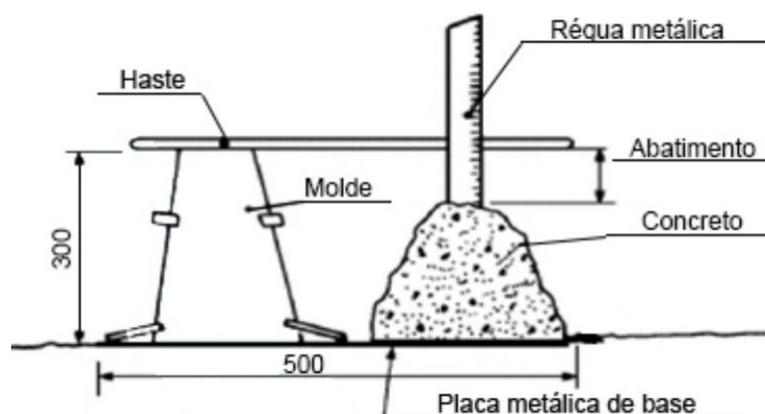
3.4.4 Fases do concreto

Segundo Helene e Andrade (2010), o concreto possui dois ciclos distintos. O primeiro ciclo diz respeito ao concreto no estado fresco, o qual tem espaço de tempo muito pequeno, em média é de 1h a 5h. Esse ciclo é referente à duração essencial para que o concreto seja preparado, transportado, lançado e adensado. O segundo ciclo corresponde ao concreto no estado endurecido, iniciando-se com a hidratação do cimento, concomitantemente com o endurecimento do concreto, ciclo que se estenderá por toda vida útil da estrutura.

3.4.5 Estado fresco

O concreto no estado fresco possui sua trabalhabilidade atrelada a diversos fatores inerentes, como os seguintes: classe e consumo de cimento no concreto por metro cúbico, relação água/materiais secos, traço do concreto, teor da argamassa, geometria e tamanho e textura dos agregados (Helene; Andrade, 2010). Além disso, também são considerados os fatores externos de influência, tais como a geometria da forma dos agregados, 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 variedade de formas e tamanhos. Isso é devido ao concreto fresco, o qual se atribui a consistência plástica. Essa consistência confere ao concreto um escoamento contínuo para o interior das formas.

Figura 4 — Abatimento do concreto



Fonte: NBR 67 (1998).

A NBR NM 67 (ABNT 2020) estabelece que a consistência do concreto fresco pode ser definida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 4), de onde se obtém os dados de *Slump Test*. Por sua vez, o *Slump Test* consiste em uma ferramenta importante para o controle tecnológico do concreto, uma vez que pode ser crucial para a determinação da variação dos materiais que estão sendo empregados para a produção do concreto, haja visto que este indicativo varia em função da consistência que se deseja obter para o concreto definindo faixas de valores, dependendo da aplicação do material.

3.4.6 Estado endurecido

A resistência mecânica no estado endurecido está diretamente ligada às propriedades conferidas no estado fresco. O estudo minucioso, na etapa de dosagem das proporções dos agregados, acarretará bons resultados no grau de adensamento e, conseqüentemente, bons resultados de resistência mecânica à compressão (Neville, 2016). O 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, as seguintes: massa específica, módulo de elasticidade, resistência mecânica à compressão, coeficiente de dilatação térmica e 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} , sp) 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, 2023), segundo ela, a resistência mecânica à tração direta poderá ser considerada equivalente a $0,7 f_{ct}$ ou $0,9 f_{ct}$, sp .

3.4.7 Permeabilidade

Segundo Repette (2010), o transporte de fluidos no interior do concreto provoca sua deterioração, afetando sua durabilidade através da permeabilidade, que modera o acesso e deslocamento de agentes de deterioração, comprometendo química e fisicamente a sua estrutura, deteriorando-a. 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 e houver comunicação entre os poros, haverá a intercomunicação entre os poros, o que contribuirá para o transporte de fluidos no interior do concreto. Portanto, pode-se inferir que a permeabilidade consiste na 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, quando o fluido se movimenta por meio de um diferencial de concentração, ou por absorção, quando 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 quantidade de água deve ser adequada, visto que ela atua como ingrediente de hidratação do cimento, facilitando, desse modo, a mistura dos insumos do concreto (Pontes, 2019).

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 da peça concretada (Mehta; Monteiro, 2014).

Sabe-se que aproximadamente 50% do volume total da pasta de cimento concentra-se na zona de transição. Esta região do concreto apresenta uma microestrutura que difere 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, 2011).

3.5 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO NO CONCRETO

Diversos estudos têm sido feitos acerca da aplicação da areia de fundição como substituto do agregado miúdo em concreto. No entanto, apesar de apresentar propriedades químicas e físicas semelhantes aos agregados miúdos convencionais, a ADF possui partículas mais finas e distribuição granulométricas mais uniformes quando comparadas aos agregados miúdos convencionais. Esses fatores, somados à presença de impurezas, provocam efeitos negativos no concreto conforme o aumento do teor de ADF além de um certo nível (Bhardwaj; Kumar, 2017).

3.5.1 Propriedades do concreto no estado fresco

No que diz respeito às propriedades no estado fresco, verifica-se que geralmente a incorporação de ADF no concreto aumenta o consumo de água em razão de sua granulometria mais fina o que se justifica pelo aumento da superfície específica. Quanto à trabalhabilidade, observa-se uma significativa redução para substituições acima de 10% de substituição de areia natural por ADF (Prabhu; Hyun, 2014). A redução na trabalhabilidade se dá em razão da presença de partículas mais finas, que absorvem uma maior quantidade de água e, por conseguinte, são responsáveis por diminuir a fluidez do concreto fresco. No entanto é válido pontuar que para partículas mais finas com superfície mais arredondada ocorre a melhora da trabalhabilidade como é o caso da sílica ativa. O aumento do consumo de água favorece o aumento da demanda de aditivos superplastificantes (Prabhu; Hyun, 2014; Guney *et al.*, 2010).

Além disso, Torres *et al.* (2017) verificaram que, quando uma areia de fundição mais grossa é empregada, o abatimento aumenta devido ao aumento do volume de vazios; já, quando se emprega areia de fundição de granulometria fina, o valor do

abatimento começa a diminuir devido ao aumento do número de partículas finas e, para traços que combinam areia fina e areia grossa, não há mudanças significativas no que tange ao abatimento do concreto. Isso ocorre pois agregados com granulometria contínua, desde que não muito grossos, tendem a aumentar a coesão e fluidez para uma dada quantidade de água adicionada. Agregados muito grossos diminuem a consistência e coesão ao passo que os muito finos têm a tendência inversa (desde que a granulometria não seja totalmente uniforme). Quanto à forma, grãos arredondados aumentam a fluidez e grãos lamelares a diminuem.

3.5.2 Resistência à compressão

Sabe-se que entre os ensaios realizados no concreto no estado endurecido, o ensaio de resistência à compressão é dos mais relevantes, pois essa propriedade está relacionada a diversas outras. Essa relação faz com que um único teste possibilite a visualização de várias características do concreto, ou seja, a partir da resistência à compressão, pode-se inferir facilmente a qualidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os autores Naik *et al.* (2012) investigaram os efeitos da substituição de agregado miúdo convencional por ADF no concreto utilizando dois tipos de areia de fundição: uma porção limpa/nova e uma porção de areia de fundição usada. As proporções utilizadas foram de 25% e 35%. Os valores de resistência à compressão obtidos no estudo foram de aproximadamente 23% e 35% menores, em relação ao concreto de referência aos 28 dias de idade, para as misturas com substituição de areia natural por areia de fundição usada. Já as misturas que continham areia de fundição nova/limpa demonstraram comportamento bastante semelhante ao concreto de referência.

Outras pesquisas relataram resultados semelhantes ao testar uma variedade de misturas com três tipos de areia: areia de fundição, areia branca fina, areia combinada e areia de fundição. Os resultados demonstraram uma redução linear da resistência a compressão conforme o aumento dos níveis de substituição dos demais tipos de areia por ADF (Khatib; Ellis, 2001).

Na pesquisa, desenvolvida por Singh e Siddique (2012), foi observado um ganho na resistência a compressão do concreto conforme o aumento do teor de ADF, testada nas proporções de substituição de 5%, 10%, 15%, 20% em massa. O aumento

da resistência à compressão observado aos 28 dias foi de 8,5% a 17%. No entanto, para substituições de teores acima de 15%, não houve aumento significativo na resistência, fato que se deve ao aumento da área superficial do agregado por meio das partículas finas de ADF que pode ter prejudicado a ligação entre a pasta de cimento e o agregado.

Kaur *et al.* (2012) conciliaram a incorporação de ADF e fungos na matriz cimentícia. A partir disso, obtiveram um ganho aos 28 dias de idade de 15,6% na resistência para 20% de substituição de agregado natural por ADF. Esse ganho se deve ao preenchimento dos poros do concreto pelos esporos dos fungos utilizados. Além disso, a cultura fúngica (*Aspergillus spp.*) aumentou a capacidade de reação do cimento com a areia de fundição, elevando, desse modo, a formação de gel CSH.

No que diz respeito a origem da areia, Salokhe *et al.* (2014) constataram que o concreto com ADF oriundas de fundições ferrosas obtiveram melhor desempenho do que o concreto com ADF não ferrosa no que tange à resistência à compressão. Siddique *et al.* (2009) verificaram um aumento significativo na resistência do concreto com ADF para teores de até 30% de substituição, o que foi atribuído ao adensamento da matriz cimentícia em razão da presença das partículas finas de ADF, concomitantemente, com a presença de sílica, que teria ajudado na formação de gel CSH. Torres *et al.* (2017) também obtiveram resultados positivos com a adição de ADF no que tange à resistência à compressão com até 30% de substituição. Além disso, os autores observaram que, até 20% de substituição, não há mudanças drásticas no que diz respeito à resistência à compressão.

Conforme a pesquisa de Matos *et al.* (2017), verificou-se que a substituição de 50% não afeta significativamente a resistência à compressão, o que possivelmente é devido ao efeito *filler*. Resultados semelhantes, com crescimentos significativos na resistência, também foram obtidos por Pathariya *et al.* (2013). A pesquisa demonstrou um ganho obtido com a substituição de areia natural por ADF em teores mais altos — de até 60%.

3.5.3 Módulo elástico

Quanto ao módulo de elasticidade, é válido pontuar sua importância, dado que essa propriedade diz respeito à capacidade do concreto de se deformar elasticamente, ou seja, sem sofrer deformações permanentes NBR 8522-1(2021). A

esse respeito, pode-se destacar a pesquisa de Prabhu *et al.* (2014) que estudaram os efeitos do emprego de ADF em concreto. Eles relataram a redução no módulo de elasticidade de concretos, resultados que estão em conformidade com os resultados de resistência à compressão. Já o concreto, feito com areia de fundição limpa/nova, com teor de substituição de 25% e 35%, apresentaram valores de módulo de elasticidade próximos ou superiores aos concretos de referência aos 28 dias (Naik *et al.*, 2012).

Resultados positivos foram obtidos nas pesquisas de Singh e Siddique (2012), que registraram aumento no módulo elástico de 1,7% até 6,4%, aos 28 dias de idade do concreto. O comportamento dessa propriedade se deu de modo crescente para os teores de substituição de areia natural por ADF de até 15%. Observou-se também que houve o aumento do módulo elástico conforme o crescimento da idade dos corpos de prova. No entanto, independentemente do tempo de cura, o concreto com 15% de ADF obteve maior valor de módulo elástico em todas as idades.

O comportamento do módulo elástico dos concretos com ADF foi parecido com o comportamento dos concretos de referência. As bibliografias revisadas demonstraram ganhos no que tange ao módulo de elasticidade para teores de substituição de até 30% de ADF, sendo que concretos com menores teores alcançaram melhores resultados (Naik; Patel; Parikh; Tharaniyil, 1994; Singh; Siddique, 2012; Prabhu; Hyun; Kim, 2014).

3.5.4 Absorção de água por imersão

Os autores Guney *et al.* (2010) observaram aumento da capacidade de absorção em concretos com 5% de ADF em relação ao concreto referência, resultado verificado na idade de 56 dias. No entanto, os mesmos autores obtiveram redução da capacidade de absorção para teores maiores de substituição, 10% e 15%, o que pode ser explicado pela redução do volume de vazios internos em decorrência da incorporação de ADF nas misturas. Basar *et al.* (2012) obtiveram um aumento de capacidade de absorção de água do concreto com incorporação de ADF, o que foi justificado pelo aumento da área superficial gerado pelas partículas finas de ADF.

Já Kaur *et al.* (2013) relataram queda na absorção de água dos concretos com a adição de ADF e fungos, isso ocorre devido ao preenchimento dos vazios internos por esporos de fungos, o que reduz significativamente a porosidade do concreto.

Manoharan *et al.* (2018) obtiveram uma diminuição na absorção de água do concreto em seu estudo para teores de substituição de até 10% de ADF no concreto. Para teores acima de 10%, evidenciou-se um aumento da absorção provocada pela presença de excesso de finos na ADF. Salokhe *et al.* (2014) não observaram nenhuma mudança significativa no que tange à absorção de água dos concretos com ADF.

4 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O conceito de sustentabilidade tem ganhado relevância nas atividades industriais, sendo visto como uma forma de reduzir os impactos ambientais causados pela geração de resíduos. Na indústria do concreto, o conceito de sustentabilidade é particularmente importante devido ao elevado consumo de recursos naturais e a geração de resíduos nocivos ao meio ambiente, entre os quais, o dióxido de carbono (CO₂) (Copetti, 2019).

Uma das principais causas do aquecimento global é a emissão dos gases de efeito estufa. Dentre esses gases, destaca-se o CO₂, por ser responsável por aproximadamente 65% desse fenômeno, e a indústria cimentícia, por 5% das emissões totais desses gases. Essa problemática tem se agravado nas últimas décadas devido ao aumento acentuado da demanda por cimento Portland, seja no emprego de argamassas, seja no concreto e outros derivados, o que fez com que esse material se tornasse, individualmente, o mais consumido pelo homem em suas diversas formas. A produção mundial de cimento de 2018 foi de 4,10 bilhões de toneladas (USGS, 2019) e a do Brasil, 52 milhões de toneladas.

4.1 CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

O conceito de construção sustentável é baseado no desenvolvimento de um modelo que permita a construção civil enfrentar e propor soluções aos principais impactos ambientais hodiernos sem renunciar à tecnologia e à criação de construções que atendam às necessidades de seus usuários (Araujo Junior; Sá, 2017).

Conforme o que preconiza o IDHEA (Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica), a construção sustentável consiste em um sistema construtivo que visa garantir qualidade de vida às gerações atuais e futuras. Esse tipo de construção provoca alterações no entorno de modo a atender às necessidades da edificação bem como as necessidades humanas, preservando o meio ambiente e os recursos naturais.

A base da sustentabilidade é apoiada no *Triple Bottom Line* ou “3BL” (Figura 5), termo criado por John Elkington, em 1990, que trouxe uma nova perspectiva em relação às questões ambientais. Nesse viés, as organizações passam a considerar a

necessidade de uma interação harmônica e equilibrada entre as três dimensões da sustentabilidade — meio ambiente, sociedade e economia. Até meados dos anos de 1990, o sucesso das empresas estava vinculado exclusivamente à dimensão econômica, considerando, desse modo, uma visão equivocada que não reconhece a interdependência entre as dimensões do *Triple Bottom Line*, em que as economias não se sustentam sem o meio ambiente e a sociedade (Walker; Yu; Zhang, 2020).

Com o passar dos anos, as organizações passaram a se preocupar em atender às diversas expectativas mercadológicas, fornecendo bens e serviços em concordância com os novos anseios de seus consumidores (Jabbour; Jabbour, 2016). As empresas têm sido pressionadas, nesse sentido, não apenas a mudar a forma como fazem negócios, mas também a monitorar e relatar mais do que apenas seu desempenho econômico (Azevedo; Barros, 2017). A reputação positiva resultante da consistência geral de uma empresa, a partir da adoção efetiva da estrutura do *Triple Bottom Line*, alavanca a competitividade geral de uma empresa no mercado (Okanga; Groenewald, 2017).

Figura 5 — *Triple Bottom Line*



Fonte: Azevedo e Barros (2027).

Como resposta, alguns esforços no estabelecimento de indicadores e medidas de sustentabilidade ao nível de negócio foram realizados (Azevedo; Barros, 2017) e, desde então, a sustentabilidade passou cada vez mais a integrar os modelos de

negócios das empresas de forma mais profunda. Sem a integração das três dimensões que compõe o *Triple Bottom Line* ao modelo de negócios e ao processo de gestão estratégica da organização, a adesão efetiva à sustentabilidade pode não ser facilmente mantida por todos na organização (Mitchell; Curtis; Davidson, 2008). Ademais, o foco no lucro do acionista pode ser prejudicial principalmente ao meio ambiente e à sociedade, sendo capaz de impedir a geração de valor no longo prazo (Walker; Yu; Zhang, 2020).

4.1.1 Concreto e a sustentabilidade

A indústria cimentícia é responsável por 3% das emissões mundiais de gases do efeito estufa e por 5% das emissões de CO_2 , aproximadamente. Desses valores, sabe-se que 50% das emissões oriundas da indústria cimentícia são referentes ao processo produtivo do *clinker*, mais especificamente durante o processo de clinkerização, cerca de 10%, ao transporte e uso da eletricidade, e os 40% restantes são provenientes da queima dos combustíveis para o aquecimento dos fornos (Cement Sustainability Initiative, 2017).

Além disso, estima-se que a fabricação de cimento Portland, em escala mundial, seja da ordem de 1,7 bilhões de toneladas por ano, quantidade que seria suficiente para gerar 6.000m³ de concreto por ano ou 1m³ por habitante (Gartner, 2010).

Só no Brasil, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022), a produção, em 2022, foi de 63,5 milhões de toneladas, considerando que a emissão específica de CO_2 por tonelada de cimento é de 564 kg.

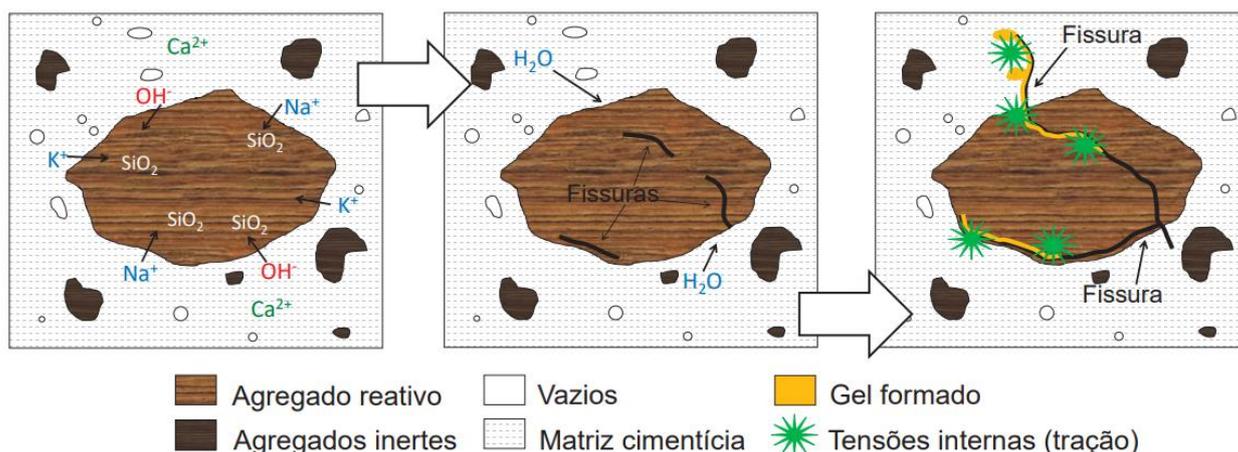
Os impactos gerados pelo processo produtivo do cimento podem ocorrer em praticamente todas as suas fases, desde a extração e produção até a sua disposição final, o que faz com que a indústria do cimento tenha um elevado potencial poluidor, haja vista que há fontes de poluição em todas as etapas do processo: moagem e homogeneização das matérias-primas, clinkerização em forno rotativo, resfriamento do clinker, moagem, adições e produção do cimento, ensacamento e expedição, e pontos de transferência de materiais (Lorençetti, Marçal, 2017; Maury, 2012).

5 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) foi reconhecida a partir de Stanton nos anos de 1940 após identificar indícios do problema em pavimentos na Califórnia. Sua publicação foi precursora para as investigações em campo e despertou o interesse dos pesquisadores ao redor do mundo sobre o tema (Gillott, 1975; Forster *et al.*, 1998; Fournier; Bérubé, 2000). Após 80 anos de estudos, inúmeras pesquisas já foram realizadas sobre a RAA e diversas obras em todo o mundo já foram identificadas em processo de deterioração devido a essa reação. A RAA é definida como um processo deletério que ocorre entre alguns componentes reativos de certos agregados e hidróxidos alcalinos, mais especificamente, os álcalis Na^+ , K^+ e hidróxido OH^- , presentes na solução de poros da matriz do concreto. Esses hidróxidos alcalinos são responsáveis por manter a alcalinidade elevada nos poros, favorecendo a formação e manutenção, por exemplo, da camada passivadora do aço em estruturas de concreto armado (Huet *et al.*, 2005).

Porém, ao mesmo tempo que propicia a passivação do aço, pode auxiliar no desencadeamento da reação álcali-agregado. De acordo com Fournier e Bérubé (2000), três condições são necessárias para iniciar e sustentar a RAA: fases reativas nos agregados, elevada concentração de hidróxidos alcalinos na solução de poros do concreto e umidade. O resultado da RAA é um gel que se forma nas fissuras dos agregados e/ou na sua superfície e que, com acesso à água, tende a expandir, gerando tensões internas nos elementos de concreto (Figura 6). Essas tensões podem causar trincas e favorecer o processo de degradação do elemento pela entrada de outros agentes do meio, por exemplo, cloretos e sulfatos (Diamond, 1975; Fournier; Bérubé, 2000).

Figura 6 — Esquema da reação álcali-agregado



Fonte: Frare *et. al.* (2023).

A RAA pode ser classificada, basicamente, de duas formas, as quais dependem do tipo e mineralogia do agregado envolvido: a reação álcali-carbonato (RAC) e a reação álcali-sílica (RAS). A RAC pode ocorrer com o uso de agregados provenientes de rochas calcárias dolomíticas, sendo que seus mecanismos de degradação e desenvolvimento são pouco conhecidos. Já a RAS é a mais comum e relatada entre as duas. Ela ocorre devido a diferentes formas de sílica reativa presente nos agregados (Alexander, 2019).

Basicamente, o que ocorre na reação é o processo ilustrado na Figura 6. O grupo silanol (Si-OH) e siloxano (Si-O-Si), presente na sílica dos agregados, são atacados pelos íons hidroxila e substituídos por pares de SiO⁻. Por sua vez os cátions em solução (Na⁺ e K⁺) são atraídos então pelas cargas negativas desses pares formados. O resultado dessa reação é a formação de um gel sílico-alcálico (Glasser; Kataoka, 1981; Taylor, 1997). Esse gel é basicamente composto por silicato de sódio e potássio em variadas proporções, podendo incorporar também íons de cálcio disponíveis na solução (Glasser; Kataoka, 1981; John; Poole; Sims, 2012). Essa reação contínua modifica e danifica a estrutura inicial da sílica e favorece a absorção de mais álcalis e água (Taylor, 1997). A quantidade e presença dos íons (Na⁺, K⁺ e Ca²⁺) determina importantes propriedades do gel. Caso o mesmo seja formado num ambiente saturado de Ca²⁺ e este for absorvido pelo gel, C-S-H pode ser o produto final. O que é diferente do gel formado pelos íons Na⁺, K⁺, que é expansível na presença de água (Bazant; Steffens, 2000).

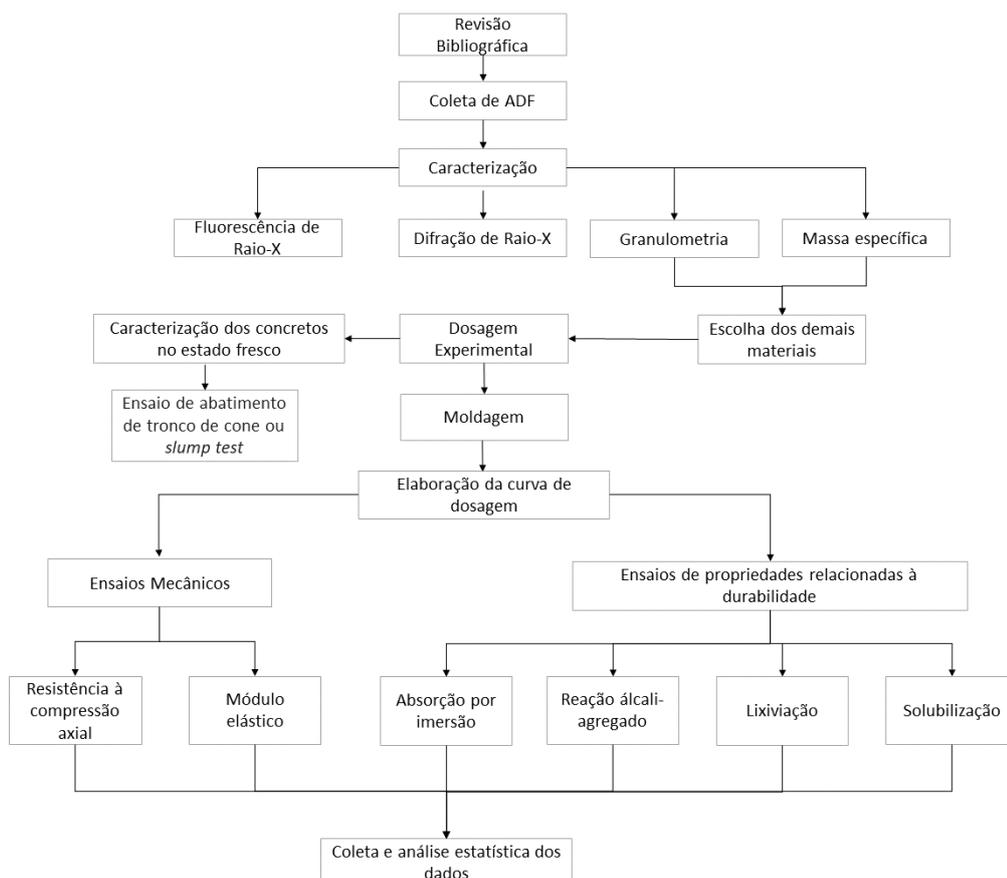
São diversas as fases reativas que podem ser encontradas nos agregados. Alexander (2019) traz uma tabela adaptada de Oberholster (2009), no qual apresenta minerais, rochas e algumas substâncias que têm potencial reação com os álcalis presentes no concreto. Além disso, a norma brasileira que especifica os ensaios para classificação de agregados quanto a reatividade, NBR 15577 (ABNT, 2018), apresenta na sua parte 3, uma relação dessas rochas e minerais passíveis à ocorrência da reação. Os principais minerais apontados são alguns tipos de sílica metaestáveis, como opala, tridimita, cristobalita; além de algumas formas de quartzo e vidros vulcânicos. Um dos fatores responsáveis pela severidade da reação é o grau de reatividade dos agregados ou da sílica reativa, no caso da RAS (Marzouk; Frare *et. al.* (2023).; Binal, 2015).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, detalha-se o roteiro metodológico seguido para a realização da presente pesquisa (Figura 7). Em primeiro plano, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema de modo a reunir as fontes principais e mais atuais para embasar a pesquisa. Posteriormente, o material (ADF) foi coletado e caracterizado para então nortear a escolha dos demais constituintes do concreto a serem empregados, bem como a dosagem dos traços a serem executados. Feita a dosagem e moldagem dos corpos de prova, os concretos foram então submetidos a ensaios que objetivaram avaliar suas propriedades mecânicas, bem como aspectos relacionados à durabilidade, como a absorção de água e a reação álcali-agregado.

Este estudo experimental pode ser classificado como qualitativo, de modo a avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, os impactos do emprego de ADF no concreto em diferentes teores (em massa) de substituição.

Figura 7 — Fluxograma experimental



Fonte: elaborado pela autora (2023).

6.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta fase do trabalho, estão as variáveis da pesquisa, que podem ser as seguintes: independentes, de resposta, fixas e não controladas.

6.1.1 Variáveis independentes

São as variáveis controladas que servem de parâmetro para a presente pesquisa, sendo listadas para serem avaliadas no decorrer do estudo, em função de suas influências sobre as variáveis de resposta. São elas duas:

- a) os percentuais de ADF empregados: foram empregados três teores diferentes de substituição de areia natural por ADF no concreto: 25,50 e 100%;
- b) idade de ensaio: resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias, módulo de elasticidade aos 28 dias, absorção aos 28 dias e reação álcali-agregado com medições ao longo de 30 dias corridos.

6.1.2 Variáveis de resposta

São quatro as variáveis afetadas diretamente pelas variáveis independentes:

- a) resistência à compressão axial;
- b) módulo de elasticidade;
- c) absorção por imersão;
- d) expansão das barras de argamassa no ensaio de reação álcali agregado.

6.1.3 Variáveis fixas

As variáveis fixas são as seguintes:

- a) Cura dos corpos de prova: cura ambiente em condições controladas nas primeiras 24 horas após a moldagem, com proteção superior de lona plástica. Após a desforma, armazenamento dos corpos de prova em câmara úmida, com umidade relativa $\geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C até a idade dos respectivos ensaios;

- b) abatimento: o abatimento do tronco de cone, definido em 120 ± 20 mm (NBR NM 67; ABNT, 2020);
- c) betoneira e equipamentos para a realização dos ensaios.

6.1.4 Variáveis não controladas

As variáveis não controladas são aquelas que, devido às limitações técnicas inerentes da execução dos experimentos, não puderam ser controladas. Entre essas variáveis estão a temperatura e umidade relativa do ambiente de concretagem, bem como dos locais onde eram realizadas as medições de expansão das barras de argamassa do ensaio da reação álcali-agregado.

6.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados nessa pesquisa e suas respectivas caracterizações, bem como os princípios de dosagem empregados, estão apresentados a seguir.

6.2.1 Cimento

Com o objetivo de avaliar o comportamento do resíduo como substituição ao agregado miúdo de origem natural, foi utilizado o cimento do tipo CPV-ARI, por ser o cimento nacional com menor teor de adições minerais. O cimento empregado é o CPV ARI conforme a ABNT NBR 16697(2018).

6.2.2 Areia descartada de fundição (ADF)

A areia de descarte de fundição (ADF) utilizada nessa pesquisa é um resíduo sólido, gerado em uma planta industrial localizada na cidade de Nova Petrópolis, estado do Rio Grande do Sul. Segundo dados fornecidos pela empresa, sua produção semanal é da ordem de 100 t.

O material foi fornecido pela empresa e devidamente acondicionado de modo a evitar a contaminação externa. E, em seguida, iniciou-se o processo de caracterização através da análise química da areia de fundição, realizada em

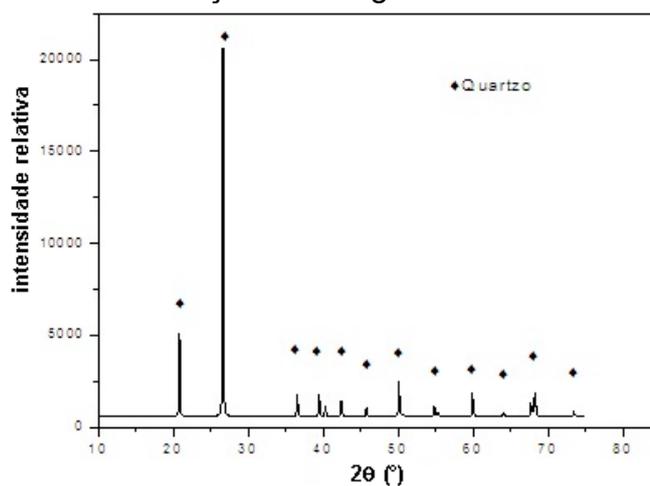
laboratório externo, por fluorescência de raios-X (FRX), calculada para óxidos, utilizando um aparelho Shimadzu, modelo XRD 1800. A análise mineralógica foi realizada por difração de raios-X (DRX), método não-orientado, utilizando um difratômetro da Philips, modelo X'pert. A análise termogravimétrica (ATG) foi realizada em um aparelho Shimadzu TG50. Os resultados são apresentados, respectivamente, pela Tabela 5, Figura 8 e Figura 9.

Tabela 5 — Análise química da “areia de fundição” por fluorescência de raios-X

Analito	Resultado %
SiO ₂	93,61
Al ₂ O ₃	3,37
K ₂ O	1,40
Na ₂ O	0,58
TiO ₂	0,36
CaO	0,33
Fe ₂ O ₃	0,30
ZrO ₂	0,01

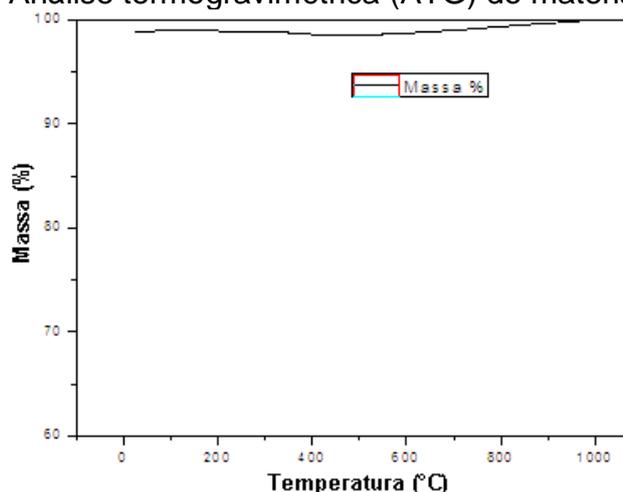
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 8 — Análise mineralógica por difração de raios-X da “areia de fundição” investigada



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 9 — Análise termogravimétrica (ATG) do material em estudo



Fonte: elaborado pela autora (2023).

As análises químicas (FRX) e mineralógica (DRX) indicam que o resíduo é composto basicamente de quartzo de estrutura cristalina. Da mesma forma, a análise termogravimétrica (ATG) é similar à de um material com perda ao fogo mínima (dentro mesmo da margem de erro desse tipo de análise), correspondente ao mineral quartzo.

No que diz respeito às características físicas, a ADF foi ensaiada conforme as instruções da NBR17054 (2022). Conforme os resultados do ensaio (Tabela 6), observa-se que se trata de uma areia de graduação fina (NBR 7211, 2009) situada na zona utilizável inferior (com módulo de finura entre 1,55 e 2,20) e com massa específica de 2,6 m/cm³.

Tabela 6 — Composição Granulométrica da areia de fundição

Abertura da peneira (mm)	ADF		
	Massa retida (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada
4,75	0	0	0
2,36	0	0	0
1,18	3	1	1
0,6	25	9	10
0,3	127	42	52
0,15	129	43	95
Fundo	16	5	100
Dimensão máxima característica			1,18 mm
Módulo de finura			1,58
Massa específica			2,6 g/cm ³

Fonte: elaborado pela autora (2023).

No que tange a caracterização quanto à forma dos grãos, a ADF teve suas frações caracterizadas em microscópio ótico (Anexo 9.1) da marca Zeiss Stemi 508,

com ampliação de 0,65x. Pelas imagens obtidas, foi possível perceber, por meio de análise visual, conforme estabelece a NBR 7389-1 (2009), uma predominância de grãos subarredondados baixos com superfície polida (Figura 10).

Figura 10 — Aspecto superficial da fração de ADF retida na peneira 1.18mm (imagem obtida em microscópio ótico com ampliação de 0,65x)

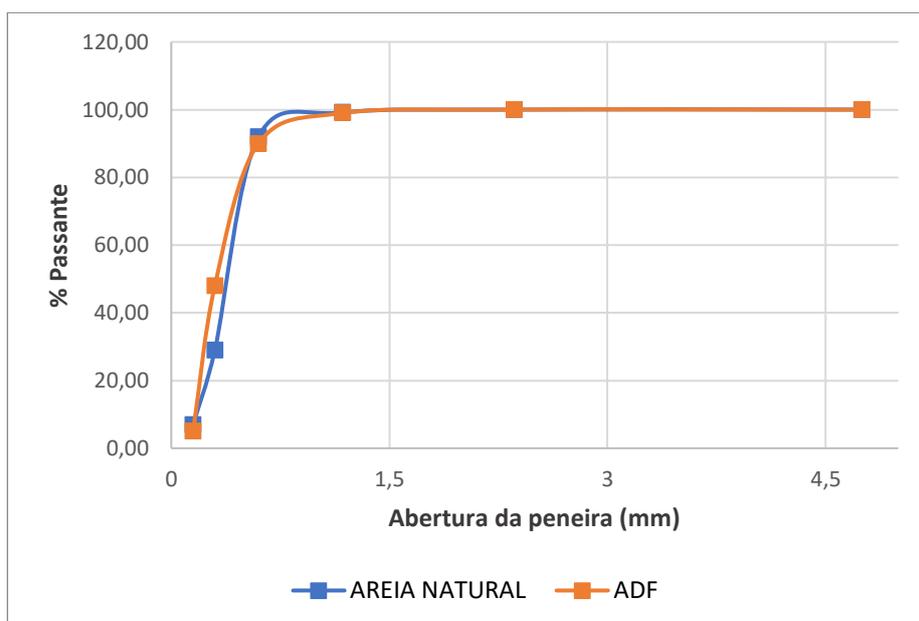


Fonte: elaborado pela autora (2023).

6.2.3 Agregados de origem natural

A fim de estabelecer um parâmetro comparativo, o agregado miúdo natural utilizado foi uma areia quartzosa, caracterizada segundo as diretrizes da NBR 7211(2022) como areia de graduação fina (NBR 7211 ,2022) situada na zona utilizável inferior e, portanto, com granulometria (Tabela 7) semelhante à granulometria da ADF, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 — Análise granulométrica dos agregados miúdos utilizados



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 7 — Composição granulométrica da areia natural

Abertura da peneira (mm)	Areia natural (areia fina)		
	Massa retida (g)	% Retida em cada peneira	% Retido acumulado
4,75	0	0	0
2,36	0	0	0
1,18	1	0	0
0,6	1	1	1
0,3	210	70	71
0,15	65	21	93
Fundo	24	8	100
Dimensão máxima característica			0,6 mm
Módulo de finura			1,68
Massa específica			2,68g/cm ³

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Como agregado graúdo, empregou-se brita basáltica de origem natural, caracterizada de acordo com as diretrizes da NBR 248 (2003), com dimensão máxima característica de 25 mm (Tabela 8), sendo, portanto, classificada pela NBR 7111 (2009) como brita 2.

Tabela 8 — Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	Agregado graúdo		
	Massa retida (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada
25	0	0	0
19	832	8	8
12,5	8364	84	92
9,5	783	8	100
Fundo	40	0	100
Dimensão máxima característica			25 mm
Massa específica			2794,68 g/cm ³

No que tange a caracterização quanto à forma dos grãos, a areia natural foi caracterizada da mesma maneira que a ADF, com suas frações caracterizadas em microscópio ótico da marca Zeiss Stemi 508, com ampliação de 0,65x. Por meio das imagens, é possível perceber, na areia de origem natural, uma predominância de grãos subarredondados com superfície mais rugosa em relação à ADF utilizada nesse estudo, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 — Aspecto superficial da fração de areia natural retida na peneira 1,18 mm; (imagem obtida em microscópio ótico com ampliação de 0,65x)



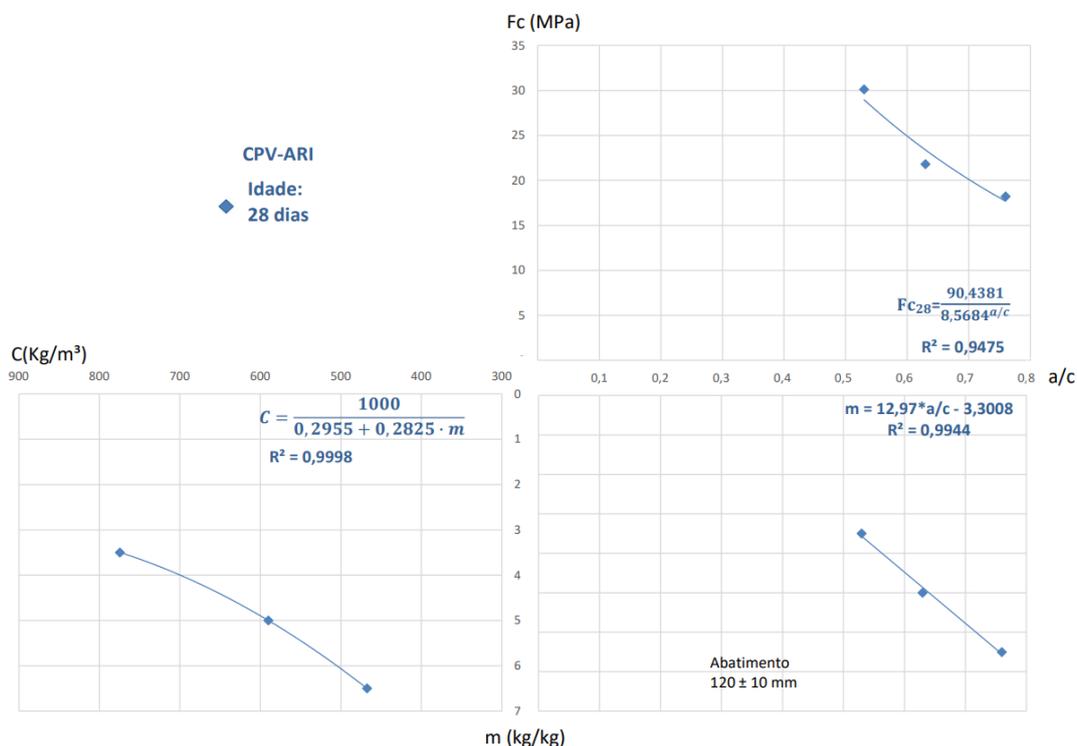
Fonte: elaborado pela autora (2023).

6.3 METODOLOGIA

6.3.1 Dosagem dos traços

O estudo da dosagem do concreto foi realizado de acordo com o método proposto por Helene e Terzian (1993), por meio da qual foi elaborada uma curva de dosagem para areia natural (Figura 13) em que foram testados três traços.

Figura 13 — Diagrama de dosagem em areia natural



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os traços testados representam três pontos da curva de dosagem, sendo eles: um traço intermediário em proporção 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa); um traço rico 1:3,5(cimento: agregados secos totais, em massa) e um pobre em cimento com proporção de 1:6,5(cimento: agregados secos totais, em massa).

Tabela 9 — Dados da curva de dosagem experimental com areia natural

Areia Natural			
Traço unitário (1:m) (Kg/Kg)	Relação a/c	Fc28 Médio (Mpa)	Consumo de Cimento (Kg/m³)
01:3,5	0,53	30,129	774,35
01:5	0,55	21,798	590,09
01:6,5	0,76	18,217	467,49

Fonte: elaborado pela autora (2023).

O teor ideal de argamassa foi então determinado experimentalmente, seguindo os procedimentos recomendados pelo método IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1993). Por meio do traço intermediário, definiu-se então, por tentativas e observações práticas, o teor mínimo de argamassa no concreto, que por sua vez é responsável

pela produção de uma mistura adequada para lançamento em forma, com menos riscos de fissuração de origem térmica ou retração por secagem (HELENE e TERZIAN, 1993). Fixou-se, desse modo, a consistência do concreto em 120 ± 10 mm, medido por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone ABNT NBR NM 67:1998. O teor de argamassa encontrado experimentalmente para esse projeto foi de 50%, resultando em uma relação água/cimento igual a 0,55.

Sabendo o valor do teor de argamassa, e considerando o abatimento estabelecido, determinou-se a relação água/cimento para os traços auxiliares (1:3,5 e 1:6,5). Após a concretagem dos traços, foram moldados os corpos de provas cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) de concreto (3 corpos-de-prova para cada traço), obtendo-se as resistências à compressão aos 28 dias, de cada um dos traços executados, de modo a permitir a elaboração da curva de dosagem (Figura 4).

Posteriormente, o traço intermediário 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) foi replicado com as respectivas substituições de areia natural por ADF nas porcentagens de 25%, 50% e 100% em massa, dado que os valores de massa específica da ADF e da areia natural eram próximos. Os traços foram elaborados obedecendo a proporcionalidade das substituições conforme expressa a tabela 10.

Tabela 10 — Relação de proporcionalidade em massa dos parâmetros de dosagem dos concretos executados

Denominação do traço	Cimento	Areia Natural	Areia de fundição	Brita	Relação a/c	Abatimento (mm)
REF.	1	2	0	3	0,55	120
25% ADF	1	1,5	0,5	3	0,5	125
50% ADF	1	1	1	3	0,49	115
100% ADF	1	0	2	3	0,46	110

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Pode-se perceber que houve uma redução da relação a/c para o traço intermediário a medida em que aumentou o percentual de substituição de areia natural por ADF. Isso pode estar relacionado provavelmente ao formato dos grãos (Figura 10 e Figura 12), uma vez que a textura superficial da areia natural é mais rugosa que a da areia de fundição, essa característica juntamente ao MF é possivelmente responsável pela redução da relação água cimento dos traços com substituição em detrimento do traço referência.

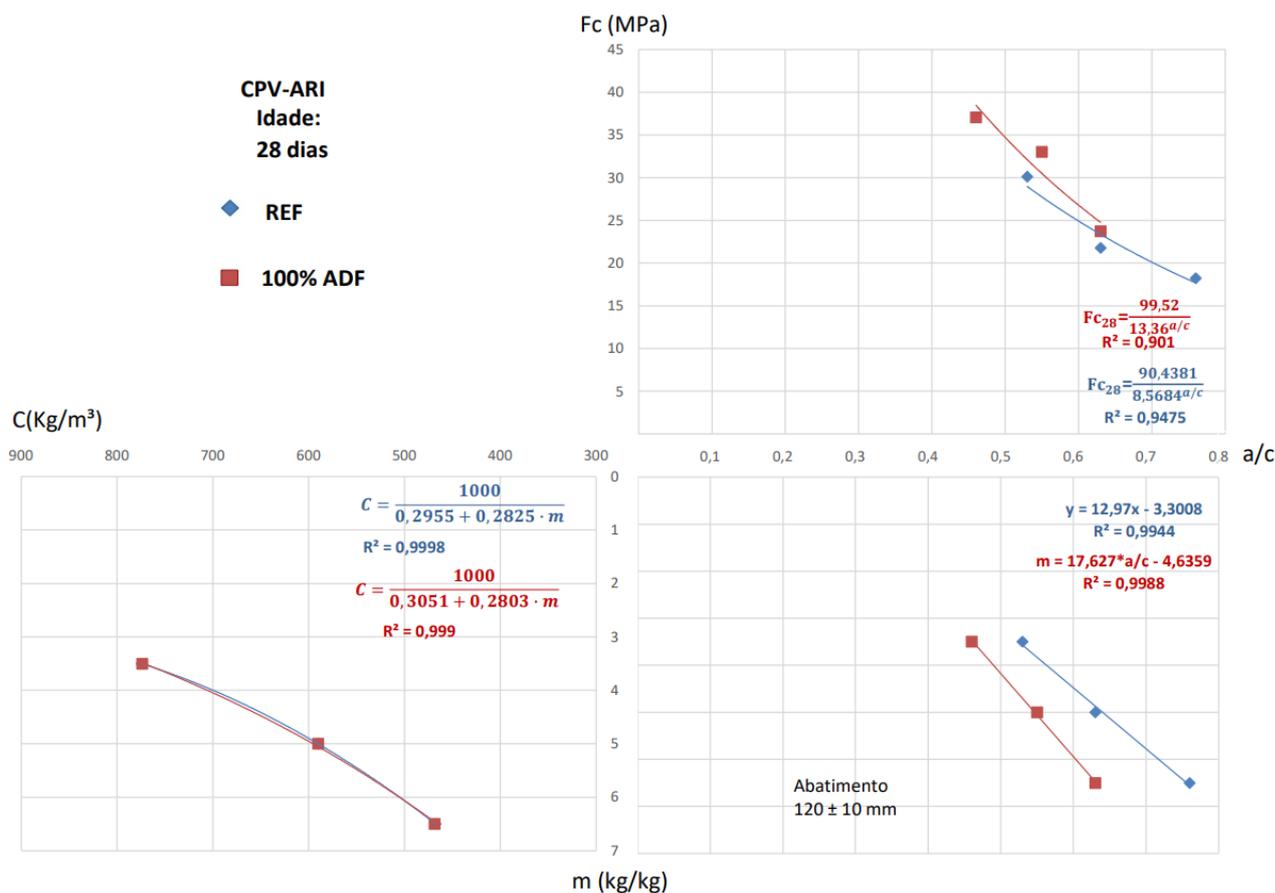
Não foram feitos traços auxiliares (1:3,5 e 1:6,5) para os concretos com teores de substituição de 50% e 25% de ADF devido a limitação na quantidade de material disponível. Além disso, conforme será visto nos capítulos seguintes os resultados mais significativos foram alcançados pelo traço com substituição de 100% de ADF, para o qual foram então elaborados os traços intermediários (Tabela 11) de modo a permitir a construção de uma curva de dosagem (Figura 5) que permitiu uma análise comparativa com a dosagem feita em areia natural.

Tabela 11 — Dados da curva de dosagem experimental com 100% de ADF

ADF			
Traço unitário (1:m) (Kg/Kg)	Relação a/c	Fc28 Médio (Mpa)	Consumo de Cimento (Kg/m³)
01:3,5	0,46	37,08	773,79
01:5	0,55	33,04	590,07
01:6,5	0,63	23,75	468,75

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Figura 14 — Diagrama de dosagem comparativo (dosagem com 100% ADF e dosagem em areia natural)



Fonte: elaborado pela autora (2023).

6.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova com substituições de 25%,50% e 100% de areia natural por ADF. Quanto ao processo de mistura dos materiais, esse se deu através da utilização de uma betoneira planetária de eixo vertical, devidamente imprimada com argamassa de cimento e areia oriundos desse trabalho. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi efetuada a partir da colocação de toda a brita do traço, seguindo com um terço de água. Posteriormente foram adicionados o cimento, o restante da água e a areia.

O tempo decorrido desde a colocação da água na brita até o ensaio de abatimento do tronco de cone era de 5 minutos. Após o ensaio, o concreto utilizado era devolvido para a betoneira e homogeneizado por mais 30 segundos. Na sequência era realizado o ensaio de massa específica no estado fresco, sendo o concreto devolvido novamente à betoneira após sua realização. O concreto era misturado por mais 30 segundos e então era realizado o processo de moldagem dos corpos de prova. Para cada traço foi necessária uma betonada, sendo o procedimento de confecção dos concretos mantido fixo para todas as betonadas realizadas

O abatimento de tronco de cone *Slump Test* foi medido conforme (Figura15) a ABNT NBR NM 67:1998, para os concretos estudados adotou-se um limite de 120 ± 10 mm.

Figura 15 — Ensaio de abatimento *Slump test*



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para cada concreto estudado foi realizada uma betonada, sendo que em uns 16 corpos de provas cilíndricos (100mmx200mm) foram moldados. Destes, nove

foram destinados ao ensaio de resistência à compressão axial, três para o ensaio de módulo elástico, e dois para o ensaio de absorção por imersão, conforme o programa experimental o ANEXO 9.2.

6.3.3 Cura

Após moldagem, os corpos de prova ficaram expostos à temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida sob temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $>95\%$, onde permaneceram até as datas dos respectivos ensaios de 3, 7 e 28 e 28 dias após a moldagem.

6.3.4 Ensaio de resistência à compressão axial

O método de ensaio de resistência à compressão do concreto segue as determinações da NBR 5739 (1994), que consiste na aplicação controlada de um carregamento vertical centrada na face superior do corpo-de-prova (CP) cilíndrico de concreto, de dimensões 9,5 x 19 cm. Para a realização do ensaio os CP's tiveram suas extremidades regularizadas em retífica de modo a garantir que as superfícies de aplicação do carregamento estivessem lisas e livres de saliências que pudessem provocar a concentração de tensões durante o ensaio. Posteriormente a esse processo os CP's foram ensaiados em uma prensa servo hidráulica EMIC, com célula de carga de 200kN, onde foram devidamente posicionados entre os pratos de compressão e receberam o carregamento até a ruptura.

6.3.5 Ensaio de módulo elástico

O ensaio de módulo de elasticidade à compressão dos corpos de prova de concreto foi realizado conforme NBR 8522 (ABNT, 2008). Foram utilizados dois corpos de prova para cada traço, a fim de determinar o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade com suas dimensões devidamente medidas com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm. Os corpos de prova foram submetidos a séries de carregamentos e descarregamentos, com força de ruptura em torno de 30% da prevista, numa velocidade de $(0,45 \pm 0,15 \text{ MPa/s})$, conforme as instruções da norma vigente. As deformações foram medidas através de extensômetros com sensores em cada lado do corpo de prova (Figura 16).

Figura 16 — CP com extensômetros durante o ensaio de módulo elástico



Fonte: elaborado pela autora (2023).

6.3.6 Ensaio de absorção por imersão

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos concretos estudados nesse trabalho quanto à durabilidade, foi realizado o ensaio de absorção de água, por imersão total, seguindo os padrões normativos estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Ao todo foram moldados 2 corpos de prova para cada traço realizado e esses exemplares colocados em câmara úmida. Após o período de cura, mais precisamente aos 28 dias, os corpos de prova foram colocados em uma estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 72h, até que fosse atingida a constância de massa para a obtenção de. Depois de retirados da estufa, os corpos de prova foram resfriados em temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e determinada sua massa seca com auxílio de uma balança, a qual foi utilizada em todo o ensaio. Posteriormente ao processo mencionado acima, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e mantidos por 72 horas nessa condição. Após o término da etapa de saturação, as amostras foram colocadas em um recipiente com água que foi progressivamente levada à ebulição e mantidos por 5 horas, com volume constante. Em seguida, a água foi esfriada naturalmente até a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e então foi obtida a massa dos CPs com o auxílio de uma balança hidrostática. Feito isso, as amostras foram retiradas da água e enxugadas com o auxílio de um pano úmido para a determinação da massa com o auxílio de uma balança.

Por fim calculou-se a absorção de água por imersão por meio da equação 01:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa.

6.3.7 Caracterização por solubilização e lixiviação

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos concretos estudados nesse trabalho quanto à presença de contaminantes presentes na ADF e a possível ocorrência de lixiviação desses componentes, foi realizado o ensaio de solubilização e lixiviação, seguindo os padrões normativos estabelecidos pelas respectivas normas vigentes (NBR 1006, 2004; NBR 1005, 2004). Para a execução desses ensaios foi feita amostragem dos resíduos de concreto a serem estudados, bem como de ADF conforme os procedimentos previstos na NBR 1007 (2004).

Para o ensaio de lixiviação, as amostras de concreto foram trituradas e posteriormente os fragmentos foram peneirados e em peneira de malha 9,5 mm conforme consta em norma. Em seguida, foram pesadas e separadas duas amostras de 250 g para cada concreto, bem como de ADF (as amostras de ADF seguiram o mesmo processo com exceção do processo de trituração). As amostras foram então transferidas para o frasco de lixiviação onde foi adicionada a solução utilizada, de composição estabelecida em norma. Feito isso, o frasco foi fechado e mantido sob agitação durante (18 ± 2) h à temperatura de até 25 °C com uma rotação de (30 ± 2) rpm em agitador rotatório. Após este período as amostras foram filtradas para a obtenção do extrato lixiviado que foi devidamente armazenado e enviado para a análise.

Para o ensaio de solubilização, as amostras de concreto foram trituradas e passadas em peneira de malha 9,5 mm. Em seguida, as amostras foram secas a uma temperatura de até 42 °C em estufa de circulação forçada, em seguida foram separadas duas amostras de cada concreto com 250 g, bem como de ADF de material em frasco de 1500mL. Posteriormente, foi adicionado 1000 mL de água destilada deionizada e isenta de orgânicos, agitando a amostra em baixa velocidade por 5 min.

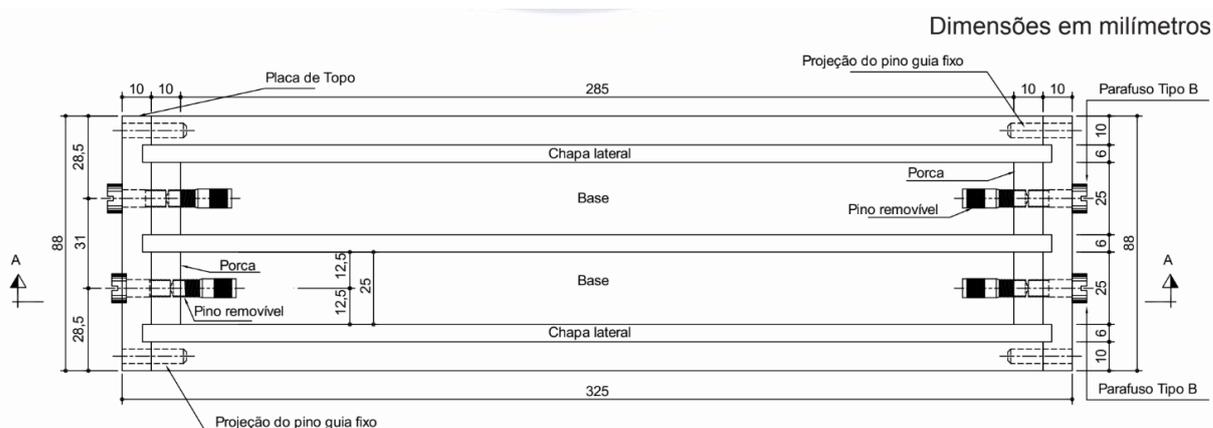
Em seguida, o frasco foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias, em temperatura de até 25 °C. Passado esse período a solução foi filtrada com membrana filtrante de 0,45 µm de porosidade para a obtenção do extrato solubilizado que, por sua vez, foi enviado para análise dos resultados.

Ambos os ensaios foram realizados no LACER (Laboratório de materiais cerâmicos) e as análises (ANEXOS A, B, C e D), em laboratório externo, em razão da limitação das ferramentas de detecção. Por esse motivo, a fim de que fosse possível a comparação dos resultados obtidos com os limites propostos pela NBR 1004 (2004) as análises foram feitas no laboratório CEIMIC.

6.3.8 Ensaio de reação álcali-agregado

Devido a presença de álcalis na ADF, investigou-se a possibilidade de ocorrência de Reação Álcali-Agregado (RAA) por meio do ensaio com barras prismáticas fundamentado pela NBR 15577-4 (2018). Para o ensaio de RAA, foram produzidas argamassas com os respectivos percentuais de substituições em massa, cimento CPV-ARI e a relação água/cimento fixa de 0,47. As areias foram peneiradas de acordo com a série de peneiras propostas pela normativa e as frações, para a composição de cada traço, foram separadas para o preparo das argamassas. Para cada teor de substituição, foram moldadas 3 barras prismáticas em forma metálica (Figura 17) de seção quadrada com (25 ± 7) mm e, de lado, 285 mm de comprimento, com comprimento efetivo de medida de $(250 \pm 2,5)$ mm.

Figura 17 — Moldes vistos em planta



Fonte: NBR 15577-4 (2018).

Para a análise comparativa a composição granulométrica foi ordenada proporcionalmente conforme a Tabela 12.

Tabela 12 — Composição granulométrica das argamassas testadas no ensaio de RAA

Abertura das peneiras NM 248 (ABNT, 2003)	Quantidade de Material por Traço (g)					
	REF	25%ADF		50%ADF		100% ADF
	A.N.	A.N.	ADF	A.N.	ADF	ADF
1,18 mm	346,5	259,8	86,6	173,3	173,3	346,5
600 µm	247,5	185,6	61,9	123,8	123,8	247,5
300 µm	247,5	185,6	61,9	123,8	123,8	247,5
150 µm	148,5	111,4	37,2	74,3	74,3	148,5
Total	990	990		990		990

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Após a confecção das barras essas foram submetidas a um período inicial de cura em câmara úmida a (23 ± 2) °C durante 24h, e posteriormente foram removidas dos moldes, e identificadas para a realização das leituras, conforme o APÊNDICE C, no comparador de comprimento (Figura 18). Após a desmoldagem e a identificação, as barras foram inseridas no banho-termorregulador à (80 ± 2) °C, contendo uma solução de NaOH pelo período de 30 dias, ao longo do qual foram realizadas as leituras das barras em um comparador de comprimento.

Figura 18 — Leitura das barras de argamassa no comparador de comprimento



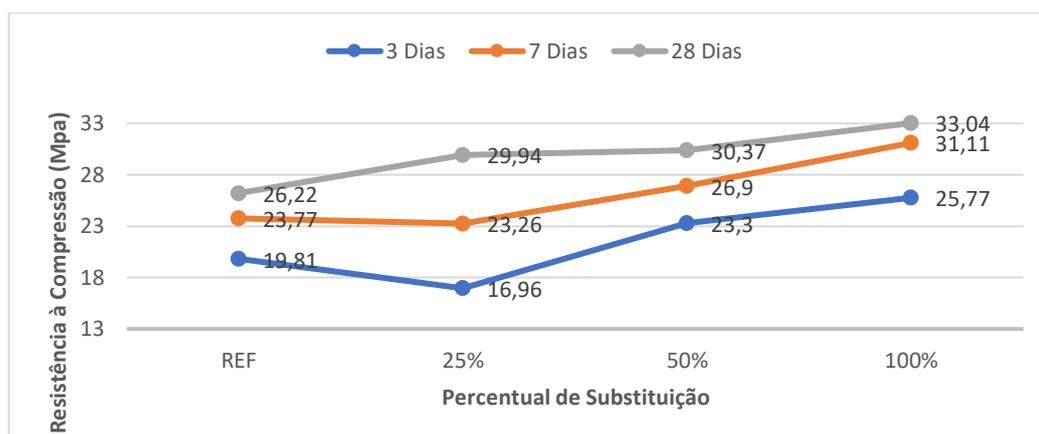
Fonte: elaborado pela autora (2023).

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 19 mostra os resultados de resistência à compressão para as misturas ensaiadas.

Figura 19 — Influência do teor de substituição de agregado miúdo por ADF na resistência à compressão dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os resultados do teste de resistência à compressão axial indicam uma melhora à medida que aumenta o teor de substituição de areia natural por ADF. Para verificar se essa melhora apresenta diferença significativa, foi realizada análise estatística ANOVA *two-way*, com repetição, utilizando os resultados de resistência à compressão para todas as idades e níveis de substituição (Tabela 13).

Tabela 13 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados de resistência à compressão

Resistência à compressão axial						
Efeito	SS	GDL	MQ	F	p	Significância
Idade	146,50	2	73,25	16,885	0,000325	S
% de ADF	202,34	1	202,34	46,641	0,000018	S
Idade e ADF	1,44	2	0,72	0,166	0,849074	NS
Erro	52,06	12	4,34			
Total	402,34	17				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Nota: abreviações convencionais usadas: **SQ** - Soma Quadrada; **GDL** - Graus de liberdade; **MQ** - Média Quadrada; **Teste F** - Valor calculado de F; **p** - Nível de significância; **S** - Significativo; **NS** - Não significativo.

Os resultados dos ensaios revelaram influência estatisticamente significativa na substituição de areia natural por ADF no concreto. Por meio do Teste de Tukey

(Tabela 14), é possível perceber que a diferença significativa diz respeito aos traços com substituição de 100% ADF em relação ao traço de referência, pois apresentaram $p < 0,5$, indicando diferença significativa entre os resultados.

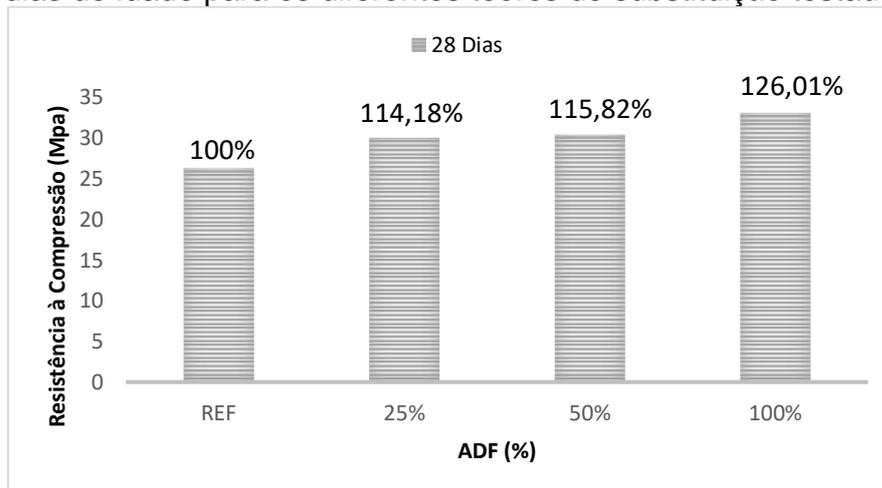
Tabela 14 — *Tukey test*: valores de p para os resultados do ensaio de resistência à compressão

Tukey test — resistência à compressão							
CP	IDADE	% de ADF	p				
			1	2	3	4	5
1	3	0%		0,039013	0,253728	0,000391	0,024893
2	3	100%	0,039013		0,839964	0,072123	0,999772
3	7	0%	0,253728	0,839964		0,010062	0,703353
4	7	100%	0,000391	0,072123	0,010062		0,111294
5	28	0%	0,024893	0,999772	0,703353	0,111294	
6	28	100%	0,000202	0,001700	0,859643	0,859643	0,016928

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Por meio dos resultados, pode-se perceber um ganho de 26% de resistência em relação ao concreto referência (Figura 20). Ganho esse que pode estar relacionado à forma dos grãos, conforme mostra a Figura 1 e Figura 3, que proporcionou, para o concreto com 100% de substituição de areia natural por ADF, redução na relação água/cimento para o mesmo abatimento. Resultados semelhantes aos encontrados por Mavroulidou e Lawrence (2019) e Martins *et al.* (2019).

Figura 20 — Comparativo do ganho percentual de resistência à compressão aos 28 dias de idade para os diferentes teores de substituição testados



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Além do ganho em desempenho mecânico, evidencia-se, por meio dos resultados, uma economia em relação ao consumo de cimento por m^3 , conforme pode ser observado na tabela 15, que traz um comparativo teórico do consumo de cimento obtido por meio do diagrama de dosagem (Figura 14) elaborado nesta pesquisa.

Tabela 15 — Comparativo teórico do consumo de cimento por m³ de concreto

F _{c28} (Mpa)	Consumo de cimento (Kg/m ³)	
	Ref.	100% ADF
20	516,2	484,57
25	642,44	610,33
30	802,88	774,59

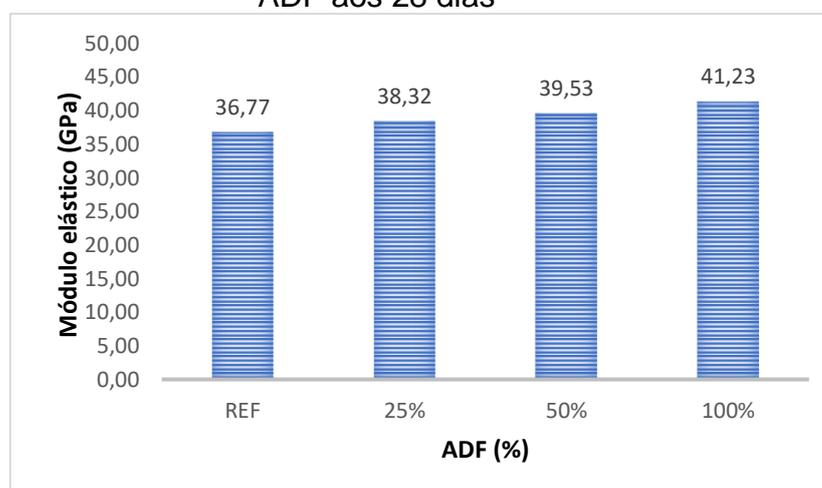
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Esse resultado pode representar ganhos econômicos e ambientais, dada a problemática ambiental existente quanto à produção do *clinker*, principal componente do cimento, material amplamente utilizado na construção civil.

7.2 MÓDULO ELÁSTICO

A Figura 21 ilustra o comportamento do módulo de elasticidade dos concretos com diferentes teores de substituição de areia natural por ADF.

Figura 21 — Módulo de elasticidade dos concretos com diferentes teores de ADF aos 28 dias



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os resultados indicam que o módulo de elasticidade variou significativamente para os teores de substituição estudados, conforme demonstrado pela análise estatística ANOVA (Tabela 16).

Tabela 16 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de módulo elástico aos 28 dias

Módulo Elástico						
Efeito	SS	GDL	MS	F	p	Significância
% de ADF	95,122	1	95,122	13461,000	0,000	S
Erro	0,028	4	0,007			
Total	95,150	5	0,007			

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Nota: abreviações convencionais usadas: **SQ** - Soma quadrada; **GDL** - Graus de liberdade; **MQ** - Média quadrada; **Teste F** - Valor calculado de F; **p** – Nível de significância; **S** – Significativo; **NS** - Não significativo.

Resultados semelhantes também foram encontrados por outros autores (Sinic, 2018; Barros Martins, 2019) que atestam que o ADF influencia o módulo de elasticidade da mesma forma que influencia a resistência à compressão — com tendência a aumentar proporcionalmente com o aumento dos teores utilizados. Por meio do Teste de *Tukey* (Tabela 17), foi possível perceber que a significância é atribuída ao concreto com 100% de ADF em relação ao concreto de referência. Esse resultado é semelhante aos resultados obtidos por meio da análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão.

Tabela 17 — Teste de *Tukey* ensaio de Módulo Elástico

Test de <i>Tukey</i> – Módulo Elástico				
CP	Idade	% de ADF	p	
			1	2
1	28	0%		0,000291
2	28	100%	0,002910	

Fonte: elaborado pela autora (2023).

A principal hipótese é que isso se deve à semelhança do ADF com a areia natural utilizada nesse estudo. Além disso, conforme observado na análise do aspecto visual e no ensaio de absorção, os concretos com ADF mostraram-se mais compactos que o concreto convencional, que proporciona maior densidade e, conseqüentemente, pode ter corroborado com a tendência de crescimento do módulo de elasticidade bem como com os ganhos na resistência à compressão.

Tabela 18 — Comparativo de granulometria das areias empregadas em diferentes pesquisas

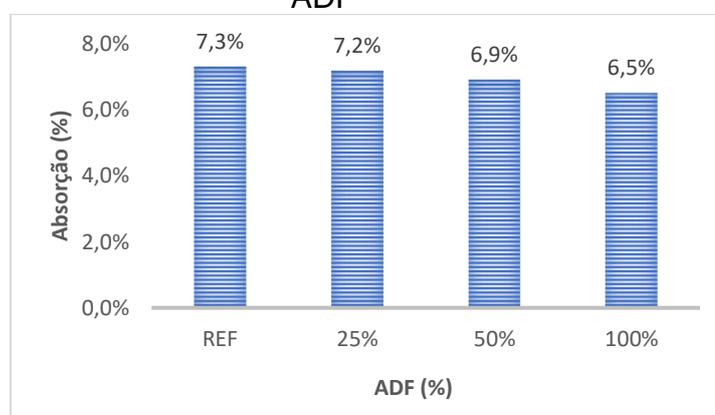
Autor	Módulo de finura ADF	Módulo de finura agregado miúdo convencional	Tipo de ADF
Manoharan <i>et al.</i> (2020)	2,37	2,6	areia ligada quimicamente
Siddique <i>et al.</i> (2011)	1,78	3,03	areia ligada quimicamente
Cremonese (2022)	1,35	2,1	areia ligada quimicamente
Tittarelli (2018)	2,36	2,6	areia ligada quimicamente
Elaborado pela autora (2023)	1,56	1,68	areia verde

Fonte: elaborado pela autora (2023).

7.3 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Quanto à absorção por imersão, a Figura 22 ilustra o comportamento do concreto com substituição de areia natural por ADF.

Figura 22 — Percentual de absorção por imersão total dos concretos com ADF



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Com base na análise estatística (Tabela 18), observa-se que não houve alteração significativa no que diz respeito a essa propriedade, o que significa que os concretos com ADF apresentaram comportamento semelhante ao concreto de referência para todos os teores de substituição.

Tabela 19 — Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de absorção por imersão aos 28 dias

% de absorção dos concretos estudados						
Efeito	SS	GDL	MS	F	p	Significância
% de ADF	0,563	1	0,563	0,310	0,633	NS
Erro	3,625	1				
Total	4,188	2				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Nota: abreviações convencionais usadas: **SQ** - soma quadrada; **GDL** - Graus de liberdade; **MQ** - Média quadrada; **Teste F** - Valor calculado de F; **p** - Nível de significância; **S** - Significativo; **NS** - Não significativo.

Fato que pode ser explicado pela semelhança granulométrica entre as areias utilizadas nesse estudo, o que resultou em um grau de empacotamento semelhante para todos os concretos. Logo é possível inferir que a incorporação de ADF no concreto não é prejudicial no que tange a esse aspecto, o que significa um resultado bastante positivo uma vez que foi possível substituir 100% do agregado de origem natural por ADF sem prejuízo no que diz respeito à absorção.

7.4 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A investigação da ocorrência da reação álcali-agregado revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre as barras com os teores de substituição estudados conforme demonstrado pela análise estatística ANOVA (Tabela 19).

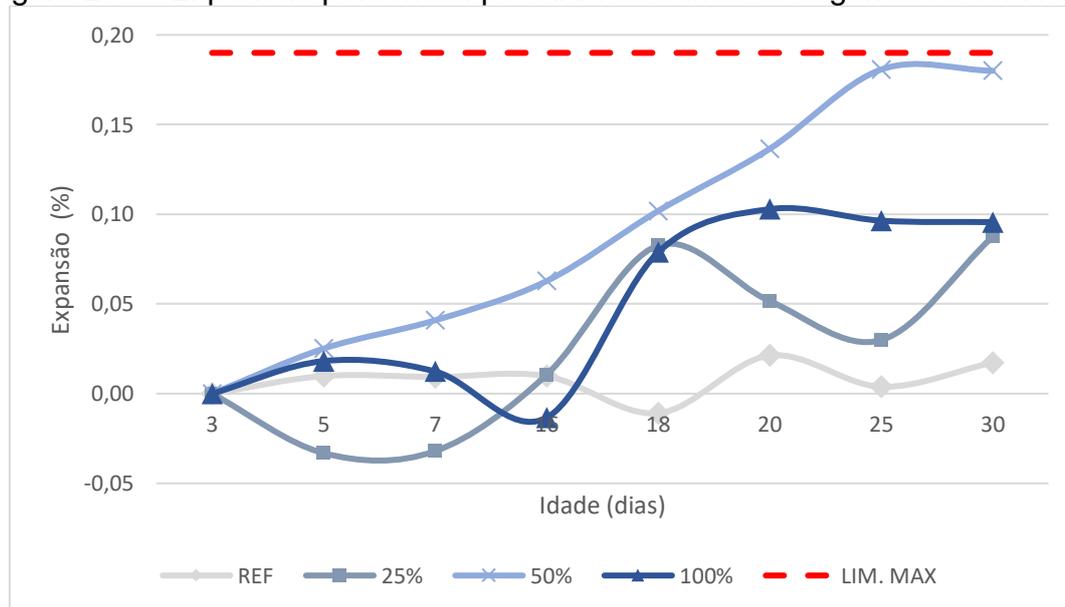
Tabela 20 — Análise Resultados da análise estatística ANOVA para os resultados do ensaio de RAA

% de expansão das barras do ensaio de RAA						
Efeito	SS	GDL	MS	F	p	Significância
% de ADF	0,000	1	0,000	0,316	0,604	NS
Erro	0,001	1	0,000			
Total	0,001	4	0,000			

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Além disso, os valores percentuais de expansão estão abaixo do limite normativo de 0,19% (Figura 23) e, portanto, são considerados potencialmente inócuos (Mavroulidou; Lawrence, 2019).

Figura 23 — Expansão percentual por RAA de barras de argamassa com ADF



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Sobre os valores, nota-se que as barras que mais se aproximaram do limite normativo de expansão (0,19%), curiosamente, foram aquelas com teor de substituição de 50% ADF que atingiram a marca de 0,18% (Figura 19). Com base nisso, sugere-se maior cautela quanto a certos usos desse percentual de substituição, como a sua utilização em concreto para elementos de fundação. Uma alternativa mais segura pode ser o seu uso combinado com materiais mitigadores, como adições

minerais e materiais pozolânicos (Martins, 2022). No entanto, enfatiza-se a necessidade de maiores investigações a respeito desse fenômeno, de modo a caracterizar, detalhadamente, seu mecanismo de ocorrência, no caso de concretos com ADF, dado o resultado limítrofe obtido para as barras com 50% de substituição.

7.5 CARACTERIZAÇÃO POR SOLUBILIZAÇÃO E LIXIVIAÇÃO

Quanto à caracterização pelos ensaios de solubilização (Tabela 20) e lixiviação (Tabela 21), observou-se a neutralização do contaminante Al inicialmente presente na areia de fundição e no concreto de referência. O processo de solubilização e estabilização em matrizes de cimento permite controlar a lixiviação de metais pesados por meio de reações químicas entre silicato de cálcio hidratado (C-S-H), dióxido de carbono e portlandita ($Ca(OH)_2$), resultando na formação de calcita ($CaCO_3$). Este processo altera a solubilidade dos componentes e imobiliza os metais pesados, o que pode ocorrer por adsorção ou interações químicas com a matriz cimentícia (Barros *et al.*, 2020). Portanto, é possível classificar a areia de fundição e o concreto de referência como não perigoso, classe II, e não inerte, classe II A, e o concreto com 100% ADF, como resíduo não perigoso, classe II, e inerte, classe II B, de acordo com a classificação da ABNT NBR 10.004 (2004).

Tabela 21 — Concentração de contaminantes nos extratos solubilizados (ABNT NBR 1006, 2004)

Contaminante (mg/L)	Limite NBR 1004/2004 (mg/L)	Resíduo	Concreto	
			Ref.	100% ADF
Alumínio Total (Al)	0,20	1,872	0,509	0,078
Arsênio Total (As)	0,01	<0,01	< 0,00600	< 0,00600
Bário Total (Ba)	0,70	0,023	0,173	0,174
Cádmio Total (Cd)	0,01	<0,004	< 0,00500	< 0,00500
Chumbo Total (Pb)	0,01	<0,006	< 0,00600	< 0,00600
Cianeto Total	0,07	<0,02	< 0,005	< 0,005
Cloreto	250,00	9,54	13,1	13,5
Cobre Total (Cu)	0,07	0,014	< 0,00500	< 0,00500
Cromo Total (Cr)	0,05	<0,009	0,0439	0,00995
Fenóis Totais	0,01	0,01	< 0,001	< 0,001
Ferro Total (Fe)	0,30	0,235	0,0184	< 0,00600
Fluoreto	1,50	0,995	0,202	0,281
Manganês Total (Mn)	0,10	<0,01	< 0,00600	< 0,00600
Mercúrio Total (Hg)	0,00	<0,01	< 0,00010	0,00011
Nitrato como N	10,00	0,36	1,31	< 0,5
Prata Total (Ag)	0,05	<0,01	< 0,00500	< 0,00500
Selênio Total (Se)	0,01	<0,01	< 0,00600	< 0,00600
Sódio Total (Na)	200,00	43,79	79,84	98,53
Sulfato	250,00	34,7	42,9	132,1
Zinco Total (Zn)	5,00	<0,05	0,009	< 0,00600

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Tabela 22 — Concentração de contaminantes nos extratos lixiviados (ABNT NBR 1005, 2004)

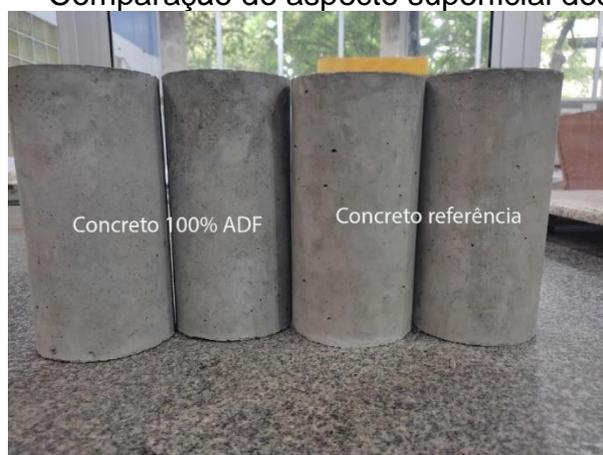
Contaminante (mg/L)	Limite NBR 1004/2004 (mg/L)	Resíduo	Concreto	
			Ref.	100% ADF
Arsênio Total (As)	1,00	<0,01	< 0,00600	< 0,00600
Bário Total (Ba)	70,00	0,058	1,42	1,29
Cádmio Total (Cd)	0,50	<0,004	< 0,00500	< 0,00500
Chumbo Total (Pb)	1,00	<0,006	< 0,00600	< 0,00600
Cromo Total (Cr)	5,00	<0,009	0,0707	0,0193
Fluoreto	150,00	0,143	0,337	0,361
Mercúrio Total (Hg)	0,10	<0,1	< 0,00010	< 0,00010
Prata Total (Ag)	5,00	<0,01	< 0,00500	< 0,00500
Selênio Total (Se)	1,00	<0,01	< 0,00600	< 0,00600

Fonte: elaborado pela autora (2023).

7.5.1 Aspecto superficial

Por fim, quanto ao aspecto superficial, observa-se que não houve alteração significativa, sendo a coloração final dos corpos de prova muito semelhantes na comparação do concreto de referência com o concreto contendo 100% ADF em substituição à areia natural (Figura 24). É importante notar que a cor do concreto está relacionada não apenas ao tipo de agregado utilizado, mas também ao tipo de cimento e suas respectivas adições, além de outras variáveis cruciais, como a relação água-cimento (Battagin, 2021). Nesse contexto, é válido ressaltar que o presente estudo limitou o uso dos materiais citados acima.

Figura 24 — Comparação do aspecto superficial dos concretos



Fonte: elaborado pela autora (2023).

8 CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi verificar a viabilidade técnica do emprego de areia descartada de fundição em substituição ao agregado miúdo de origem natural no concreto. Para isso, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e de módulo elástico, além da investigação de aspectos ligados à durabilidade, como a absorção por imersão e a ocorrência de reação álcali-agregado. Com base nos resultados e análises realizadas, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- a) os teores de substituição de areia natural por ADF tiveram bons resultados, em termos de propriedades mecânicas, com ganho significativo de resistência à compressão, chegando a um acréscimo de 26% aos 28 dias para o concreto com 100% de ADF em relação ao traço referência. Além disso, também foi possível perceber uma redução do consumo de cimento por m³, o que representa um benefício econômico e ambiental;
- b) o módulo de elasticidade dos concretos com substituição de areia natural por ADF demonstrou comportamento semelhante aos valores de resistência à compressão, com um aumento significativo para os concretos com 100% de ADF em relação ao concreto referência;
- c) por meio do ensaio de absorção, constatou-se que não houve diferença estatisticamente significativa entre as misturas, o que indica que os concretos com substituição de areia natural por ADF apresentam comportamento semelhante ao concreto de referência;
- d) o teste RAA demonstrou que não houve diferença estatisticamente significativa entre os concretos com as substituições e a mistura de referência. Em relação aos valores, constatou-se, pelos resultados, que o traço mais próximo do limite normativo (0,19%), curiosamente, foi o traço com 50% de acréscimo de conteúdo de ADF — ele apresentou 0,18% de expansão. Diante disso, sugere-se maior cautela quanto ao seu uso em determinadas aplicações, como fundações e/ou seu uso em combinação com agentes atenuantes, como as pozolanas. Ressalta-se a necessidade de realizar mais estudos a respeito desse fenômeno, abordando detalhadamente seu mecanismo de ocorrência, no caso de concretos com ADF, dado o resultado limítrofe obtido para as barras com 50% de substituição;

- e) quanto à caracterização e à classificação em relação à solubilização e lixiviação, os resultados mostraram que houve neutralização do teor de contaminante (Al) presente na areia de fundição quando utilizada na matriz cimentícia. Esse resultado representa uma forma importante de mitigar os efeitos ambientais da disposição convencional de resíduos (em resíduos industriais). No entanto, mais estudos precisam ser feitos para melhor explicar como isso ocorre em concretos com ADF;
- f) por fim, conclui-se que a utilização de ADF pode ser viável em concreto convencional, pois os resultados dos ensaios realizados mostraram que os concretos com ADF apresentam propriedades semelhantes aos concretos obtidos com areia natural. Isso possibilita o aproveitamento desse resíduo como agregado miúdo, com percentual de substituição, em massa, de até 100%. É importante ressaltar, no entanto, que esse trabalho está limitado ao uso dos materiais mencionados na metodologia, assim, os resultados obtidos podem diferir dos resultados obtidos por outros autores. Portanto, com base nos trabalhos discutidos acima e nos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização de resíduos de areia de fundição no concreto representa uma excelente opção para esse resíduo, pois oferece grandes benefícios ambientais e à saúde.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após as conclusões obtidas com a realização da presente dissertação, sugere-se alguns temas para trabalhos futuros: a repetição dessa pesquisa, tendo como foco 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; a repetição dessa pesquisa com diferentes tipos de areia descartada de fundição, de modo a comparar os resultados obtidos com a areia verde e a areia ligada quimicamente para verificar se existe algum tipo de diferença entre os dois tipos de resíduo no que tange a sua aplicação no concreto; o desenvolvimento de metodologias de qualificação e caracterização física e química da ADF ainda na indústria siderúrgica, tendo como objetivo 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 essas medidas, é importante avaliar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10005**: Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. **NBR 1004**: A. N. ABNT NBR 10004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. **NBR 15702**: Areia descartada de fundição — Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto — Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT. **NBR 17054**: Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.

ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991c.

ABNT. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ABNT. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT. **NBR 7809**: Agregado graúdo — Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. **NBR 7810**: Agregado em estado compactado seco — Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ABNT. **NBR 8522**: Procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido — Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. **NBR NM 45**: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

ABNT. **NBR NM 67**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ADEGAS, R. G. **Perfil Ambiental dos Processos de Fundição Ferrosa que utilizam Areias no Estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/11199> . Acesso em: 4 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Relatório de ensaio nº 98721**. São Paulo: ABCP, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Guia ABIFA de fundição. São Paulo. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Índices de Mercado, Distribuição Regional de Mercados — Fundição acumula alta de +12,0% no 1º quadrimestre de 2022 – ABIFA. Disponível em: . Acesso em: maio 2022.

AZEVEDO, S.; BARROS, M. The application of the triple bottom line approach to sustainability assessment: The case study of the UK automotive supply chain. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 10, n. 2, p. 286–322, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3926/jiem.1996>. Disponível em: <http://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/1996>. Acesso em: 4 dez. 2023.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: Processos e tecnologias correlatas. São José dos Campos: Érica, 2013.

BARROS, M. A.; BARROS, R. M.; SILVA, G.; SANTOS, I. F. S. Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete. **Sustainable cities and society**, Amsterdam v. 45, 2019, p. 187-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670718312162?via%3Di> hub. Acesso em: 4 dez. 2023.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos**: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012.

BARROS, S. V.; DANTAS, G. C.; NEVES, G. D.; MENEZES, R. R. Imobilização de metais pesados presentes nos resíduos de quartzito por meio da incorporação em argamassas com substituição total do agregado natural. **Eng. Sanit. Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6, 2020, p. 833–845. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180063>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/qrWZ7VFLyMwp7kTYXkGrBbH/>. Acesso em: 4 dez. 2023.

BASAR, H. M.; AKSOY, N. D. O efeito da areia residual de fundição (WFS) como substituição parcial da areia nas características mecânicas, de lixiviação e microestruturais do concreto pré-misturado. **Construção e Materiais de Construção**, v. 35, 2012, p. 508-515.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P.; Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 156, 2017, p. 661-674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817318111>. Acesso em: 4 dez. 2023.

CALDAS, L. R. *et al.* Circular economy in concrete production: Greenhouse Gas (GHG) emissions assessment of rice husk bio-concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 15, n. 6, 2022, p. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000600002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/x8L6dXVRHwk3sMby4DyCHqN/?lang=em>. Acesso em: 4 dez. 2023.

CASALI, J. M. *et al.* Caracterização e influência do teor de resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimentos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n.1, 2018, p. 261-279. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100220>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/Rwq5dX6MttkXfjYQQGNDc6P/?lang=pt>. Acesso em: 4 dez. 2023.

CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDS, 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1721>. Acesso em: 4 dez. 2023.

CREMONEZ, Claiton et al. **Estudo da substituição parcial de areia natural por areia descartada de fundição para produção de concreto convencional**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COPETTI, M. T. **Estudo de viabilidade de concreto estrutural com areia de descarte de fundição e adições minerais**: propriedades mecânicas e análise de ciclo de vida. 2019. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/17383>. Acesso em: 4 dez. 2023.

DAYTON, E. A.; WHITACRE, S.D.; DUNGAN, R.S.; BASTA, N.T. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in

manufactured soils. **Plant Soil**, v. 329, 2010, p. 27–33. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0120-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-0120-0>. Acesso em: 4 dez. 2023.

FRARE, Andreza et al. Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT**, v. 13, n. 1, p. 1-27, 2023.

GUNEY, Y.; SARI, Y. D.; YALCIN, M.; TUNCAN, A.; DONMEZ, S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management**, Amsterdam, v. 30, n. 8-9, p. 1705-1713, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X10001042>. Acesso em: 4 dez. 2023.

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C. **Gestão ambiental nas organizações: fundamentos e tendências**. São Paulo: Atlas, 2016.

MANOHARAN, T.; LAKSMANAN, D.; MYLSAMY, K.; SIVAKUMAR, P.; SIRCAR, A. Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. **Waste management**, Amsterdam, v. 71, p. 454-460, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17307705>. Acesso em: 4 dez. 2023.

MARTINI, N. C. **Reuso de areia descartada de fundição para a confecção de blocos de concreto estrutural**. 2017. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12107>. Acesso em: 4 dez. 2023.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura. Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MITCHELL, M.; CURTIS, A.; DAVIDSON, P. Evaluating the process of triple bottom line reporting: increasing the potential for change. **Local Environment**, Inglaterra, v. 13, n. 2, p. 67–80, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/13549830701581937>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13549830701581937>. Acesso em: 4 dez. 2023.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; RAMME, B. W. Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 7, 2012, p. 851–859. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000432). Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000432](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000432). Acesso em: 4 dez. 2023.

OKANGA, B.; GROENEWALD, D. Leveraging effects of triple bottom lines business model on the building and construction small and medium-sized enterprises' market performance. **Acta Commercii**, Cape Town, v. 17, n. 1, p. 1–14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4102/ac.v17i1.457>. Disponível em: <https://actacommercii.co.za/index.php/acta/article/view/457>. Acesso em: 4 dez. 2023.

OLIVEIRA, D. F. de. **Caracterização dos finos de areia de uma fundição e sua incorporação em argamassa de cimento**. 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/f6e13e9b-bf0f-4ca7-a8fb-56e12a11cd7f>. Acesso em: 4 dez. 2023.

PINTO, F. B. **O uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção de concreto**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá Estadual Paulista, Itajubá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/792>. Acesso em: 4 dez. 2023.

PONTES, Victor Cunha Pereira. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. 2019, 127f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

PRABHU, G. G.; HYUN, J. H.; KIM, Y. Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. **Construction and building materials**, Amsterdam, v. 70, p. 514-521, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.070>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814008289>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SANDHU, R. K.; SIDDIQUE, R. Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 225, p. 371-383, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.216>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819319002>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SIDDIQUE, R.; AGGARWAL, Y.; AGGARWAL, P.; KADRI, E. H.; BENNACER, R. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 4, p. 1916-1925, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810005957>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SIDDIQUE, R.; SCHUTTER, G.; NOUMOWE, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and building materials**, Amsterdam, v. 23, n. 2, p. 976-980, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061808001311>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 55, p. 885-892, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000802>. Acesso em: 4 dez. 2023.

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**, Amsterdam, v. 26, n. 1, 2012, p. 416-422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811003047>. Acesso em: 4 dez. 2023.

SINIC. **Relatório anual da indústria do cimento**, 2018. Rio de Janeiro: SINIC, 2018. Disponível em: <http://sinic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=33>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SOUZA, A. F. **Reaproveitamento de areia descartada de fundição (ADF) na produção de blocos cerâmicos**. 2021. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, 2021. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11002201. Acesso em: 4 dez. 2023.

SOUZA, B. M.; SANTICIOLLI, F. M. Comparação entre diferentes métodos de regeneração de areias de fundição. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, Campinas, v. 2, n. 2, p. 46-54, 2021. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/article/view/20>. Acesso em: 4 dez. 2023.

TITARELLI, F. Waste foundry sand. *In*: SIDDIQUE, R.; CACHIM, P. (org.). **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**: Characterisation, Properties and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 121-147.

APÊNDICE

APÊNDICE A — ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS FRAÇÕES DAS AREIAS PARA
CARACTERIZAÇÃO DA FORMA DOS GRÃOS

Fonte: elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE B —PROGRAMA EXPERIMENTAL

Traços	Ensaio	Idade (dias)	Dimensões dos Corpos de Prova (cm)	Nº de Corpos de Prova
0% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3	10x20	3
		7	10x20	3
		28	10x20	3
	Módulo Elástico (NBR 8522)	28	10x20	3
	Absorção por imersão (NBR 9778)	35	10x20	2
25% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3	10x20	3
		7	10x20	3
		28	10x20	3
	Módulo Elástico (NBR 8522)	28	10x20	3
	Absorção por imersão (NBR 9778)	35	10x20	2
50% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3	10x20	3
		7	10x20	3
		28	10x20	3
	Módulo Elástico (NBR 8522)	28	10x20	3
	Absorção por imersão (NBR 9778)	35	10x20	2
100% ADF	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3	10x20	3
		7	10x20	3
		28	10x20	3
	Módulo Elástico (NBR 8522)	28	10x20	3
	Absorção por imersão (NBR 9778)	35	10x20	2
Quantidade total de CPs				52

Fonte: elaborado pela autora (2023).

**APÊNDICE C — MEDIDAS DE EXPANSÃO DAS BARRAS PRISMÁTICAS DO
ENSAIO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Idade	Argamassa Referência						expansão %	Expansão % Acumulada
	REF	Média	expansão (mm)	expansão %/ amostra				
3	1	0,237	0,222	0,2295	0	0	0,00	0,00
	2	0,242	0,253	0,2475	0	0		
	3	0,625	0,621	0,623	0	0		
5	1	0,228	0,21	0,219	-0,0105	-0,003556555	0,01	0,01
	2	0,253	0,258	0,2555	0,008	0,002709591		
	3	0,724	0,701	0,7125	0,0895	0,030275046		
7	1	0,241	0,224	0,2325	0,0135	0,004572714	0,00	0,01
	2	0,269	0,259	0,264	0,0085	0,002878941		
	3	0,688	0,684	0,686	-0,0265	-0,00896412		
16	1	0,259	0,248	0,2535	0,021	0,00711311	0,00	0,01
	2	0,22	0,235	0,2275	-0,0365	-0,012362509		
	3	0,717	0,694	0,7055	0,0195	0,006596239		
18	1	0,269	0,251	0,26	0,0065	0,002201677	-0,02	-0,01
	2	0,0036	0,043	0,0233	-0,2042	-0,069162313		
	3	0,741	0,7	0,7205	0,015	0,00507403		
20	1	0,274	0,255	0,2645	0,0045	0,001524238	0,03	0,02
	2	0,263	0,264	0,2635	0,2402	0,081355473		
	3	0,755	0,766	0,7605	0,04	0,013530747		
25	1	0,28	0,271	0,2755	0,011	0,003725915	-0,02	0,00
	2	0,143	0,142	0,1425	-0,121	-0,040982565		
	3	0,728	0,705	0,7165	-0,044	-0,014883822		
30	1	0,321	0,309	0,315	0,0395	0,013379422	0,01	0,02
	2	0,193	0,149	0,171	0,0285	0,009652918		
	3	0,777	0,758	0,7675	0,051	0,017251702		

Argamassa com 25% de ADF					
25%	Média	expansão (mm)	expansão %/ amostra	expansão %	Expansão % Acumulada
3,151	3,141	3,146	0	0	0,00
0,105	0,114	0,1095	0	0	
0,996	1,017	1,0065	0	0	
3,203	3,198	3,2005	0,0545	0,018279635	-0,03
0,195	0,124	0,1595	0,05	0,016942864	
0,041	1,175	0,608	-0,3985	-0,134625422	
3,358	3,35	3,354	0,1535	0,051484843	0,00
0,367	0,195	0,281	0,1215	0,041171159	
0,318	0,369	0,3435	-0,2645	-0,089356146	
3,468	3,463	3,4655	0,1115	0,037397785	0,04
0,177	0,171	0,174	-0,107	-0,036257728	
0,716	0,72	0,718	0,3745	0,126517492	
3,7	3,692	3,696	0,2305	0,077311116	0,07
0,706	0,615	0,6605	0,4865	0,164854063	
0,539	0,744	0,6415	-0,0765	-0,025844027	
3,857	3,853	3,855	0,159	0,053329577	-0,03
0,514	0,506	0,51	-0,1505	-0,050998019	
0,351	0,368	0,3595	-0,282	-0,095268178	
3,77	3,764	3,767	-0,088	-0,029515741	-0,02
0,495	0,508	0,5015	-0,0085	-0,002880287	
0,262	0,262	0,262	-0,0975	-0,032938466	
3,858	3,895	3,8765	0,1095	0,036726973	0,06
0,853	0,803	0,828	0,3265	0,110636899	
0,484	0,192	0,338	0,076	0,025675112	

Argamassa com 50% de ADF						
50%		Média	expansão (mm)	expansão %/ amostra	expansão %	Expansão % Acumulada
2,456	2,476	2,466	0	0		
1,947	1,938	1,9425	0	0		
3,104	3,098	3,101	0	0	0,00	0,00
2,539	2,528	2,5335	0,0675	0,022690906		
2,031	2,023	2,027	0,0845	0,028456688		
3,177	3,169	3,173	0,072	0,024152888	0,03	0,03
2,575	2,565	2,57	0,0365	0,012269897		
2,086	2,072	2,079	0,052	0,017511808		
3,23	3,221	3,2255	0,0525	0,017611481	0,02	0,04
2,591	2,583	2,587	0,017	0,005714747		
2,116	2,111	2,1135	0,0345	0,011618411		
3,369	3,37	3,3695	0,144	0,048305776	0,02	0,06
2,754	2,748	2,751	0,164	0,055130498		
2,252	2,241	2,2465	0,133	0,044789816		
3,425	3,417	3,421	0,0515	0,017276024	0,04	0,10
2,841	2,836	2,8385	0,0875	0,029414138		
2,369	2,365	2,367	0,1205	0,040580247		
3,525	3,519	3,522	0,101	0,033881134	0,03	0,14
2,942	2,935	2,9385	0,1	0,033616157		
2,462	2,458	2,46	0,093	0,031319195		
3,682	3,766	3,724	0,202	0,067762268	0,04	0,18
3,01	3,005	3,0075	0,069	0,023195149		
2,478	2,469	2,4735	0,0135	0,004546335		
3,647	3,837	3,742	0,018	0,006038222	0,01	0,19

Argamassa com 100% ADF						
100%		Média	expansão (mm)	expansão %/ amostra	expansão %	Expansão % Acumulada
0,331	0,406	0,3685	0	0		
3,063	3,047	3,055	0	0		
1,741	1,585	1,663	0	0	0,00	0,00
0,36	0,471	0,4155	0,047	0,01591233		
3,107	3,1	3,1035	0,0485	0,01627216		
1,802	1,656	1,729	0,066	0,02228969	0,02	0,02
0,347	0,333	0,34	-0,0755	-0,02556129		
3,117	3,111	3,114	0,0105	0,00352284		
1,802	1,684	1,743	0,014	0,00472812	-0,01	0,01
0,393	0,492	0,4425	0,1025	0,03470241		
3,181	3,176	3,1785	0,0645	0,0216403		
1,349	1,345	1,347	-0,396	-0,13373815	-0,03	-0,01
0,373	0,369	0,371	-0,0715	-0,02420705		
3,394	3,388	3,391	0,2125	0,07129557		
2,095	1,958	2,0265	0,6795	0,22948251	0,09	0,08
0,388	0,385	0,3865	0,0155	0,00524768		
3,493	3,487	3,49	0,099	0,03321535		
2,187	2,066	2,1265	0,1	0,03377226	0,02	0,10
0,455	0,599	0,527	0,1405	0,0475677		
3,639	3,634	3,6365	0,1465	0,049152		
1,784	1,782	1,783	-0,3435	-0,11600771	-0,01	0,10
1,432	0,43	0,931	0,404	0,1367783		
3,655	1,649	2,652	-0,9845	-0,33030816		
2,375	2,323	2,349	0,566	0,19115099	0,00	0,10

Fonte: elaborado pela autora (2023).

ANEXOS

ANEXO A — RESULTADO DO ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA



Relatório de ensaio : 14679/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Cliente: AFONSO REGULY - PROEX CAPES

Endereço da coleta: Rua MATIAS JOSÉ BINS 364 TRÊS FIGUEIRAS - Porto Alegre - RS

Identificação do projeto: Classificação de Resíduos - Areia de Fundação

Contato: Emily Noronha Marques

Identificação da amostra: Concreto referência

Matriz: Resíduo Sólido - Solubilizado

Data da amostragem: 30/11/2022 00:00

Data de recebimento: 01/02/2023

Responsável pela amostragem: Cliente

RESULTADOS:

Encontra(m)-se na(s) Tabela(s) da(s) página(s) seguinte(s) e referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) analisada(s)

Análises terceirizadas - pH Final do Extrato Solubilizado							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
pH Final do Extrato Solubilizado	---	13,1	---	1 a 14	1,31	---	56

Análises terceirizadas - Cianeto Total							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Cianeto Total	mg/L	< 0,005	1	0,005	0,0005	79197	60

Análises terceirizadas - Índice de Fenóis							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fenóis Totais	mg/L	< 0,001	1	0,001	0,0001	79353	62

Análises terceirizadas - Fluoreto							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fluoreto	mg/L	0,202	---	0,05	0,0202	79288	63

Análises terceirizadas - Nitrato							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Nitrato como N	mg/L	1,31	1	0,1	0,131	79576	64

Análises terceirizadas - Sulfato							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Sulfato	mg/L	42,9	5	5	4,29	79450	67

"Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório."
Página 1 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANALISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129



Relatório de ensaio : 14679/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Análises terceirizadas - Surfactantes (MBAS)							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Surfactantes (Subs. tensoativas que reagem com azul de metileno)	mg/L	< 0,03	1	0,03	0,003	79193	78

Análises terceirizadas - Cloreto							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Cloreto	mg/L	13,1	2	4	1,31	79517	82

Análises terceirizadas - Mercúrio Total							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Mercúrio Total (Hg)	mg/L	< 0,00010	1	0,00010	0,000017604	79226	260

Análises terceirizadas - Metais Totais							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Alumínio Total (Al)	mg/L	0,509	1	0,00600	0,09	79219	354
Arsênio Total (As)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Bário Total (Ba)	mg/L	0,173	1	0,00600	0,03	79219	354
Cádmio Total (Cd)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0005724	79219	354
Chumbo Total (Pb)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0008	79219	354
Cobre Total (Cu)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Cromo Total (Cr)	mg/L	0,0439	1	0,00600	0,004	79219	354
Ferro Total (Fe)	mg/L	0,0184	1	0,00600	0,002	79219	354
Manganês Total (Mn)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0007	79219	354
Prata Total (Ag)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Selênio Total (Se)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Sódio Total (Na)	mg/L	79,84	100	6,00	4	79219	354
Zinco Total (Zn)	mg/L	0,00900	1	0,00600	0,0007	79219	354

Referências dos Métodos de Análises terceirizadas							
Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
56	pH Final do Extrato Solubilizado	SM23 4500H/4500B:2017	---	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
60	Cianeto Total	SM23 4500-CN C/4500-CN E:2017	---	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
62	Índice de Fenóis	NBR 10006:2004 / EPA 420.1:1978	---	07/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
63	Fluoreto	NBR 10006:2004 / SM22 4500-F C	---	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
64	Nitrato	NBR 10006:2004 / SM22 4500-NO3 E	---	03/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
67	Sulfato	NBR 10006:2004 / SM22 4500-SO42- E	---	04/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
78	Surfactantes (MBAS)	NBR 10006:2004 / SM22 5540C	---	04/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
82	Cloreto	NBR 10006:2004 / SM 22 4500-Cl- D	---	09/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
260	Mercúrio Total	NBR 10006:2004 / EPA 7470A:1994	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
354	Metais Totais	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 2 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.



Relatório de ensaio : 14679/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Observações:

Cadastro na FEPAM N° 00020/2019 válido até 22/05/2023

Regra de decisão:

Na avaliação dos riscos associados à realização dos ensaios, a CEIMIC definiu que as incertezas informadas nos relatórios de ensaio não serão consideradas na conclusão/declaração da conformidade a uma especificação ou norma, ficando a critério do cliente e/ou parte interessada a aplicação ou não das incertezas declaradas.

Legendas:

LQ = Limite de Quantificação.

LD = Limite de Detecção.

CQ = Controle de Qualidade.

***H** = Valor fora dos limites de CQ devido à interferência de matriz da amostra.

***J** = Valor estimado entre o LD e LQ.

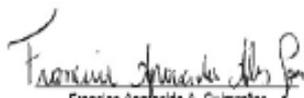
***J¹** = Valores não atendem às legislações requeridas tendo base o Limite de detecção (LD)

N.A. = Não aplicável.

N.D. = Não determinado.

A descrição do material ensaiado, plano e procedimento de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente e os resultados se aplicam a amostra conforme recebida.

Resultado conferido e aprovado eletronicamente por:


Francine Aparecida A. Guimarães
Coordenadora Lab. Regional
CRQ-V 05101870

Código de autenticidade do relatório de ensaio: 0e98a0bbb7ba679b464d3b66a026bfe2

A autenticidade deste relatório pode ser verificada fazendo click no próximo link: [C-Link](#).

FIM DO RELATÓRIO DE ENSAIO

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 3 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANÁLISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129

ANEXO B — RESULTADO DO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA



Relatório de ensaio : 14677/2023-1.0_N
Emitido em: 08/02/2023

Cliente: AFONSO REGULY - PROEX CAPES
Endereço da coleta: Rua MATIAS JOSÉ BINS 364 TRÊS FIGUEIRAS - Porto Alegre - RS
Identificação do projeto: Classificação de Resíduos - Areia de Fundação
Contato: Emily Noronha Marques

Identificação da amostra: Concreto referência

Matriz: Resíduo Sólido - Lixiviado
Data da amostragem: 23/11/2022 00:00
Data de recebimento: 01/02/2023
Responsável pela amostragem: Cliente

RESULTADOS:

Encontra(m)-se na(s) Tabela(s) da(s) página(s) seguinte(s) e referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) analisada(s)

Análises terceirizadas - pH Final do Extrato Lixiviado							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
pH Final do Extrato Lixiviado	---	12,87	---	1 a 14	1,29	---	55

Análises terceirizadas - Fluoreto							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fluoreto	mg/L	0,337	---	0,05	0,0337	79288	63

Análises terceirizadas - Mercúrio Total							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Mercúrio Total (Hg)	mg/L	< 0,00010	1	0,00010	0,000017604	79226	260

Análises terceirizadas - Metais Totais							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Arsênio Total (As)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Bário Total (Ba)	mg/L	1,42	1	0,00600	0,3	79219	354
Cádmio Total (Cd)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0005724	79219	354
Chumbo Total (Pb)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0008	79219	354
Cromo Total (Cr)	mg/L	0,0707	1	0,00600	0,006	79219	354
Prata Total (Ag)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Selênio Total (Se)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354

Referências dos Métodos de Análises terceirizadas							
Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
55	pH Final do Extrato Lixiviado	NBR 10005:2004 / SM22 4500-H+ B	---	08/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
63	Fluoreto	NBR 10005:2004 / SM22 4500-F	---	08/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165

"Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório."

Página 1 de 2

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANALISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129



Relatório de ensaio : 14677/2023-1.0_N
Emitido em: 08/02/2023

Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
		C					
260	Mercurio Total	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
354	Metais Totais	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165

Observações:

Cadastro na FEPAM N° 00020/2019 válido até 22/05/2023

Regra de decisão:

Na avaliação dos riscos associados à realização dos ensaios, a CEIMIC definiu que as incertezas informadas nos relatórios de ensaio não serão consideradas na conclusão/declaração da conformidade a uma especificação ou norma, ficando a critério do cliente e/ou parte interessada a aplicação ou não das incertezas declaradas.

Legendas:

LQ = Limite de Quantificação.

LD = Limite de Detecção.

CQ = Controle de Qualidade.

***H** = Valor fora dos limites de CQ devido à interferência de matriz da amostra.

***J** = Valor estimado entre o LD e LQ.

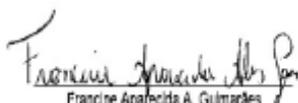
***J¹** = Valores não atendem às legislações requeridas tendo base o Limite de detecção (LD)

N.A. = Não aplicável.

N.D. = Não determinado.

A descrição do material ensaiado, plano e procedimento de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente e os resultados se aplicam a amostra conforme recebida.

Resultado conferido e aprovado eletronicamente por:


 Francine Aparecida A. Guimarães
 Coordenadora Lab. Regional
 CRQ-V 05101870

Código de autenticidade do relatório de ensaio: 7acd9ed4316b3b0406742a28223b73bb

A autenticidade deste relatório pode ser verificada fazendo click no próximo link: [C-Link](#).

FIM DO RELATÓRIO DE ENSAIO

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
 Página 2 de 2

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANALISES QUIMICAS E TOXICOLOGICAS LTDA
 Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129

ANEXO C — RESULTADO DO ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DO CONCRETO COM 100% ADF



Relatório de ensaio : 14678/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Cliente: AFONSO REGULY - PROEX CAPES
Endereço da coleta: Rua MATIAS JOSÉ BINS 364 TRÊS FIGUEIRAS - Porto Alegre - RS
Identificação do projeto: Classificação de Resíduos - Areia de Fundição
Contato: Emily Noronha Marques

Identificação da amostra: Concreto com 100% de areia de fundição

Matriz: Resíduo Sólido - Solubilizado
Data da amostragem: 29/11/2022 00:00
Data de recebimento: 01/02/2023
Responsável pela amostragem: Cliente

RESULTADOS:

Encontra(m)-se na(s) Tabela(s) da(s) página(s) seguinte(s) e referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) analisada(s)

Análises terceirizadas - pH Final do Extrato Solubilizado							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
pH Final do Extrato Solubilizado	---	13,3	---	1 a 14	1,33	---	56

Análises terceirizadas - Cianeto Total							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Cianeto Total	mg/L	< 0,005	1	0,005	0,0005	79197	60

Análises terceirizadas - Índice de Fenóis							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fenóis Totais	mg/L	< 0,001	1	0,001	0,0001	79353	62

Análises terceirizadas - Fluoreto							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fluoreto	mg/L	0,281	---	0,05	0,0281	79288	63

Análises terceirizadas - Nitrato							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Nitrato como N	mg/L	< 0,5	5	0,5	0,05	79576	64

Análises terceirizadas - Sulfato							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Sulfato	mg/L	132,1	25	25	13,21	79450	67

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 1 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.



Relatório de ensaio : 14678/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Análises terceirizadas - Surfactantes (MBAS)

Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Surfactantes (Subs. tensoativos que reagem com azul de metileno)	mg/L	< 0,03	1	0,03	0,003	79193	78

Análises terceirizadas - Cloreto

Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Cloreto	mg/L	13,5	2	4	1,35	79517	82

Análises terceirizadas - Mercúrio Total

Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Mercúrio Total (Hg)	mg/L	0,00011	1	0,00010	$1,93644 \times 10^{-5}$	79226	260

Análises terceirizadas - Metais Totais

Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Alumínio Total (Al)	mg/L	0,0780	1	0,00600	0,01	79219	354
Arsênio Total (As)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Bário Total (Ba)	mg/L	0,174	1	0,00600	0,03	79219	354
Cádmio Total (Cd)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0005724	79219	354
Chumbo Total (Pb)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0008	79219	354
Cobre Total (Cu)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Cromo Total (Cr)	mg/L	0,00995	1	0,00600	0,0008	79219	354
Ferro Total (Fe)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0006	79219	354
Manganês Total (Mn)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0007	79219	354
Prata Total (Ag)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Selênio Total (Se)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Sódio Total (Na)	mg/L	98,53	100	6,00	5	79219	354
Zinco Total (Zn)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0004	79219	354

Referências dos Métodos de Análises terceirizadas

Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
56	pH Final do Extrato Solubilizado	SM23 4500H/4500B:2017	—	06/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
60	Cianeto Total	SM23 4500-CN C/4500-CN E:2017	—	06/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
62	Índice de Fenóis	NBR 10006:2004 / EPA 420.1:1978	—	07/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
63	Fluoreto	NBR 10006:2004 / SM22 4500-F C	—	06/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
64	Nitrato	NBR 10006:2004 / SM22 4500-NO3 E	—	03/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
67	Sulfato	NBR 10006:2004 / SM22 4500-SO42- E	—	04/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
78	Surfactantes (MBAS)	NBR 10006:2004 / SM22 5540C	—	04/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
82	Cloreto	NBR 10006:2004 / SM 22 4500-Cl- D	—	09/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
260	Mercúrio Total	NBR 10006:2004 / EPA 7470A:1994	08/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165
354	Metais Totais	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	08/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	—	0165

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.

Página 2 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANÁLISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129



Relatório de ensaio : 14678/2023-1.0_N
Emitido em: 09/02/2023

Observações:

Cadastro na FEPAM N° 00020/2019 válido até 22/05/2023

Regra de decisão:

Na avaliação dos riscos associados à realização dos ensaios, a CEIMIC definiu que as incertezas informadas nos relatórios de ensaio não serão consideradas na conclusão/declaração da conformidade a uma especificação ou norma, ficando a critério do cliente e/ou parte interessada a aplicação ou não das incertezas declaradas.

Legendas:

LQ = Limite de Quantificação.

LD = Limite de Detecção.

CQ = Controle de Qualidade.

***H** = Valor fora dos limites de CQ devido à interferência de matriz da amostra.

***J** = Valor estimado entre o LD e LQ.

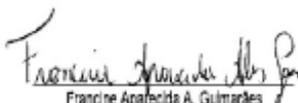
***J¹** = Valores não atendem às legislações requeridas tendo base o Limite de detecção (LD)

N.A. = Não aplicável.

N.D. = Não determinado.

A descrição do material ensaiado, plano e procedimento de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente e os resultados se aplicam a amostra conforme recebida.

Resultado conferido e aprovado eletronicamente por:


Francine Aparecida A. Guimarães
Coordenadora Lab. Regional
CRQ-V 05101870

Código de autenticidade do relatório de ensaio: f8ba57e29ed221473068cbb38a19b202

A autenticidade deste relatório pode ser verificada fazendo click no próximo link: [C-Link](#).

FIM DO RELATÓRIO DE ENSAIO

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 3 de 3

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANALISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129

ANEXO D — RESULTADO DO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DO CONCRETO COM 100% ADF



Relatório de ensaio : 14676/2023-1.0_N
Emitido em: 08/02/2023

Cliente: AFONSO REGULY - PROEX CAPES

Endereço da coleta: Rua MATIAS JOSÉ BINS 364 TRÊS FIGUEIRAS - Porto Alegre - RS

Identificação do projeto: Classificação de Resíduos - Areia de Fundação

Contato: Emily Noronha Marques

Identificação da amostra: Concreto com 100% de areia de fundição

Matriz: Resíduo Sólido - Lixiviado

Data da amostragem: 23/11/2022 00:00

Data de recebimento: 01/02/2023

Responsável pela amostragem: Cliente

RESULTADOS:

Encontra(m)-se na(s) Tabela(s) da(s) página(s) seguinte(s) e referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) analisada(s)

Análises terceirizadas - pH Final do Extrato Lixiviado							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
pH Final do Extrato Lixiviado	---	13,06	---	1 a 14	1,31	---	55

Análises terceirizadas - Fluoreto							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Fluoreto	mg/L	0,361	---	0,05	0,0361	79286	63

Análises terceirizadas - Mercúrio Total							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Mercúrio Total (Hg)	mg/L	< 0,00010	1	0,00010	0,000017604	79226	260

Análises terceirizadas - Metais Totais							
Parâmetro	Unidade	Resultado	Diluição	LQ	Incerteza	CQ	Ref.
Arsênio Total (As)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354
Bário Total (Ba)	mg/L	1,29	1	0,00600	0,2	79219	354
Cádmio Total (Cd)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0005724	79219	354
Chumbo Total (Pb)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,0008	79219	354
Cromo Total (Cr)	mg/L	0,0193	1	0,00600	0,002	79219	354
Prata Total (Ag)	mg/L	< 0,00500	1	0,00500	0,0007	79219	354
Selênio Total (Se)	mg/L	< 0,00600	1	0,00600	0,001	79219	354

Referências dos Métodos de Análises terceirizadas							
Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
55	pH Final do Extrato Lixiviado	NBR 10005:2004 / SM22 4500-H+ B	---	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
63	Fluoreto	NBR 10005:2004 / SM22 4500-F	---	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 1 de 2

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANÁLISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129



Relatório de ensaio : 14676/2023-1.0_N
Emitido em: 08/02/2023

Ref.	Descrição	Metodologia	Data Preparo	Data Análise	Laboratório	Id. do relatório	CRL
		C					
260	Mercurio Total	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165
354	Metais Totais	NBR 10005:2004 / SM22 3120B	06/02/2023	06/02/2023	CEIMIC NTO	---	0165

Observações:

Cadastro na FEPAM N° 00020/2019 válido até 22/05/2023

Regra de decisão:

Na avaliação dos riscos associados à realização dos ensaios, a CEIMIC definiu que as incertezas informadas nos relatórios de ensaio não serão consideradas na conclusão/declaração da conformidade a uma especificação ou norma, ficando a critério do cliente e/ou parte interessada a aplicação ou não das incertezas declaradas.

Legendas:

LQ = Limite de Quantificação.

LD = Limite de Detecção.

CQ = Controle de Qualidade.

***H** = Valor fora dos limites de CQ devido à interferência de matriz da amostra.

***J** = Valor estimado entre o LD e LQ.

***J¹** = Valores não atendem às legislações requeridas tendo base o Limite de detecção (LD)

N.A. = Não aplicável.

N.D. = Não determinado.

A descrição do material ensaiado, plano e procedimento de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente e os resultados se aplicam a amostra conforme recebida.

Resultado conferido e aprovado eletronicamente por:


Francine Aparecida A. Guimarães
Coordenadora Lab. Regional
CRQ-V 05101870

Código de autenticidade do relatório de ensaio: 7034ef64316ecc9b10d37749905dcf4

A autenticidade deste relatório pode ser verificada fazendo click no próximo link: [C-Link](#).

FIM DO RELATÓRIO DE ENSAIO

Este Relatório de Ensaio somente pode ser reproduzido na sua totalidade e sem alterações. A reprodução parcial requer aprovação escrita do Laboratório.
Página 2 de 2

CM-005-A, registro aplicável ao POP 005 Emissão, aprovação e alteração em relatórios de ensaio e relatórios de estudo.

CEIMIC REGIONAL SUL ANALISES QUIMICAS E TOXICOLOGICAS LTDA
Rua Felipe de Oliveira, 293 - Santa Cecília - Porto Alegre / RS Fone: (51) 3333-9129