



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

GABRIEL DE LIMA RIBEIRO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE TREFILAÇÃO DE FIO MÁQUINA COMO
SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

**FORTALEZA
2025**

GABRIEL DE LIMA RIBEIRO

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE TREFILAÇÃO DE FIO MÁQUINA COMO
SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra
Florez

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369a Ribeiro, Gabriel de Lima.

Aproveitamento de resíduo de trefilação de fio máquina como substituto do agregado miúdo no concreto de cimento Portland / Gabriel de Lima Ribeiro. – 2025.

53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.

1. Concreto de cimento Portland. 2. Carepa de trefilação de fio-máquina. 3. Resistência à compressão. I. Título.

CDD 628

GABRIEL DE LIMA RIBEIRO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE TREFILAÇÃO DE FIO MÁQUINA COMO
SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 01/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emilio Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Helano Wilson Pimentel
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus, por ter me sustentado em cada passo desta caminhada.

Aos meus pais, Elizeuda e Gilmar, pelo amor incondicional, apoio e incentivo ao longo de toda minha formação.

À minha namorada, Ana Clara, pelo companheirismo, paciência e palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

E, por fim, dedico a mim mesmo, pelo esforço, resiliência e determinação que me trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela sabedoria e força concedidas ao longo de toda a minha jornada acadêmica.

Ao professor Mauro Cerra, meu orientador, pela orientação precisa, disponibilidade e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Centro Acadêmico de Engenharia Metalúrgica, cuja parceria e dedicação contribuíram para um ambiente acadêmico mais colaborativo e motivador.

Aos membros do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), pelo apoio técnico e companheirismo.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), pelo espaço e estrutura oferecidos para a realização da pesquisa.

Agradeço, de maneira especial, aos amigos Bruno Eliezer, Emerson Santana, Felipe Messias e Davi Aires, pela amizade, trocas de conhecimento e apoio mútuo ao longo do curso.

Um agradecimento especial à amiga Beatriz Sousa, pela presença constante, incentivo e amizade ao longo da graduação.

Por fim, estendo minha gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, fizeram parte desta trajetória.

“A ciência pode divertir-nos e fascinar-nos, mas é a engenharia que muda o mundo.” (ISAAC ASIMOV).

RESUMO

Na atualidade, são produzidas cerca de 30 bilhões de toneladas de concreto por ano, o que o caracteriza como um dos materiais mais usados no mundo, essencial para a construção civil. O concreto é constituído de aglomerante, agregados e água, e sua produção, de modo geral, impacta negativamente o meio ambiente. Uma prática que se difundiu é a incorporação de coprodutos gerados em processos de diversos setores na fabricação de concreto, visando a redução do impacto ambiental e, também, dos custos associados à aquisição de suas matérias-primas. Muitas vezes, os resíduos são adicionados na mistura do concreto como substituição parcial do peso de areia. Assim sendo, o presente trabalho objetivou o estudo da viabilidade, em termos de resistência à compressão, do uso de carepa oriunda da trefilação de fio-máquina de aço na fabricação de concreto de cimento Portland. Inicialmente, realizou-se a caracterização da carepa por meio das técnicas de Fluorescência de Raios-X e de Difração de Raios-X. Os corpos de prova de concreto para os ensaios de compressão foram fabricados com as porcentagens de substituição parcial da areia por carepa de trefilação de 5%, 10%, 15% e 20% em peso. Também foram feitos corpos de prova sem adição de carepa, para permitir a análise comparativa dos resultados. Os corpos de prova experenciaram os seguintes quatro tempos de cura: 7, 14, 21 e 28 dias. Quanto à caracterização da carepa, concluiu-se que a carepa de óxido usada é composta principalmente de hematita (FeO_3) e de magnetita (FeO_4). Avaliando a quantidade de carepa adicionada, percebeu-se que o uso de 5% e 10% de carepa de óxido como agregado miúdo, junto à areia, resultou no decrescimento da resistência à compressão, o qual foi mais acentuado para os CPs fabricados com 10% de carepa. Para 15% de carepa adicionada, houve um aumento na resistência à compressão para os tempos de cura de 7, 21 e 28 dias. A melhora da resistência à compressão também ocorreu para os corpos de prova fabricados com 20% de carepa. De modo geral, o aumento do tempo de cura somente resultou em um aumento significativo da resistência à compressão dos corpos de prova, exceto para aqueles fabricados com 10% de carepa de óxido. Ademais, a partir de uma certa quantidade de carepa adicionada ao peso de areia entre 10 e 15%, entende-se que foi possível obter resultados favoráveis para o aproveitamento do resíduo da trefilação do fio máquina, considerando a resistência à compressão.

Palavras-chave: concreto de cimento Portland; carepa de trefilação de fio-máquina; resistência à compressão.

ABSTRACT

In recent years, approximately 30 billion tonnes of concrete are produced annually, making it one of the most widely used materials in the world and essential for the construction industry. Concrete is composed of binder, aggregates, and water, and its production generally has a negative impact on the environment. One widely adopted practice to mitigate this impact is the incorporation of by-products from various industrial processes into concrete production, aiming to reduce both environmental impact and the costs associated with raw material acquisition. These residues are often used as partial replacements for sand in the concrete mix. Accordingly, the present study aimed to assess the feasibility, in terms of compressive strength, of using scale waste derived from the wire rod drawing process in the production of Portland cement concrete. Initially, the scale was characterized using X-ray Fluorescence (XRF) and X-ray Diffraction (XRD) techniques. Concrete specimens for compressive strength testing were produced with partial sand replacement by drawing scale at proportions of 5%, 10%, 15%, and 20%. Control specimens with no scale addition were also fabricated to allow for comparative analysis. The specimens were subjected to four curing durations: 7, 14, 21, and 28 days. Compressive strength tests were conducted to comparatively assess the effects of both the scale addition and curing time. The characterization of the scale revealed that it is primarily composed of hematite (Fe_2O_3) and magnetite (Fe_3O_4). With respect to the amount of scale added, it was observed that using 5% and 10% of drawing scale as fine aggregate led to a decrease in compressive strength, with the reduction being more pronounced in specimens with 10% scale than those with 5%. For a 15% addition, an increase in compressive strength was observed at 7, 21, and 28 days of curing. An improvement in compressive strength was also recorded in specimens containing 20% scale. Overall, the increase in curing time generally resulted in a significant gain in compressive strength, except in specimens with 10% scale addition. Furthermore, it was concluded that from a scale addition range between 10% and 15% relative to sand mass, favorable results were achieved regarding the reuse of drawing process waste, considering compressive strength performance.

Keywords: Portland cement concrete; wire drawing scale; compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre pasta, argamassa e concreto em termos de seus constituintes	20
Figura 2 – Gráfico que representa a Lei de Abrams	21
Figura 3 – Efeito combinado do teor de substituição e do tempo de cura sobre a resistência à compressão	25
Figura 4 – (a) Resistência à compressão e (b) absorção de água para as relações água/cimento de 0,55 e 0,65	26
Figura 5 – Representação esquemática do processo de trefilação	28
Figura 6 – Moldes para corpos de prova de concreto cilíndricos	29
Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão em prensa manual de 100 toneladas: (1) CP de concreto durante o rompimento e (2) CP rompido	31
Figura 8 – Mistura dos componentes para fabricação dos corpos de prova: (a) brita, (b) brita e areia, (c) brita, areia e cimento Portland (CP III 32 RS) e (d) mistura homogeneizada	33
Figura 9 – Corpos de prova no molde logo após fabricação	34
Figura 10 – Corpos de prova imersos no banho de água e cal	35
Figura 11 – Maquinário utilizado para os ensaios de compressão	37
Figura 12 – Medições ortogonais nos corpos de prova	37
Figura 13 – Difratograma da carepa de trefilação	39
Figura 14 – Exemplo da falha de um corpo de prova durante o ensaio de compressão	40
Figura 15 – Registro dos corpos de prova padrão pré e pós-ensaios de compressão	41
Figura 16 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova padrão com o tempo de cura	42
Figura 17 – Registro dos corpos de prova com 5% de carepa pré e pós-ensaios de compressão	43
Figura 18 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 5% de carepa com o tempo de cura	44
Figura 19 – Registro dos corpos de prova com 10% de carepa pré e pós-ensaios de compressão	45
Figura 20 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 10% de carepa com o tempo de cura	45
Figura 21 – Registro dos corpos de prova com 15% de carepa pré e pós-ensaios de compressão	46
Figura 22 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 15% de carepa com	

o tempo de cura	47
Figura 23 – Registro dos corpos de prova com 20% de carepa pré e pós-ensaios de compressão	48
Figura 24 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 20% de carepa com o tempo de cura	48
Figura 25 – Gráfico comparativo relacionando a resistência à compressão e o tempo de cura dos corpos de prova de concreto	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de composição química do cimento Portland	23
Tabela 2 – Composição dos corpos de prova	33
Tabela 3 – Corpos de prova fabricados	36
Tabela 4 – Composição da carepa de óxido de ferro	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo de Prova
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
TUM	Traço Unitário em Massa
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICO	19
3.1	Concreto	19
3.1.1	<i>Fatores que influenciam as propriedades do concreto</i>	20
3.1.2	<i>Dosagem experimental do concreto.....</i>	22
3.1.3	<i>Concreto de cimento Portland</i>	22
3.2	Aproveitamento de resíduos na fabricação de concreto	23
3.3	Geração de resíduo na trefilação de fios-máquina	27
3.4	Fabricação de corpo de prova de concreto para ensaio de compressão	29
4	METODOLOGIA	32
4.1	Materiais	32
4.2	Fabricação dos corpos de prova	32
4.3	Ensaio de compressão	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Caracterização da carepa	39
5.2	Ensaio de compressão	40
5.2.1	<i>Corpos de prova padrão</i>	41
5.2.2	<i>Corpos de prova com 5% de carepa</i>	42
5.2.3	<i>Corpos de prova com 10% de carepa</i>	44
5.2.4	<i>Corpos de prova com 15% de carepa</i>	46
5.2.5	<i>Corpos de prova com 20% de carepa</i>	47
5.3	<i>Influência da adição de carepa e do tempo de cura</i>	49
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material de construção civil essencial, que fornece boa trabalhabilidade, durabilidade e custo-benefício, e cujo uso data de vários séculos (PENA, OLIVEIRA, 2021). Atualmente, são produzidas 30 bilhões de toneladas de concreto por ano, o que o caracteriza como um dos materiais mais usados no mundo. A produção e o uso de concreto estão diretamente ligados ao desenvolvimento e modernização da sociedade em termos de infraestrutura e construção civil (ETHEREDGE, 2025). Couto *et al.* (2013) comenta, baseado no trabalho de Mehta e Monteiro (1994) que “a capacidade do concreto resistir à ação da água sem deterioração séria o tornou um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água”.

O concreto é constituído, principalmente, de aglomerante, agregados e água. Sua produção afeta bastante o meio ambiente. Por isso, uma prática que se difundiu industrialmente é a incorporação de coprodutos gerados em processos de diversos setores na fabricação de concreto, visando a redução do impacto ambiental e, também, dos custos associados à aquisição de matérias-primas. Esta prática é muito benéfica para critérios de sustentabilidade e contribui com o aproveitamento de materiais que seriam inutilizados pelo descarte ou pela realocação em aterros, pátios, etc.

Geralmente, os resíduos são adicionados na mistura do concreto como substituição parcial do peso de areia. Exemplos de materiais que já foram incorporados na composição de concreto são: escória de alto forno, cinzas volantes e vidro moído. Diversos trabalhos na literatura abordam os efeitos destas substituições parciais nas propriedades mecânicas e físico-químicas do concreto; as duas propriedades mais comumente avaliadas são a resistência à compressão e a absorção de água, que são obtidas com os devidos ensaios e, então, comparadas ao material de referência, o qual se trata do concreto produzido com composição tradicional, sem o uso de resíduos (SILVA *et al.*, 2020; FIGUEIREDO, VARGAS, 2016; TRENTIN *et al.*, 2020; PEREIRA, COSSA, PEREIRA, 2008).

A trefilação é um processo bastante utilizado na indústria de materiais metálicos, e é um dos processos que produzem resíduo. Fios-máquina são materiais que passam por trefilação. Antes de serem submetidos à trefilação para redução da seção transversal, os fios-máquina são fabricados por laminação à quente, o que induz a formação de uma camada de óxido na superfície destes materiais, que pode afetar negativamente a trefilação, já que possuem dureza elevada e não são uniformemente distribuídos na superfície. Por isso, antes de serem trefilados, os fios-máquina passam por uma descarepação, que consiste na remoção mecânica

ou química da camada de óxido superficial (DIETER, 1988; SOUZA, CORBACHO, 2015). É assim que se origina a carepa de trefilação.

Diante do exposto, o presente trabalho consistiu no estudo da viabilidade do uso de carepa oriunda da trefilação de fio-máquina de aço na fabricação de concreto de cimento Portland. Para isso, foram produzidos corpos de prova com diferentes porcentagens de substituição parcial da areia por carepa e, também, corpos de prova sem adição de carepa. Por meio de ensaios de compressão, analisou-se, comparativamente, a resistência à compressão dos corpos de prova produzidos. Além disso, foram empregados quatro diferentes tempos de cura, para determinar a influência deste parâmetro na propriedade avaliada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho visou analisar a viabilidade do reaproveitamento de carepa de ferro, resíduo proveniente do processo de trefilação de fios-máquina, para utilização como agregado miúdo na fabricação de concreto de cimento Portland.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar a composição química da carepa de óxido proveniente da trefilação de fios-máquina, para caracterizar o resíduo aplicado, usando as técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX) e de Difração de Raios-X (DRX);
- Estudar a influência da variação da quantidade de carepa adicionada ao concreto de cimento Portland e do tempo de cura na resistência à compressão de corpos de prova fabricados segundo a metodologia estabelecida na norma ABNT NBR 5739 (2016);
- Determinar a proporção de óxido de ferro com os melhores resultados, que poderia ser incorporada no concreto sem comprometer as propriedades mecânicas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção apresentará os conceitos necessários para a compreensão do presente estudo, englobando a teoria acerca do concreto e de seus componentes, bem como do aproveitamento de resíduos na fabricação de concreto. Serão tratados também os principais aspectos da trefilação de fios-máquina, processo que dá origem ao resíduo aplicado neste trabalho. Além disso, serão fornecidos os detalhamentos necessários acerca da realização de ensaios de compressão em concreto.

3.1 Concreto

Define-se como concreto a junção, em proporções bem definidas, de um aglomerante, agregados e água (ALMEIDA, 2002). Essa mistura, após fabricada, pode ser moldada de diferentes formas e, então, usada em diversas aplicações. O aglomerante é o cimento, que, quando misturado com a água, une os agregados. Por sua vez, os agregados são materiais como pedra e areia, responsáveis por aumentar a resistência mecânica e reduzir o custo do concreto.

Na literatura, é possível encontrar uma diferenciação dos componentes do concreto, caracterizando-os como agregado miúdo, que seria a areia, e agregado graúdo, que se trataria da pedra ou brita (COUTO *et al.*, 2013). A norma ABNT NBR 7211 (2005) especifica essa distinção mais detalhadamente, definindo como agregado miúdo “grãos passantes em peneira de diâmetro de 4,75 mm e retidos em peneira de 0,15 mm em ensaio realizado conforme a normas ABNT NBR NM 248 e ABNT NBR NM ISSO 3310-1” e como agregado graúdo grãos passantes pela peneira de diâmetro de 75 mm e retidos em peneira de 4,75 mm” em ensaio realizado conforme a normas mencionadas. Geralmente, utiliza-se como agregado graúdo brita de diâmetros entre 4,8 mm e 76 mm.

A mistura que constitui o concreto, após sua fabricação, adquire propriedades adequadas, capazes de resistir, por exemplo, às solicitações mecânicas do transporte e da aplicação. Isso acontece à medida que as reações entre o aglomerante e a água se processam, isto é, conforme se processe a hidratação do cimento (ALMEIDA, 2002). Para isso, é necessário que o concreto experencie o tempo de cura, que é o período necessário para que o concreto ganhe resistência e alcance as propriedades desejadas para a aplicação, como durabilidade e impermeabilidade.

É importante distinguir o concreto de outros materiais que também podem ser formados da mistura de cimento, água, areia ou brita. Para isso, apresenta-se a Figura 1, que

define “pasta” como sendo o resultado da mistura de cimento e água e “argamassa” como sendo a junção de cimento, água e areia.

Figura 1 – Diferença entre pasta, argamassa e concreto em termos de seus constituintes



Fonte: Educa Civil (2020).

O concreto pode ser classificado quando ao modo de fabricação entre fabricado no local ou pré-misturado; quanto ao campo de aplicação, podendo ser concreto massa ou concreto estrutural, que é utilizado em estruturas robustas, como edifícios e pontes; ou até mesmo de acordo com seu peso específico, variando de concreto pesado, normal, leve ou leve para isolamento térmico (ALMEIDA, 2002; COUTO *et al.*, 2013).

3.1.1 Fatores que influenciam as propriedades do concreto

A qualidade do concreto é influenciada pela qualidade dos materiais que o constituem, pelo proporcionamento adequado dos materiais da mistura, pela manipulação adequada e pelo processo de cura. Dentre estas variáveis, o processo de cura é um dos fatores que mais requerem cuidado. Almeida (2002) comenta que a hidratação do cimento ocorre por um tempo longo, e é necessário que as condições ambientais favoreçam as reações que se processam neste período, evitando a evaporação prematura da água.

A relação água/cimento é dos principais fatores que influenciam a resistência mecânica do concreto. Esta relação interfere na fluidez da mistura, de modo que, quanto maior é a razão água/cimento, maior é a fluidez do concreto, e também afeta a resistência e

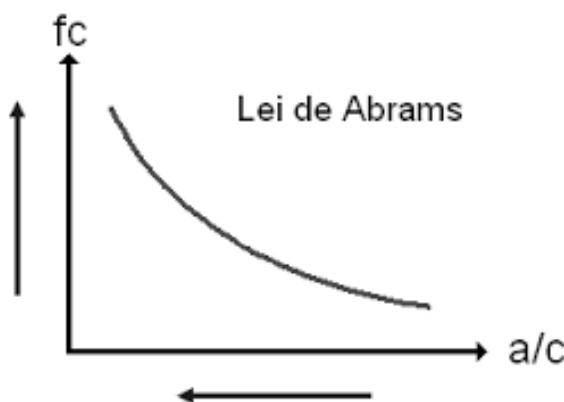
durabilidade do concreto endurecido. A correlação da resistência à compressão e a razão água/cimento foi uma descoberta de Abrams (1918), a qual originou a Lei de Abrams, que considera que, “para um dado cimento, método de ensaio e idade, a resistência à compressão do concreto totalmente compactado depende apenas da relação água/cimento”.

De modo matemático, a Lei de Abrams pode ser expressa conforme a Equação 1, onde f_c é a resistência à compressão do concreto, a/c é a relação água/cimento (em massa) e A e n são constantes empíricas determinadas por ensaios para cada tipo de material e traço (ABRAMS, 1918; HELENE, ANDRADE, 2010).

$$f_c = \frac{A}{B^{(a/c)}} \quad (\text{Equação 1})$$

É estabelecido, mais especificamente, que, considerando os concretos plásticos, a resistência aos esforços é inversamente proporcional à relação água/cimento, seguindo uma tendência parabólica, conforme é mostrado na Figura 2. Ou seja, até um certo limite, quanto menor for a relação água/cimento, maior será a resistência do concreto.

Figura 2 – Gráfico que representa a Lei de Abrams



Fonte: Maranhão (2018).

Outros fatores bastante relevantes são: a porosidade, tempo de cura, grau de hidratação, tipo e teor de cimento, propriedades dos agregados (aderência, rugosidade e granulometria) e pureza da água. Em relação à porosidade, inclusive, sabe-se que o uso de água em excesso na fabricação do concreto ocasiona maior porosidade, uma vez que mais poros são formados durante a evaporação da água. Uma consequência da maior porosidade é a redução da resistência mecânica do concreto.

3.1.2 Dosagem experimental do concreto

Existem diversos métodos experimentais que visam determinar a dosagem do concreto, ou seja, obter a proporção em massa dos constituintes em relação à massa de cimento. A proporção dos materiais é denominada traço unitário em massa (TUM). Conhecendo o TUM de um concreto, é possível obter qualquer quantidade dele, garantindo-se as mesmas propriedades, desde que as proporções relativas entre seus componentes sejam mantidas (HELENE, ANDRADE, 2010).

O TUM é descrito da maneira indicada na Equação 2, onde: A se refere à unidade de cimento, em massa; B é a quantidade em massa de adição pozolânica tipo escória granulada e moída de AF, metacaulim, sílica ativa, cinza de casca de arroz, etc; a é a quantidade em massa de agregado miúdo (areia) em relação à massa de cimento; b é a quantidade em massa de agregado graúdo (brita) em relação à massa de cimento; a/c é a relação entre água e cimento, ou entre água e aglomerantes, em massa; e $adt_{1\%}$ é a relação entre massa de aditivo e a massa de cimento, em percentual (HELENE, ANDRADE, 2010).

$$A : B : a : b : a/c : adt_{1\%} \quad (\text{Equação 2})$$

3.1.3 Concreto de cimento Portland

O concreto de cimento Portland é caracterizado por possuir o cimento Portland como aglomerante, e é o tipo de concreto de uso mais difundido na sociedade, em comparação a outros tipos existentes, tais como o concreto geopolimérico, concreto de enxofre polimerizado, concreto de fosfato de magnésio, concreto asfáltico e concreto de argila calcinada. Este concreto passou a ser produzido após o patenteamento do cimento Portland por John Aspdin, em 1824, na Inglaterra; o cimento levou este nome como referência à pedra de Portland, uma rocha calcária conhecida por sua durabilidade (HELENE, ANDRADE, 2010).

O cimento Portland é constituído de calcário (CaCO_3), argila e outros materiais. Um exemplo da composição química deste material é fornecido na Tabela 1. Para fabricação do cimento Portland, os constituintes são moídos, depois misturados em um forno rotativo a temperaturas entre 1400 °C e 1500 °C. O aquecimento em alta temperatura de calcário e argila origina o clínquer, que é um material granulado, base do cimento Portland. Segundo Aitcin (2016), a formação do clínquer é dada, sequencialmente, pelas reações de: (i) evaporação da água existente, (ii) decomposição de MgCO_3 em MgO e CO_2 , que ocorre a 333 °C,

(iii) decomposição, a 900 °C, de CaCO₃, que resulta em CaO e CO₂, a 900 °C, e (iv) formação de silicatos por meio de calcinação a cerca de 1450 °C. Como resultado, produzem-se os quatro principais compostos químicos do cimento Portland: silicato tricálcico (3CaOSiO₄ ou C₃S), silicato dicálcico (2CaOSiO₄ ou C₂S), aluminato tricálcico (3CaOAl₂O₃ ou C₃A) e ferro-aluminato tetracálcico (4CaOAl₂O₃F₂O₃ ou C₄AF).

Tabela 1 – Exemplo de composição química do cimento Portland

Composto	Quantidade (%p.)
CaO	42,0
CO ₂	35,5
SiO ₂	15,5
MgO	2,5
Al ₂ O ₃	2,5
Fe ₂ O ₃	2,0

Fonte: Patton (1976).

Após sair do forno, o clínquer é moído com, geralmente, 3% de gesso e possíveis outras adições para produzir o cimento. Neste caso, a função do gesso na mistura que compõe o cimento é retardar o seu endurecimento após ser hidratado, fornecendo tempo suficiente para que o cimento seja manuseado e depositado conforme requerido pela aplicação proposta (PATTON, 1976; HEWLETT, 1998; HELENE, ANDRADE, 2010).

3.2 Aproveitamento de resíduos na fabricação de concreto

A produção de concreto é uma atividade industrial que impacta bastante o meio ambiente. A fabricação de cimento, a principal matéria-prima do concreto, gera altíssimas quantidades de CO₂. Além disso, a extração da natureza das outras matérias-primas implica mineração em larga escala e intenso uso energético, o que, geralmente, afeta de modo negativo o solo, o ar e a qualidade da água (ETHEREDGE, 2025). Portanto, atualmente há um incentivo científico para o estudo de tecnologias sustentáveis para produção de concreto. Exemplos de tecnologias sustentáveis que estão sendo constantemente aplicadas são o uso de cimento de baixo carbono e a implementação de processos de produção mais limpos, em termos de eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis para combustíveis de fontes renováveis.

A incorporação de coprodutos gerados em processos produtivos de diversos setores industriais é outra prática que se tornou comum e que é benéfica para a redução tanto do impacto ambiental quanto dos custos associados à produção de concreto. Embora não atue diretamente na diminuição dos danos ao meio ambiente gerados pela fabricação do concreto, esta medida

auxilia no aproveitamento de resíduos que, a princípio, poderiam ser descartados ou alocados em pátios específicos, ajudando a logística industrial de muitos setores. Ademais, entende-se que o uso de resíduos na composição do concreto reduz a demanda associada à produção de suas matérias-primas clássicas.

É conhecida a incorporação de variados tipos de resíduos industriais na composição do concreto, tais como: escória de alto forno e outros resíduos advindos da indústria siderúrgica; cinzas volantes originadas de termoelétricas a carvão; sílica ativa, coproducto da exploração do silício metálico; resíduos de vidro moído, oriundos da reciclagem do vidro; resíduos de construções e pó de mármore ou granito, da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais.

Cunha *et al.* (2006) estudaram a caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas nos processos siderúrgicos de lingotamento contínuo de laminação, visando investigar justamente suas potencialidades industriais. As carepas passaram pelos processos de secagem, peneiramento e briquetagem, e, em seguida, procedeu-se com a caracterização física e química. Foram analisados os teores de umidade e de óleo, a granulometria, a absorção de água e composição química, fornecendo informações que são úteis na aplicação, por exemplo, destes resíduos na composição de um concreto.

Amran *et al.* (2021) publicaram um estudo de revisão de literatura acerca do uso de escória para produção de concreto sustentável. Os autores comentam que a incorporação de escória de alto-forno granulada e moída ou a substituição total do cimento Portland por escória ativada alcalinamente (AAS) reduz preocupações relacionadas ao consumo de energia, uso de matérias-primas e custos de fabricação do concreto tradicional.

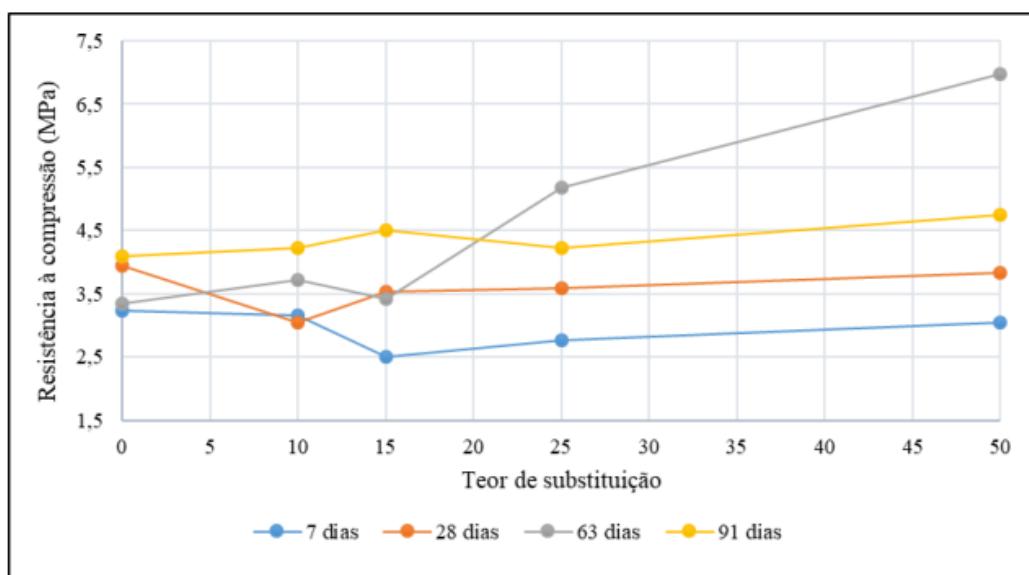
Silva *et al.* (2021) analisaram substituições parciais de 10%, 20% e 30% do agregado miúdo (areia) por resíduos de arenito Botucatu em concreto estrutural. Seus resultados mostraram que esta substituição do agregado miúdo, até o teor de 30%, manteve-se constante no comportamento físico do concreto estrutural, baseado nos valores de absorção de água, massa específica e resistência à compressão obtidos.

Figueiredo e Vargas (2016) avaliaram a influência nas propriedades mecânicas da utilização de agregados reciclados da região de Criciúma/SC, em termos da resistência à compressão. Os autores estudaram a incorporação destes resíduos da construção civil nos teores 30%, 60% e 100%. Para o tempo de cura de 28 dias, o traço de concreto sem resíduos atingiu uma resistência à compressão de 33,62 MPa, enquanto os traços com resíduos atingiram as resistências de 31,4 MPa (30%), 34,28 MPa (60%) e 16,62 MPa (100%). Ou seja, o concreto produzido com 30% de substituição sofreu uma queda na resistência à compressão em relação ao material de referência. Por sua vez, o concreto fabricado com 60% apresentou um ganho de

cerca de 1,5% na resistência à compressão. Por fim, para o concreto com 100% de substituição do agregado miúdo, houve uma queda de cerca de 50%, em todas as propriedades.

O trabalho de Trentin *et al.* (2020) visou estudar a viabilidade de utilização de garrafas *long neck* de vidro moídas para substituir parcialmente a areia na produção de argamassa. Foram realizados ensaios de consistência no estado fresco e de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade no estado endurecido. Os percentuais de substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro moído foram de 10, 15, 25 e 50%, usando os tempos de cura de 7, 28, 63 e 91 dias. A resistência mecânica obtida foi estatisticamente igual ou superior ao traço referência, sendo as maiores resistências obtidas com o teor de 50% de resíduo de vidro moído. Em relação à análise do efeito do tempo de cura, Trentin *et al.* (2020) comentam que o tempo de 63 dias resultou os melhores resultados de resistência à compressão, conforme pode ser constatado nos dados apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Efeito combinado do teor de substituição e do tempo de cura sobre a resistência à compressão

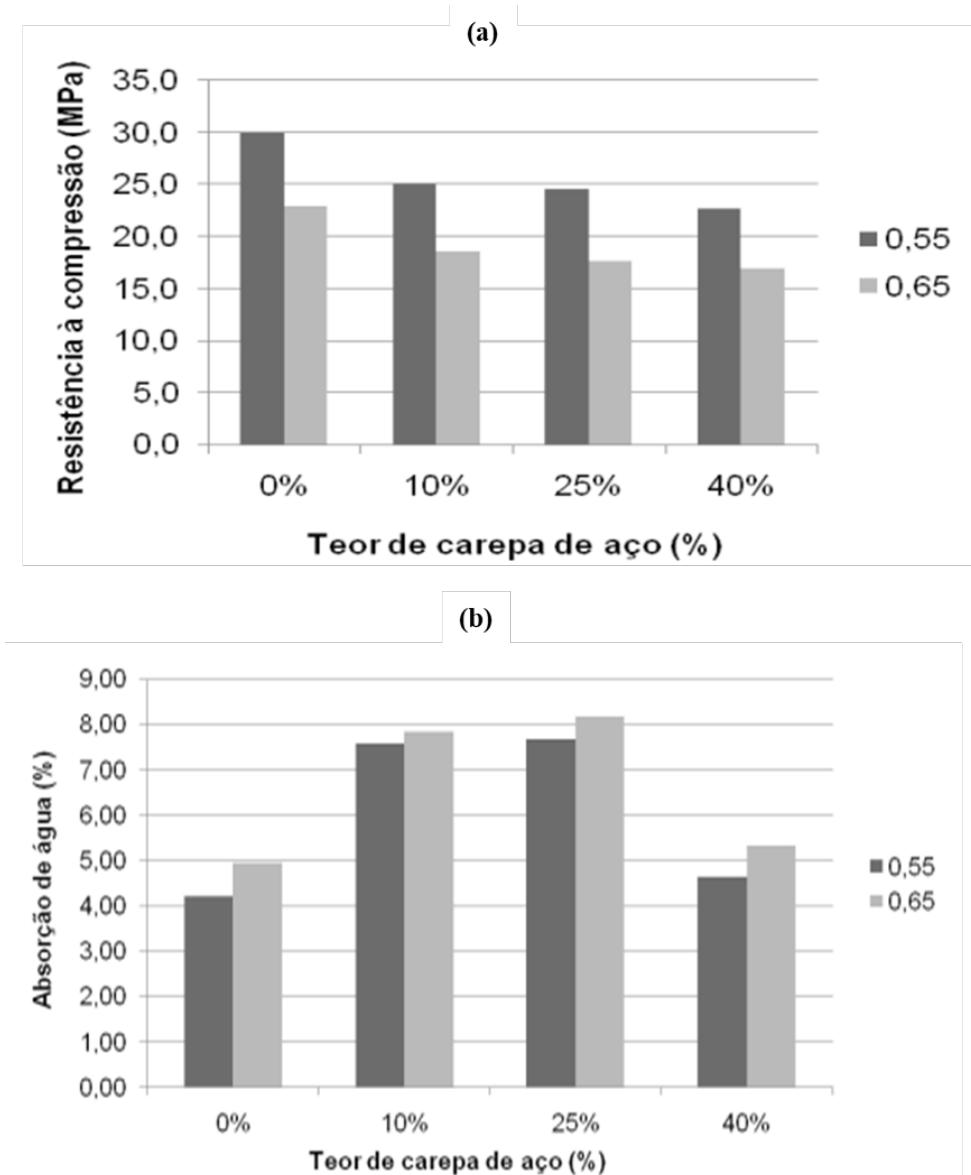


Fonte: Trentin *et al.* (2020).

Pereira, Cossa e Pereira (2008) avaliaram a utilização de carepa de aço na produção de concreto, por meio de produção de concretos com traços 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5, com diferentes teores do resíduo (0%, 10%, 25% e 40%) e abatimento de $110\pm10\text{mm}$. A carepa de aço se tratava de um resíduo siderúrgico. Foram analisadas a absorção de água e a resistência à compressão. As principais conclusões dos autores foram: (i) o emprego da carepa de aço aumentou a demanda de água para a manutenção do nível de trabalhabilidade requerida para a aplicação e

(ii) para ambas relações a/c estudadas, os concretos apresentaram uma redução média na resistência à compressão de cerca de 20%, assim como é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – (a) Resistência à compressão e (b) absorção de água para as relações água/cimento de 0,55 e 0,65



Fonte: Pereira, Cossa e Pereira (2008).

Ao avaliar os trabalhos disponíveis na literatura, percebe-se que, em geral, concretos produzidos teores de substituição de agregados miúdos maiores que 20% tendem a apresentar uma melhora nas propriedades mecânicas. Além disso, entende-se que conhecer a forma e a variabilidade é fundamental para a garantia da qualidade; a limpeza do agregado reciclado também é crucial, pois a presença de óleos e graxas, por exemplo, pode afetar a sua interação química e mecânica com os demais materiais.

3.3 Geração de resíduo na trefilação de fios-máquina

No presente trabalho, é proposto o aproveitamento do resíduo formando no processo de trefilação de fios-máquina como substituição parcial ao agregado miúdo na fabricação de concreto. Tendo em vista a contextualização da formação deste resíduo, que é uma carepa de óxido de ferro, a operação de trefilação é abordada a seguir.

A trefilação objetiva a redução da seção transversal de materiais metálicos por meio da aplicação de um esforço de tração, forçando o material através de uma matriz cônica, conhecida como fieira ou trefila. Este processo permite que uma redução da seção transversal de forma mais acentuada que outros processos, além de proporcionar uma alta precisão dimensional. Outra característica inerente do material trefilado é a uniformidade e limpeza de sua superfície (DIETER, 1988). São exemplos de produtos trefilados fios e arames de aço, condutores elétricos, tubos e microtubos.

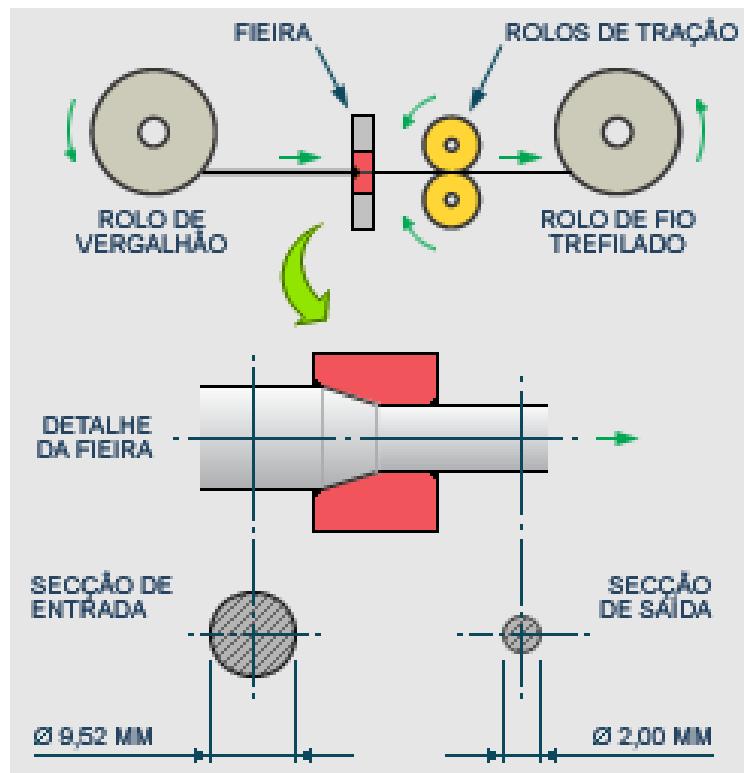
Ao ser tracionado e comprimido pela matriz, o material sofre deformação plástica. Assim, obviamente, a trefilação afeta as propriedades mecânicas. Quando combinado com um tratamento térmico posterior, por exemplo, pode proporcionar ao material uma vasta gama de propriedades mecânicas para a mesma composição química (BEDDOES, BIBBLY, 1999; DIETER, 1988).

O principal parâmetro da trefilação é a quantidade de redução (r), que é calculada a partir da seção inicial do material (A_0) e da seção final requerida (A), por meio da Equação 3. Outros parâmetros essenciais são o semiângulo de trefilação, a lubrificação durante a operação e as propriedades mecânicas do material antes e após redução (DIETER, 1988).

$$r = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

O processo de trefilação é ilustrado simplificadamente na Figura 5, na qual destacam-se a fieira, os rolos de tração, a seção de entrada do material e a seção de saída, que é reduzida, em comparação à inicial.

Figura 5 – Representação esquemática do processo de trefilação



Fonte: Conformação Mecânica (2010).

A lamination à quente de fios-máquina produz, na superfície destes materiais, uma camada de óxido; para aços, esta camada consiste em óxidos de ferro. Uma vez que a camada de óxido possui uma dureza muito maior do que o núcleo do arame, ela deve ser removida antes da trefilação, como uma forma de garantir a uniformidade na seção transversal final do material e, também, de aumentar a vida útil do equipamento utilizado para trefilação (SOUZA, CORBACHO, 2015).

A remoção da camada superficial de óxido de ferro, conhecida como carepa, pode ocorrer pelo processo de descarepação, que pode proceder de forma mecânica ou química. Quando realizado mecanicamente, a descarepação consiste no descascamento, dobramento e/ou escovamento do material. Já de forma química, a descarepação é feita por meio de decapagem, com o uso de HCl (ácido clorídrico) ou H₂SO₄ (ácido sulfúrico) diluídos.

A descarepação é seguida da lavagem do material em água corrente e de um recobrimento; geralmente, o material é imergido em banho de cal aquecido a uma temperatura de 100 °C, visando neutralizar quaisquer resíduos de ácido, impedir a corrosão do material e preparar a superfície do material para ser recoberta com o lubrificante da trefilação (DOVE, 1979).

3.4 Fabricação de corpo de prova de concreto para ensaio de compressão

Existem diversas normas que tratam da confecção e teste de corpos de prova de concreto. Por exemplo, a norma ABNT NBR 6118 (2007) aborda o teste de abatimento, também conhecido como *slump test*, que consiste na compactação por abatimento de um corpo de prova dentro de um molde; depois de “abatido”, a nova altura do corpo de prova é medida e, então, comparada à altura original do molde, assim possibilitando a determinação da trabalhabilidade do concreto. A norma NBR NM 67 define as especificações dimensionais do corpo de prova para a realização do teste de abatimento.

No presente trabalho, para a fabricação de corpos de prova de concreto para a realização de ensaios de compressão, usou-se a norma ABNT NBR 5738 (2016). Esta norma engloba o procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova dos tipos cilíndricos e prismáticos de concreto. Segundo ela, os moldes de corpos de prova cilíndricos, que correspondem aos utilizados neste estudo, devem ter altura igual ao dobro do diâmetro, e o diâmetro deve ser de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm. Ademais, é estabelecido que os planos das bordas circulares externas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde.

Os moldes devem: (1) ser fabricados em aço ou outro material não absorvente, de modo a não reagir com o cimento Portland; (2) ser capazes de manter sua integridade durante a operação de moldagem; (3) ser abertos na extremidade superior e (4) permitir fácil desmoldagem. A base inferior do molde deve ser bastante plana, e o conjunto formado pelo molde e sua base não deve permitir vazamentos. A Figura 6 apresenta típicos moldes para corpos de prova de concreto cilíndricos.

Figura 6 – Moldes para corpos de prova de concreto cilíndricos



Fonte: CS Construsinos (2019).

Em relação à fabricação dos corpos de prova e realização do ensaio de compressão, a norma ABNT NBR 5738 (2016) determina o procedimento padrão, que é descrito brevemente a seguir:

- Inicialmente, os moldes devem ser revestidos internamente com óleo mineral ou outro lubrificante antes da moldagem de corpos de prova;
- A mistura que constitui o concreto deve ser misturada novamente antes de ser despejada no molde do corpo de prova;
- Deve-se introduzir o concreto no molde em camadas de volume aproximadamente igual e adensar cada camada utilizando uma haste;
- Deve-se bater levemente na face externa do molde até o fechamento de eventuais vazios;
- A última camada deve ser moldada com quantidade em excesso de concreto, de modo que, ao ser adensada, complete todo o volume do molde e seja possível proceder ao seu rasamento, eliminando o material em excesso;
- Após o adensamento da última camada, deve ser feito um rasamento na superfície com a borda do molde, usando uma régua metálica ou uma colher de pedreiro adequada;
- Os corpos de prova devem ser preferencialmente moldados no local onde devem ser armazenados, evitando-se o manuseio e transporte de corpos de prova recém-moldados;
- Corpos de prova cilíndricos devem permanecer em repouso pelas primeiras 24 h, sob superfície horizontal rígida e livre de vibrações;
- Antes de ensaiar os corpos de prova, deve-se preparar suas bases, de modo que se tornem superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova.

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos é padronizado pela norma ABNT NBR 5739 (2018), que define os parâmetros do ensaio, tais como a preparação da superfície das bases dos corpos de prova, a velocidade do carregamento aplicado, a umidade dos corpos de prova, entre outros. A Figura 7 mostra o aspecto de um corpo de prova de concreto cilíndrico antes e a pós a realização de um ensaio de compressão.

Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão em prensa manual de 100 toneladas: (1) CP de concreto durante o rompimento e (2) CP rompido



Fonte: Wolenski *et al.* (2011).

A norma ABNT NBR 5738 (2016) define que a amostragem é descrita pela norma ABNT NBR NM 33. A norma ABNT NBR 16886 (2020), por sua vez, afirma que as amostras a serem ensaiadas “devem ser obtidas aleatoriamente, logo após terem sido completadas a adição e a homogeneização de todos os componentes do concreto, principalmente após a incorporação total da água de mistura e/ou aditivo”.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

A carepa de óxido de ferro cuja adição como agregado miúdo estudada no presente trabalho foi fornecida por uma empresa do ramo metalúrgico. A carepa de óxido usada se trata, mais especificamente, de um resíduo gerado na trefilação para redução de diâmetro de fios-máquina, a qual é realizada por meio de um sistema de polias. Após a coleta, a carepa passou por um processo de separação granulométrica por meio do uso de peneiras granulometrias distintas, posicionadas de forma sobreposta. Para este estudo, selecionou-se a parcela da carepa que possuía granulometria menor ou igual à 300 µm.

A composição química da carepa de óxido de ferro foi determinada por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX). A análise foi realizada utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia da fabricante SHIMADZU, modelo EDX-7000, operando com 50 kV por 60 segundos para determinação dos teores dos elementos na faixa elementar do alumínio ao urânio e, depois, com fonte de 15 kV por 60 segundos para determinação dos teores dos elementos na faixa elementar do sódio ao escândio.

Para obter informações a respeito das fases presentes na carepa, amostras foram submetidas à Difração de Raios-X (DRX). Os parâmetros usados nesta análise foram: radiação de Co-K α ($K\alpha = 1,788 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, ângulo de varredura (2θ) de 40° a 110° , passo de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de $5^\circ/\text{min}$.

Os demais materiais empregados na fabricação dos corpos de prova a serem ensaiados foram brita, areia, cimento Portland e água, em quantidades que serão informadas no tópico seguinte.

4.2 Fabricação dos corpos de prova

Para analisar a influência do óxido de ferro nas propriedades mecânicas do concreto, foram confeccionados corpos de prova conforme a norma ABNT NBR 5739 (2016), a qual aborda o procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de concreto.

Inicialmente, foram elaborados corpos de prova chamados de padrão, os quais não continham óxido de ferro em sua composição. As propriedades mecânicas destes corpos de prova foram, na avaliação dos resultados dos ensaios de compressão, usadas de modo comparativo para compreender os efeitos da adição do resíduo na composição do concreto. Os corpos de prova padrão possuíam um traço 123; estes números se referem às proporções dos

seus componentes, que são informadas na Tabela 2. Em termos de massa, foram utilizados 1,5 kg de água, 1,5 kg de cimento Portland (CP III 32 RS), 3 kg de areia e 4,5 kg de brita.

Tabela 2 – Composição dos corpos de prova

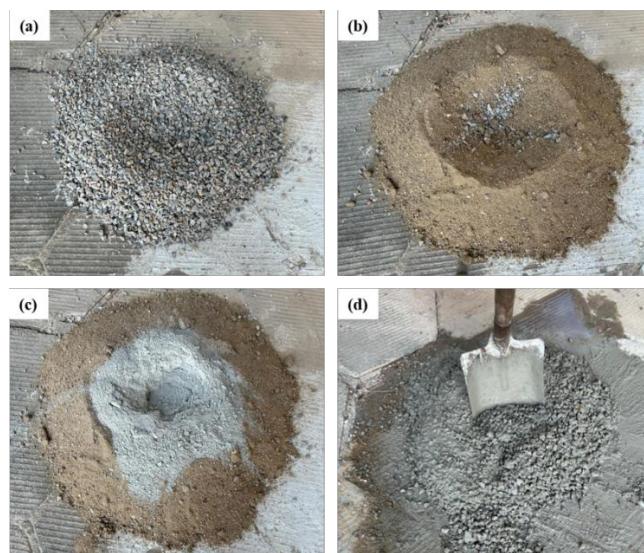
Tipo de corpo de prova	Água	Cimento Portland (CP III 32 RS)	Areia	Brita	Óxido de ferro
Padrão	1 porção	1 porção	2 porções	3 porções	-
Com adição de óxido de ferro	1 porção	1 porção	2 porções	3 porções	%5, %10, %15 ou %20 do peso de areia

Fonte: elaborada pelo autor.

Os corpos de prova com adição de resíduo de óxido de ferro também foram produzidos conforme descrito na norma NBR 5739 e sua composição também é detalhada na Tabela 2. As proporções de brita, areia, água e cimento são as mesmas utilizadas para os corpos de prova padrão. Contudo, na areia, foi misturada uma determinada quantidade de óxido de ferro. Em relação ao peso de areia, fabricaram-se corpos de prova contento 5%, 10%, 15% e 20% de óxido de ferro.

O processo de fabricação dos corpos de prova é ilustrado na Figura 8. Na fabricação de ambos os tipos de corpos de prova, sem ou com a adição de carepa de óxido de ferro, usou-se um espaço reservado para a mistura dos componentes do concreto, os quais foram adicionados na seguinte ordem: brita, areia, cimento e água.

Figura 8 – Mistura dos componentes para fabricação dos corpos de prova: (a) brita, (b) brita e areia, (c) brita, areia e cimento Portland (CP III 32 RS) e (d) mistura homogeneizada



Fonte: elaborada pelo autor.

Com o auxílio de uma colher de pedreiro e/ou com uma pá, o conteúdo da mistura de cada corpo de prova foi misturado até ficar homogêneo, como mostrado na Figura 1d. Entende-se que efetuar uma mistura adequada, além de garantir as proporções de cada material, é um dos pontos mais importantes no processo de fabricação. Neste trabalho, o tempo de mistura foi de 15 a 20 minutos.

Após o fim da mistura, a massa gerada era despejada na forma do corpo de prova, de modo a preenchê-la primeiramente apenas até a metade do volume. Então, usando um vergalhão, foram dados 15 golpes. Na norma ABNT NBR 5739 (2016), indica-se a utilização de 12 golpes, entretanto, visando eliminar de uma melhor forma os vazios, foi realizada uma adaptação para 15 golpes, a fim de garantir que qualquer vazio que pudesse ter sido originado durante o preenchimento do molde fosse eliminado com o prosseguimento do preenchimento do molde. Concluídos os golpes, a massa foi despejada até preencher a outra metade do molde e, depois, foram dados mais 15 golpes.

Os corpos de prova foram deixados descansando nos moldes por 24 horas, em um lugar plano, assim como apresentam a Figura 9. Em seguida, foram retirados dos moldes e alocados em uma bacia, em contato com um banho constituído de uma mistura de água e cal (com, aproximadamente, 1,5 kg de cal para 50 L de água), à temperatura ambiente. Este processo é mostrado na Figura 10. Os corpos de prova permaneceram em repouso neste banho até o momento imediatamente anterior aos ensaios de compressão; o tempo variou de acordo com o tempo de cura desejado.

Figura 9 – Corpos de prova no molde logo após fabricação



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 10 – Corpos de prova imersos no banho de água e cal



Fonte: elaborada pelo autor.

Como mencionado anteriormente, um dos objetivos deste estudo foi avaliar o efeito do tempo de cura nas propriedades mecânicas do concreto com adição de óxido de ferro. Para isso, optou-se por analisar os tempos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Para cada proporção de carepa de óxido de ferro utilizada em mistura com a areia, foram produzidos cinco corpos de prova para a avaliação de cada um destes tempos de cura. Também foram fabricados cinco corpos de prova para cada um dos tempos de cura para o tipo de corpo de prova considerado padrão, ou seja, que não continha a adição de carepa de óxido.

Para elucidar estas informações, os corpos são descritos na Tabela 3, que especifica a identificação usada para se referir a cada tipo de corpo de prova, a fim de facilitar a apresentação dos resultados.

Tabela 3 – Corpos de prova fabricados

Tipo de corpo de prova	Tempo de cura (dias)	Quantidade de corpos de prova produzidos
Padrão	7	3
	14	3
	21	3
	28	3
Com 5% de óxido de ferro	7	3
	14	3
	21	3
	28	3
Com 10% de óxido de ferro	7	3
	14	3
	21	3
	28	3
Com 15% de óxido de ferro	7	3
	14	3
	21	3
	28	3
Com 20% de óxido de ferro	7	3
	14	3
	21	3
	28	3
Total de corpos de prova produzidos		60

Fonte: elaborada pelo autor.

Passado o tempo de cura proposto, os corpos de prova foram secados durante 10 minutos ao ar livre antes da realização dos ensaios de compressão, cuja metodologia será explanada no tópico a seguir.

4.3 Ensaios de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da UFC. Os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 5739 (2016). Foi usada uma máquina de ensaio universal Siemens (Figura 11), capaz de aplicar uma carga de até 60 toneladas nos corpos de prova.

Figura 11 – Maquinário utilizado para os ensaios de compressão



Fonte: elaborada pelo autor.

Imediatamente antes do ensaio de compressão, realizaram-se medições ortogonais nos corpos de prova para determinação do diâmetro médio. Esta etapa é ilustrada na Figura 12. Além disso, foi feita a retificação das faces do corpo de prova usando uma lixa d'água comum, para garantir que ambas as faces estavam niveladas corretamente.

Figura 12 – Medições ortogonais nos corpos de prova



Fonte: elaborada pelo autor.

O diâmetro médio é necessário para o cálculo da área da seção transversal (A_t) por meio da Equação 4, onde d é o diâmetro médio do corpo de prova.

$$A_t = \pi \frac{d^2}{4} \quad (\text{Equação 4})$$

Sabendo a área da seção transversal do corpo de prova e a carga máxima suportada durante o ensaio de compressão, é possível calcular a resistência à compressão (f_c) utilizando a Equação 5, na qual $T_{máx}$ é a carga máxima.

$$f_c = \frac{T_{máx}}{A_t} \quad (\text{Equação 5})$$

Os ensaios de compressão procederam até a fratura dos corpos de prova, de modo que se considerou como critério de parada o momento no qual os primeiros indícios da fratura fossem detectados a olho nu. Após o ensaio, cada corpo de prova passou por uma inspeção visual para observação das características macroscópicas das superfícies de fratura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da carepa

A composição química da carepa, determinada por meio da técnica de FRX, é apresentada na Tabela 4. A carepa de trefilação tem como elemento químico majoritário o ferro e contém adições consideráveis de silício e manganês. Considerando principalmente os teores de silício e manganês obtidos, entende-se que a carepa é constituída não somente de óxidos de ferro, mas também possua os elementos de liga correspondentes à composição do fio-máquina cuja trefilação a originou. Os demais elementos identificados, como cálcio e potássio, podem ter sido originados de contaminações da carepa pelo lubrificante usado na fieira durante o processo de trefilação. Tais contaminações, então, não teriam sido completamente removidas na preparação da carepa.

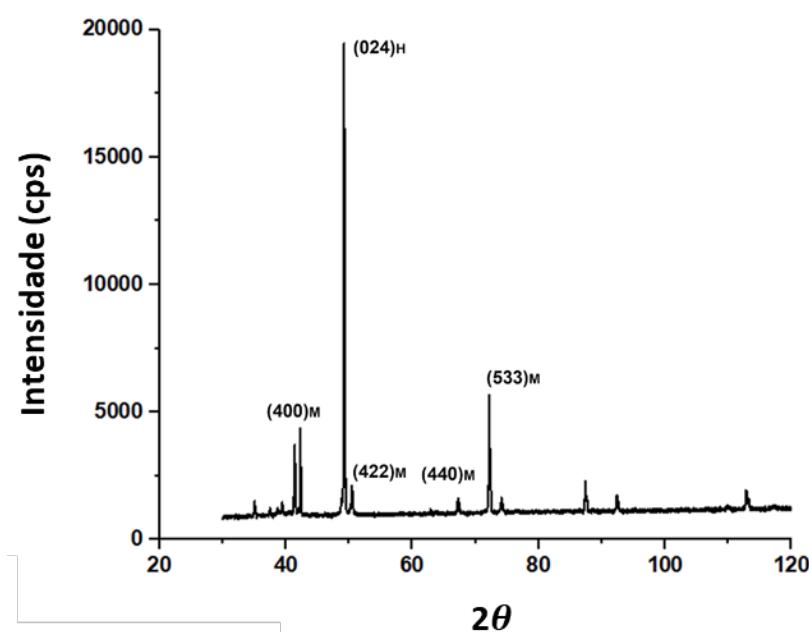
Tabela 4 – Composição da carepa de óxido de ferro

Fe	Si	Mn	K	Cr	Cu	Ca	S
96,79	1,90	0,68	0,08	0,06	0,03	0,13	0,30

Fonte: elaborada pelo autor.

A análise por meio de DRX complementou a caracterização da carepa de trefilação. Os resultados (Figura 13) destacam seis principais picos de difração, sendo quatro de maior intensidade de dois de menor intensidade.

Figura 13 – Difratograma da carepa de trefilação



Fonte: elaborada pelo autor.

O programa do equipamento de DRX utilizado interpretou os picos de difração como indicadores da presença de quatro compostos, estes sendo a ferrita de cobalto ou lítio, de fórmula $\text{Li}_0, \text{XCo}(\text{Fe}_2\text{O}_4)$, a grossulária, de fórmula molecular $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, e de dois óxidos de ferro, que podem vir de lubrificantes ou líquidos refrigerantes usados no processo de trefilação.

Segundo a literatura, os quatro picos de maior intensidade são correspondentes, para a radiação de Co, aos planos (400), (024), (440) e (533), que possuem, respectivamente ângulos 2θ de $41,35^\circ$, $49,27^\circ$, $50,44^\circ$ e $72,17^\circ$ (ZAINURI, 2017; MARIUS *et al.*, 2013). Os autores Zainuri (2017) e Marius *et al.* (2013) também afirmam que estes quatro picos são característicos da difração da magnetita (Fe_3O_4). Enquanto isso, um dos dois picos de menor intensidade se refere ao plano (024), o qual, para a radiação de Co, remete à difração da hematita (Fe_2O_3).

Portanto, de acordo com as informações apresentadas, acredita-se que a carepa de trefilação usada no presente trabalho seja composta principalmente de hematita (Fe_2O_3) e de magnetita (Fe_3O_4).

5.2 Ensaio de compressão

A Figura 14 apresenta o posicionamento dos corpos de prova no maquinário do ensaio de compressão e, também, o comportamento da falha verificado para alguns corpos de prova. Nos tópicos a seguir, a resistência à compressão de cada tipo de corpo de prova avaliado no presente trabalho será discutida, bem como a influência da quantidade de carepa de óxido utilizada e do tempo de cura.

Figura 14 – Exemplo da falha de um corpo de prova durante o ensaio de compressão

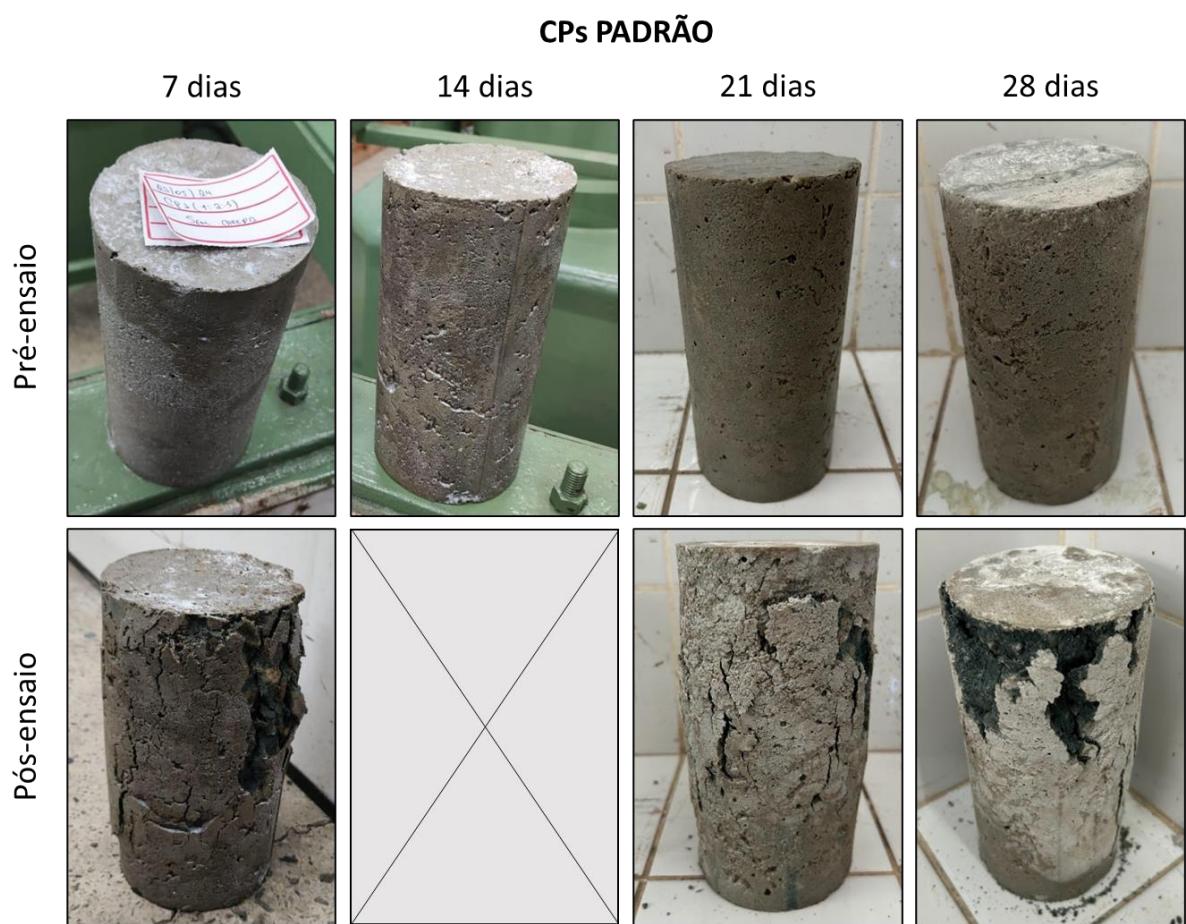


Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.1 Corpos de prova padrão

Os corpos de prova padrão, ou seja, fabricados sem a adição de carepa, são mostrados na Figura 15, tanto antes quanto após o ensaio de compressão, para os quatro tempos de cura avaliados. É importante comentar que, infelizmente, os registros dos corpos de prova padrão que experenciaram o tempo de cura de 14 dias foram perdidos durante a etapa de tratamento de dados, devido ao grande número de CPs produzidos e avaliados. Contudo, entende-se que isso, no geral, não comprometeu a análise dos resultados.

Figura 15 – Registro dos corpos de prova padrão pré e pós-ensaios de compressão

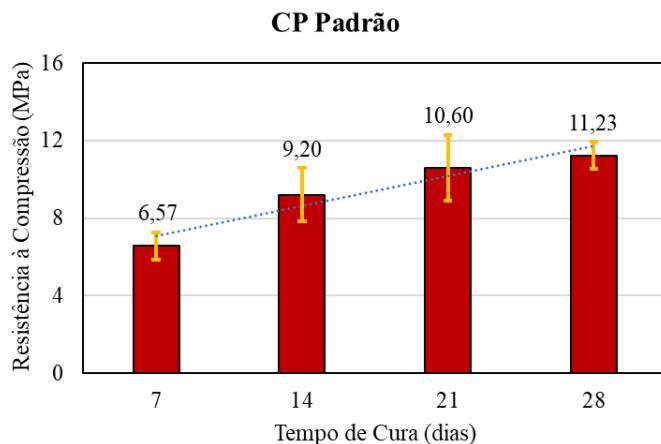


Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores de resistência à compressão dos corpos de prova padrão são informados no gráfico presente na Figura 16. Estes valores consistem na média da resistência à compressão verificada para os três CPs de cada variação de percentual de carepa adicionado e tempo de cura que foi ensaiado, e as barras de erros apresentadas no gráfico consistem no desvio padrão dos dados. A resistência à compressão dos CPs padrão foi considerada como referência para análise

e discussão dos resultados dos outros tipos de CPs, para que, assim, fosse possível compreender a influência da utilização da carepa de óxido e do tempo de cura.

Figura 16 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova padrão com o tempo de cura



Fonte: elaborada pelo autor.

Segundo os dados apresentados na Figura 16, a resistência à compressão média dos corpos de prova padrão aumentou em relação ao aumento do tempo de cura. Comparando o CP que experenciou 7 dias de cura com o CP de 28 dias de cura, houve um aumento de 70,9% na resistência à compressão média. Porém, considerando os desvios padrão obtidos, percebe-se que a resistência à compressão dos CPs cujo tempo de cura foi de 14, 21 e 28 dias não difere significativamente, embora tenha aumentado conforme o aumento do tempo de cura. Sendo assim, neste caso, pode-se considerar um tempo de cura igual ou maior a 14 dias já benéfico para melhorar a resistência à compressão.

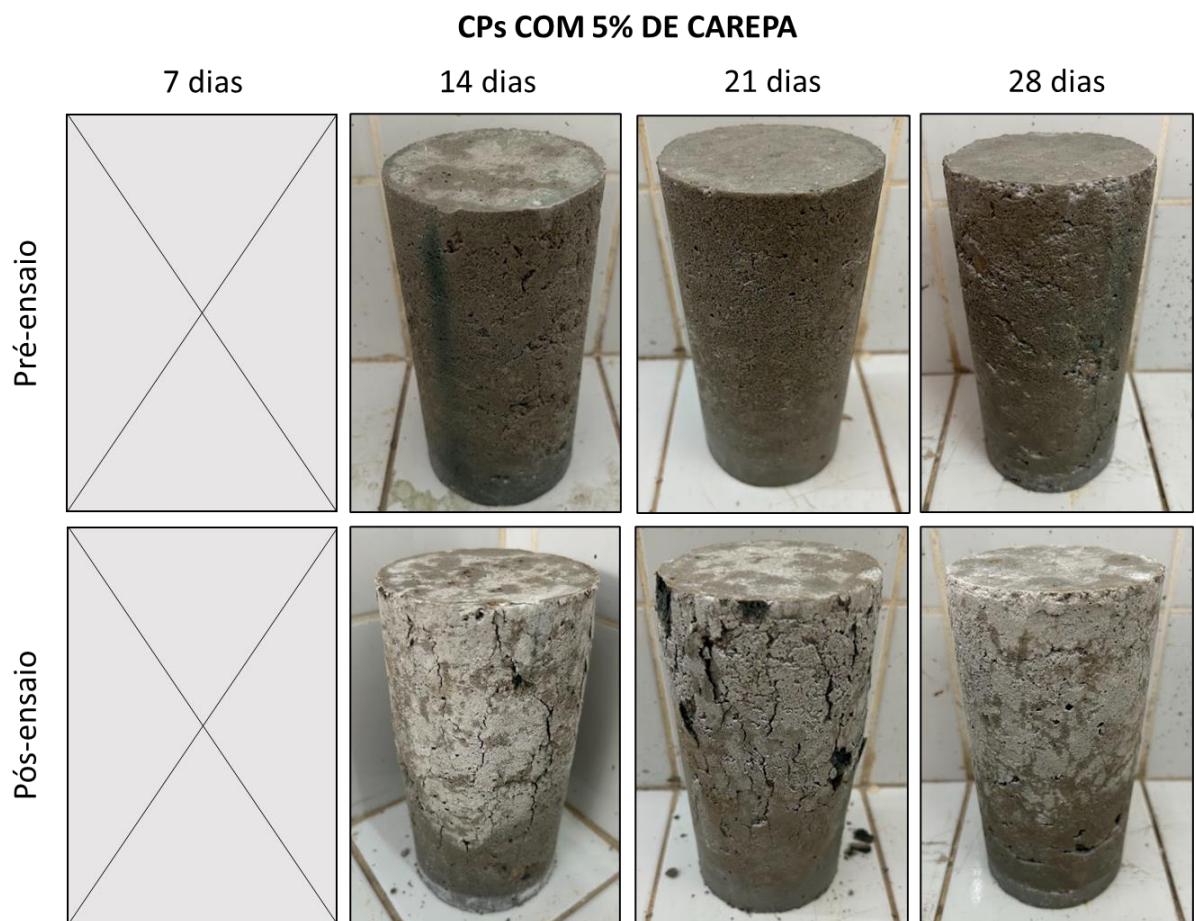
O fato comentado anteriormente é de conhecimento da literatura existente acerca da fabricação de concreto, pois diversos trabalhos, como os de Cruz (2018), Bauer (2009) e Bresolin (2016), comentam que o tempo ideal de cura do concreto é de 28 dias, o qual é suficiente para que a mistura passe pelos processos de hidratação e endurecimento e, assim, alcance sua resistência máxima.

5.2.2 Corpos de prova com 5% de carepa

O aspecto dos corpos de prova fabricados com 5% de carepa adicionada ao peso de areia antes e após os ensaios de compressão é mostrado na Figura 17. Ressalta-se que, assim como ocorreu para um corpo de prova padrão, os registros dos corpos de prova com 5% de

carepa não foram localizados na etapa de tratamento e edição das imagens. Novamente, o entendimento dos resultados não foi comprometido.

Figura 17 – Registro dos corpos de prova com 5% de carepa pré e pós-ensaio de compressão

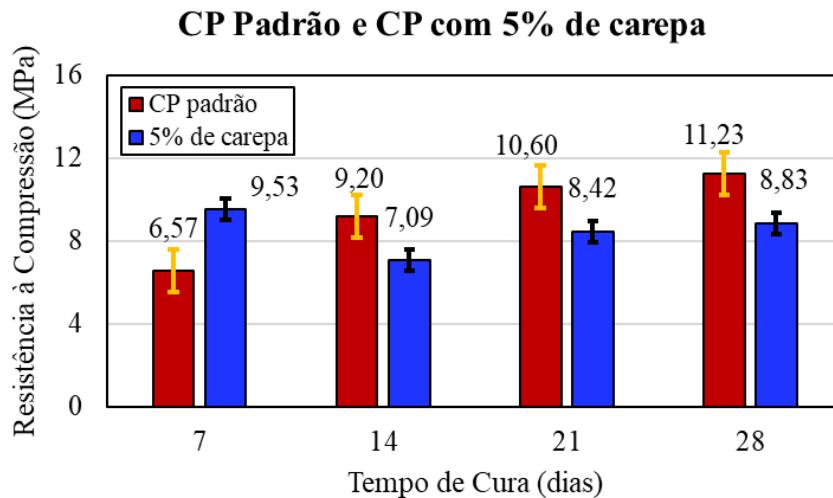


Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 18 informa os valores de resistência à compressão dos CPs com 5% de carepa. Também são apresentados os valores referentes aos CPs padrão. Houve, exceto para o tempo de cura de 7 dias, um decrescimento na resistência à compressão devido à adição da carepa de óxido. Avaliando os desvios padrão, é perceptível que este decrescimento foi significativo. Para o tempo de cura de 28 dias, a diminuição da resistência à compressão foi de 21,37% em relação ao CP padrão.

Contrastando as informações apresentadas na Figura 17 e na Figura 15, entende-se que, apesar dos corpos de prova com 5% de carepa apresentarem terem sofrido menos danos físicos durante o ensaio de compressão, é fato que eles resistiram menos à compressão do que os corpos de prova padrão.

Figura 18 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 5% de carepa com o tempo de cura



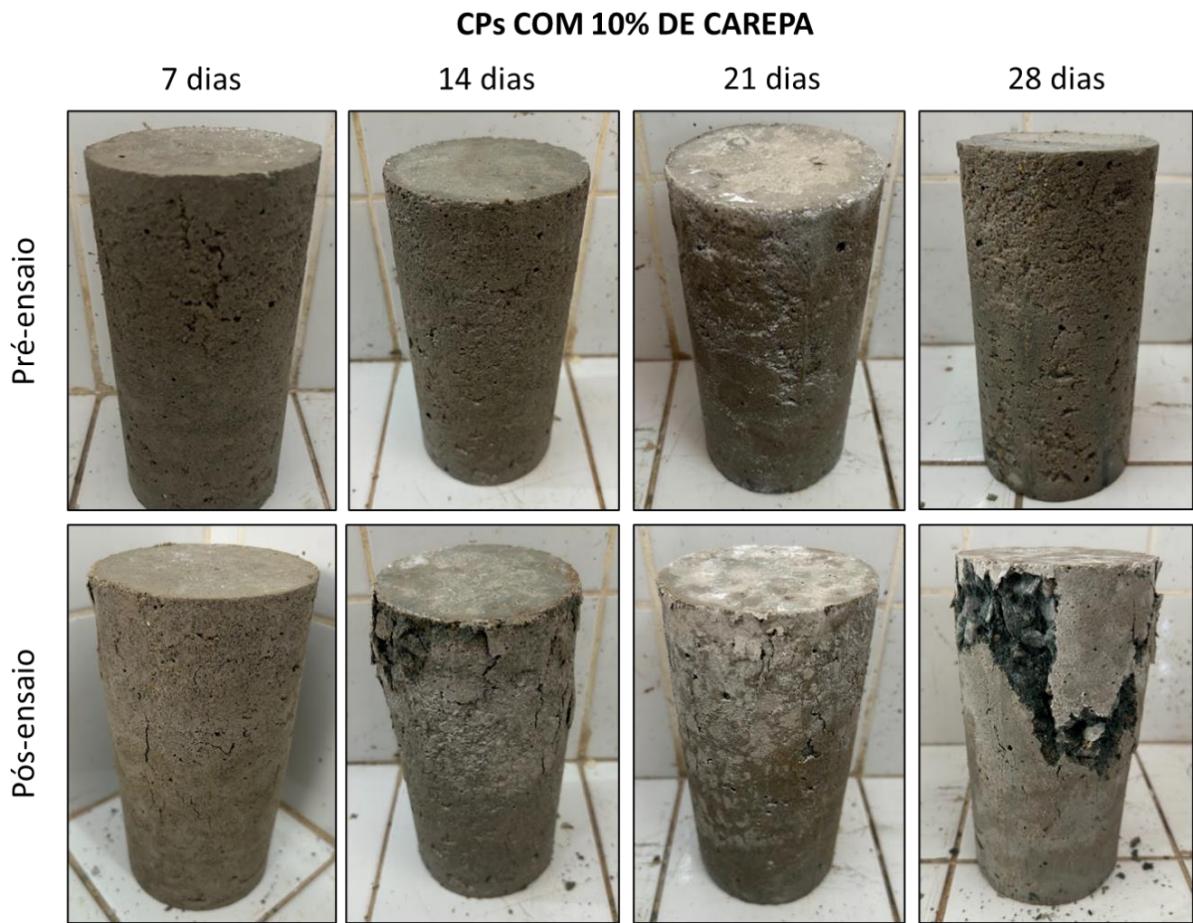
Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.3 Corpos de prova com 10% de carepa

A Figura 19 mostra a condição dos corpos de prova que contêm 10% de carepa de óxido antes e após os ensaios de compressão. Avaliando visualmente, os corpos de prova com 10% de carepa apresentam ter sofrido falhas mais críticas do que aquelas verificadas para os CPs contendo 5% de carepa, apresentando um aspecto mais esfarelado e até mesmo partes desintegradas, como se pode observar nos corpos de prova de tempo de cura de 14 e 28 dias, por exemplo.

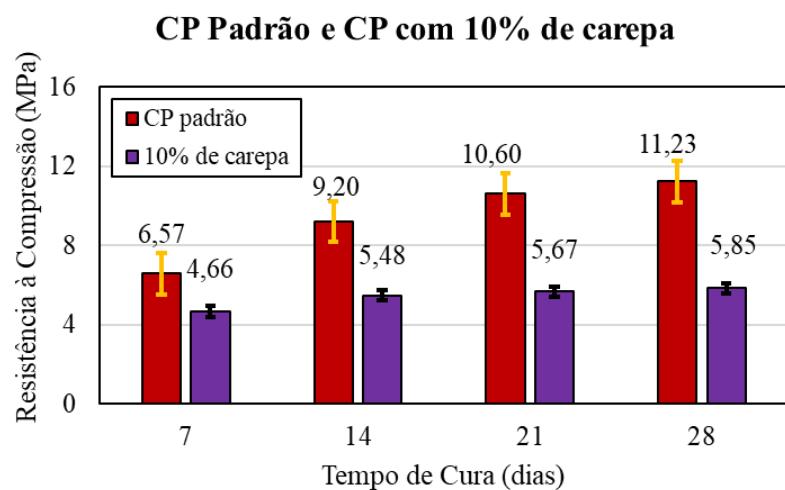
De acordo com o relatado no gráfico da Figura 20, houve uma queda na resistência à compressão dos CPs fabricados com 10% de carepa em relação aos CPs padrão. Inclusive, este decrescimento na resistência à compressão foi mais acentuado do que o ocorrido para os CPs com 5% de carepa de óxido. Conforme comentado anteriormente, em relação ao CP padrão, a diminuição da resistência à compressão para o CP com 5% de carepa foi de 21,37%, considerando o tempo de cura de 28 dias, enquanto foi de 51,91% para o CP com 10% de carepa.

Figura 19 – Registro dos corpos de prova com 10% de carepa pré e pós-ensaios de compressão



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 20 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 10% de carepa com o tempo de cura

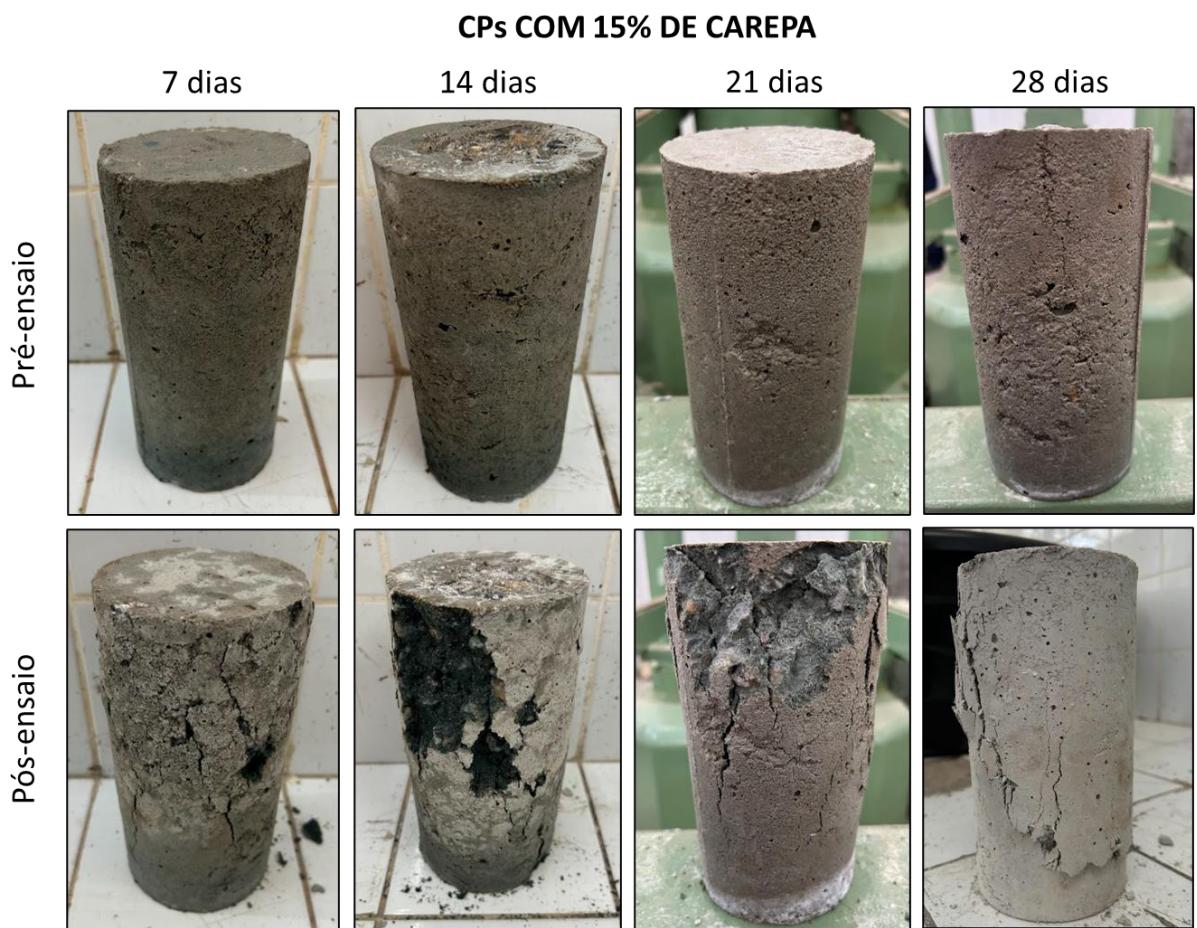


Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.4 Corpos de prova com 15% de carepa

Os corpos de prova fabricados com 15% de carepa são mostrados na Figura 21, nas condições antes e depois dos ensaios de compressão. Os danos sofridos em decorrência do ensaio parecem ter sido mais severos a este tipo de corpo de prova do que para os CPs contendo 10% de carepa.

Figura 21 – Registro dos corpos de prova com 15% de carepa pré e pós-ensaios de compressão

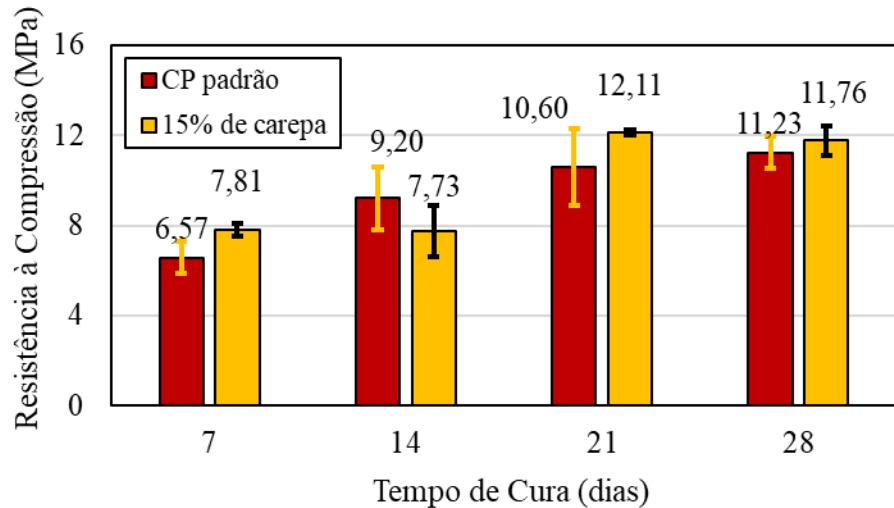


Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 22 informa a resistência à compressão média dos CPs contendo 15% de carepa. Para os tempos de cura de 7, 21 e 28 dias, estes CPs apresentaram um aumento da resistência à compressão, quando comparados com os CPs padrão, ainda que, estatisticamente (levando em consideração os desvios-padrão), os resultados nestas condições tenham sido bastante semelhantes para ambos tipos de corpos de prova. O fato é que a porcentagem de 15% de carepa de óxido misturada na areia não resultou em uma piora da resistência à compressão, exceto para o tempo de cura de 14 dias. Este resultado é satisfatório, uma vez que, segundo os resultados obtidos, seria possível, por exemplo, reaproveitar esta quantidade de carepa de óxido,

que é um resíduo da trefilação de um fio máquina, para a fabricação de concreto sem que as propriedades mecânicas sejam comprometidas.

Figura 22 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 15% de carepa com o tempo de cura



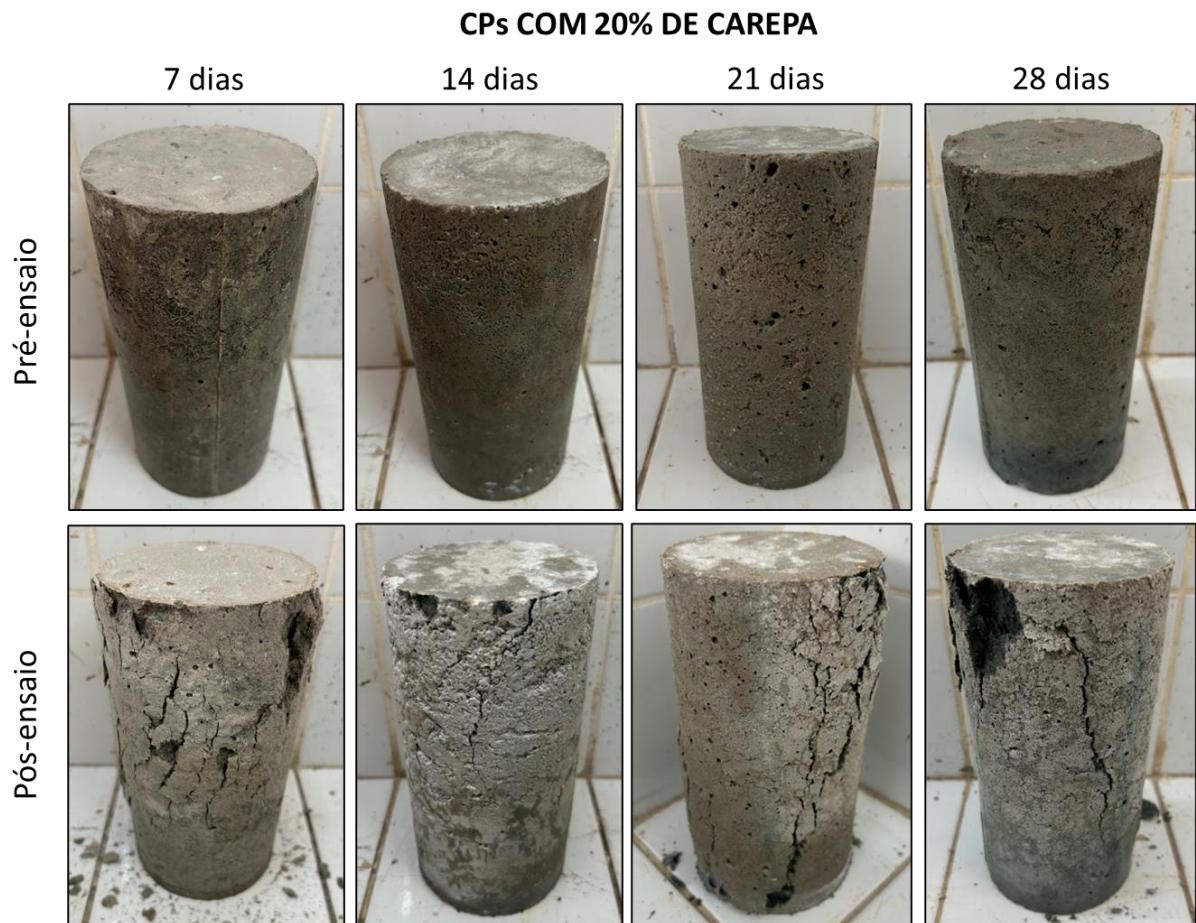
Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.5 Corpos de prova com 20% de carepa

Na Figura 23, apresenta-se o aspecto dos corpos de prova com 20% de carepa de óxido pré e pós-ensaios de compressão. Aparentemente, os CPs com 20% de carepa sofreram menos desintegração devido ao ensaio, em comparação aos CPs fabricados com 15% de carepa, como pode ser concluído a partir da observação da Figura 21 e da Figura 23.

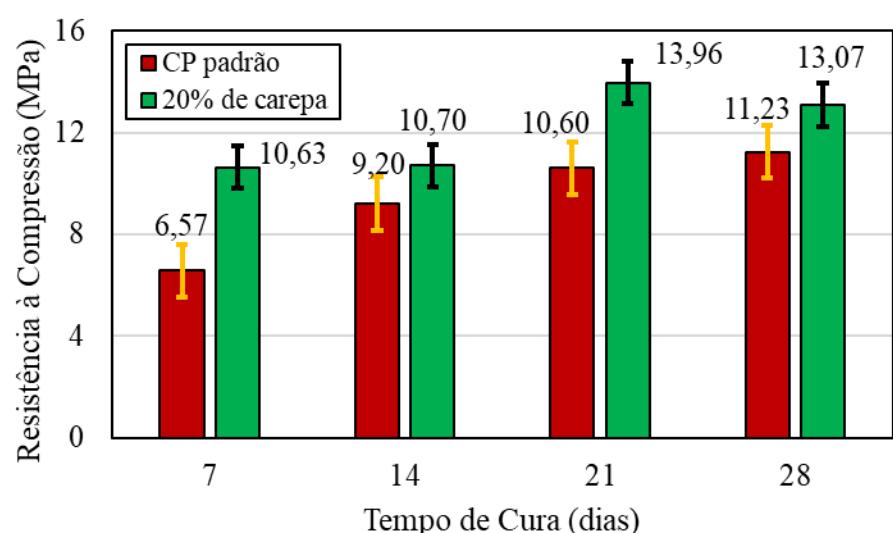
Em relação ao valor da resistência à compressão, a leitura do gráfico da Figura 24 informa que, assim como verificado para os CPs com 15% de carepa, os CPs com 20% de carepa apresentaram maior resistência à compressão do que os CPs padrão. Os ensaios dos CPs com 20% de carepa, para os tempos de cura de 7 e de 21 dias, resultaram em uma melhora estatisticamente relevante da resistência à compressão, tendo o valor desta propriedade aumentado em 61,8% e 31,7%, respectivamente, para estas condições. Com os tempos de cura de 14 e 28 dias, embora os limites dos desvios-padrão positivo e negativo possam ter cruzado com os dos CPs padrão, a melhora da resistência à compressão ainda é bastante notória, sendo de 16,3% para o tempo de cura de 7 dias e de 16,4% para o tempo de cura de 28 dias.

Figura 23 – Registro dos corpos de prova com 20% de carepa pré e pós-ensaios de compressão



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 24 – Relação da resistência à compressão dos corpos de prova com 20% de carepa com o tempo de cura



Fonte: elaborada pelo autor.

Diversos trabalhos na literatura confirmam uma melhora na resistência à compressão devido a adição de carepas em concretos. Goergen (2006), por exemplo, estudou o uso de carepa de aço em concretos visando a fabricação de peças pré-moldadas para pavimentação e concluiu que o emprego deste resíduo aumentou em cerca de 10% a resistência à compressão em relação ao concreto convencional e que, além disso, não houveram modificações consideráveis na trabalhabilidade dos materiais com adição de carepa.

Almeida (2009) também avaliou a utilização de carepa de aço na produção de blocos de concreto, focado na aplicação na área de alvenaria. Seus resultados mostram que os blocos de concreto com adição de carepa de aço apresentaram um melhor desempenho, em comparação a blocos de concreto fabricados convencionalmente.

Contudo, também existem autores que comentam efeitos contrários aos comentados anteriormente ao se adicionar carepas na composição do concreto. Borges (2017) analisou a substituição da areia como agregado miúdo por carepa de aço nas porcentagens de 10%, 20% e 40%. Após as análises dos resultados obtidos, o autor concluiu que a adição de carepa não contribuiu para o melhoramento ou para a constância nas características do material produzido, assim não solucionando o problema de destinação do resíduo sólido, que, em seu caso, tratava-se da carepa de aço.

Uma leitura crítica dos trabalhos disponíveis na literatura possibilita elencar pontos importantes ao estudar os efeitos da adição de carepas como agregado miúdo para a fabricação de componentes de concreto. O estado da carepa é bastante relevante; ao avaliar e comparar os resultados, é essencial informar, por exemplo, a granulometria da carepa e sobre a presença ou não de contaminantes, como graxas e óleos oriundos dos maquinários onde estes resíduos são gerados, que podem influenciar na forma com que a mistura se comportará. A quantidade de carepa adicionada também é outro fator relevante, pois parece existir, para cada tipo de mistura, uma faixa de quantidade de carepa adequada, para a qual as propriedades do concreto modificado ou são mantidas em relação ao convencional ou são melhoradas.

De todo modo, tratando especificamente dos resultados do presente trabalho, o tópico a seguir visam comentar sobre a influência da porcentagem de carepa de óxido adicionada e do tempo de cura dos corpos de prova na resistência à compressão.

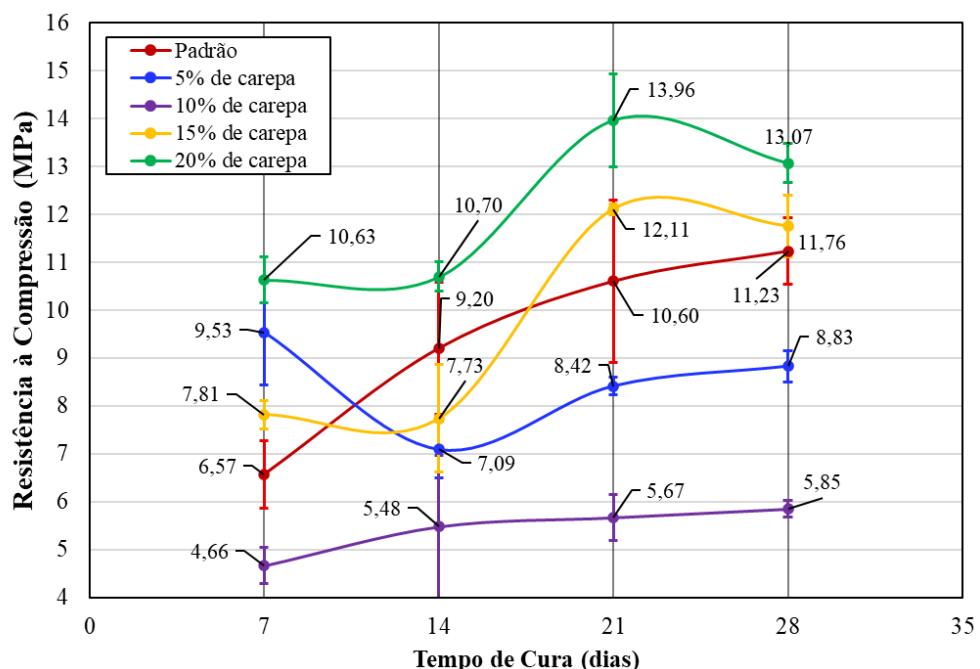
5.3 Influência da adição de carepa e do tempo de cura

Na Figura 25, apresenta-se um gráfico contendo todas as informações quanto à resistência à compressão informadas anteriormente, porém, rearranjadas de modo a facilitar o entendimento acerca da influência tanto da adição de carepa quanto do tempo de cura nesta

propriedade mecânica. Cada curva mostrada se refere a um tipo de corpo de prova, fabricado com uma porcentagem específica de carepa. Os valores de resistência à compressão informados são os valores médios, e as barras de erro consistem no desvio padrão positivo e negativo obtidos com os dados coletados.

De modo geral, a adição de carepa nas quantidades de 5% e 10% implicou em uma piora da resistência à compressão, tendo como referência os CPs padrão. Entretanto, ao se aumentar a quantidade de carepa adicionada para 15%, passou-se a observar uma melhora na resistência à compressão para três dos quatro tempos de cura avaliados. E a otimização desta propriedade continuou sendo verificada para os corpos de prova fabricados com 20% de carepa. Isto é, a partir de uma cerca quantidade de carepa adicionada ao peso de areia (a qual, no presente trabalho, foi considerada entre 10 e 15%), foi possível obter resultados favoráveis para o aproveitamento do resíduo da trefilação do fio máquina.

Figura 25 – Gráfico comparativo relacionando a resistência à compressão e o tempo de cura dos corpos de prova de concreto



Fonte: elaborada pelo autor.

Ainda utilizando como base para discussão os dados apresentados no gráfico da Figura 25, percebe-se que, de forma muito acentuada, o aumento do tempo de cura resultou em um aumento da resistência à compressão dos CPs padrão. O mesmo ocorreu para os CPs de 15% e 20%. Para os de 20%, inclusive, é possível verificar que os tempos de cura de 7 e 14 dias tiveram valores parecidos de resistência à compressão, e que o mesmo aconteceu para os CPs

que experenciaram 21 e 28 dias de cura. O tipo de corpo de prova que não apresentou diferenças relevantes no valor médio de resistência à tração com o aumento do tempo de cura foi o com 10% de carepa; isto é mais notório ainda quando se analisa os desvios padrão obtidos para estes CPs.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou o aproveitamento de carepa de óxido, resíduo da trefilação de fio-máquina, por meio da incorporação na fabricação de concreto com cimento tipo Portland, avaliando principalmente os efeitos desta adição na resistência à compressão. Os principais resultados obtidos de acordo com as análises realizadas foram:

- Com a caracterização por meio de FRX e DRX, identificou-se que a carepa usada é composta principalmente de hematita (Fe_2O_3) e de magnetita (Fe_3O_4);
- Os resultados dos ensaios de compressão mostraram que a adição de 5% e 10% de carepa de óxido como agregado miúdo, junto à areia, resultou no decrescimento da resistência à compressão, tendo como referência a resistência à compressão dos corpos de prova padrão. Este decrescimento foi mais acentuado para os CPs fabricados com 10% de carepa do que para os com 5% de carepa;
- Ao avaliar os resultados obtidos por meio dos ensaios de compressão, percebeu-se que, para 15% de carepa adicionada, houve um aumento na resistência à compressão para três dos quatro tempos de cura avaliados. Além disso, a melhora desta propriedade também aconteceu para os corpos de prova fabricados com 20% de carepa;
- Segundo os ensaios realizados, o aumento do tempo de cura somente não resultou em um aumento significativo da resistência à compressão dos corpos de prova fabricados com 10% de carepa de óxido;
- A análise dos resultados obtidos permitiu definir que, a partir de uma certa quantidade de carepa adicionada ao peso de areia, entre 10 e 15%, foi favorável para o aproveitamento do resíduo da trefilação do fio máquina.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5738. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** 2016.
- ABNT NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** 2018.
- ABNT NBR 16886. **Concreto – Amostragem de concreto fresco.** 2020.
- ABNT NBR NM ISO 3310-1. **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** 1997.
- ABNT NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação.** 2005.
- ABNT NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** 2003.
- ABRAMS, D. A. **Design of Concrete Mixtures.** Bulletin No. 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. 1918.
- AITCIN, P.C. **Science and Technology of Concrete Admixtures.** Chapter 3 – Portland cement, pp. 27-51, 2016.
- ALMEIDA, E. de. **Potencial de utilização do resíduo "Carepa de Aço" na fabricação de blocos de concreto.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ambiente e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2009.
- ALMEIDA, L. C. de. **Concreto.** 2002. Disponível em:
<https://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.
- AMRAN, M.; MURALI, G.; KHALID, N. H. A.; FEDIUK, R.; OZBAKKALOGLU, T.; LEE, Y. H.; HARUNA, S.; LEE, Y. Y. Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. **Construction and Building Materials**, vol. 272, 121942, 2021.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Novos Materiais para Construção Civil.** v.1. 5. Ed. Rio 444 de Janeiro: LTC, 2009, p. 488.
- BEDDOES, J.; BIBBLY M. J. **Principles of metal manufacturing process.** Arnold, 1999.
- BORGES, V. M. **Estudo do Concreto com Adição de Carepa de Aço.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campo Mourão, 2017.
- BRESOLIN, G. **Influência das Técnicas de Cura na Resistência do Concreto e Análise da Incorporação de Cal Hidratada na Técnica de Cura por Aspersão Periódica de Água.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Lajeado, 2016.

CONFORMAÇÃO MECÂNICA. Métodos de Conformação - Máquinas e Ferramentas. 2010. Disponível em: <https://conformacaomecanica.blogspot.com/2010/11/trefilacao.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. O Concreto como Material de Construção. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, n. 17, p. 49-58, 2013.

CRUZ, W. B.; ALVARENGA, M. C. S. **Estudo sobre a Influência do Fator Água Cimento e Diferentes Tipos de Cura na Resistência à Compressão do Concreto.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal de Viçosa – UFV, Rio Parnaíba, 2018.

CS CONSTRUSINOS. **Entenda como funciona os ensaios de resistência mecânica de concreto.** 2019. Disponível em: <https://construsinos.com.br/entenda-como-funciona-os-ensaios-de-resistencia-mecanica-de-concreto/>. Acesso em: 27 maio 2025.

DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. McGrawHill, 1988.

DOVE, A. B. **Steel Wire Handbook**. USA, the Wire Association International, INC, Vol.1 3. Ed., 1979.

EDUCA CIVIL. **7 Tipos de Concreto e suas Principais Características.** Disponível em: <https://educacivil.com/7-tipos-de-concreto/>. Acesso em: 26 maio 2025.

ETHEREDGE, L. M. **Concrete Technology: Evolution and Environmental Impacts.** 2025. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/392694245_Concrete_Technology_Evolution_and_Environmental_Impacts/references. Acesso em: 01 jul 2025.

FIGUEIREDO, N.; VARGAS, A. **Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de Criciúma/SC nas propriedades mecânicas de concretos estruturais.** Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, Brasil, 2016.

HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4º ed. Elsevier Ltd, 1998.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland.** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, IBRACON, 2010.

MARANHÃO, L. F. S. **Avaliação econômica da implantação de uma linha de produção de um aditivo para concreto em uma fábrica do Rio Grande do Norte.** Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MARIUS, C.; KISS, M.L.; IETA, A. Synthesis of Micrometric Single Crystalline Magnetite with Superparamagnetic Properties for Biomedical Applications. **Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech**, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994, p. 01-02.

PENA, I. R.; OLIVEIRA, R. F. **Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto Simples.** GETEC, v.10, n.26, p.35-51, 2021.

PATTON, W.J. **Materiais de Construção.** 1^a Ed. Editora EDUSP, 1976.

PEREIRA, G. L.; COSSA, R. J.; PEREIRA, F. M. Estudo da viabilidade da utilização de carepa de aço na produção de concreto. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, pp. 222-230, 2008.

SILVA, S. E. H.; ARNOLD, D. C. M.; ORTOLAN, V. K.; NADALON, J. E. A. Estudo do comportamento físico da substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de arenito Botucatu em concreto estrutural. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 26, n. 4, 2021.

SOUZA, G.O.; CORBACHO, R.S. Análise da viabilidade técnica do processo de remoção do óxido de ferro através da decapagem mecânica na trefilação do aço ABNT 1075. 8º **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, ABCM, 2015.

TRENTIN, P. O.; MANICA, J.; VANZETTO, S. C.; MARANGONI, B.; ZALESKI, A. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

WOLENSKI, A. R. V.; MONTEIRO, A. B.; CHRISTOFORO, A. L.; SANTOS, F. L.; BARBOSA, M. P. **Theoretical and Experimental Analysis of Self-Compacting Concrete by the Use of CP IV Cement and Mineral Metacaolim Addition.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis/SC, 2011.

ZAINURI, M. Hematite from natural stones as microwave absorbing material on X-band frequency ranges. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 196, 2017.