



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

EMERSON SANTANA DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE CAREPA DE TREFILAÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO NA
FABRICAÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

FORTALEZA

2025

EMERSON SANTANA DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE CAREPA DE TREFILAÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO NA
FABRICAÇÃO DE 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)

S223u Silva, Emerson Santana da.

Utilização de carepa de trefilação como agregado miúdo na fabricação de concreto de cimento Portland / Emerson Santana da Silva. – 2025.

56 f. : il. color.

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

Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.

1. Concreto de cimento Portland. 2. Carepa de trefilação. 3. Resistência à compressão. I. Título.
CDD 669

EMERSON SANTANA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE CAREPA DE TREFILAÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO NA
FABRICAÇÃO DE 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: 21/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Eng. Helano Wilson Pimentel
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha mãe, minha esposa e meu filho.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente expresso minha mais profunda e sincera gratidão à minha mãe, Maria de Fátima Santana, cuja dedicação incondicional ao longo de toda a minha trajetória foi acompanhada de um amor constante e de um encorajamento que nunca cessou. Ela foi a verdadeira força motriz por trás de todas as minhas conquistas acadêmicas, o alicerce fundamental que me sustentou e possibilitou a realização deste marco significativo em minha caminhada.

Ao Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez, dedico meu reconhecimento e agradecimento pela orientação diligente e pelo generoso compartilhamento de seus vastos conhecimentos. Sua mentoria foi decisiva para a formação e direcionamento deste trabalho, proporcionando-me observações valiosas tanto no âmbito acadêmico quanto profissional, as quais foram essenciais para o aprimoramento desta pesquisa. Aproveito a oportunidade para agradecer aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Ricardo Emilio Nogueira e Eng. Helano Wilson Pimentel, pelas contribuições sugeridas para a melhoria deste trabalho.

Aos cuidados e apoio incansáveis de Luara Ribeiro da Silva, mãe de meu filho, expresso minha gratidão imensa. Sua parceria e troca enriquecedora de ideias foram fundamentais em cada etapa deste projeto. Sua dedicação e apoio constante foram cruciais para a superação de desafios e para que juntos pudéssemos alcançar importantes marcos ao longo dessa jornada.

Ao meu filho, Luca Ribeiro Santana, dedico uma especial manifestação de carinho e agradecimento. Ele foi minha fonte de energia nos momentos difíceis, a motivação constante que me impulsionou a superar obstáculos e a seguir em frente, sempre com o pensamento de que todo esforço valeria a pena para construir um futuro melhor.

Agradeço de coração à minha irmã, Liziania Santana da Silva, e ao meu cunhado, Eugênio José Sirino Bessa, pelo apoio incondicional, orientações e conselhos valiosos ao longo dessa jornada. Além disso, sou eternamente grato pela base financeira que me proporcionaram antes e durante a minha trajetória universitária, sem a qual minha formação não teria sido possível.

Sou também profundamente grato aos colegas do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) e ao Centro Acadêmico da Engenharia Metalúrgica, que se mostraram uma rede de apoio constante, fundamental para o enfrentamento dos desafios que surgiram ao longo deste percurso. A troca contínua de experiências e o ambiente colaborativo nesses espaços foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Grupo Aço Cearense, representado por Gilberto Filho e Marcos Arruda, pela confiança depositada neste estudo e pelo empenho dedicado à sua realização. O apoio institucional foi imprescindível para que este trabalho alcançasse sua plenitude.

Aos meus colegas, professores e a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram com seu suporte, orientação e incentivo ao longo dessa jornada, expresso minha eterna gratidão. Cada contribuição, por menor que tenha sido, foi fundamental para o sucesso deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

A Universidade Federal do Ceará e aos laboratórios LACAM e NUTEC que disponibilizaram máquinas e equipamentos para o acontecimento deste trabalho. O resultado em sua totalidade, é fruto de um esforço coletivo, um reflexo do apoio inestimável de cada um. Sou imensamente grato por fazerem parte dessa caminhada e por tornarem possível a concretização deste projeto.

RESUMO

A crescente preocupação sobre os impactos ambientais, especialmente no que se refere à emissão de CO₂ proveniente da fabricação de concreto de cimento Portland, responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono, provoca a busca por alternativas sustentáveis, como o “concreto verde”, que visa reduzir os impactos ambientais do setor de construção civil através da utilização de práticas e materiais mais ecológicos. Baseado nisto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico do concreto de cimento Portland com a incorporação de partículas de óxido de ferro, originárias da carepa de aço proveniente do processo de trefilação, como substituto parcial da areia. A investigação busca verificar a viabilidade desse coproduto como agregado miúdo, analisando os efeitos na resistência à compressão do concreto. Para isso, foram produzidos corpos de prova com traço de referência, utilizando brita, areia e água, e posteriormente foram incorporados diferentes teores de carepa de trefilação substituindo a areia (5%, 10%, 15% e 20% em peso). A metodologia envolveu a realização de ensaios de compressão de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2015), utilizando uma máquina de ensaio universal. O período de cura foi variado em 7, 14, 21 e 28 dias, com a análise de 60 corpos de prova. A análise dos dados foi realizada por meio de cálculo de médias e uma análise estatística de variância (ANOVA), a fim de avaliar a influência do teor de carepa e do tempo de cura nas propriedades mecânicas do concreto. Os resultados indicaram que a incorporação de carepa de trefilação resultou em uma queda na resistência à compressão do concreto à medida que o teor de carepa aumentava. Tal redução pode estar relacionada a fatores como a contaminação do coproduto, o traço ideal ainda não determinado e a concentração de tensões compressivas na região da carepa. A análise de variância (ANOVA) revelou que o teor de carepa tem um efeito significativo negativo nas propriedades mecânicas do concreto. A inspeção visual dos corpos de prova após os ensaios confirmou modos de fratura aceitáveis conforme a norma ABNT NBR 5739, embora não tenha sido possível correlacionar diretamente o modo de fratura à variação das propriedades mecânicas. Conclui-se que, embora a carepa de trefilação tenha potencial como material alternativo no concreto, é necessário mais estudo para determinar o traço ideal e mitigar os efeitos da contaminação, visando a melhoria da resistência mecânica e a sustentabilidade do material.

Palavras-chave: Concreto de cimento Portland; Carepa de trefilação; Resistência à compressão.

ABSTRACT

The increasing concern about the environmental impacts, particularly regarding CO₂ emissions from Portland cement concrete production, which is responsible for approximately 8% of global carbon dioxide emissions, has led to the search for sustainable alternatives such as "green concrete." This aims to reduce the environmental impact of the construction sector through the use of more eco-friendly practices and materials. Based on this context, the present study aims to investigate the mechanical behavior of Portland cement concrete incorporating iron oxide particles from steel mill scale, a byproduct of the drawing process, as a partial sand substitute. The study explores the viability of this byproduct as a fine aggregate, analyzing its effect on concrete compressive strength. For this, test specimens were produced using a reference mix with crushed stone, sand, and water, to which varying amounts of mill scale (5%, 10%, 15%, and 20% by weight) were added as a replacement for sand. The methodology involved performing compression tests following ABNT NBR 5738 (2015) standards, using a universal testing machine. The curing period was varied at 7, 14, 21, and 28 days, with 60 test specimens analyzed. Data analysis was performed through average calculations and analysis of variance (ANOVA) to assess the influence of mill scale content and curing time on concrete's mechanical properties. Results showed that incorporating mill scale led to a reduction in compressive strength as the mill scale content increased. This reduction may be associated with contamination of the byproduct, the yet-to-be-determined ideal mix, and the concentration of compressive stresses in the mill scale region. ANOVA revealed that mill scale content significantly affects the mechanical properties of concrete. Visual inspection of the test specimens after testing confirmed acceptable fracture modes, though no direct correlation between fracture mode and mechanical property variation was found. In conclusion, while mill scale shows potential as an alternative material in concrete, further studies are needed to determine the optimal mix and mitigate the effects of contamination to enhance mechanical strength and material sustainability.

Keywords: Portland mortar concrete; Mill scale; Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– - Resistência à compressão do concreto em função da <i>idade (com incremento de lodo centrifugado de estação de tratamento de água)</i>	19
Figura 2	– – Relação entre resistência à compressão e razão água/cimento do <i>concreto</i>	19
Figura 3	– - Fluxograma do método de dosagem <i>IBRACON</i>	22
Figura 4	– - Diagrama de dosagem de concreto de cimento <i>Portland</i>	23
Figura 5	– - Diagrama de dosagem: (a) 0% de carepa de aço (concreto de referência), (b) 10% de carepa de aço, (c) 25% de carepa de aço e (d) 40% de carepa de aço.....	25
Figura 6	– (a) Curvas de graduação de escória (IS) e areia (NFA). (b) Corpos de prova produzidos. (c) Variação de resistência à compressão para diferentes proporções de concreto reciclado (RCA) e escória (IS) após curas de 7 e 28 dias.....	26
Figura 7	– - Resistência à compressão uniaxial dos traços (a) TS-0, (b) TS-10, (c) TS-20, (d) TS-30 e (e) TS-40, em MPa.....	27
Figura 8	– - (a) Esquemático do processo de trefilação. (b) Desenho em perspectiva de uma fieira. (c) Esquemático da atuação de tensões em um fio-máquina durante a passagem em uma <i>fieira</i>	29
Figura 9	– - Esquemático de uma fieira e seus parâmetros de controle durante a <i>trefilação</i>	30
Figura 10	– - Medição após <i>abatimento</i>	32
Figura 11	– - Sistema de decapagem para retirada de carepa de <i>fio-máquina</i>	34
Figura 12	– - (a1) Peneiras sobrepostas para separação da granulometria de carepa, (a2) exemplo de especificação da abertura da peneira, (b) carepa de trefilação separada em diferentes granulometrias.....	35
Figura 13	– - (a) Molde preenchido com concreto para início de cura. (b) Cura inicial	36

do concreto ao ar livre. (c) Armazenamento dos corpos de prova em solução de água e cal para finalização da <i>cura</i>	
Figura 14 – - Difratograma gerado por radiação Co da amostra de carepa de trefilação de granulometria entre 75 e 150 μm	36
Figura 15 – - Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto com traço padrão em função do tempo de <i>cura</i>	40
Figura 16 – - Valores da média da resistência à compressão do concreto de cimento Portland com variação nos tempos de cura e percentual de carepa de trefilação no <i>traço</i>	41
Figura 17 – - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 7 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de <i>carepa</i>	45
Figura 18 – - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 14 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de <i>carepa</i>	46
Figura 19 – - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 21 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de <i>carepa</i>	47
Figura 20 – - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 28 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de <i>carepa</i>	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – - Componentes de uma mistura típica de cimento Portland e sua participação em <i>peso</i>	174 3
Tabela 2 – - Abatimento recomendado para diferentes tipos de <i>obras</i>	31
Tabela 3 – - Número de camadas e golpes de adensamento para modelagem de corpos de prova de concreto <i>cilíndricos</i>	33
Tabela 4 – - Variáveis de análise para viabilidade de carepa de trefilação como agregado <i>miúdo</i>	37
Tabela 5 – - Composição química da carepa de trefilação determinada por fluorescência de <i>raios-X</i>	39
Tabela 6 – - Valores de resistência à compressão (fc), em MPa, calculados para os corpos de prova definidos para tempos de cura e traço de carepa <i>determinados</i>	43
Tabela 7 – - Resultados da análise ANOVA calculados a partir dos valores expostos na Tabela 6.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em Celsius
%	Porcentagem
f_c	Resistência à compressão
MPa	Megapascal
a/c	Água/cimento
kV	Kilovolts
©	Copyright
μm	Micrometros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Concreto de Cimento Portland	16
2.1.1	<i>Cimento Portland</i>	16
2.1.2	<i>Agregados</i>	19
2.1.3	<i>Relação água/cimento – dosagem do concreto</i>	20
2.2	Utilização de Coprodutos para Fabricação de Concreto	23
2.3	Processo de Trefilação	28
2.3.1	<i>Decapagem na trefilação</i>	30
2.4	Normas para Ensaios de Concreto	31
2.4.1	<i>Teste de abatimento – slump test</i>	31
2.4.2	<i>Moldagem e cura de corpos de prova</i>	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	4.1 Caracterização Química da Carepa de Trefilação	38
4.2	Avaliação das Propriedades Mecânicas	39
4.3	Inspeção Visual	44
5	CONCLUSÃO	49
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido na Terra, com produção anual estimada em torno de 28 bilhões de toneladas, sendo superado apenas pela água (MONTEIRO *et al.*, 2017). Isto se deve à sua grande aplicabilidade e versatilidade em diversas áreas, com ênfase no setor de construção civil, cuja demanda é crescente pelo rápido crescimento populacional e dos grandes centros urbanos, tornando constante a necessidade de construção de casas e novas infraestruturas. Tais medidas urbanísticas tornam o impacto ambiental voltado à construção civil cada vez maior.

A produção de concreto possui como material primário o cimento Portland, com produção recorde de 4,1 bilhões de toneladas em 2021 (STATISTA, 2023). Sua fabricação é responsável por cerca de 8% da emissão global de dióxido de carbono (NILIMAA, 2023). Esta significativa estatística, aliada ao grande consumo de recursos naturais como água e agregados (WADA *et al.*, 2010), traz consigo desafios voltados à sustentabilidade da fabricação de concreto.

“Concreto verde” é um termo atualmente utilizado para descrever um produto com implementação de práticas e materiais com o objetivo de reduzir o impacto ambiental causado pelo setor de construção civil (QAIDI, *et al.*, 2021). Tendo em vista este desafio de engenharia, a produção do concreto sustentável se baseia em três pilares: redução de desperdícios, utilização de materiais de produção local e incorporação de materiais alternativos (QAIDI *et al.*, 2021; RAHUL *et al.*, 2019; AGWA *et al.*, 2022). Desta forma, impactos ambientais causados por logística e consumo de energia são consideravelmente reduzidos, além de melhorar propriedades mecânicas do concreto fabricado. Outra importante pauta é a integração industrial, uma das vertentes da indústria 4.0, a qual é baseada em conexão entre diversos setores industriais, utilizando tecnologia para garantir produção e operação mais eficientes (XU, XU, LI, 2018).

Uma das formas de integração industrial, proposta pelo presente trabalho, é a substituição de areia, um dos insumos para fabricação de concreto, por óxido de ferro proveniente do processo de trefilação, popularmente chamado de carepa. Este resíduo é obtido por processos pré e pós-trefilação, e geralmente é depositado em pátios; portanto, não possuindo um destino apropriado, apesar de ser disposto de acordo com requisitos ambientais propostos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de concreto de cimento Portland com partículas de óxido de ferro proveniente do processo de trefilação de modo a verificar a viabilidade deste coproduto como agregado miúdo de forma parcial.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a carepa recebida proveniente do processo de trefilação com a obtenção da composição química e componentes presentes na carepa de trefilação por meio das técnicas de difração de raios-X e fluorescência de raios-X, visando entender a natureza deste resíduo industrial e avaliar seu potencial de reutilização em aplicações de concreto;
- Moldar corpos de prova de concreto envolvendo traços com substituição parcial de agregado miúdo por diferentes porcentagens em peso de carepa do processo de trefilação com granulometria acima de 300 micrômetros, visando avaliar a influência desta substituição na propriedade de resistência à compressão do concreto;
- Avaliar a resistência à compressão do concreto de cimento Portland com substituição parcial de agregado miúdo por diferentes porcentagens de carepa de óxido de ferro proveniente do processo de trefilação, mediante a realização de ensaios de resistência à compressão e análises estatísticas dos resultados utilizando o software Excel®.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresentará os aspectos teóricos necessários para embasamento da metodologia executada neste trabalho, assim como para apresentação dos resultados e posterior discussão. As Seções 2.1 e 2.2 trarão conceitos sobre fabricação da principal matéria-prima utilizada para fabricação dos corpos de prova, o concreto de cimento Portland, e resultados de trabalhos na literatura sobre substituição de insumos por coprodutos. A Seção 2.3 apresentará informações sobre o processo de trefilação, do qual a carepa de trefilação, coproducto utilizado neste estudo, é obtida. A Seção 2.4 compila informações sobre normas técnicas para avaliação de propriedades mecânicas de corpos de prova de concreto.

2.1 Concreto de Cimento Portland

O concreto de cimento Portland é, desde sua descoberta, o material de construção civil mais importante da sociedade atual. Sua ampla e constante utilização no século XX tornou este material o mais utilizado do mundo logo após a água (ISAIA, HELENE, ANDRADE, 2010). Sua mistura possui três componentes principais: cimento, água e agregados, sendo estes últimos divididos em agregados graúdos e miúdos (ISAIA, HELENE, ANDRADE, 2010). A combinação destes materiais, em determinada proporção, é conhecida como traço. Nos dias de hoje, o emprego de aditivos como pigmentos, fibras, minerais e outros agregados se tornou mais comum, objetivando a melhora de propriedades mecânicas e redução de custos aliada ao reaproveitamento de recursos.

Diante disso, o entendimento a respeito da função de cada constituinte que forma o concreto de cimento Portland é crucial, envolvendo processos de hidratação e cura, por exemplo. Por meio destas informações, será possível obter conclusões futuras das análises a serem realizadas.

2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é uma mistura complexa de compostos químicos que, ao entrar em contato com água, sofre uma série de reações químicas que provocam seu endurecimento. Segundo Patton (1976), as matérias-primas para o cimento Portland são, em essência, calcário (CaCO_3) e argila. Em alguns casos, o calcário pode ser substituído por gesso ou outros carbonatos de cálcio. Algumas especificações limitam o teor de compostos secundários. Por exemplo, os teores de magnésia se limitam a 5% (QIANG *et al.*, 2021), de

modo a evitar a sua reação com a água, formando Mg(OH)₂. Esta reação é acompanhada de um aumento de volume, facilitando a formação de trincas (PATTON, 1976).

A Tabela 1 define uma mistura típica para fabricação de cimento Portland.

Tabela 1- Componentes de uma mistura típica de cimento Portland e sua participação em peso.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CO ₂
Percentual em peso (%)	15,5	2,5	2,0	42,0	2,5	35,5

Fonte: PATTON, 1976.

As matérias-primas são inseridas em um forno para formação de um agregado em pelotas chamado clínquer (ISAIA, HELENE, ANDRADE, 2010). A mistura é gradualmente aquecida até uma temperatura de cerca de 1450 °C, ocorrendo a seguinte sequência de reações:

- 1) Evaporação da água existente;
- 2) Decomposição de MgCO₃ em MgO e CO₂, a 333 °C;
- 3) Decomposição de CaCO₃ em CaO e CO₂, a 900 °C;
- 4) A 1450 °C, as chamadas reações de calcinação ocorrem, pelas quais silicatos de cálcio são formados (AITCIN, 2016).

O clínquer, ao sair do forno, é misturado com cerca de 3% de gesso, para controle da hidratação do produto. Finalmente, a mistura é levada a um moedor para obtenção do cimento, de granulometria extremamente fina (PATTON, 1976).

A Etapa 4 da sequência de reações de formação do clínquer dão origem aos quatro principais compostos químicos do cimento Portland: silicato tricálcico (3CaO.SiO₂ ou C₃S), silicato dicálcico (2CaO.SiO₂ ou C₂S), aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃ ou C₃A) e ferro-aluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.F₂O₃ ou C₄AF). Além disso, existe o gesso – sulfato de cálcio hidratado (CaSO₄.2H₂O) em sua composição (AITCIN, 2016).

Baseando-se na aplicação, os cimentos Portland são divididos em cinco categorias (PATTON, 1976; MELO, 2017):

- Tipo I: não há adições de compostos secundários, exceto gesso, para controlar hidratação – também chamada de “pega” – do cimento. Utilizado quando não são exigidas propriedades especiais;
- Tipo II: com pequenas adições de coprodutos, como escória de altos fornos, possui desempenho semelhante ao Tipo I; entretanto, com melhor resistência quanto à ação química de solos e utilizado em aplicações com grande volume de concretagem;
- Tipo III: com adição de escória de alto forno em proporções de 35 a 70% em massa, este tipo de concreto possui maior durabilidade, com difícil propagação de trincas, e constitui certa impermeabilidade. Ideal para construção de barragens;
- Tipo IV: também utilizado em barragens, ou em aplicações com variação de temperatura e água corrente, aliada a ambientes agressivos. Contém adições de pozolana;
- Tipo V: cimento com baixo teor de aluminato tricálcico para prevenir formação de gesso em contato com solo e/ou água, evitando assim dilatação. Possui maior resistência inicial por moagem mais fina do clínquer.

O cimento Portland endurece ao se hidratar, por meio de uma série de reações. O ganho de resistência pode durar até meses, caso o contato com água seja recorrente, e envolve a interação dos compostos mencionados na subseção 2.1.1, C₃S, C₂S e C₃A. Segundo Gartnet e Damidot (2001), o silicato tricálcico é o constituinte mais importante, pois, ao reagir com a água, confere os estágios iniciais de resistência. Sua hidratação é regida pela Equação 1:

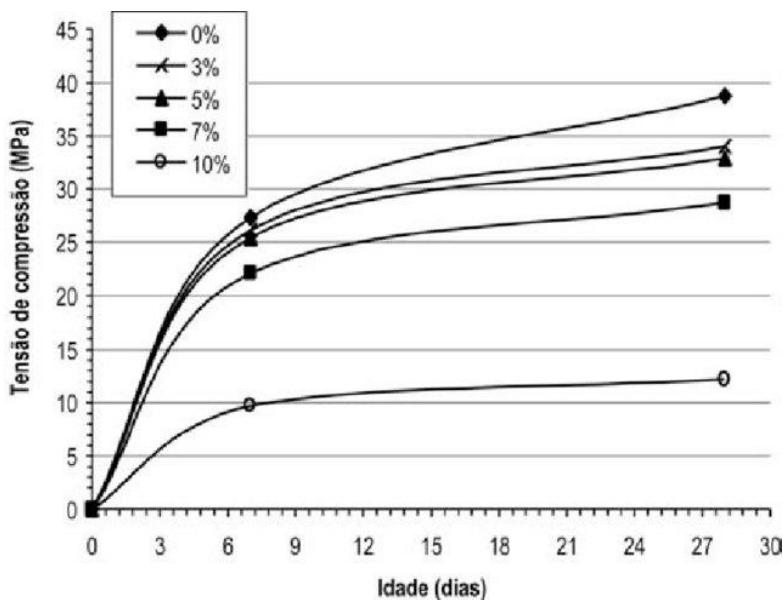


A reação dos demais constituintes toma maiores quantidades de tempo. Para tal, deve-se cumprir com um tempo mínimo, chamado de cura, para que o concreto possua resistência adequada exigida para aplicação. De acordo com a norma ABNT NBR 7212 (2012), o concreto deve ser curado em um ambiente protegido contra exposição do ambiente, de modo a evitar perda de água e que as reações de hidratação do cimento sejam prejudicadas. O tempo de cura varia entre 5 a 7 dias, quando a aplicação requer produtividade. Idealmente,

o tempo de cura é de 28 dias (BAUER, 2009). Outro fator importante para determinar o tempo de cura é a relação água/cimento (a/c), a qual será detalhada adiante.

A Figura 1 mostra uma relação entre resistência à compressão e idade do concreto, em dias, a qual retrata a importância da hidratação do cimento Portland.

Figura 1- Resistência à compressão do concreto em função da idade (com incremento de lodo centrifugado de estação de tratamento de água).



Fonte: HOPPEN *et al.*, 2005.

2.1.2 Agregados

Os agregados são materiais granulosos, os quais compõem cerca de 75% da mistura do concreto, são unidos por um aglomerante – cimento – e interferem na durabilidade e propriedades do material (ALMEIDA, 2012, LUDWIG *et al.*, 2022). Para além disto, a utilização de agregados contribui para um maior volume de mistura sem a utilização de maiores quantidades de cimento, portanto, barateando o custo final do concreto (LUDWIG *et al.*, 2022).

Os agregados podem ser classificados quanto à sua natureza (naturais, artificiais e reciclados), massa específica (leves – menor que 2000 kg/m³ –, normais – entre 2600 e 2800 kg/m³ –, e pesados – maior que 3000 kg/m³) e dimensões (ALMEIDA, 2012).

A norma ABNT NBR 7211 (2005) define os agregados, quanto à dimensão, em:

- (i) Miúdo: grãos passantes em peneira de diâmetro de 4,75 mm e retidos em peneira de 0,15 mm em ensaio realizado conforme a norma ABNT NBR 9935;

- (ii) Graúdo: grãos passantes pela peneira de diâmetro de 75 mm e retidos em peneira de 4,75 mm em ensaio realizado conforme a norma ABNT NBR 9935.

Como agregado graúdo, utiliza-se, geralmente, brita de dimensões comerciais com numeração variando entre 0 e 4, com diâmetros na faixa de 4,8 até 76 mm. Ensaios devem ser realizados para determinar sua densidade granulométrica, massa específica e resistência mecânica (ALMEIDA, 2012). Deve-se tomar cuidados quanto a presença de materiais que impeçam adesão entre cimento e agregado graúdo, assim como impurezas que atrapalhem reações de hidratação do cimento (PATTON, 1976). Como forma de tornar o concreto “verde”, a substituição de brita por reciclados de concreto tem se tornado recorrente (MCNEIL, KANG, 2013).

O agregado miúdo é geralmente constituído de argilas do tipo *shale*, areias de cava, vermiculita, perlita ou materiais pozolânicos, como escórias de alto-forno (PATTON, 1976; MCNEIL, KANG, 2013). De acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2005), ensaios de granulometria, massa específica, entre outros; também devem ser utilizados para agregados leves, de forma semelhante ao tratamento de agregados graúdos.

2.1.3 Relação água/cimento – dosagem do concreto

Apesar de ainda não existir um modelo ideal desenvolvido no Brasil, um estudo de dosagem objetiva determinar a melhor proporção entre os materiais que compõem o concreto; ou seja, a determinação do traço ideal. Para tal, são considerados todos os materiais a serem estudados: cimento, agregados graúdos e miúdos, água, ar incorporado, aditivos, pigmentos e fibras (TUTIKIAN, HELENE, 2011).

Métodos de determinação do melhor traço são amplamente desenvolvidos e os critérios de aceitação variam. O procedimento experimental de dosagem IBRACON (TUTIKIAN, HELENE, 2011) permite obter o comportamento mecânico e reológico do concreto, otimizando a proporção entre agregados miúdos e graúdos com bases experimentais. A relação água/cimento é o principal parâmetro para determinar as propriedades do concreto. O objetivo primário da água é fornecer trabalhabilidade da mistura, por simples efeito de lubrificação das partículas de agregado e o cimento (GRANTHAM, 2003). Efeitos adversos podem ocorrer à estrutura caso a relação a/c não seja adequada. Caso seja muito alta (ou seja, a quantidade de cimento estiver baixa), o concreto poderá ser suscetível à carbonatação (XI *et al.*, 2016). Do contrário, caso a relação água/cimento seja muito baixa (muito cimento na

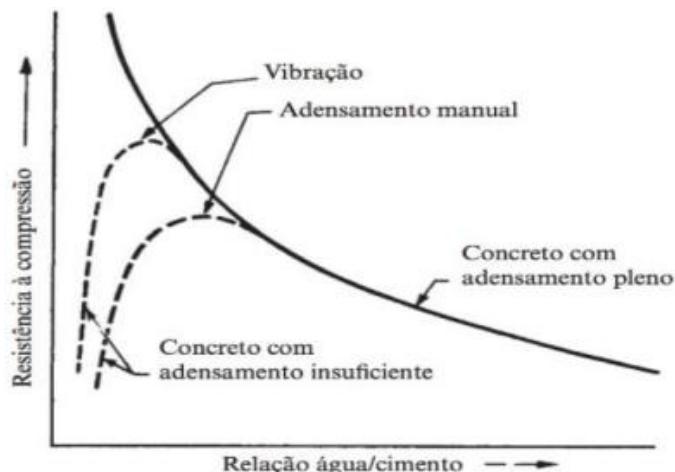
mistura), o calor produzido pela reação exotérmica de hidratação do cimento pode iniciar trincas térmicas em poros grandes por aumento do risco de contração (GRANTHAM, 2003).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a diminuição da resistência à compressão conforme a relação água/cimento está no aumento da porosidade do concreto. Poros atuam como concentradores de tensão na matriz, causando um enfraquecimento desta. Portanto, o método IBRACON se baseia em encontrar a melhor proporção entre os agregados, com mínima quantidade de água para fornecer a resistência adequada ao concreto, ainda com facilidade de ser trabalhado (NEVILLE, 2016).

Após 28 dias de cura, a resistência à compressão do concreto deve atender exigências atendidas por normas. A principal influência desta propriedade mecânica está na relação água/cimento. O peso de água usado por saco de cimento é inversamente proporcional à resistência à compressão.

A Figura 2 mostra uma relação entre resistência à compressão e a relação de água/cimento.

Figura 2 – Relação entre resistência à compressão e razão água/cimento do concreto.



Fonte: NEVILLE, 2016.

O método IBRACON possui, entre outros, os seguintes limites de aplicação (TUTIKIAN, HELENE, 2011):

- Resistência à compressão (f_c): entre 5 MPa e 150 MPa;
- Relação a/c: entre 0,15 e 1,50;
- Dimensão máxima do agregado (D_{max}): entre 4,8 e 100 mm;
- Distribuição granulométrica dos agregados: qualquer.

A Figura 3 mostra um fluxograma com os passos do método IBRACON de determinação do melhor traço para um concreto:

Figura 3 - Fluxograma do método de dosagem IBRACON.

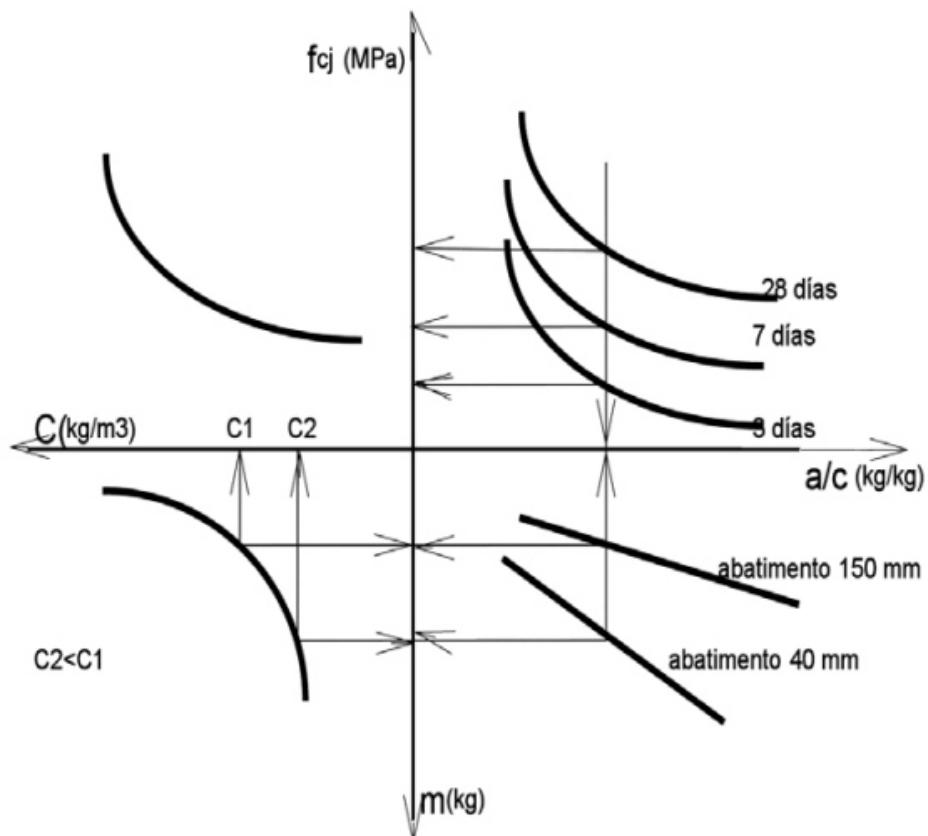


Fonte: TUTIKIAN, HELENE, 2011.

Após a manipulação da relação água/cimento e proporção de agregados para a mesma “família” de concretos e tratamento de dados, é necessário construir as correlações entre traço de concreto e relação água/cimento, consumo de cimento e traço (C) e quantidade de agregados secos e cimento (m). Isto é feito por meio de um diagrama de dosagem, como exemplificado na Figura 4, o qual determina tais correlações por concretos de mesma classe de cimento e agregados. Desta forma, é possível obter propriedades de vários concretos com

os mesmos insumos utilizados (TUTIKIAN, HELENE, 2011).

Figura 4 - Diagrama de dosagem de concreto de cimento Portland.



2.2 Utilização de Coprodutos para Fabricação de Concreto

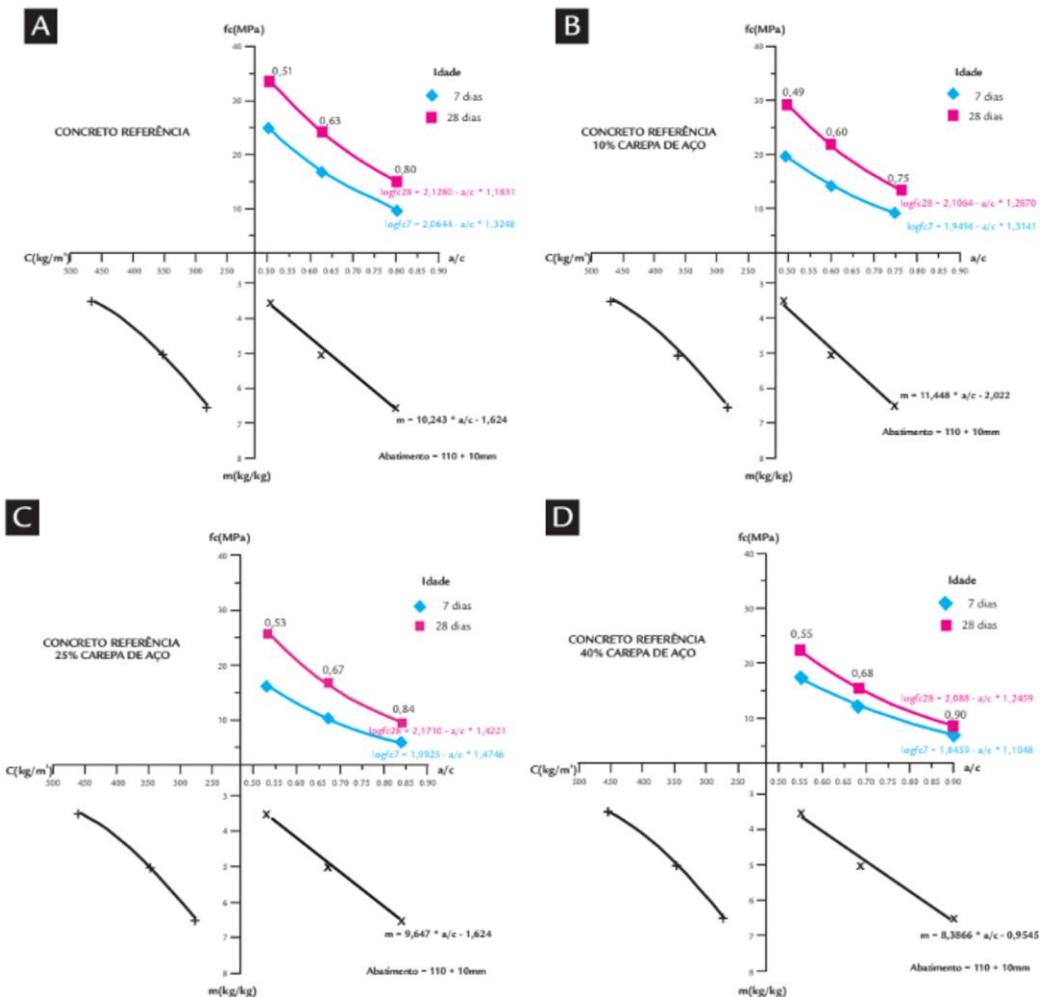
A fabricação de concreto utilizando coprodutos de diversos setores industriais visa o reaproveitamento destes resíduos que, a princípio, seriam descartados ou alocados em pátios industriais, de forma a reduzir o impacto ambiental e custos associados à sua produção, mantendo suas propriedades mecânicas. Para tanto, tornam-se necessários estudos para determinar a viabilidade de agregação do resíduo sólido ao produto final, dentre as possibilidades de retirada parcial dos insumos que compõem o concreto.

Cunha *et al.* (2006) realizaram uma caracterização de carepas de processos de lingotamento contínuo e laminação beneficiadas. O material foi fornecido em forma bruta após conformação dos aços, assim como de briquetes fabricados por aglomeração a frio da carepa após secagem em forno rotativo, peneiramento em escala Tyler para determinação da densidade granulométrica e mistura com silicato de sódio. Além de análises de composição química, ensaios foram realizados para determinar a densidade, umidade e teor de óleo. Os

resultados obtidos pelos autores determinaram que a carepa proveniente do lingotamento contínuo possuía maiores teores de água de óleo. Após beneficiamento, os briquetes de carepa de laminação passaram a ter maiores teores.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, Pereira, Cossa e Pereira (2008) avaliaram a possibilidade de incorporação da carepa de aço em concreto de cimento Portland, em diferentes traços (1:3,5; 1:5 e 1:6,5) com diferentes teores de resíduo (0%, 10%, 25% e 40%) na substituição de areia quartzosa como agregado miúdo e tempos de cura de 7 e 28 dias. Foi observada uma exigência de quantidades maiores de água para manter a trabalhabilidade do concreto com carepa de aço. Além disto, de um modo geral, houve uma diminuição da resistência à compressão e maior absorção de água à medida que o teor de carepa de aço aumenta. Os autores levantaram a hipótese de que a presença de óleos na carepa pode prejudicar as propriedades de resistência à compressão por interferir nas reações de hidratação do cimento Portland. A Figura 5 mostra os diagramas de dosagem produzidos a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão.

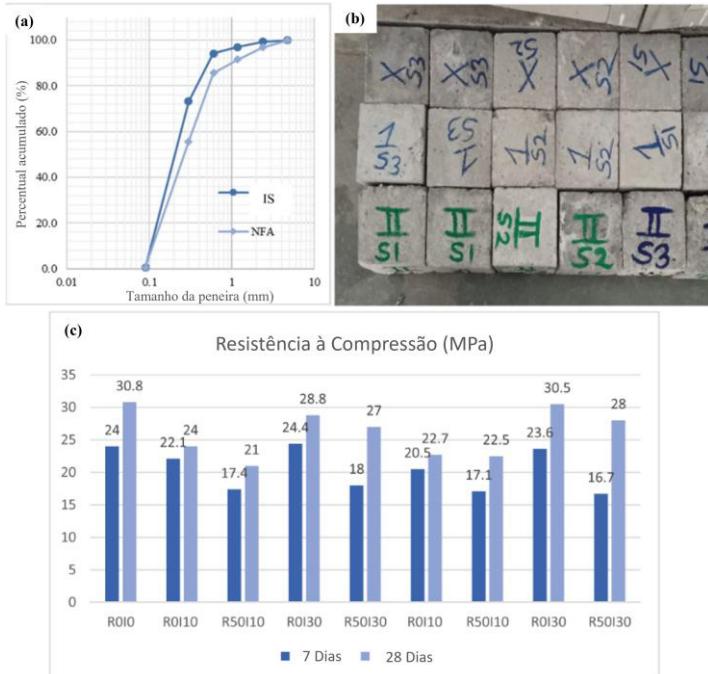
Figura 5 - Diagrama de dosagem: (a) 0% de carepa de aço (concreto de referência), (b) 10% de carepa de aço, (c) 25% de carepa de aço e (d) 40% de carepa de aço.



Fonte: PEREIRA, COSSA, PEREIRA (2008).

Sharma e Singh (2023) avaliaram a resistência à compressão de corpos de prova de concreto substituindo brita por agregados provenientes da reciclagem de concreto derivados de construções demolidas (*recycled concrete aggregates – RCA*), e areia (*natural fine aggregate – NFA*) por escória derivada da produção de aço (*iron slag – IS*). Após peneiramento da areia e da escória e obtenção de informações de distribuição de tamanho de partícula, conforme mostra a Figura 6a, foi constatado que a escória era mais fina que a areia. Corpos de prova de 100 x 100 x 100 mm – Figura 6b – foram fabricados em diferentes proporções de concreto reciclado – 0 e 50% - e escória – 0, 10% e 30% - tendo como referência as propriedades de resistência à compressão de uma mistura de 100% de brita e 100% de areia. A cura dos corpos de prova ocorreu em duas categorias: durante sete dias e vinte e oito dias. A Figura 6c mostra os resultados dos ensaios.

Figura 6 – (a) Curvas de gradação de escória (IS) e areia (NFA). (b) Corpos de prova produzidos. (c) Variação de resistência à compressão para diferentes proporções de concreto reciclado (RCA) e escória (IS) após curas de 7 e 28 dias.



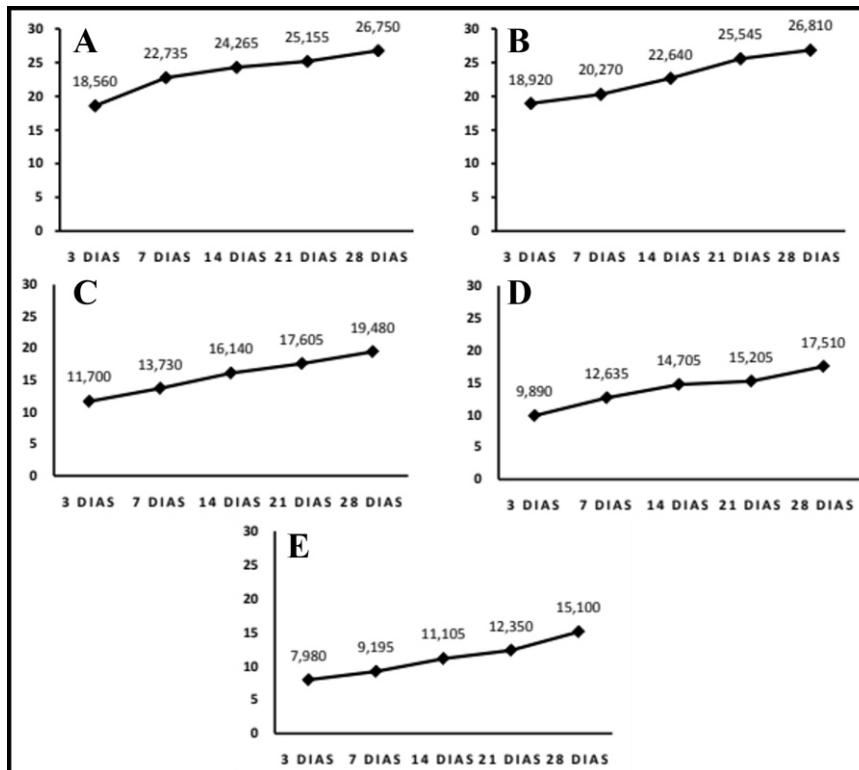
Fonte: SHARMA, SINGH (2023), com adaptação elaborada pelo autor.

Foi observado um aumento na resistência à compressão com o aumento do percentual de substituição de escória de 10% - proporção que resultou em diminuição da resistência à compressão – para 30% (R_0I_{10} para R_0I_{30}) tanto para 7 como para 28 dias de cura, cujos valores são comparáveis aos da mistura de referência. A inclusão RCA, de um modo geral, diminuiu a resistência à compressão do concreto para todas as proporções. A partir de 30% de escória, para 28 dias de cura, o efeito de diminuição das propriedades mecânicas foi, em parte, contornado. Portanto, a utilização deste coproduto como agregado fino se mostrou eficiente para manter a resistência à compressão do concreto (SHARMA, SINGH, 2023).

Lanjewar *et al.* (2023) estudaram o efeito da inserção de escória da produção de ferro fundido cinzento como agregado grosso nas propriedades mecânicas do concreto do tipo M30 (30 MPa de resistência à compressão), nas proporções de 30%, 35%, 40% e 50%, em relação a um concreto de referência. Verificou-se um aumento expressivo de 31,72 MPa para 66,36 MPa com 30% de escória incorporada na substituição. Entretanto, à medida que as quantidades aumentaram, houve diminuição da resistência à compressão. É válido ressaltar que, mesmo com o menor valor de 29,41 MPa, o resultado obtido com 50% de escória ainda é comparável ao concreto de referência, portanto, viabilizando a utilização deste resíduo sólido.

Carmo *et al.* (2018) caracterizaram a resistência à compressão de concreto com substituição parcial de cimento Portland por vidro sodo-cálcico moído, material que possui uma taxa de reaproveitamento muito menor que a de fabricação. As proporções de substituição foram de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% em massa de vidro moído para um traço fixo de 1:2:3, com tempos de cura de 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Os resultados mostrados na Figura 7 mostraram um leve aumento na resistência à compressão do cimento com 10% de incorporação de vidro sodo-cálcico com cura de 28 dias, sendo viável para reciclagem dentro desta aplicação. Os valores passaram a diminuir com o aumento do teor de substituição de cimento pelo resíduo.

Figura 7 - Resistência à compressão uniaxial dos traços (a) TS-0, (b) TS-10, (c) TS-20, (d) TS-30 e (e) TS-40, em MPa.



Fonte: CARMO *et al.*, 2018.

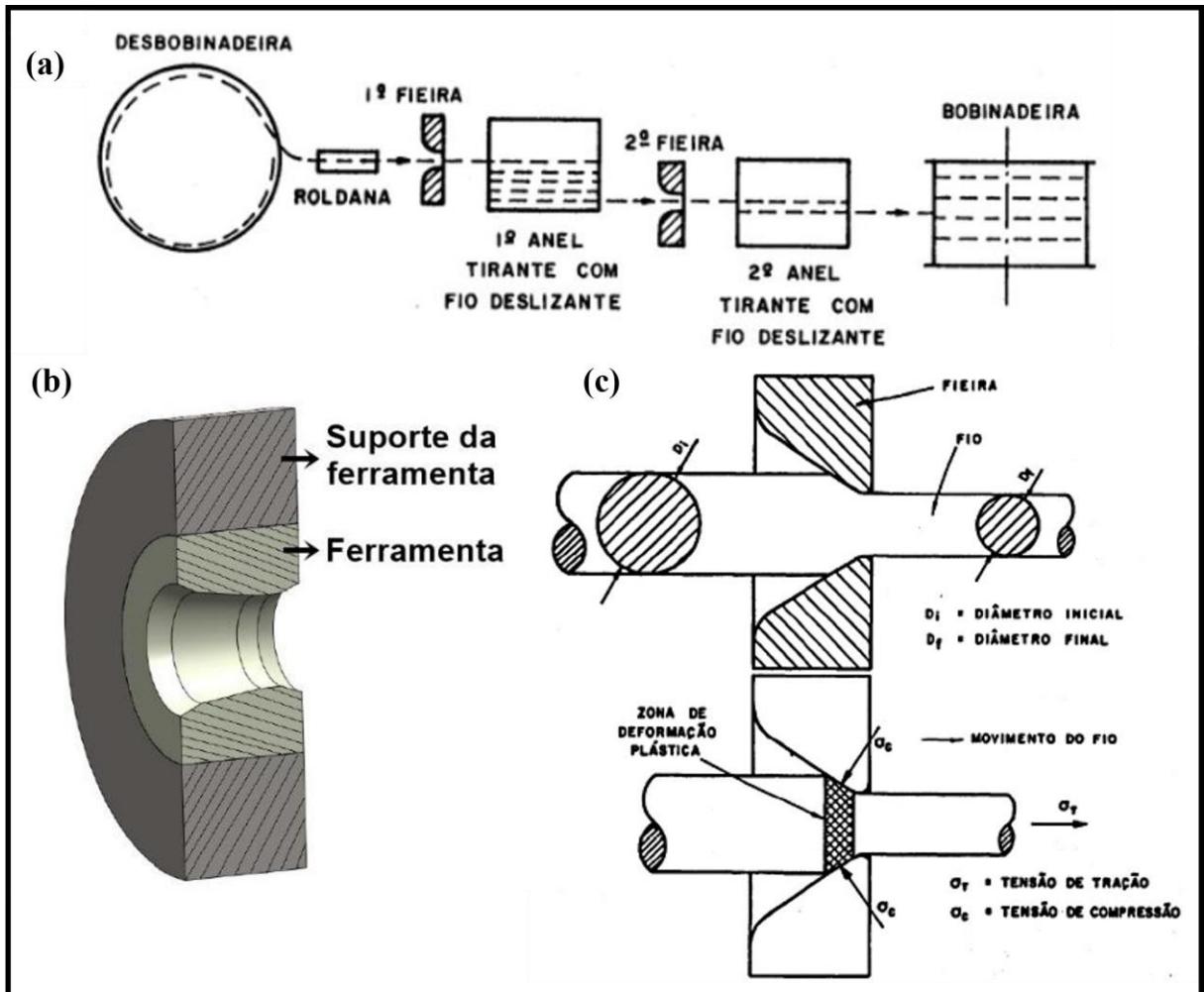
Slosarczyk *et al.* (2017) obtiveram melhoria nas propriedades de resistência à compressão de concreto a partir de cimento com inclusões de óxidos metálicos em escala micrométrica e nanométrica. Partículas de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 com diâmetros menores que 5 μm e de NiO com $d < 50$ nm em teores de 2 a 3% em peso foram suficientes para formação de um aglomerante de melhor adesão aos agregados, promovendo melhores propriedades mecânicas.

Na literatura, também são encontrados estudos para a viabilidade de incorporação de resíduos orgânicos no concreto, como pós gerados a partir da casca de coco (LIM *et al.*, 2018; KHALID *et al.*, 2016), bagaço da cana-de-açúcar (PARADA *et al.*, 2017; TAYEH *et al.*, 2023) e cascas de arroz (). Os coprodutos mencionados contribuem na fase de cura úmida do concreto pela facilitação de reações que ocorrem no cimento Portland (SARANGI, SUGANYA, 2024).

2.3 Processo de Trefilação

O processo de trefilação consiste em conformar mecanicamente uma peça, pelo tracionamento desta por uma matriz, ou série de matrizes, com o objetivo de reduzir seu diâmetro. A Figura 8a mostra um esquemático da trefilação. A matéria-prima, chamada de fio-máquina, é fornecida enrolada em bobinas. Ao ser desbobinado, o fio-máquina é conduzido, conforme mostrado na Figura 8a, para as matrizes, chamadas de fieiras, as quais são constituídas de uma carcaça metálica com um núcleo fabricado de metal duro, como é mostrado na Figura 8b. Percebe-se que o diâmetro de saída é menor que o de entrada. Isto é responsável pelas reduções de diâmetro a cada passe de trefilação, até que se atinja o diâmetro final desejado. Um esquemático de tensões de tração e compressão, assim como a redução de diâmetro após a trefilação, é mostrado na Figura 8c. Ao final da conformação, os grãos presentes na microestrutura do fio-máquina passam a ser alongados em direção paralela ao esforço de tração. As tensões compressivas, resultantes da interação da matriz com o fio-máquina, são responsáveis pela maior parte da deformação plástica (SANTOS *et al.*, 2012).

Figura 8 - (a) Esquemático do processo de trefilação. (b) Desenho em perspectiva de uma fieira. (c) Esquemático da atuação de tensões em um fio-máquina durante a passagem em uma fieira.



Fonte: MENEZES *et al.*, 2017 e SANTOS *et al.*, 2012, com adaptações elaboradas pelo autor.

A Figura 9 mostra quatro parâmetros importantes de uma fieira para o processo de trefilação. A região do ângulo de entrada (2γ) é responsável por contribuir para com a lubrificação do fio-máquina por facilitar a entrada de lubrificante na região de redução. Na região do ângulo de trefilação (2α), ocorre a redução do diâmetro do arame. A zona cilíndrica é responsável por controlar o diâmetro do arame e aumentar a vida útil da fieira. Por último, a região do ângulo de saída atua para que não haja atrito entre o fio-máquina e a fieira nos últimos instantes de passagem (SANTOS *et al.*, 2012).

Figura 9 - Esquemático de uma fieira e seus parâmetros de controle durante a trefilação.



Fonte: SANTOS *et al.*, 2012.

2.3.1 Decapagem na trefilação

O controle dimensional das peças a serem trefiladas é de suma importância para garantir a produção de produtos de qualidade. Antes do processo de conformação, é comum a observação de uma camada superficial de – para aços – óxido de ferro, que se forma durante a laminação a quente do fio-máquina, a qual possui dureza muito maior que o arame em si, e deve ser removida antes do processo de trefilação, para garantir uniformidade no diâmetro final do fio e aumentar a vida útil da fieira (SOUZA, CORBACHO, 2015).

A remoção do óxido de ferro superficial – também chamado de carepa – é chamada de decapagem, e pode ser realizada de duas formas. A decapagem química consiste em imergir as bobinas de fio-máquina em ácido sulfúrico ou clorídrico, seguido de banho de cal para evitar corrosão do material (DOVE, 1979). A decapagem mecânica pode ser feita com uma escova rotativa ou um sistema de 5 a 12 polias que provoca esforços de flexão para retirada da carepa superficial (SILVA, 2011). Atualmente, as indústrias optam pela decapagem mecânica, por questões logísticas – transporte e secagem das bobinas de fio-máquina – e ambientais – controle e descarte de ácidos (SOUZA, CORBACHO, 2015).

A carepa é constituída de óxido de ferro em diferentes estequiometrias: magnetita (Fe_3O_4), wustita (FeO) e hematita (Fe_2O_3) (SILVA, 2011).

2.4 Normas para Ensaios de Concreto

2.4.1 Teste de abatimento – *slump test*

O teste de abatimento visa determinar a trabalhabilidade, fluidez e consistência do concreto. Este teste é considerado simples e pode ser realizado em laboratório ou em obra. A norma ABNT NBR 6118 (2007) define o teste como a compactação de um corpo de prova, dentro de um molde, por abatimento, seguida de medição de sua nova altura e comparar com a altura do topo do molde. Esta diferença determinará a trabalhabilidade do concreto.

A Tabela 2 fornece valores mínimos e máximos para abatimento de concreto para diferentes aplicações.

Tabela 2 - Abatimento recomendado para diferentes tipos de obras.

Tipo de Obra	Abatimento máximo (cm)	Abatimento mínimo (cm)
Bloco sobre estaca e sapata	8	2
Viga e parede armada	10	2
Pilar de edifício	10	2
Laje maciça e nervurada	8	2

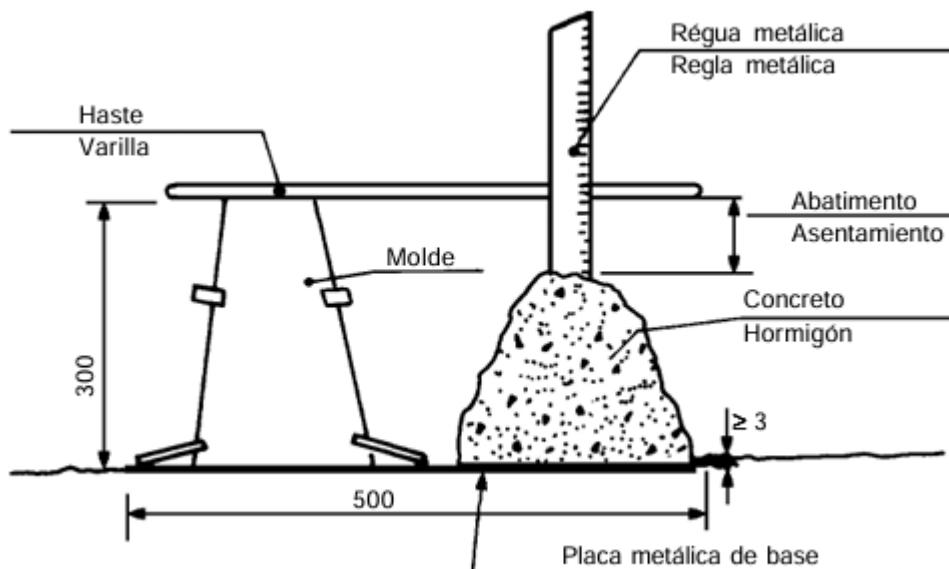
Fonte: ABNT, 2007.

A norma ABNT NBR 7222 (2011) destaca os processos necessários para realização do teste de abatimento. O molde deve possuir um formato de tronco de cone oco, com diâmetro da base superior de 100 mm, diâmetro da base inferior de 200 mm e altura de 300 mm, com margem de erro de 2 mm para mais ou menos em todas as dimensões. O abatimento é feito com uma haste de compactação de seção circular reta, feita de aço, com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm. Abaixo do molde, deve existir uma placa de base retangular, com dimensões mínimas de 500 mm e espessura de 3 mm.

Após umedecer o molde, deve-se enchê-lo rapidamente com concreto em três camadas, cada uma ocupando volume equivalente a um terço da altura do molde. A cada camada depositada, deve-se compactá-la com a haste, dispondo de 25 golpes, distribuídos uniformemente ao longo da superfície de contato, até que todas as camadas sejam depositadas e abatidas. Utiliza-se um instrumento chamado de desempenadeira para rasar a superfície do concreto (ABNT, 1998).

O molde deve ser retirado da posição em direção vertical para medição da altura do concreto após abatimento em relação à altura do molde. Todo o procedimento descrito deve durar, no máximo, 150 segundos (ABNT, 1998). A Figura 10 mostra um esquemático da medição da altura do corpo de prova após o teste de abatimento.

Figura 10 - Medições após abatimento.



Fonte: ABNT, 1998.

2.4.2 Moldagem e cura de corpos de prova

A fabricação de corpos de prova de concreto para ensaios de compressão é regida pela norma ABNT NBR 5738 (2015). Para corpos de prova cilíndricos, a dimensão de referência – também chamada de dimensão básica – está no diâmetro (d). O molde utilizado para confecção das amostras possui diâmetro igual à dimensão básica, com altura igual a duas vezes este valor ($h = 2d$). A Tabela 3 traz informações sobre o número de camadas a serem depositadas no molde, com o auxílio de uma concha, a depender do diâmetro de referência. O processo de adensamento do concreto deve ser realizado conforme consistência determinada em teste de abatimento previamente realizado, conforme mencionado na subseção 2.4.1, de forma manual ou vibratória, com número de golpes a definir pela Tabela 3. A dimensão básica deve ser escolhida, obedecendo a condição de ser maior ou igual a três vezes o diâmetro máximo do agregado. A cura inicial, a qual dura 24 horas, deve ser feita com os corpos de prova completamente cobertos com material não reativo e que impeça escape de água de modo a não prejudicar as reações de hidratação do cimento. Como última ressalva, a haste de compactação possui dimensões iguais às apresentadas no teste de abatimento.

Tabela 3 - Número de camadas e golpes de adensamento para modelagem de corpos de prova de concreto cilíndricos.

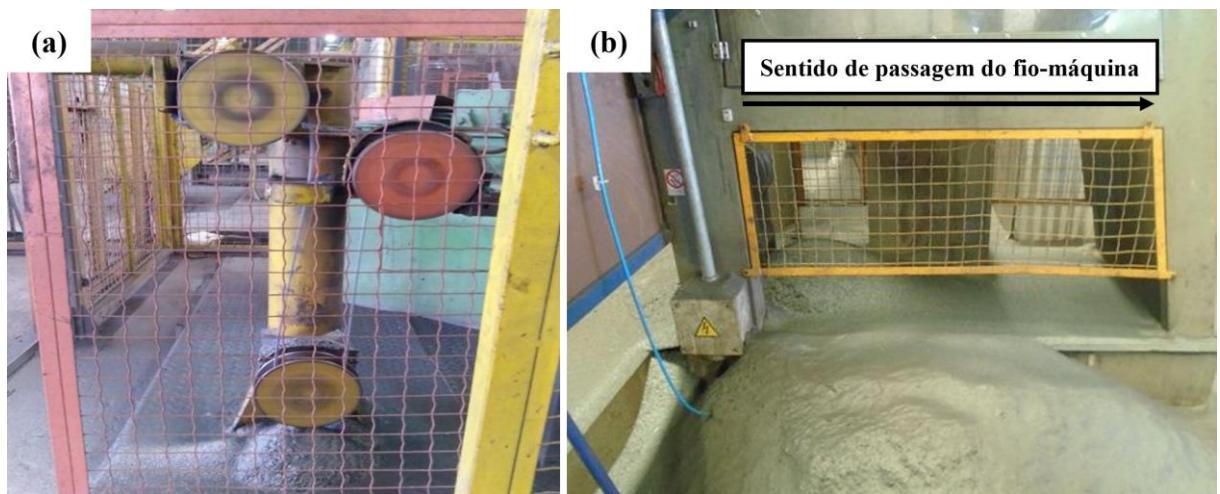
Tipo de adensamento	Dimensão básica (d, mm)	Número de camadas	Número de golpes por camada
Manual	100	2	15
	150	4	30
	200	5	75
Vibratório (penetração da haste até 200 mm)	100	1	-
	150	2	
	250	3	
	450	5	

Fonte: ABNT, 2015.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foi utilizada carepa de óxido de ferro fornecida por uma empresa renomada do ramo siderúrgico, a qual possui sistema de trefilação para redução de diâmetro de fios-máquina, com decapagem pré-trefilação manual por flexão, por meio de um sistema de polias que aplicam esforço no fio-máquina à medida que é desbobinado; e por meio de escova rotativa. A Figura 11 mostra o sistema de decapagem para retirada de carepa de fios-máquina.

Figura 11 - Sistema de decapagem para retirada de carepa de fio-máquina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A caracterização da carepa de trefilação se deu de duas formas. Uma vez recebido o lote de coproduto, proveniente de fio máquina SAE1010 a SAE1018 e realizou-se a separação granulométrica por meio de três peneiras sobrepostas, caracterizando três categorias: granulometria de até 75 µm, entre 75 e 150 µm e maior que 150 µm.

Figura 12 mostra a disposição das peneiras, com especificação, assim como imagens da carepa separada em diferentes granulometrias.

A separação da carepa em diferentes granulometrias da primeira etapa objetivou auxiliar na análise de composição química da carepa, uma vez que partículas muito grosseiras atrapalham a resolução das técnicas a serem mencionadas. Foram realizadas análises de Difração de Raios-X por meio do equipamento RIGAKU, modelo SmartLab SE, com radiação de Co-K α ($K\alpha = 1,788 \text{ \AA}$) e tensão de 40 kV, com ângulo de varredura 2θ de 40° a 110° , utilizando um passo de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de $5^\circ/\text{min}$. Como análise auxiliar, a identificação dos elementos presentes foi realizada por exposição das superfícies do

material a um espectrômetro de raios-X por dispersão em energia (EDS), por meio do equipamento da fabricante SHIMADZU, modelo EDX-7000, operando com fonte de 50 kV, para faixa elementar do Al (alumínio) ao U (urânio), durante 60 segundos, e fonte de 15 kV, para faixa elementar do Na (sódio) ao Sc (escândio), durante 60 segundos. É válido mencionar que apenas a amostra com granulometria entre 75 e 150 μm foi utilizada para as análises.

Figura 12 - (a1) Peneiras sobrepostas para separação da granulometria de carepa, (a2) exemplo de especificação da abertura da peneira, (b) carepa de trefilação separada em diferentes granulometrias.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda etapa objetivou o peneiramento da carepa de óxido de ferro para inclusão no traço dos corpos de prova de concreto. Para isto, de forma semelhante à mostrada na

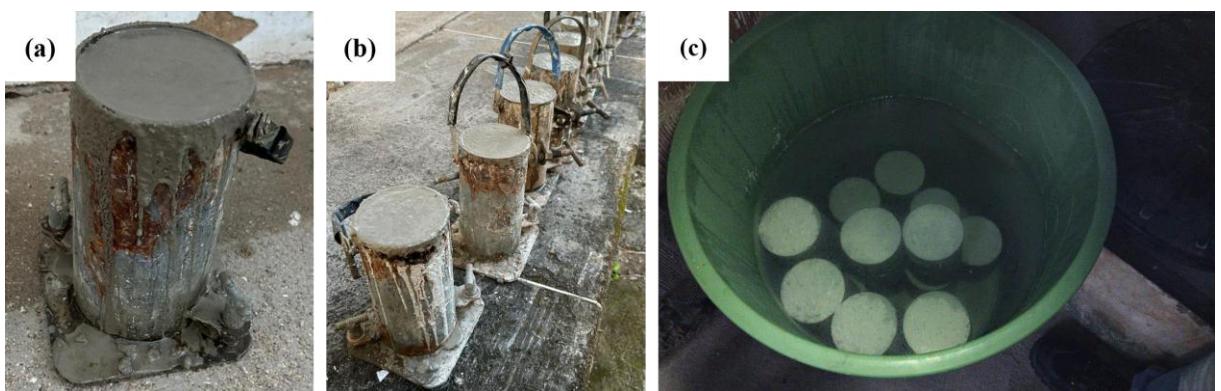
Figura 12, as partículas de óxido de ferro foram peneiradas para filtrar granulometrias menores que 300 μm . As partículas maiores que esta dimensão, foram incorporadas aos corpos de prova, os quais serão descritos adiante.

A fabricação dos corpos de prova para ensaios de resistência à compressão foi feita conforme a norma ABNT NBR 5738 (2015). A dimensão básica escolhida foi de 100 mm; portanto, fixando a altura em 200 mm para o molde. Conforme menciona a norma ABNT NBR 7222 (2011), o molde foi preenchido em duas camadas e, após cada deposição, 15 golpes foram desferidos para abatimento do concreto. Foram utilizados brita, areia e água como insumos para fabricação de corpos de prova de concreto, com uma proporção de referência com brita, areia e água de, respectivamente, 1:2:3, ou seja, três partes de brita, duas partes de areia e uma parte de água. Em termos de massa, foram utilizados 4,5 kg de brita média, 3 kg de areia e 1,5 kg de água. Além disto, utilizou-se 1,5kg de cimento CP III para esta proporção. Portanto, o traço de referência caracteriza-se como 1:2:3, relação água cimento 1/1.

A Figura 13a mostra o molde preenchido com a mistura feita a partir do traço de referência. Como próxima etapa, foram determinados quatro níveis de substituição de areia por carepa de trefilação: 5%, 10%, 15% e 20% em peso. As medidas necessárias foram feitas em uma balança digital antes da incorporação ao novo traço. É válido ressaltar que a granulometria da carepa, a partir da substituição na mistura, passava a ser não-uniforme, por efeitos mecânicos de mistura. Três corpos de prova foram feitos para cada traço.

A cura inicial foi feita ao ar livre, durante 24h, com a mistura dentro do molde para início da hidratação do cimento, conforme mostrado na Figura 13b. Após este período, os corpos de prova foram cuidadosamente retirados e imersos em um reservatório contendo água saturada com óxido de cálcio – cal (CaO) – e cobertos com uma manta para evitar escape de água, de acordo com a Figura 13c.

Figura 13 - (a) Molde preenchido com concreto para início de cura. (b) Cura inicial do concreto ao ar livre. (c) Armazenamento dos corpos de prova em solução de água e cal para finalização da cura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O período de cura foi considerado como outro parâmetro de análise para avaliação das propriedades mecânicas do concreto com inclusão de carepa como agregado miúdo. Quatro níveis foram determinados: 7, 14, 21 e 28 dias. Foram produzidos três corpos de prova para cada condição de teor de carepa e de cura, totalizando 60 análises. A Tabela 4 mostra as variáveis de análise. A nomenclatura adotada corresponde ao tempo de cura (C) e percentual de óxido (O), respectivamente. Os ensaios de compressão foram realizados por meio da máquina de ensaio universal Siemens, a qual possui capacidade máxima de 60 toneladas e mede a carga máxima atingida do corpo de prova. O critério de parada foi o momento no qual as primeiras evidências de fratura fossem observadas a olho nu. Os resultados foram coletados e a unidade foi convertida de toneladas para mega pascal (MPa). Os resultados foram coletados e um tratamento de dados foi realizado por cálculo de médias entre os corpos de prova de mesma categoria, em conjunto a uma análise estatística de variância (ANOVA).

Tabela 4 - Variáveis de análise para viabilidade de carepa de trefilação como agregado miúdo.

Traço	Dias de Cura	Nomenclatura	Quantidade
Padrão	7	C ₇ O ₀	3
	14	C ₁₄ O ₀	3
	21	C ₂₁ O ₀	3
	28	C ₂₈ O ₀	3
5% Carepa	7	C ₇ O ₅	3
	14	C ₁₄ O ₅	3
	21	C ₂₁ O ₅	3
	28	C ₂₈ O ₅	3
10% Carepa	7	C ₇ O ₁₀	3
	14	C ₁₄ O ₁₀	3
	21	C ₂₁ O ₁₀	3
	28	C ₂₈ O ₁₀	3
15% Carepa	7	C ₇ O ₁₅	3
	14	C ₁₄ O ₁₅	3
	21	C ₂₁ O ₁₅	3
	28	C ₂₈ O ₁₅	3
20% Carepa	7	C ₇ O ₂₀	3
	14	C ₁₄ O ₂₀	3

	21	$C_{21}O_{20}$	3
	28	$C_{28}O_{20}$	3
		TOTAL	60

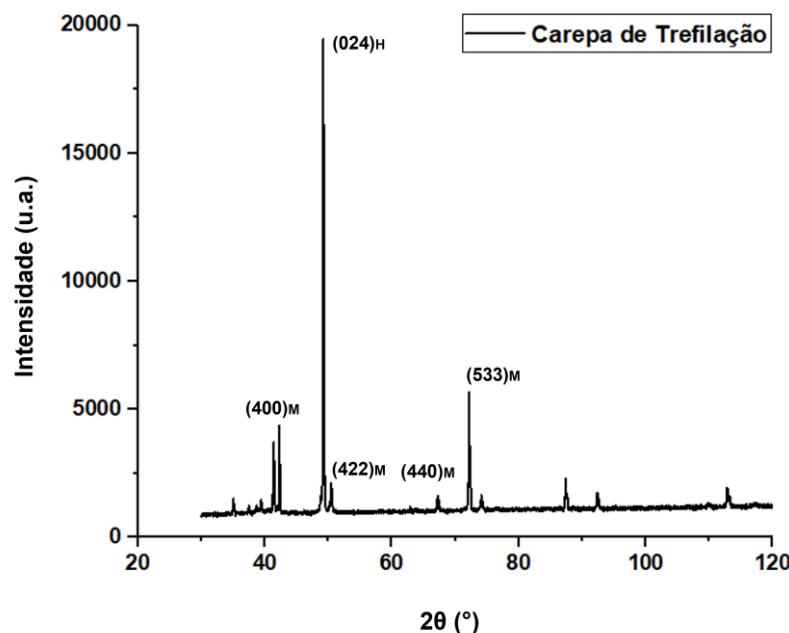
Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Química da Carepa de Trefilação

Por meio das análises de Difração de Raios-X, foi possível caracterizar a carepa de trefilação com granulometria entre 75 e 150 μm . Os resultados são mostrados na Figura 14. Os picos de maior intensidade foram observados com ângulos 2θ de $41,35^\circ$, $49,27^\circ$, $50,44^\circ$ e $72,17^\circ$. Inicialmente, o software X’Pert HighScore Report[©] associou os picos à presença de quatro compostos: ferrita de cobalto/lítio ($Li_{0,x}CoFe_2O_4$), dois óxidos de ferro e grossulária. A identificação dos picos de maior intensidade, de acordo com Zainuri (2017) e Marius *et al.* (2013), estão associados aos planos de difração (400), (422), (440) e (533) da magnetita (Fe_3O_4) e o plano (024) da hematita (Fe_2O_3), para a radiação de Co.

Figura 14 - Difratograma gerado por radiação Co da amostra de carepa de trefilação de granulometria entre 75 e 150 μm .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos pelo ensaio de Fluorescência de Raios-X estão explícitos de forma quantitativa na Tabela 5. Foram identificados os elementos Fe, Si, Mn, S, Ca, K, Cr e

Cu. Apesar de não existir especificações de composição química a respeito do material utilizado para lubrificação da fieira e do fio-máquina durante a trefilação, acredita-se que os demais resultados não vinculados aos óxidos de ferro identificados (tanto pela difração de raios-X como pelo alto teor de ferro observado no resultado de fluorescência) estejam associados ao lubrificante, o qual não foi completamente removido durante o tratamento da carepa.

Portanto, pela análise química, a carepa de trefilação extraída é composta majoritariamente de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4).

Tabela 5 – Composição química da carepa de trefilação determinada por fluorescência de raios-X.

Elemento	Percentual (%p)
Fe	96,79
Si	1,90
Mn	0,68
S	0,30
Ca	0,13
K	0,08
Cr	0,06
Cu	0,03

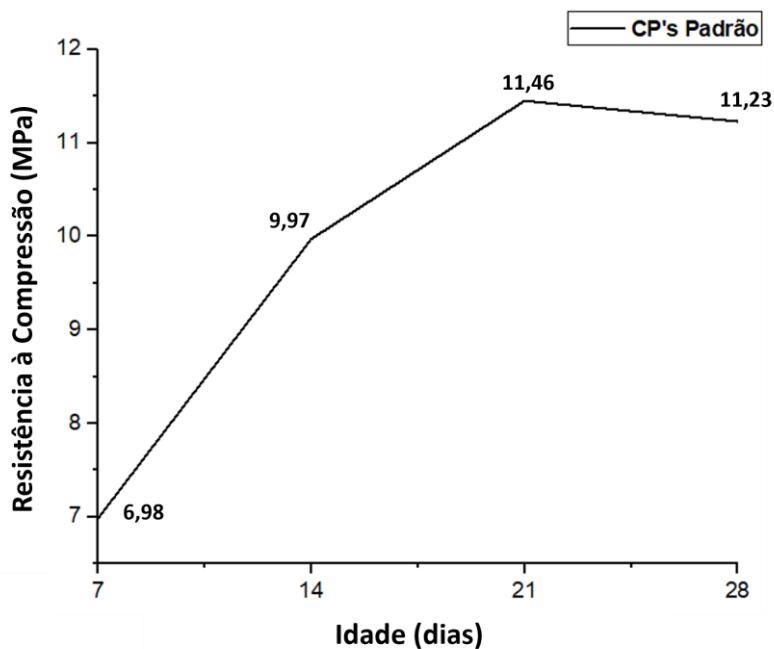
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Avaliação das Propriedades Mecânicas

A primeira análise das variáveis que podem influenciar a resistência à compressão dos corpos de prova se deu de forma geral, comparando individualmente o tempo de cura e a variação do teor de carepa no traço. A variação do tempo de cura e sua influência na resistência à compressão (f_{ck}) do concreto de traço padrão é mostrada na Figura 15. Os valores mostrados representam a média dos resultados obtidos a partir dos três corpos de prova fabricados para a mesma condição. É possível verificar um crescimento contínuo desta propriedade mecânica à medida que a idade do concreto aumenta. Conforme menciona Bauer (2009), o tempo ideal de 28 dias para cura de concreto é viável para garantir a correta

hidratação do cimento, favorecendo as reações químicas que conferem propriedades mecânicas adequadas, com a ressalva dos cuidados a serem tomados para evitar evaporação da água presente no traço – manutenção da temperatura ambiente, umidade adequada e ambiente livre de eventos externos, como ventos. Apesar de existir uma leve diminuição de 2% de 21 para 28 dias de cura, pode-se considerar como uma variação irrigária. O tempo de 21 dias de cura, para este traço especificado na Seção 3, pode ser considerado o mínimo para obtenção de propriedades ótimas.

Figura 15 - Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto com traço padrão em função do tempo de cura.

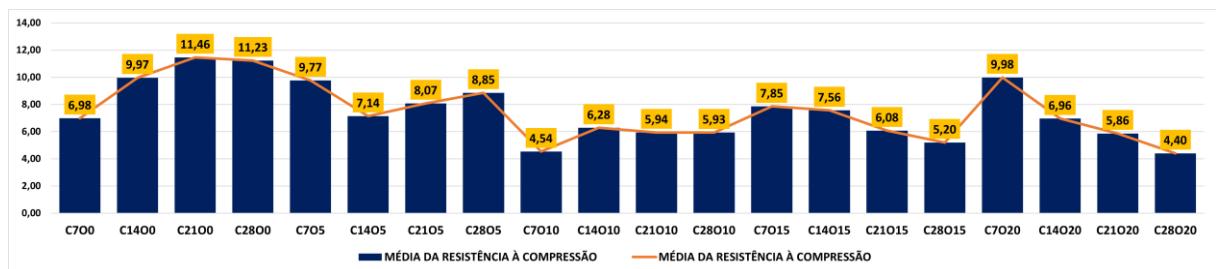


Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda análise dos dados considerou a inserção de carepa de trefilação no traço do concreto. A Figura 16 mostra os resultados das médias das resistências obtidas para os corpos de prova nomeados de acordo com a Tabela 4. Pela observação dos dados para os mesmos tempos de cura, para 7 dias de idade do concreto, a resistência à compressão apresentou um aumento de 30% ao substituir 20% em massa de areia por concreto (C_7O_{20}). Apesar desta variação significativa, o curto tempo de cura pode inviabilizar o aumento das propriedades mecânicas do concreto, as quais podem não ser significativas, visto que, para o traço padrão, conforme ilustra a Figura 15, não foram observados os maiores valores de resistência, possivelmente pelo curto tempo de hidratação do concreto.

Entretanto, é possível observar um padrão nos valores para tempos de cura de 14, 21 e 28 dias. A incorporação de carepa de trefilação provocou um decrescimento contínuo da resistência à compressão, com valores para cura de 28 dias de 6,96 MPa para o corpo de prova C₁₄O₂₀, 5,86 MPa para o corpo de prova C₂₁O₂₀ e 4,40 MPa para o corpo de prova C₂₈O₂₀. É possível afirmar, portanto, para os experimentos realizados neste trabalho, que a adição de carepa de trefilação provocou uma queda na resistência à compressão do concreto.

Figura 16 - Valores da média da resistência à compressão do concreto de cimento Portland com variação nos tempos de cura e percentual de carepa de trefilação no traço.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Entretanto, Almeida (2009), ao fabricar blocos de concreto com carepa de aço como agregado miúdo, verificou que, para tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, ocorreram aumentos de até quase 20% na resistência à compressão, ainda mantendo a boa trabalhabilidade destes. Segundo o autor, com certo tempo de exposição ao ambiente, foram observadas manchas ferruginosas, representando partículas de carepa de granulometria exacerbada, fato que poderia ser resolvido com um peneiramento.

Al-Otaibi (2008), ao trabalhar com substituição de agregado grosso e miúdo por carepa de aço, também verificou benefícios à resistência à compressão com substituições entre 30 a 50%. A análise dos dados foi realizada por meio de uma otimização do método Taguchi de análise de dados.

Prado *et al.* (2008) apresentaram uma alternativa para concretos utilizados como barreiras para radiação em ambientes da área da Saúde onde a radioterapia seja aplicada. Para tal, tanto propriedades mecânicas como físicas são desejadas. Os resultados mostraram que a carepa de aço proveniente da laminação pode contribuir positivamente para melhora de ambos os requisitos.

Uma hipótese para justificar os resultados encontrados no presente trabalho está na presença de contaminantes na carepa de trefilação, os quais possivelmente não foram

completamente removidos, pela composição química mostrada na Tabela 5, a qual inclui elementos que não fazem parte dos óxidos de ferro comumente encontrados. Tais compostos podem influenciar no retardamento das reações de hidratação do cimento Portland.

Outra argumentação surge na granulometria da carepa de trefilação, a qual está classificada como acima de 300 µm. É possível que tal diâmetro de partícula seja exagerado para atuar como agregado miúdo. Fraga *et al.* (2024) estudou a viabilidade de duas areias provenientes de águas fluviais, cuja granulometria era, em maioria, acima de 150 µm. Os autores relataram uma diminuição entre 38 e 40% na resistência à compressão. Neste trabalho, além da morfologia do material, a granulometria pode representar sítios de contração não-uniformes, gerando concentração de tensão compressiva à medida que a cura do concreto procede.

Por último, é válido ressaltar que, até o momento do presente trabalho, não foi determinado um traço ideal considerando diferentes proporções dos constituintes, assim como relação água/cimento, tornando este estudo preliminar. Para maior avanço nas análises, seria necessária uma maior matriz de experimentos com diferentes traços para verificar se existe, de fato, alguma combinação que mostre melhora nas propriedades, assim como os estudos encontrados na literatura previamente mencionados (ALMEIDA, 2009; AL-OTAIBI, 2008; PRADO *et al.*, 2008).

Para avaliar as variáveis de estudo de forma independente, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada. Este procedimento consiste em comparar as médias dos resultados de três ou mais grupos de forma independente, considerando as variáveis que afetam estes resultados individualmente, verificando se há distinções significativas em relação a estes parâmetros (MONTGOMERY, 2012). O cálculo da análise de variância envolve critérios de hipótese que determinam se as variáveis independentes (no caso, tempo de cura e percentual de carepa no traço) são comparáveis ou não a parâmetros críticos.

O parâmetro F crítico é a razão entre a variação de dados entre grupos diferentes e a variação (ou erro aleatório) de dados dentro de um mesmo grupo. Baseado nisto, se os dados apresentam um valor de F abaixo de um valor crítico, isto significa que a variável independente não é significativa para a variação dos dados apresentados (também definida como hipótese nula). Caso o valor de F seja maior que o crítico, a variável passa a ser significativa (hipótese alternativa) (MONTGOMERY, 2012).

De forma análoga, o segundo parâmetro calculado, “p”, indica a probabilidade de observação dos resultados mais extremos na distribuição dos dados; portanto, assumindo que há hipótese nula. Caso o valor calculado de “p” seja maior que um valor crítico definido para análise, a variável não é significativa para variação dos resultados (MONTGOMERY, 2012).

A Tabela 6 mostra os valores calculados da resistência à compressão calculados para os 60 corpos de prova, considerando cada tempo de cura e traço diferentes. A Tabela 7 mostra os cálculos da análise ANOVA realizados via software Excel© com duas variáveis independentes – tempo de cura e traço de carepa – ilustrando o valor de F, F crítico e p, com um p crítico, ou nível de significância, definido a 0,05 (5%).

Tabela 6 - Valores de resistência à compressão (f_c), em MPa, calculados para os corpos de prova definidos para tempos de cura e traço de carepa determinados.

CP's	Padrão	5% Carepa	10% Carepa	15% Carepa	20% Carepa
7d	6,95	9,14	4,57	7,84	9,89
7d	7,01	10,18	4,29	7,89	10,08
7d	5,75	9,98	4,75	7,83	8,31
14d	10,34	7,25	6,76	7,74	6,79
14d	9,60	6,66	5,81	7,39	6,30
14d	7,67	7,52	6,25	8,96	7,79
21d	8,89	8,07	5,74	6,23	5,73
21d	12,28	9,55	6,11	5,92	5,98
21d	10,64	8,48	5,97	7,16	6,43
28d	10,85	8,78	5,91	4,84	5,34
28d	12,04	8,93	5,98	5,06	4,59
28d	10,81	10,42	5,90	5,69	4,21

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Resultados da análise ANOVA calculados a partir dos valores expostos na Tabela 6.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Cura	0,951665	3	0,317222	0,562979	0,642585	2,838745
Carepa	112,9778	4	28,24446	50,12588	4,64E-15	2,605975
Interações	106,3816	12	8,865132	15,73309	1,52E-11	2,003459
Dentro	22,53882	40	0,56347			
Total	242,8499	59				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados mostrados na Tabela 7 indicam que, apesar da aparente variação, o tempo de cura não representa uma variável significativa para a resistência à compressão do concreto. Uma hipótese pra justificar este resultado reside na amostragem do experimento. Estatisticamente, uma análise de variância se torna mais confiável quando se estuda uma maior quantidade de resultados. Matematicamente, o valor de F diz que a variação dos dados entre os grupos está menor que o erro aleatório dentro de um mesmo grupo, sugerindo que o número de experimentos para analisar esta variável não foi suficiente para excluir possíveis aleatoriedades durante os ensaios. Outra forma de definir o tempo de cura como estatisticamente insignificante é o valor de p, o qual ultrapassou o nível de significância de 0,05.

Entretanto, esta quantidade de experimentos foi suficiente para avaliar a variável independente traço de carepa como significativa para a resistência à compressão do concreto. Os valores de F e p se distanciam muito dos valores críticos, o que significa que há uma chance extremamente irrisória de que os resultados calculados sejam justificados por aleatoriedades durante os ensaios. Este resultado é concordante com o que foi previamente discutido nesta Subseção, conforme observado na queda brusca das propriedades mecânicas à medida que o traço de carepa se torna maior.

4.3 Inspeção Visual

Conforme menciona a norma ABNT NBR 5739 (2018), a análise da fratura de corpos de prova de concreto inclui sete modos de aparecimento de fissuras ao longo de seu eixo, divididas de A-G, de acordo com a especificação:

- A: Cônica e cônica afastada em 25 mm do capeamento;
- B: Cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição;
- C: Coluna com formação de cones;
- D: Cônica e cisalhada;
- E: Cisalhada;
- F: Fraturas no topo e/ou na base abaixo do capeamento;
- G: Similar ao tipo F – com fraturas próximas ao topo.

As Figuras 17 a 20 mostram o aspecto dos corpos de prova pós-ensaio, separados na mesma categoria de tempo de cura, comparados à adição de carepa nos níveis

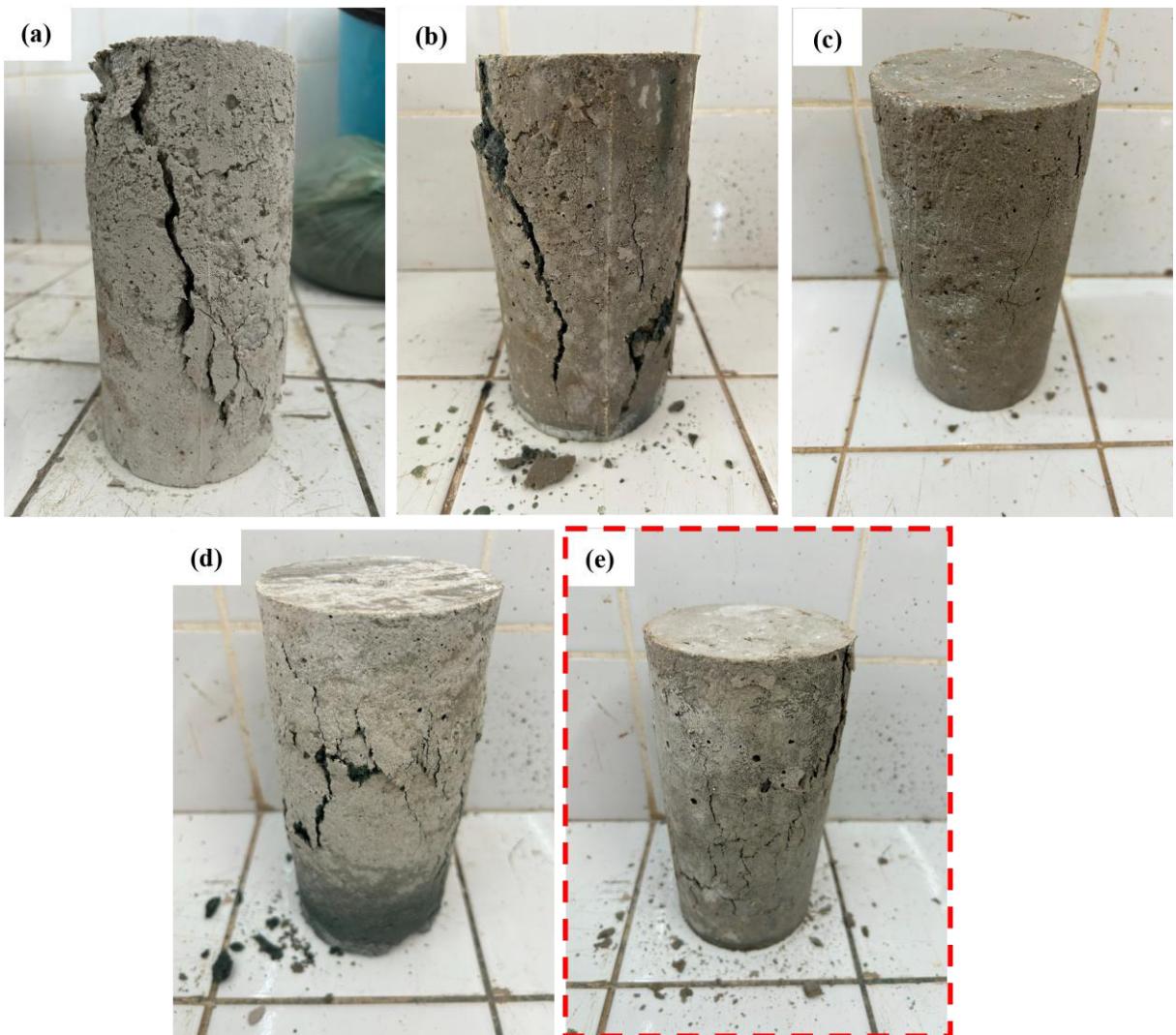
especificados. A norma define os modos de fratura entre A-C aceitáveis e desejáveis. Os modos de fratura D-E são considerados apenas aceitáveis. Os modos de fratura F e G são considerados indesejáveis, e podem indicar que houve um possível desbalanceamento na distribuição da carga no corpo de prova, seja por irregularidades nos pratos inferior ou superior do equipamento, ou no abatimento do corpo de prova, provocando a formação de uma superfície de contato irregular. Após inspeção visual, os corpos de prova marcados em vermelho nas figuras foram denominados com fraturas do tipo F ou G, enquanto os demais foram avaliados como desejáveis para a norma do ensaio. No entanto, não foi possível correlacionar o aspecto da fratura com uma possível mudança na resistência à compressão. Além disto, seriam necessárias análises posteriores para identificação das possíveis causas da queda da resistência à compressão.

Figura 17 - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 7 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de carepa.



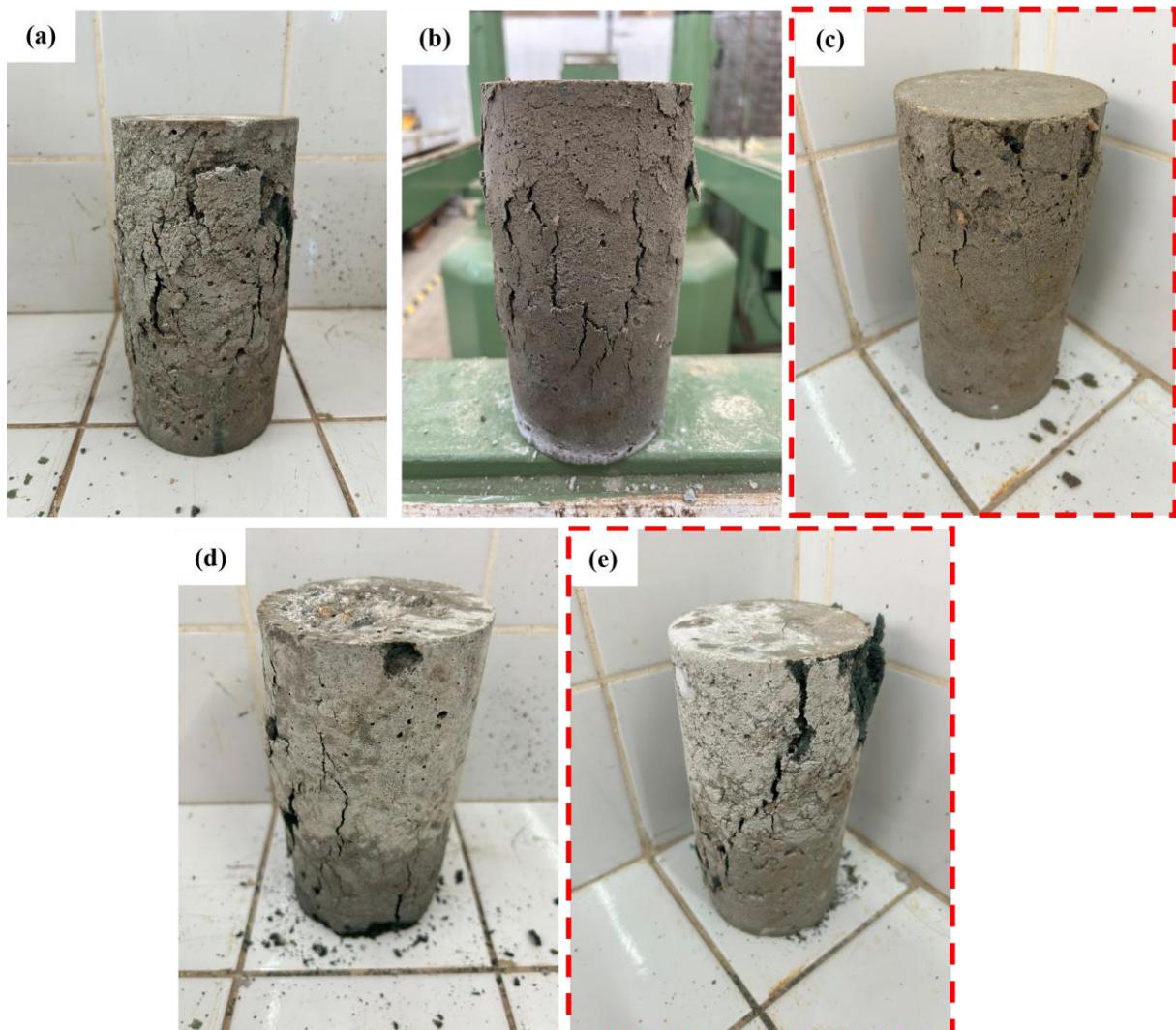
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 14 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de carepa.



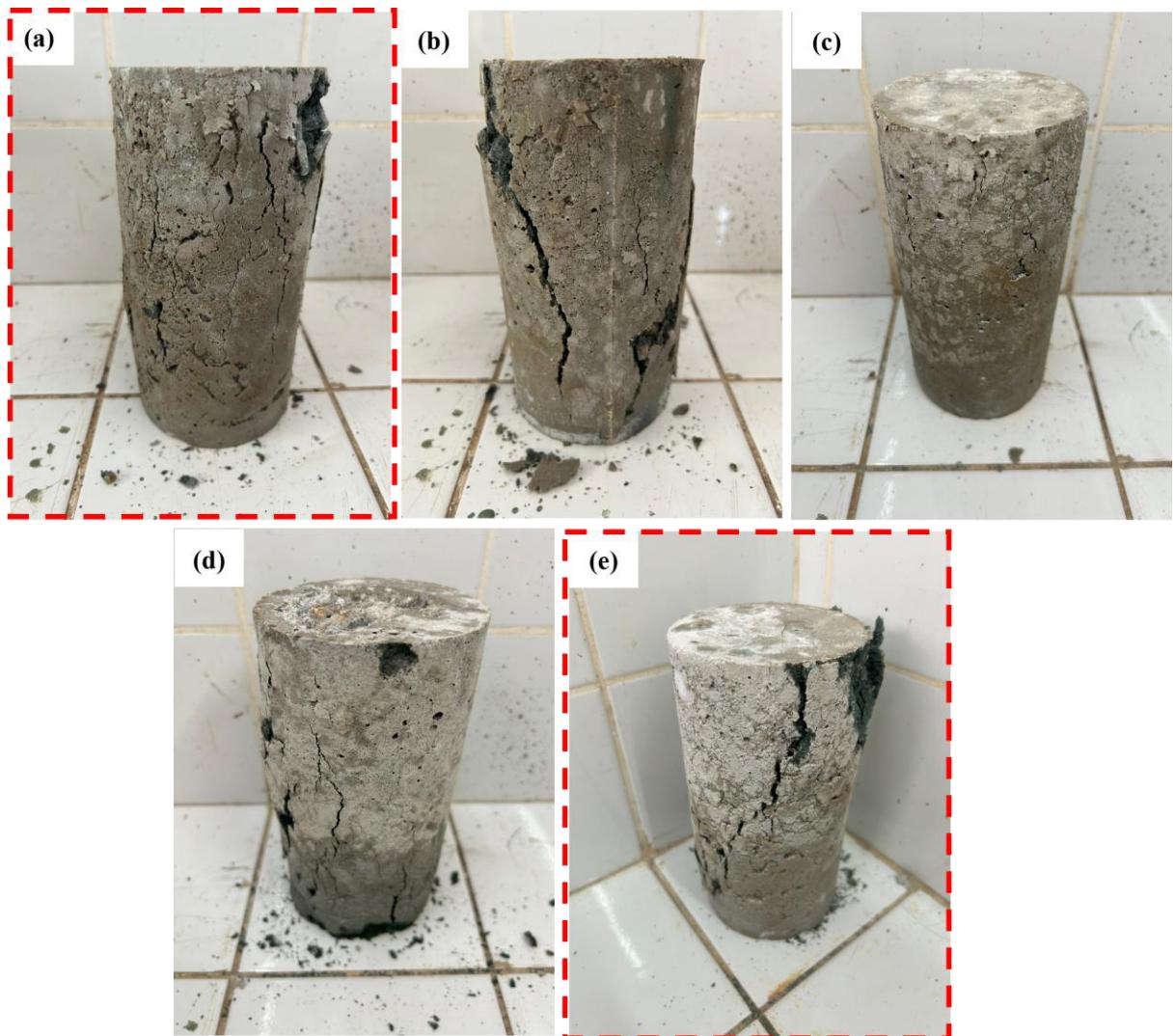
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 21 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de carepa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 - Aspecto da fratura dos corpos de prova com tempo de cura de 28 dias, nos traços (a) padrão, (b) 5% de carepa, (c) 10% de carepa, (d) 15% de carepa, (e) 20% de carepa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

A resistência à compressão de corpos de prova de concreto de cimento Portland com diferentes traços de carepa de trefilação de granulometria superior a 300 µm como agregado miúdo foi analisada. Por meio deste trabalho, foi possível concluir que:

- A carepa de trefilação consiste majoritariamente de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), com traços de outros elementos associados a possíveis contaminações por lubrificantes ou graxas;
- A resistência à compressão apresentou queda em seus valores à medida que o traço compôs maior teor de carepa de trefilação, com possíveis causas associadas à contaminação, traço ideal indeterminado e o coproducto representar uma região de concentração de tensões compressivas;
- A análise de variância (ANOVA) indica que o teor de carepa é significativo para a variação desta propriedade mecânica, fato que é concordante com os valores das médias apresentadas;
- A inspeção visual dos corpos de prova pós-ensaio consolidou, em sua maioria, a validade do ensaio realizado, por meio da observação de modos de fratura aceitáveis. Entretanto, não foi possível correlacionar o modo de fratura à variação das propriedades mecânicas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um novo experimento, em maior escala, pode ser realizado considerando diferentes traços com cálculos de relação água/cimento e a confecção de diagramas de dosagem para determinar a combinação de constituintes ideal para averiguar se, de fato, a carepa de trefilação pode conferir melhora na resistência à compressão do concreto de cimento Portland, conforme foi visto na literatura.

Conforme discutido, a granulometria acima de 300 μm pode representar uma causa de perda de propriedades mecânicas. Uma segunda sugestão envolve a utilização de carepa de trefilação de menor granulometria e sua influência na resistência à compressão.

Possíveis evidências microestruturais podem ser analisadas na seção transversal dos corpos de prova via microscopia ótica ou microscopia eletrônica de varredura, de modo a identificar causas e correlações impostas neste trabalho que possam enfatizar a perda de propriedades mecânicas do concreto.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5738 – Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. 2015.

ABNT NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.

ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2007.

ABNT NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. 2005

ABNT NBR 7212 – Execução de concreto dosado em central – Procedimento. 2012.

ABNT NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2011.

ABNT NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1998.

ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

AGWA, I.S.; ZEYAD, A.M.; TAYEH, B.A. A comprehensive review on the use of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material to produce eco-friendly concretes. **Mater. Today: Proc.**, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.264>

AITCIN, P.C. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Chapter 3 – Portland cement, 2016, pp. 27-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>

ALMEIDA, E. **Potencial de utilização do resíduo “carepa de aço” na fabricação de blocos de concreto.** Dissertação de Mestrado, Repositório da UNIVATES, 2008.

ALMEIDA, S.M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante.** Dissertação de Mestrado, Repositório da UFMG, 2012.

AL-OTAIBI, S. Recycling Steel Mill Scale as Fine Aggregate in Cement Mortars. **European Journal of Scientific Research**, UK, v.24, n.3, p. 332-338, 2008.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Novos Materiais para Construção Civil.** v.1. 5. Ed. Rio 444 de Janeiro: LTC, 2009, p. 488.

CARMO, M.E.R.; FERNANDES, F.A.S.; LOPES, S.C. Caracterização da resistência à compressão uniaxial de concreto com substituição parcial de cimento Portland por vidro sodo-cálcico moído. **73º Congresso Anual da ABM**, Proceedings da ABM Week, 2018.

CUNHA, A.F.; MOL, M.P.G.; MARTINS, M.E. Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos. **Metalurgia e Materiais**, Rev. Esc. Minas 59(1), 2006. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000100014>

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

FRAGA, Y.S.B.; FERREIRA, M.A.S.; COREIA, C.R.T. Influência da granulometria do agregado natural no desempenho mecânico do concreto. **Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Arquitetura**, 2024.

GARTNER, E.M.; DAMIDOT, D.A.; YOUNG, J.F. **Hydration of Portland Cement**. Book Chapter, 2001, pp. 57-113.

GRANTHAM, M. Diagnosis, inspection, testing, and repair of reinforced concrete structures. **Advanced Concrete Technology**, Book Chapter, vol. 2, 2003, pp. 1-54. <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50269-X>

HOPPEN, C.; BARON, O.; ANDREOLI, C.V. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, 51, 2005, pp. 85-95.

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

KHALID, N.H.A.; HUSSIN, M.W.; MIRZA, J. Palm oil fuel ash as potential green micro-filler in polymer concrete. **Construct. Build. Mater.**, vol. 102, 2016, pp. 950-960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.038>

LANJEWAR, B.; JAYAN, N.; CHaware, A. Effect of cupola slag as a coarse aggregate on compressive strength of concrete. **Materials Today: Proceedings**, ISSN 2214-7853, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.214>

LIM, J.L.G.; RAMAN, S.N.; LAI, F.C. Synthesis of nano cementitious additives from agricultural wastes for the production of sustainable concrete. **J. Clean. Prod.**, 171, 2018, pp. 1150-1160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.143>

LUDWIG, G.A.; RIGO, A.B.; MONEGO, F. Análise de resistência à compressão do concreto para diferentes métodos de fabricação. **Brazilian Journal of Development**, ISSN:2525-8761, 2022. DOI:10.34117/bjdv8n11-075

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.

MCNEIL, K.; KANG, T.H.K. Recycled concrete aggregates – a review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, vol. 7, 2013, pp. 61-69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, J. M. Paulo. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENEZES, M.S.; ZOTTIS, J.; DIAS, V.W. Análise de uma ferramenta de trefilação a frio através do método de elementos finitos. **7º Seminário de Trefilação – Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos**, 2017. 10.5151/2594-3650-27876

MONTEIRO, P.; MILLER, S.; HORVARTH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Mater**, vol. 16, pp. 698–699, 2017. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley and Sons, 8^a ed. 2012.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Traduzido por Ruy Alberto Cremonini. 5^a Edição, Porto Alegre-RS, 2016.

NILIMAA, J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. **Developments in the Build Environment**, vol. 15, 2023, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>

PARADA, V.; QUERO, V.G.; TAMEZ, P.L. Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. **Construct. Build. Mater.**, vol. 157, 2017, pp. 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>.

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**, 2008.

PRADO, M., PRADO, L., CARPENTER, D. E. O. S. Estudo do potencial de blindagem à radiação de concretos produzidos com agregado metálico. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. Porto de Galinhas: 2008.

QAIDI, S.M.; DINKHA, Y.Z.; HAIDO, J.H.; ALI, M.H.; TAYEH, B.A. Engineering properties of sustainable green concrete incorporating eco-friendly aggregate of crumb rubber: a review. **J. Clean. Prod.**, vol. 324, 129251, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129251>

QIANG, C.; SU, J.; NIE, J. The occurrence of MgO and its influence on the properties of clinker and cement: a review. **Construction and Building Materials**, vol. 293, 2021, 123494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123494>

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, M.; MEENA, H.; GHANI, Z. 3D printable concrete: mixture design and test methods. **Cem. Concr. Compos.**, vol. 97, 2019, pp. 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>

SANTOS, A.P.; SANTOS, D.R.; NASCIMENTO, M.R.V.O. Simulação do processo de trefilação através de uma máquina de tração. **3º Seminário de Trefilação – Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos**, 2012.

SARANGI, S.; SUGANYA, O.M. A comprehensive review of the physical and mechanical characteristics of agricultural by-products as cementitious alternatives in the production of sustainable concrete. **Materials Today Sustainability**, vol. 27, 2024, 100882. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100882>

SHARMA, R.D.; SINGH, N. Optimizing the compressive strength behavior of iron slag and recycled aggregate concretes. **Materials Today: Proceedings**, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.093>

SILVA, T.F. **Efeito dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1015 trefilado.** Trabalho de Conclusão de Curso, Repositório da UFC, 2011.

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.

STATISTA. Global cement production from 1995 to 2022. **Statista**, 2023. <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/> on 27 Mar 2023.

TAYEH, B.A.; HAKAMY, A.A.; FATTOUH, M.S. The effect of using nano agriculture wastes on the microstructure and electrochemical performance of ultra-high-performance fiber-reinforced self-compacting concrete under normal and acceleration conditions. **Case Stud. Constr. Mater.**, vol. 18, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01721>.

TUTIKIAN, B.F; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. Concreto: Ciência e Tecnologia – Capítulo 12, IBRACON, 2011.

WADA, Y.; VAN BEEK, L.P.; VAN KENPEM, C.M.; RECKMAN, J.W.; VASAK, S.; BIERKENS, M.F. Global depletion of groundwater resources. **Geophys. Res. Lett.**, vol. 37, p. 20, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>

XI, F.; DAVIS, S.J.; CIAIS, P. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**, 9, 880-883, 2016. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>

XU, L.D.; XU, E.L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, 56:8, 2018, pp. 2941-2962. [10.1080/00207543.2018.1444806](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806)

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. [10.1088/1757-899X/196/1/012008](https://doi.org/10.1088/1757-899X/196/1/012008).