



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**HEWERTON AGRA OLIVEIRA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE AÇO DERIVADOS DA INDÚSTRIA  
METALÚRGICA NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2023**

**HEWERTON AGRA OLIVEIRA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE AÇO DERIVADOS DA INDÚSTRIA  
METALÚRGICA NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

**Linha de pesquisa:** Qualidade de Sistemas Ambientais

**Orientador:** Prof. Dr. William de Paiva

**CAMPINA GRANDE – PB  
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48i Oliveira, Hewerton Agra.  
Incorporação de resíduos de aço derivados da indústria metalúrgica na fabricação do concreto [manuscrito] / Hewerton Agra Oliveira. - 2023.  
71 p. : il. colorido.

Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.  
"Orientação : Prof. Dr. William de Paiva, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

1. Composição do concreto. 2. Construção civil. 3. Resíduo de aço. 4. Metalurgia. I. Título

21. ed. CDD 691

**HEWERTON AGRA OLIVEIRA**

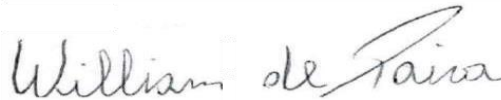
**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE AÇO DERIVADOS DA INDÚSTRIA  
METALÚRGICA NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

**Linha de pesquisa:** Qualidade de Sistemas Ambientais

Aprovado(a) em: 25/07/2023.

**BANCA EXAMINADORA**



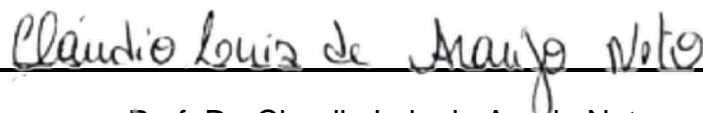
---

Prof. Dr. William de Paiva  
(Orientador — Universidade Estadual da Paraíba — UEPB)



---

Prof. Dr. Laércio Leal dos Santos  
(Examinador Interno — Universidade Estadual da Paraíba — UEPB)



---

Prof. Dr. Claudio Luis de Araujo Neto  
(Examinador Externo — Universidade Federal do Maranhao)



---

Dra. Giselly Marilaide Galdino Farias  
(Examinador Externo — Centro Universitario Mauricio de Nassau)

Dedico este trabalho aos meus pais, minha esposa e meu filho que, mesmo diante das adversidades, sempre me deram forças para continuar e crescer.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e inspiração ao longo desta jornada de mestrado. Sua orientação divina que guiou meus caminhos, fortaleceu minha fé e me deu forças nos momentos mais desafiadores. Reconheço que sem Sua presença e bênçãos, nada disso seria possível.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Helmiton Barbosa Oliveira e Rossana Agra Lima Oliveira, pelo amor incondicional, apoio constante e pelos sacrifícios que fizeram ao longo da vida para me proporcionar as melhores condições de estudo. A vida de vocês me inspira e guardo no fundo do coração as palavras de ensino, amor e incentivo que foram fundamentais para minha caminhada até aqui. Amo demais vocês.

Agradeço também à minha esposa, Jéssica Lima, pela compreensão, paciência e incentivo durante todo o processo desta dissertação. Sua presença e apoio foram essenciais para enfrentar os desafios e me motivaram a alcançar meus objetivos. Em especial, sou grato por ter me dado o melhor presente da minha vida: nosso filho Bernard, que trouxe ainda mais alegria e motivação para concluir este trabalho.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. William de Paiva, por sua orientação acadêmica, dedicação e valiosos ensinamentos ao longo deste trabalho. Sua expertise e paciência foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço também pela disponibilidade em tirar minhas dúvidas, pelos feedbacks construtivos e pela confiança depositada em mim.

Agradeço igualmente a todos os professores, colegas e demais membros do corpo docente e do GPTecA que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado, me apoiando e encorajando durante essa etapa desafiadora da minha vida.

Minha gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso desta dissertação de mestrado.

"O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você; ele nunca o deixará, nunca o abandonará. Não tenha medo! Não se desanime!" - Deuteronômio 31:8

## RESUMO

O concreto é amplamente utilizado na construção civil devido à sua alta resistência à compressão e capacidade de se adaptar a diferentes formas arquitetônicas. No entanto, busca-se constantemente aprimorar as propriedades desse material, e uma abordagem promissora é a incorporação de resíduos de aço provenientes de usinagem industrial na fabricação do concreto na tentativa de superar as deficiências apresentadas pelos concretos convencionais e de buscar alternativas para o reuso de materiais contribuindo para a sustentabilidade. Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da incorporação de resíduos de metalúrgicas (cavacos de aço) na resistência à tração e compressão do concreto. Os ensaios de resistência a compressão, tração e abatimento foram realizados, utilizando cavacos de formato tubular com comprimento entre 2 e 7 cm coletados em usinas metalúrgicas em Campina Grande-PB. Utilizou-se o método do planejamento fatorial para investigar as variáveis da composição do concreto, incluindo o fator água/cimento e o percentual de cavacos de aço. Foi utilizado o delineamento composto central (DCC). Dessa forma, foi viável otimizar a interação entre essas variáveis controláveis e reduzir a quantidade de ensaios realizados. Verificou-se que houve uma redução em relação a resistência a compressão do concreto com adição de cavacos, porém de apenas 4% quando comparado ao concreto de referência. A resistência à tração do concreto com adição apresentou em sua melhor interação um aumento de 34% em relação ao concreto de referência embora os níveis escolhidos para o fator água/cimento e percentuais de adição se mostraram sem significância, ao nível de 5%, para o DCC realizado. O ensaio de abatimento mostrou que a consistência do concreto tende a reduzir conforme o aumento de cavacos na mistura, sendo o percentual de 10% o que apresentou menor trabalhabilidade. Sendo assim, a adição de cavacos de aço no concreto se mostra viável quanto às variáveis e modelo estudados, porém há ainda limitações e variáveis que podem ser estudadas.

**Palavras-chave:** composição do concreto; construção civil; resíduo de aço; metalurgia.



## ABSTRACT

Concrete is widely used in civil construction due to its high compressive strength and its ability to adapt to different architectural forms. However, there is a constant search to improve the properties of this material, and a promising approach is the incorporation of steel waste from industrial machining in the production of concrete in an attempt to overcome the deficiencies of conventional concrete and explore alternatives for material reuse, contributing to sustainability. Within this context, this study aims to analyze the influence of incorporating steel waste (steel chips) on the tensile and compressive strength of concrete. Compression, tensile, and slump tests were conducted, following the applicable standards, using tubular-shaped steel chips with lengths ranging from 2 to 7 cm, collected from metallurgical plants in Campina Grande-PB, Brazil. The factorial design method was employed to investigate the variables in concrete composition, including the water-to-cement ratio and the percentage of steel chips. The central composite design (CCD) was used. Consequently, it was possible to optimize the interaction between these controllable variables and reduce the number of tests conducted. It was found that the addition of steel chips led to a reduction in the compressive strength of the concrete, albeit insignificant when compared to the reference concrete. The tensile strength of the concrete with added steel chips showed a 34% increase in its best interaction compared to the reference concrete, although the selected levels for the water-to-cement ratio and percentage of addition were found to be insignificant for the CCD performed. The slump test revealed that the consistency of the concrete tends to decrease with an increase in the amount of steel chips in the mixture, with the 10% percentage showing the lowest workability. Thus, the addition of steel chips to concrete proves to be viable for the studied variables and model, although there are still limitations and variables that can be further investigated.

**Keywords:** concrete composition; civil construction; steel residue; metallurgy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tabela de limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa) .....	18
Figura 2 - Mecanismo de aumento de tenacidade à flexão do concreto com fibra....	21
Figura 3. Representação das tensões de tração e compressão em um corpo seccionado. ....	23
Figura 4. Representação do ensaio de abatimento de tronco de cone .....	28
Figura 5. Cavaco de aço tubulares.....	30
Figura 6. Formatos dos cavacos de aço .....	31
Figura 7. Metodologia aplicada .....	39
Figura 8. Sequência de operação do planejamento fatorial .....	40
Figura 9. Cavacos coletados (a), cortados (b) e separados (c).....	43
Figura 10. Corpos de prova utilizados (a), moldados (b), cura úmida (c) e após 28 dias (d).....	45
Figura 11. Capeamento do corpo de prova (a) e Prensa hidráulica da UFCG (b).....	47
Figura 12. Prensa hidráulica Uninassau (a) e Corpo de prova posicionado para ensaio de tração (b).....	48
Figura 13. Materiais utilizados para abatimento de tronco de cone .....	49
Figura 14. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC (Resistência a compressão).....	52
Figura 15. Superfície resposta do DCC para fator A/C x % de Cavacos de aço.....	53
Figura 16. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC no Slump Test.	56
Figura 17. Superfície resposta do DCC para fator A/C x % de Cavacos de aço x Slump .....	57
Figura 18. Comportamento do abatimento .....	58
Figura 19. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC na Resistência à Tração .....	60
Figura 20. Comportamento da resistência à tração.....	61
Figura 21. Superfície resposta do DCC para o fator A/C x % de Cavacos de aço x Resistência à Tração.....	62
Figura 22. Comportamento e aspecto do corpo de prova rompido no ensaio de tração .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. DCC para obtenção dos resultados de resistência e abatimento.....	41
Tabela 2. Matriz de planejamento com fatores e níveis propostos para o DCC.....	42
Tabela 3. Resultados de Resistência a compressão axial para o delineamento proposto .....	51
Tabela 4. Resultados de Resistência a compressão axial para o delineamento proposto .....	55
Tabela 5. Resultados de Resistência à Tração para o delineamento proposto .....	59
Tabela 6. Resistência à tração por compressão diametral em Mpa aos 28 dias de cura .....	60

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Quantidade de cada material utilizado no concreto.....	44
Quadro 2. Normas para a realização dos ensaios .....	46
Quadro 3. Descrição da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos ensaios .....	50

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CM - Unidade de centímetro

CP - Cimento Portland

CRF - Concreto Reforçado com Fibras

DCC - Delineamento composto central

A/C - água/cimento

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

M - Unidade de metro

Mm - Unidade de milímetro

Mpa - Mega pascal

NBR - Norma Brasileira

PB - Paraíba

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Específicos</b> .....	<b>16</b>
3.1.1 Tensões atuantes no Concreto .....	21
3.1.2. Resistência à Tração.....	24
3.1.3. Resistência a compressão .....	26
3.1.4. Consistência do concreto .....	28
<b>3.2 Cavacos de aço</b> .....	<b>30</b>
3.2.1 Formatos do Cavaco de aço .....	31
3.2.2 Reuso dos cavacos de aço .....	32
<b>3.3 Aplicações de materiais alternativos no concreto</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4 Planejamento Fatorial</b> .....	<b>35</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1 Planejamento Fatorial</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2 Coleta dos cavacos de aço nas metalúrgicas</b> .....	<b>42</b>
<b>4.3 Preparação do concreto, moldagem e cura dos corpos de prova</b> .....	<b>43</b>
<b>4.4 Realização Dos Ensaios</b> .....	<b>45</b>
4.4.1 Ensaio de Resistência a Compressão Axial.....	45
4.4.2 Ensaio de Consistência pelo abatimento de tronco de cone (Slump Test).....	49
<b>4.5 Avaliação dos resultados e conclusão</b> .....	<b>49</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>5.1 Análise descritiva dos dados</b> .....	<b>50</b>
<b>5.2 Resistência a Compressão Axial</b> .....	<b>51</b>
5.2.2 Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test) .....	54
<b>5.3 Resistência a tração por compressão diametral</b> .....	<b>58</b>

<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais usados no mundo e é composto basicamente por cimento Portland, agregados miúdos, agregados graúdos e água, podendo ser aditivado ou não. A utilização do concreto na construção civil é justificada principalmente pela sua alta resistência à compressão e a fácil conformação aos diferentes formatos que a arquitetura possa exigir. Porém, com o avanço da tecnologia, o aumento da produção em escala e, conseqüentemente, o crescimento dos resíduos gerados, há uma grande necessidade de que as indústrias busquem meios e técnicas que possam gerar uma redução ou eliminação dos impactos ambientais.

Dessa forma, tem havido um crescente interesse por parte de pesquisadores em todo o mundo, bem como no Brasil, no estudo dos processos da construção civil, que é considerada uma das indústrias de maior impacto ambiental. Esse interesse tem impulsionado a busca por metodologias de execução que possam reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar a poluição ambiental associada a essa indústria. Uma das abordagens promissoras nesse sentido é a incorporação de resíduos e materiais, previamente considerados sem valor, no processo de produção de concreto. Essas adições de resíduos têm o potencial de conferir benefícios tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, proporcionando uma alternativa sustentável e viável para o setor da construção civil.

Andrade e Tutikian (2016), afirmam que é de grande importância a resistência do concreto para as estruturas, solicitado por três tipos de tensões, sendo elas a de compressão, tração, e cisalhamento, ou mesmo quando elas atuam simultaneamente em uma combinação de esforços atuando dentro do elemento estrutural. Entre os tipos de tensões citados, o concreto possui uma deficiência em relação à resistência à tração, sendo necessário a inserção de reforços para melhorar sua propriedade mecânica, e para isso, o aço ainda é muito utilizado.

Com o crescente avanço tecnológico dos materiais e das técnicas da construção civil, misturas de concretos especiais têm surgido na tentativa de superar as deficiências apresentadas pelos concretos convencionais e de buscar alternativas para o reuso de materiais contribuindo para a sustentabilidade (BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2018).



Nesse sentido, o resíduo de aço gerado por processos de usinagem nas indústrias metalúrgicas pode ser um aliado do concreto para o aumento de sua resistência à tração. Os cavacos de aço, como são comumente conhecidos, são os pedaços de material removidos da peça de aço durante o processo de usinagem, gerados pela ação de uma ferramenta de corte. Portanto, estudos sobre adições de materiais alternativos ao concreto estão sendo desenvolvidos buscando melhorias em suas propriedades mecânicas e a redução dos impactos ambientais causados.

Ghannam et al. (2016) observaram que para uma proporção de 10% de pó de granito no concreto, o aumento da resistência à compressão foi cerca de 30% em comparação com o concreto normal. Também foi observado que a substituição de até 20% da areia, em peso, pelo pó de ferro no concreto resultou em um aumento na resistência à compressão em 10% em comparação com o concreto normal.

Dias et al. (2021) avaliaram o reaproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na fabricação de concreto com influência da adição de Óxido de Grafeno (OG), nas propriedades mecânicas do concreto, levando em consideração as propriedades do óxido de grafeno e dos RCD. Conclui-se que com a concentração de óxido de grafeno utilizada no concreto reciclado desta pesquisa, a resistência do concreto não aumenta, sendo então necessários outros estudos a respeito.

Ehrenbring e Medeiros (2018) e Herscovici et al. (2019), relatam que uma das características atribuídas das fibras é o aumento da ductilidade do concreto, reduzindo o comportamento frágil em relação a trincas e fissuras, além de proporcionar melhorias na absorção de impactos em zonas de fissuração. Sendo assim, este trabalho busca avaliar a contribuição da incorporação dos resíduos de aço, derivados da usina metalúrgica, nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente na resistência à tração.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Analisar a influência da incorporação de resíduos de metalúrgicas (cavacos de aço) na resistência à tração e compressão do concreto.

### **2.2 Específicos**

- Analisar a viabilidade técnica da adição de cavacos no concreto;
- Propor, por meio de planejamento fatorial, a redução dos ensaios e otimização dos resultados.
- Verificar a influência da adição do resíduo na consistência do concreto através do slump test.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Concreto

O concreto convencional, na construção civil, é um material compósito, constituído fundamentalmente por um composto de um aglomerante (Portland), agregados – material granular como britas ou resíduos da construção/demolição, e água. É um material sólido artificial de baixo custo e que se acomoda a diversas condições e construções, como rodovias, pontes, obras de saneamento, casas de alvenaria, dentre outras opções. Porém, possui comportamento frágil quando exposto a tensões cisalhantes, o que pode causar uma ruptura brusca (FERNANDES et al., 2020; COSTA; SAVARIS; BALESTRA, 2019).

Há diversos motivos do concreto ser amplamente utilizado na área da construção civil, como a resistência à água (relacionada à deterioração), sendo utilizado em obras de controle e armazenamento de água; possibilidade de confecção de formas e tamanhos variados (atrelado a consistência plástica no estado fresco), por ser um material acessível e disponível no mercado (materiais componentes de custo acessível); e também com relação ao fogo, devido a sua resistência (MELLO, 2021).

O concreto pode ser classificado como simples (cimento, agregados e água), ciclópico (material agregado é uma mistura de até 60% de fragmentos de rochas) e reforçado (adição de aço na forma de fibras, barras, telas e hastes), sendo este último subdividido em Estrutural: leve; pré-fabricado; pré-esforçado; pré-tensionado; pós-tensionado (SANCHEZ; TRUJILLO, 2020). Estima-se que anualmente são consumidos cerca de 11 bilhões de toneladas de concreto, o que resulta em um consumo médio de 1,9 tonelada por habitante, valor inferior apenas ao consumo mundial de água.(DENARDI, 2016).

O cimento desempenha um papel fundamental na composição e propriedades do concreto, sendo um dos principais componentes do material. Sua importância está relacionada à capacidade de conferir resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade ao concreto. Além disso, o tipo de cimento utilizado e suas adições podem influenciar diretamente nas características e desempenho do concreto. A

Figura 1 mostra os diferentes tipos de cimento e os limites de sua composição segundo a ABNT NBR 16697:2018.

Figura 1 – Tabela de limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa)

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno <sup>b</sup>		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico <sup>c</sup>		CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V <sup>a</sup>			ARI	90 – 100	0	0
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	—	75 – 100	—	—	0 – 25
	Não estrutural		—		—	50 – 74	—	—

<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.  
<sup>b</sup> O teor máximo da somatória de adições ( escória granulada de alto –forno e material carbonático) deve ser de 75%.  
<sup>c</sup> O teor máximo da somatória de adições ( material pozolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

Fonte: ABNT NBR 16697,2018.

O cimento Portland é amplamente utilizado na fabricação do concreto devido à sua alta resistência inicial e final, sendo produzido a partir da calcinação de calcário e argila em altas temperaturas. O cimento Portland composto é obtido pela adição de

materiais pozolânicos, como a cinza volante ou a escória de alto forno, melhorando sua resistência e durabilidade. Já o cimento Portland de alto forno é produzido a partir da adição de escória de alto forno durante a moagem do clínquer, proporcionando maior durabilidade e menor impacto ambiental. (CARVALHO et al., 2019).

A escolha do tipo de cimento apropriado para o concreto deve levar em consideração as características e requisitos específicos de cada projeto. É fundamental considerar fatores como a resistência, durabilidade, trabalhabilidade, exposição a agentes químicos, condições ambientais e exigências estéticas. (GARCÍA et al., 2017).

De acordo com Moraes, Cunha e Helene (2021), o cimento Portland Comum é o tipo mais conhecido e amplamente utilizado. Esse tipo de cimento apresenta alta resistência inicial e final, sendo empregado em uma ampla variedade de aplicações na construção civil. Já o cimento Portland Composto é especialmente indicado para estruturas sujeitas a agressões químicas. O cimento Portland Pozolânico é geralmente utilizado em aplicações que exigem maior desempenho em ambientes agressivos, já o cimento Portland Branco, é amplamente utilizado em aplicações estéticas, como revestimentos e elementos arquitetônicos, onde a cor clara é desejada.

A validade do cimento é um aspecto crítico a ser considerado. O cimento tem um prazo de validade, geralmente indicado na embalagem, que deve ser respeitado para garantir sua eficácia. O armazenamento adequado é essencial para preservar a qualidade do cimento. Ele deve ser mantido em local seco, protegido da umidade, chuva e outras intempéries. Além disso, as embalagens devem ser armazenadas em pilhas, evitando o contato direto com o solo e garantindo a rotação dos estoques para uso do cimento mais antigo primeiro. (HELENE et al. 2021)

Existem três razões principais que tornam o concreto tão utilizado como material na engenharia. A primeira é a resistência do concreto perante a ação da água, o que faz dele um material ideal para construção de estruturas para controle, armazenamento e transporte da água. A segunda razão é a facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser obtidos através de uma variedade de formas e tamanhos, isso porque o concreto fresco é de consistência plástica, que

favorece o fluxo do material para o interior das formas, e a terceira razão seria o baixo custo do material quando comparado com alternativas. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Para garantir um concreto econômico e que atenda as propriedades mínimas, especialmente a consistência, durabilidade e resistência, é necessária atenção no processo de escolha dos materiais constituintes. A qualidade do concreto fresco e endurecido depende dos aspectos dos materiais que serão utilizados, por isso devem ser componentes adequados (NEVILLE, 2015).

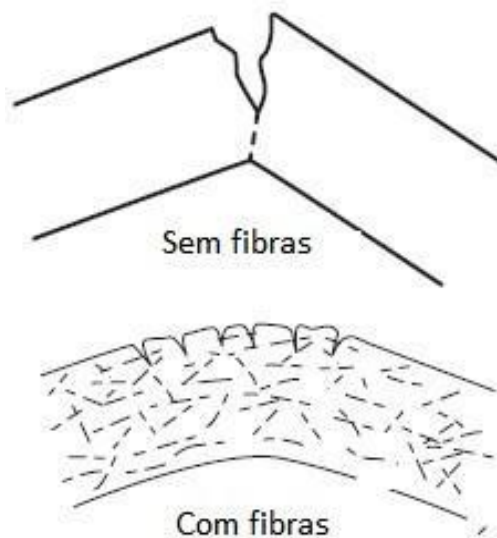
As características do concreto proporcionam a qualidade de ser um material de grande capacidade a esforços de compressão, no entanto seu comportamento em esforços de tração e flexão não segue a mesma tendência. Em virtude de ser um material amplamente utilizado, o concreto se torna foco de inúmeras pesquisas que permitem a evolução do composto. (LORENZI, 2020).

Diversos estudos têm sido feitos para o desenvolvimento de técnicas que auxiliam na neutralização do problema de fissuração que o concreto apresenta, sendo que o uso de fibras no traço do concreto é uma das possíveis soluções. Conseqüentemente, diversas fibras têm sido adicionadas à dosagem do concreto para que se haja melhorias relacionadas à ductilidade das peças de concreto e à capacidade das mesmas de resistirem à tração. Dentre tais fibras, podem-se citar as fibras de aço, vidro, bambu, polipropileno e o bagaço da cana (CARVALHO et al., 2019).

Bentur e Mindess (2007) afirmam que a presença de fibras na argamassa promove ao concreto um ganho de resistência à tração, maior capacidade de deformação e aumento da tenacidade. Além dessas propriedades, Choi e Yuan (2005) complementam com o aumento da resistência ao impacto, resistência à flexão e do módulo de ruptura.

As propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas por fibras curtas discretas, aleatoriamente orientadas, que previnem ou controlam a formação e a propagação de fissuras. A fibra induz uma distribuição homogênea das tensões no concreto, o que provoca uma melhor exploração da matriz de elevada resistência (GENCEL et al., 2011). A Figura 2 mostra o mecanismo do aumento de tenacidade à flexão do concreto com fibra.

Figura 2 - Mecanismo de aumento de tenacidade à flexão do concreto com fibra



Fonte: Johnson, 1980 apud Mehta e Monteiro, 2008.

Além dos cuidados com os materiais e o cumprimento das normas, outros fatores como o processo de mistura, transporte e cura do concreto também influenciam suas propriedades. Um processo adequado de mistura garante a homogeneidade da mistura e a distribuição uniforme dos materiais. O transporte deve ser realizado de maneira adequada, evitando segregação e perda de consistência. A cura do concreto é importante para a sua hidratação e endurecimento, garantindo a resistência final.

### 3.1.1 Tensões atuantes no Concreto

A compreensão do comportamento das tensões no concreto é fundamental para o projeto e a análise de estruturas de concreto. O concreto é um material compósito que exibe uma resposta complexa às diferentes tensões a que é submetido. Diversos estudos científicos recentes têm contribuído para a compreensão das tensões no concreto, identificando as principais tensões envolvidas e investigando as respostas do material a essas tensões.

No que diz respeito às principais tensões que atuam no concreto, destacam-se as tensões de tração, compressão, cisalhamento e torção. As tensões de tração são

particularmente críticas, uma vez que o concreto apresenta baixa resistência à tração em comparação com a compressão. Estudos como o de Airey e Airey (2018) têm explorado a influência da história de carregamento de tração nas propriedades de fissuração do concreto, mostrando que o aumento gradual das tensões de tração ao longo do tempo resulta em uma taxa de propagação de fissuras menor em comparação com carregamentos súbitos de alta magnitude.

Além disso, estudos como o de Beushausen e Alexander (2019) têm investigado a relação entre tensões e fissuras no concreto. Verificou-se que tensões de tração mais elevadas resultam em fissuras mais largas e espaçadas, enquanto a capacidade de deformação e a ductilidade do concreto desempenham um papel importante na limitação da propagação das fissuras.

Um estudo realizado por Duan et al. (2020) investigou o comportamento do concreto sob tensão de tração. Os resultados indicaram que a capacidade de resistência à tração do concreto é baixa em comparação com sua resistência à compressão. Isso ocorre devido à natureza frágil do concreto, que apresenta baixa capacidade de distribuir as tensões de tração.

No que se refere às tensões de cisalhamento e torção, estudos como o de Fernández-Canteli e López-Colina (2020) e Ozbakkaloglu e Lim (2018) investigaram os efeitos dessas tensões no comportamento estrutural do concreto. Observou-se que a combinação de cisalhamento e torção pode levar a falhas catastróficas em elementos de concreto, destacando a importância de considerar a resistência à torção e ao cisalhamento no projeto de estruturas de concreto.

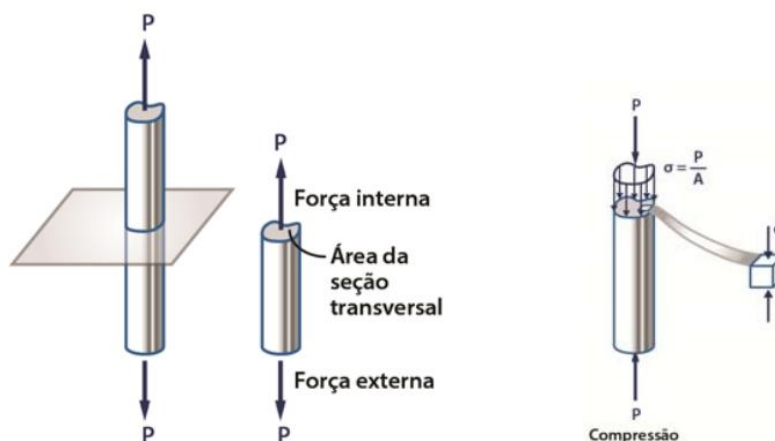
As tensões atuam no concreto de diferentes maneiras, dependendo do tipo de carga e das condições de carregamento. Quando o concreto está sujeito a cargas de compressão, as tensões aplicadas fazem com que o material se comprima, resultando em um aumento da resistência. No entanto, o concreto também pode ser submetido a tensões de tração, que podem levar ao surgimento de fissuras e redução de sua resistência.

Conforme ilustrado por Hibbeler (2009), a Figura 3 demonstra visualmente a representação das tensões de tração e compressão em um corpo seccionado. Essa



representação gráfica auxilia na compreensão das tensões e na análise das características e distribuição das mesmas em diferentes seções do corpo.

Figura 3 – Representação das tensões de tração e compressão em um corpo seccionado.



Fonte: Hibbeler (2009)

A dita resistência de um material está relacionada à sua aptidão em suportar essas tensões, sem sofrer excessivas deformações ou rupturas. Os valores para essas propriedades mecânicas, nos diferentes materiais, são atribuídos de forma experimental, sendo os testes de tração ou compressão axial os mais importantes para suas obtenções. Através da conformação do material a ser estudado em corpos de prova de dimensões padronizadas por normas, uma carga é aplicada de modo lento e constante até que o material atinja o ponto de ruptura (BASCOUL et al., 2021).

Já são vários os trabalhos na literatura aberta que têm sugerido a utilização de resíduos metálicos para otimizar as propriedades mecânicas do concreto, incluindo resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, capacidade de retenção de radiação, dentre outras (ALWAEELI; NADZIAKIEWICZ, 2012; ALWAEELI, 2016; EMON; MANZUR; YAZDANI, 2016; SENGUL, 2016; KESHAVARZ; MOSTOFINEJAD, 2019).

### 3.1.2 Resistência à Tração

A resistência à tração é uma propriedade mecânica importante para o concreto, pois indica sua capacidade de suportar esforços que tendem a separar suas partes. No entanto, o concreto convencional apresenta uma resistência à tração relativamente baixa, o que pode comprometer a integridade estrutural de elementos submetidos a cargas de tração. Para contornar essa limitação, surgiu a técnica de reforço com fibras. (CHEN, J., et al., 2021)

Materiais mais frágeis, como concreto, rochas e cerâmicas, são mais fracos quando postos sob esforços de tração do que compressão, ou seja, sua resistência à tração é muito menor que à compressão. Os principais iniciadores de danos em estruturas compostas por esses materiais são as próprias falhas de tração, como apresentadas em decorrência da exposição a cargas de flexão oriundas de atividades sísmicas, ou a fragmentação causada pela reflexão de uma onda de compressão de um limite livre. E é para evitar danos como estes que se torna importante o estudo do parâmetro da resistência à tração desses materiais (GUO et al., 2019).

De todos os materiais de construção, o concreto é o mais utilizado. Ele é um material compósito complexo, onde, em geral, as falhas nas suas estruturas podem ser atribuídas a alguma forma de tensão de tração. A resistência à tração é determinada de forma experimental pelo ensaio de tração por compressão diametral, permitindo uma inferência indireta da resistência à tração. A tração é uma solicitação que tem tendência a delongar um objeto, no sentido oposto à inércia resultante do sistema de forças, como acontece nos cabos de aço de um guindaste (GARCÍA et al., 2017).

Durante a execução do ensaio, uma tensão de tração é induzida de forma perpendicular à carga, e proporcional a sua magnitude. Quando a tensão impelida excede a tensão de tração do material, a fratura se inicia no centro geométrico do disco. O término do teste habitualmente ocorre devido a uma falha súbita e violenta do corpo de prova, no instante em que atinge a carga máxima suportável, em decorrência da propagação de uma trinca instável (GARCÍA et al., 2017). Os corpos de prova devem ser moldados e curados conforme as NBRs 7215 e 5738 (ABNT, 2015; ABNT, 2019).

De acordo com o estudo de Larsen e Thorstensen (2020), o reforço de fibras metálicas pode contribuir para a melhoria da resistência à tração consideravelmente, em comparação com o concreto convencional, mesmo após a primeira fissuração. Apesar da resistência à tração do concreto convencional ser frequentemente considerada zero, ele pode resistir a aplicação de cargas do tipo, entretanto, com uma baixa capacidade. Essa adição de fibras metálicas concede ao concreto a sustentação e integridade estrutural atuando como ponte para transferência de carga entre as fissuras, melhorando a sua resistência à tração do corpo de prova (LARSEN; THORSTENSEN, 2020).

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um tipo de material compósito que combina a matriz de concreto com fibras de diferentes materiais, como vidro, aço, polipropileno, dentre outros. Essas fibras são adicionadas ao concreto com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, especialmente a resistência à tração. Em comparação com o concreto convencional, o CRF apresenta uma maior tenacidade, ductilidade e resistência à tração por cisalhamento. Além disso, as fibras conferem ao material uma maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura, o que pode resultar em um comportamento mais seguro e previsível em caso de carregamento cíclico ou dinâmico (YAO, Y., et al., 2021).

Entre as fibras mais utilizadas no CRF, destacam-se as fibras de aço, que apresentam uma alta resistência mecânica e um comportamento dúctil. Essas fibras são capazes de resistir a grandes deformações antes da ruptura, o que confere ao CRF uma maior capacidade de absorção de energia (YAO, Y., et al., 2021).

A incorporação de fibras de aço no CRF também proporciona uma maior capacidade de controle e redução de fissuras no concreto. Essas fibras atuam como elementos de reforço, impedindo a propagação de fissuras microscópicas e reduzindo a formação de fissuras macroscópicas. Isso resulta em um concreto com maior durabilidade e resistência aos efeitos ambientais e ao envelhecimento. Além disso, a presença das fibras de aço também melhora a trabalhabilidade do concreto, facilitando sua colocação e compactação durante a execução de elementos estruturais. (GONÇALVES et al., 2021).

### 3.1.3 Resistência a compressão

A resistência a compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto, uma vez que é uma medida da sua capacidade de suportar cargas compressivas. A resistência à compressão do concreto depende de vários fatores, como a qualidade dos materiais utilizados, a relação água/cimento, a idade do concreto e as condições de cura. (LIMA, R. F. et al., 2021)

A garantia da resistência a compressão axial do concreto é uma característica que garantem os critérios de segurança na execução das obras e uma das maiores dificuldades encontradas pelos engenheiros. No campo do dimensionamento de estruturas em concreto armado, a resistência característica à compressão do concreto é um dos parâmetros de maior relevância, estabelecendo-se profunda relação entre a relação água/cimento e o grau de adensamento do concreto. A resistência à compressão trabalha contra a solicitação que tende a encurtar o objeto em questão, e ocorre em sentido igual ao da reação de apoio (SOUZA et al., 2021).

A resistência a compressão é influenciada por diversos fatores, como a qualidade dos materiais utilizados na produção do concreto, a relação água/cimento, o tipo e tamanho dos agregados, o teor de aditivos e a técnica de mistura e cura do concreto. Além disso, a resistência à compressão é uma propriedade que evolui ao longo do tempo, com o aumento da idade do concreto, devido à reação química contínua entre o cimento e a água. (SIQUEIRA, R. C. et al., 2020)

As reações de hidratação dos compostos do concreto, advindos do cimento Portland, ocorrem inicialmente a uma taxa elevada, que decrescem continuamente até atingir uma velocidade de hidratação considerada praticamente nula. O desenvolvimento da resistência à compressão é semelhante ao processo de hidratação apresentado, onde as taxas de incremento à resistência tendem a zerar no decorrer dos anos. O tempo considerado para a taxa de hidratação ser considerada nula depende de diversos fatores, tais como o tipo do cimento, a cura e a proporção água/cimento. Como padrão, adota-se a idade de 28 dias como tempo de decréscimo da taxa de hidratação do corpo de prova para realização do teste de resistência (NEVILLE, 2015).

Os ensaios de resistência a compressão são de fácil execução, normalizado pela NBR 5739, cujo procedimento para moldagem dos corpos de prova pode ser realizado facilmente nos canteiros de obra, com custo irrisório (HELENE; TERZIAN, 1992; ABNT, 2018). Os ensaios acontecem em corpos de prova tratados conforme os procedimentos normalizados nas NBR 5738, NBR 7680 e NBR 9479, que envolvem extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, e a moldagem e cura dos corpos de prova (ABNT, 2006; ABNT, 2015; ABNT, 2015; ABNT, 2018).

O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos, que são moldados com uma mistura de concreto fresco e curados em condições específicas, geralmente em água, por um período de tempo pré-determinado. Após o período de cura, os corpos de prova são ensaiados em uma prensa hidráulica, que aplica uma carga axial gradualmente crescente até que ocorra a ruptura do material. A resistência à compressão do concreto é calculada a partir da carga máxima suportada pelo corpo de prova dividida pela área da seção transversal da amostra. Os resultados são geralmente expressos em megapascals (MPa) e são utilizados para avaliar a qualidade do concreto produzido. (SANTIAGO, C. M. P. et al., 2020)

A inclusão de fibras no concreto é um conhecido aliado para se evitar o comportamento explosivo nas falhas. A principal diferença com a adição deste material é a melhor resistência à compressão e rigidez. A diferença na resistência à compressão dar-se-á, também, em decorrência dos materiais constituintes, as proporções da mistura, condições de cura, além do próprio teor de fibras (LARSEN; THORSTENSEN, 2020).

Ainda de acordo com Larsen e Thorstensen (2020), uma amostra bibliográfica considerável de trabalhos de pesquisa relata os efeitos das fibras de aço na resistência à compressão. Foram relatadas, por exemplo, melhorias na resistência à compressão em casos de adição de fibra em concreto de alto desempenho, porém essa influência varia em função do teor do material entre os diferentes estudos. Foi observada, também, a interferência do volume dos produtos de hidratação e da densidade de empacotamento dos agregados na resistência à compressão das amostras (LARSEN; THORSTENSEN, 2020).

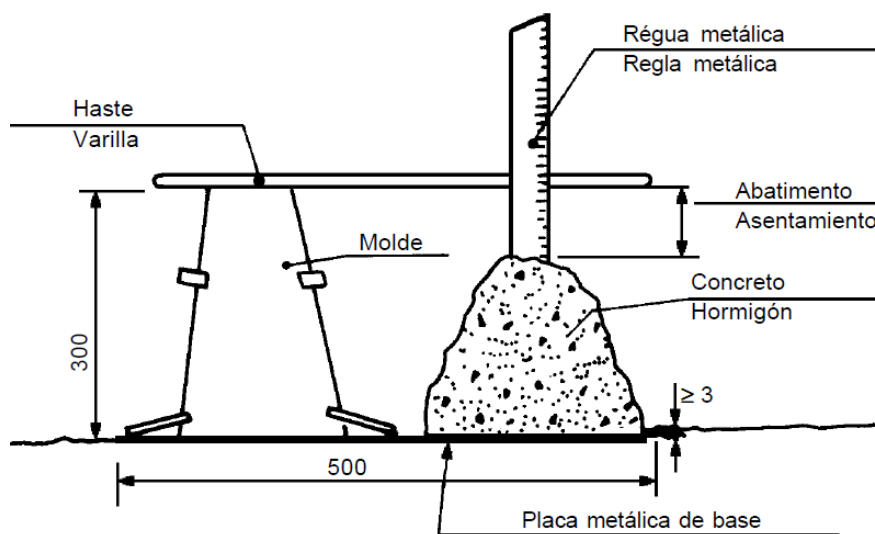
### 3.1.4 Consistência do concreto

A consistência do concreto é uma propriedade que se refere à sua capacidade de fluir e se moldar adequadamente durante a colocação e a compactação. Uma mistura de concreto com a consistência adequada deve ser facilmente moldável e trabalhável, ao mesmo tempo em que deve manter a sua forma e coesão (BORGES, P. H. R. et al., 2019).

A consistência do concreto pode ser afetada por diversos fatores, como a quantidade e a qualidade dos materiais utilizados na mistura, a relação água/cimento, o tipo e tamanho dos agregados, a presença de aditivos e a técnica de mistura e transporte do concreto. Para avaliar a consistência do concreto, são realizados ensaios de consistência, que podem ser realizados por diferentes métodos, tais como o ensaio de abatimento ou espalhamento (Slump Test) (BORGES, P. H. R. et al., 2019).

O ensaio de abatimento, também conhecido como Slump Test, é um dos ensaios mais comuns para avaliar a consistência do concreto. Nesse ensaio, uma amostra de concreto fresco é colocada em um molde cilíndrico e, em seguida, é retirado o molde. A medida da deformação vertical sofrida pelo cone de concreto é conhecida como abatimento, e é um indicador da consistência do material (ADAS, A. M.; BANGASH, M. Y. H., 2020). A Figura 4 ilustra a realização do ensaio de abatimento.

Figura 4 – Representação do ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

A indústria do concreto reconhece a importância do monitoramento da sua consistência nos projetos desde princípios do século XX, ainda que na época não houvesse padrões de testes para sua aferição. A descrição subjetiva e qualitativa da do produto era seu único relatório de qualidade. A consistência do concreto era dividida em três categorias abstratas: (i) seca, (ii) "trepidante " e "molhada" (ELATY; GHAZY, 2016).

A trabalhabilidade se refere à firmeza da substância e ao nível de facilidade de sua fluidez. Ao tratar de concreto, a sua consistência traduz o grau de umidade, que representa a relação da quantidade de água na mistura. Na prática, dentro dos limites, os concretos mais úmidos são mais trabalháveis, quando comparados aos concretos secos (NEVILLE, 2015).

Muitas vezes subestimada, a trabalhabilidade é uma propriedade vital em relação ao concreto acabado, uma vez que deve permitir o maior adensamento com uma quantidade coerente de energia ou com a quantidade de esforço disponível para sua aplicação em determinadas condições. Reafirma-se, ainda, a importância do adensamento no grau de resistência resultante do concreto, necessária para remoção de vazios na mistura, que causariam uma redução em sua resistência. Ainda associado a esta situação, trata-se do fator "teor de umidade" na mistura, kg de água/m<sup>3</sup> de concreto, uma vez que a água retida após o adensamento, ao evaporar, resultará nesses vazios que diminuem a resistência da estrutura (BONALUMI, D. M., ET AL, 2021)

Segundo Ferreira, M., et al. (2019), mesmo com os avanços nos conceitos e métodos da construção civil, as técnicas aceitas para avaliação da trabalhabilidade continuam sendo um tanto subjetivas. Os procedimentos buscam correlacionar a trabalhabilidade com algum parâmetro físico de fácil determinação, onde, embora possam fornecer informações úteis, nenhum é totalmente satisfatório. O método de determinação de consistência do concreto mais utilizado e aceito nos canteiros de obra em todo o mundo é o abatimento do tronco de cone, determinado como "norma do *slump test*" (ABNT NBR 16889:2020).

A finalidade principal do ensaio de abatimento é medir a capacidade de deformação e fluidez do concreto, fornecendo informações importantes sobre a trabalhabilidade e a qualidade do material. A consistência do concreto está

intimamente relacionada à sua capacidade de ser moldado, espalhado e compactado adequadamente durante a fase de colocação. O ensaio de abatimento de tronco de cone permite determinar a fluidez do concreto, ou seja, sua capacidade de se deformar sob a ação da gravidade, sem a aplicação de forças externas (FIORENTIN, L. D., ET AL., 2020).

### 3.2 Cavacos de aço

O cavaco, também conhecido na literatura por resíduo de torno, aparas de aço ou mesmo resíduo de metalurgia, Figura 5, é uma porção de material, retirada pelas ferramentas empregadas na usinagem para obter geometria, dimensões e acabamento final da peça no qual não tem um padrão geométrico ordenado (CARLI, 2020; MACHADO et al., 2015). Com relação a sua forma, podem ser classificados em fitas, helicóides, espirais e lascas (CARLI, 2020). Com isso, se tornou o principal resíduo dos processos de fabricação da indústria metal mecânica, podendo ser obtido facilmente em grandes volumes em todas as empresas deste ramo.

Figura 5 – Cavaco de aço tubulares



Fonte: (Portal Soluções de Ferro, 2021)

De acordo com a NBR 3685, uma vez que o cavaco é formado durante o processo de corte de um material metálico, ele terá as características relacionadas ao produto inicial, bem como será influenciado pelo material e geometria da ferramenta, a condição das arestas, a posição e os dados de corte e condições. Os cavacos produzidos são definidos pelos seus formatos, comprimentos e seções transversais,



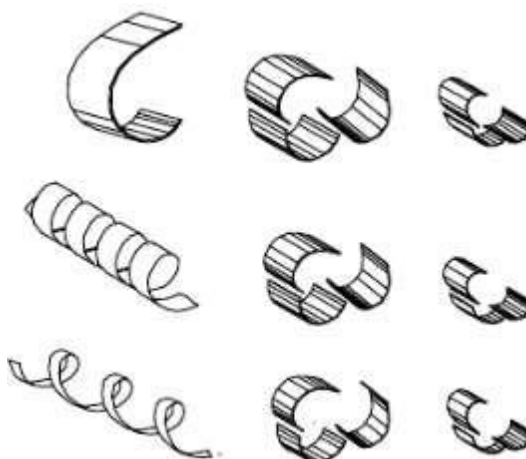
através de um sistema de codificação numérica para os tipos mais comuns observados (ABNT, 2017).

### 3.2.1 Formatos do Cavaco de aço

Em geral, os cavacos de aço possuem um formato irregular e uma dimensão que pode variar de alguns milímetros a vários centímetros. Sua superfície é geralmente áspera e pode conter impurezas, como óleo e graxa, resultantes do processo de usinagem. A composição química dos cavacos de aço pode variar dependendo do tipo de aço utilizado na produção das peças (REIS, E. J. et al. 2020).

Segundo Machado et al. (2015), durante o processo de usinagem, a peça é transformada, adquirindo uma nova forma e acabamento, por meio da remoção de material em forma de cavaco. Nesse sentido, existem diferentes categorias para classificar os cavacos, que podem ser identificados como contínuos, descontínuos e segmentados como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Formatos dos cavacos de aço



Fonte: Santos e Sales (2007)

Os processos de usinagem envolvem operações de corte que permitem remover excessos de um material bruto com auxílio de uma ferramenta ou máquina resultando em uma peça pronta (SOUZA, 2011). Após esta etapa, os resíduos gerados são encaminhados para reciclagem, pois não possuem mais utilidade para as empresas. Porém, se forem descartados de forma incorreta irão gerar prejuízos ao meio ambiente.

Esses resíduos de aço são compostos principalmente por ferro e podem conter outros elementos como carbono, silício, manganês, entre outros, dependendo do tipo de aço utilizado no processo de usinagem. Por serem um material metálico, os cavacos de aço possuem boas propriedades mecânicas, como alta resistência e rigidez (CARVALHO, E. J. S. et al., 2019).

Uma das vantagens da utilização de cavacos de aço como matéria-prima é a economia de recursos naturais. Ao utilizar esse resíduo na produção de novos produtos, a demanda por minério de ferro e outros materiais é reduzida, diminuindo assim a exploração de recursos naturais e o impacto ambiental associado (RUIZ, A. C. et al., 2019).

Além disso, a reciclagem de cavacos de aço é uma prática economicamente viável, já que o custo da sua aquisição é menor do que o da matéria-prima virgem. Isso torna a reciclagem uma opção mais sustentável do ponto de vista financeiro para as empresas. No entanto, a gestão inadequada dos resíduos de cavacos de aço pode trazer impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e da água (RUIZ, A. C. et al., 2019).

### **3.2.2 Reuso dos cavacos de aço**

Devido às suas características físicas e químicas, os cavacos de aço podem ser utilizados em diversas aplicações. Eles podem ser fundidos para produzir novas peças de aço, utilizados como matéria-prima na produção de compósitos poliméricos reforçados, ou ainda como combustível em fornos de siderurgia. Além disso, os cavacos de aço também apresentam potencial para serem utilizados na recuperação de solos contaminados com metais pesados e no aperfeiçoamento das propriedades do concreto (SILVA, W. A. et al., 2018).

De acordo com os estudos de Dias et al. (2021), o cavaco de aço ao ser incorporado ao concreto contribui tanto na melhoria de sua resistência à tração quanto na economia devido a reutilização do material retirado do tarugo na usinagem, possibilitando seu uso para construção de pontes e túneis com intuito de reforçar a resistência estrutural.

Segundo Carli (2020), o uso do cavaco metálico no concreto é viável tecnicamente, com características semelhantes ao concreto com adição de fibras de aço comerciais, o que possibilita sua reutilização direta e, dessa forma, a redução de descartes no meio ambiente e nas taxas de poluição. Na metalurgia, os cavacos são um dos principais resíduos que podem ter efeitos adversos no meio ambiente.

Em seu trabalho, Zenere e Cassol (2017) demonstraram a possibilidade de substituir 15% do agregado miúdo por cavacos de aço, mantendo a resistência à compressão e minimizando o uso de recursos naturais, além de ser uma alternativa simples e menor custo, uma vez que tem a possibilidade de reaproveitar os resíduos industriais.

Nesse sentido, a incorporação de cavacos de aço no concreto apresenta potencial para melhorar suas propriedades mecânicas e contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção civil. Essa prática pode resultar em concretos mais resistentes, duráveis e sustentáveis, capaz de suportar cargas elevadas e variações térmicas (CASTRO, P. F. et al, 2020).

### **3.3 Aplicações de materiais alternativos no concreto**

Devido à grande quantidade de resíduo gerado com potencial de reaproveitamento, começou-se a utilizar vários materiais alternativos em concretos para avaliar seus efeitos nas propriedades mecânicas do material.

Rashid et al. (2020) usou resíduos de cerâmica vermelha com esmalte de louças sanitárias em substituição ao agregado graúdo convencional em relações de peso de 10%, 20% e 30% para avaliar as propriedades do concreto fresco e endurecido. Os autores concluíram que o concreto com 30% de substituição seria a melhor escolha, uma vez que implicava uma maior resistência à compressão e menores impactos ambientais.

Lucena (2017), estudou o comportamento das propriedades mecânicas do concreto adicionando teores de 0, 1 e 2% de fibras de polipropileno em relação ao volume de concreto com o objetivo de verificar como se comportariam os painéis alveolares de paredes finas. Concluiu-se que não houve grandes alterações em

relação a resistência à compressão e módulo de elasticidade com 1 e 2% de adição, porém para a resistência a tração o teor de 2% apresentou resultados expressivos de melhoria.

Alwaeli (2016) investigou o efeito da substituição de cavacos de aço e resíduos de calcário na resistência à compressão de concretos utilizados contra radiações de raio-X. Os resíduos variaram de 25% a 100% em relação ao peso da areia e os resultados mostraram um aumento da resistência à compressão em relação ao concreto convencional.

Emon, Manzur e Yazdani (2016) utilizaram incorporação de fibras de aço e outros agregados graúdos, no concreto e consideraram essa adição como um meio de baixo custo para utilização da fibra de aço, e uma alternativa a ser utilizada em nível local. No teste, o teor de fibra era limitado à fração de baixo volume, considerando tanto o custo quanto a facilidade de mistura dos materiais. Embora tenha havido um aumento na resistência à compressão e tração em todas as amostras, alcançando uma otimização de até 33% e 53%, respectivamente, não pôde ser estatisticamente estabelecida uma relação direta com a adição das fibras com o primeiro caso (EMON; MANZUR; YAZDANI, 2016).

Já Sengul (2016) buscou investigar, experimentalmente, os efeitos das fibras de aço recuperadas de pneus inservíveis, através da incorporação de resíduos com diferentes propriedades geométricas ao concreto. Em seus resultados, foram apontados efeitos residuais no abatimento da amostra, que já eram esperados, indicando interferência em sua trabalhabilidade.

A inclusão das fibras forma uma estrutura de rede que restringe o abatimento do concreto, mas sugere-se o teste de aumento da quantidade de aditivos superplastificantes para manutenção da trabalhabilidade semelhante aos concretos convencionais (SENGUL, 2016).

Alwaeli e Nadziakiewicz (2012) objetivaram averiguar o impacto de resíduos de incrustações e cavacos de aço da indústria siderúrgica na potencialização da resistência à compressão em concreto para absorver raios gama. De acordo com os testes, a adição de até 25% dos resíduos, como substituição à areia, resulta no aumento da resistência à compressão, no entanto, quantidades maiores provocaram

o efeito oposto, devido ao fato de que as forças de adesão entre o cimento e os resíduos serem menores do que entre a areia, provavelmente em razão da graxa preexistente. Já nos ensaios com cavacos, a resistência à compressão aumentou nas proporções para 25%, 50%, 75% e 100% de substituição em 24,34%, 29,63%, 42,86% e 50,79%, respectivamente (ALWAEELI; NADZIAKIEWICZ, 2012).

No estudo de Keshavarz e Mostofinejad (2019), foram comparados corpos de prova contendo cavacos e a mescla entre cavacos de aço e resíduos de cerâmica de nova geração, em busca da determinação das porcentagens ideais de ambos os materiais residuais como substitutos para fibras e agregados graúdos no concreto. Foi assimilado que o aumento da resistência à tração se deveu, neste caso, apenas à integração de teores de cavacos de aço ao concreto. Já no tocante à resistência à compressão, mostrou-se que a combinação de materiais descrita pôde melhorá-la em até 41 % (KESHAVARZ; MOSTOFINEJAD, 2019).

### **3.4 Planejamento Fatorial**

Planejar experimentos é definir uma sequência de coletas de dados experimentais para atingir certos objetivos. Dentre os métodos de planejamento experimental disponíveis na literatura, o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. A lista dessas combinações se chama matriz de planejamento (RIBEIRO, Flávia et al. 2021).

O principal objetivo da técnica é obter através de princípios estatísticos, extrair do sistema em estudo, o máximo de informações úteis realizando o mínimo de experimentos possíveis e assim determinar a interação entre variáveis de forma racional e econômica (SILVA et al., 2021, p.863).

Para a execução dessa técnica, é necessário que sejam especificados os níveis do objeto que será estudado, ou seja, indicando os valores dos fatores empregados nos experimentos. Assim, para visualizar o comportamento do efeito do fator, deve-se variá-lo e, dessa forma, observar o que pode ser obtido dessa variação (MARINHO, CASTRO; 2005).

De acordo com Neves et al. (2002), este tipo de planejamento normalmente é

representado por  $b^k$ , sendo que  $k$  representa o número de fatores e “ $b$ ” o número de níveis escolhidos. Ainda segundo estes autores, o caso mais básico de planejamento fatorial é aquele em que cada fator  $k$  está presente em apenas dois níveis (experimento fatorial  $2^k$ ), ou seja, em um experimento com  $k$  fatores (ou variáveis) e dois níveis, são realizadas  $2 \times 2 \times \dots \times 2$  ( $k$  vezes) =  $2^k$  observações da variável resposta. Esta representação mostra que, se em um planejamento forem escolhidos 2 diferentes níveis para 3 fatores ( $2^3$ ), o número de experimentos diferentes a serem realizados será 8.

O emprego dos planejamentos experimentais e, em particular, o fatorial, além de definir as múltiplas interações entre diferentes fatores, permite também determinar a existência ou não de linearidade da resposta. A linearidade significa que a variação da resposta do sistema ao mudar um fator de um nível até outro é diretamente proporcional. Se não houver linearidade, o que acontece é que a mudança da resposta do sistema não vai ser diretamente proporcional à mudança no nível do fator. (RIBEIRO, Flávia et al. 2021)

Nesses casos, o que pode acontecer é que a resposta aumente até um máximo e depois se mantenha nesse máximo ou decline, ou que a resposta diminua até um mínimo e depois se mantenha nesse mínimo ou aumente, quando o fator muda de um nível para outro. Para poder determinar esse comportamento linear ou não da resposta, além dos experimentos nos níveis inferior e superior, deve ser feito um experimento a mais nos níveis médios de todas as variáveis (ponto central) (BHARATHI; SREEKUMARAN, 2021).

Segundo ROCHA, B. R. et al. (2020), o uso de planejamentos fatoriais é benéfico não apenas para identificar as interações entre diferentes fatores, mas também para avaliar a linearidade da resposta. A linearidade implica que a variação da resposta do sistema é diretamente proporcional à mudança nos níveis dos fatores. No entanto, se a resposta não seguir um comportamento linear, a mudança na resposta não será proporcional à variação dos níveis dos fatores.

Para determinar se a resposta é linear ou não, é necessário realizar experimentos nos níveis médios de todas as variáveis, além dos experimentos nos níveis inferior e superior. Essa condição é conhecida como ponto central. É recomendável executar um mínimo de três réplicas nesse ponto central, o que permite

estimar o erro experimental global, considerando que esse erro é uniforme em todo o plano experimental. Esse tipo de planejamento, que inclui os pontos centrais, é chamado de delineamento composto central (DCC) (MONTGOMERY, 2009; RODRIGUES et al., 2009).

De acordo com Bharathi e Sreekumaran (2021), o planejamento fatorial é uma ferramenta poderosa para auxiliar na coleta de dados e suas análises estatísticas, permitindo a manipulação simultânea de múltiplas entradas. A vantagem dessa análise está na possibilidade de reconhecimento de interações significativas que podem ser evitadas durante a experimentação.

É possível analisar todas as combinações possíveis, conhecido como planejamento fatorial completo, ou apenas em um conjunto de combinações selecionadas, conhecido como planejamento fatorial fracionário. Esta é uma das formas mais simples de otimizar as propriedades frescas e endurecidas do concreto, ajudando na aproximação das proporções da mistura de maneira fácil, sem o comprometimento das características desejáveis (BHARATHI; SREEKUMARAN, 2021).

Este método também é aplicável devido a outros benefícios, tais como redução do número de experimentos economia de tempo e maior eficácia na redução do custo da pesquisa geral sobretudo, essa técnica se destaca na distinção de fatores com efeitos significativos em uma resposta, bem como os efeitos de um fator diferem com base no nível de outros (AFZALI-NANIZ; MAZLOOM, 2018). Já é provada a utilidade do planejamento fatorial do experimento como uma alternativa, dada a necessidade de avaliação simultânea do efeito de um grande número de variáveis e a interação entre elas a partir de um pequeno número de ensaios. Ele se torna importante no instante em que se torna parte integrante de um processo de melhoria na identificação de áreas de estresse que possam ser alocados de forma eficaz (OLIVEIRA et al., 2018).

De acordo com Soutana e Galetakis (2020), o planejamento fatorial de experimentos é amplamente difundido para a otimização de produtos em diversos processos de fabricação, onde os experimentos mais comuns são: (i) o planejamento fatorial completo de três níveis, (ii) os experimentos compostos centrais e os (iii) experimentos Box-Behnken. Oliveira et al. (2018) também citam ANOVA, DOE,

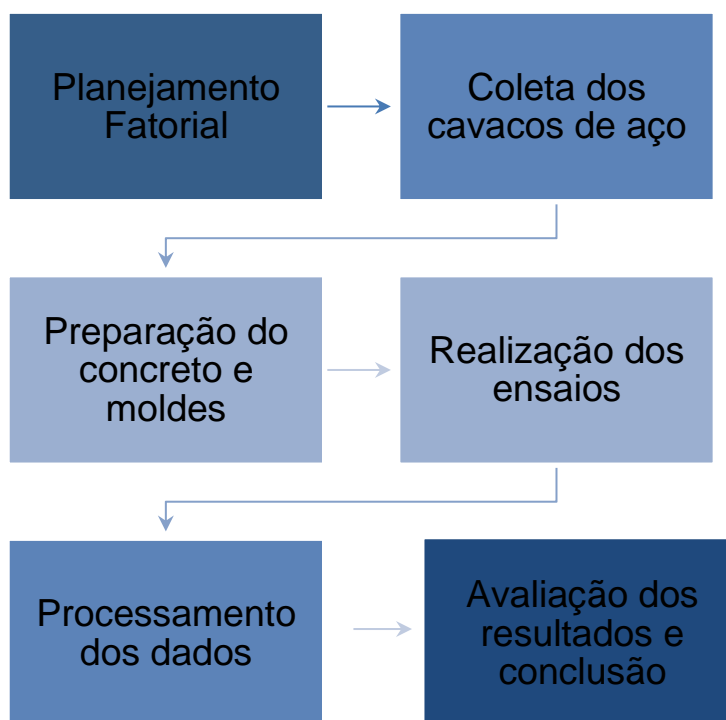
desenho fatorial 2k, 3k ou Revisão Periódica produto (RPP), entre outros fatores experimentais que podem avaliar situações indesejadas nas quais o experimento é passível.



## 4 METODOLOGIA

As etapas metodológicas (Figura 7) da pesquisa envolvem: i) Planejamento fatorial ii) Coleta dos resíduos de aço nas metalúrgicas; iii) Preparação do concreto e moldes; iv) Realização dos ensaios; v) Processamento dos dados e vi) Avaliação dos resultados obtidos e conclusão.

Figura 7 – Metodologia aplicada

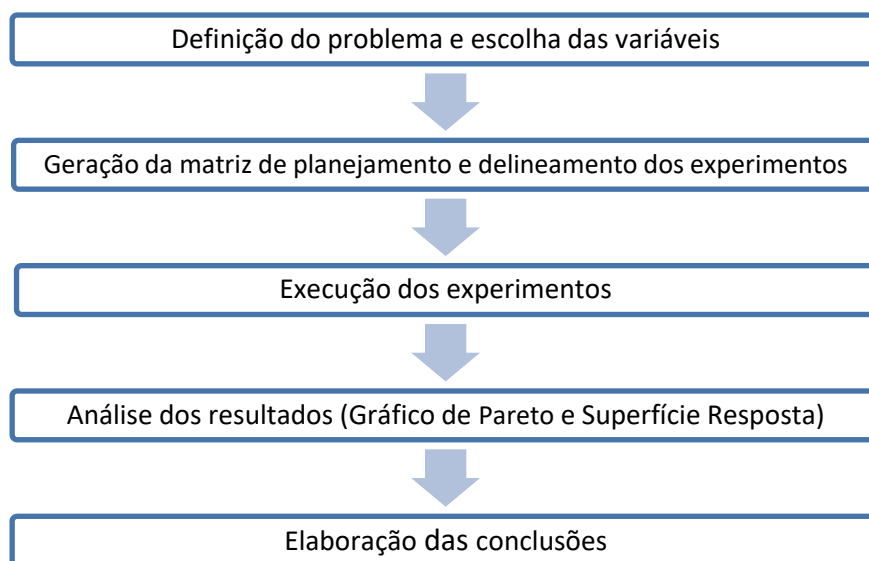


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021

### 4.1 Planejamento Fatorial

Foi realizado um planejamento fatorial com duas variáveis (quantidade de cavacos e fator A/C) para determinar os diferentes tipos de dosagem e adições de cavacos de aço utilizados na fabricação do concreto, permitindo uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis. As etapas do planejamento experimental estão descritas na Figura 8.

Figura 8 – Sequência de operação do planejamento fatorial



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

As variáveis denominadas independentes escolhidas foram o fator Água/Cimento e a quantidade de cavaco de aço adicionada que tiveram seus níveis fixados conforme o interesse do pesquisador. As variáveis respostas escolhidas foram: os resultados das resistências a compressão, resistência a tração e o abatimento do concreto.

Em seguida, foi realizado um delineamento dos experimentos a partir de uma matriz de planejamento, obtendo resultados para cada combinação. A análise dos resultados foi realizada com auxílio do *Software Statistica 12.0*.

Dessa forma, foi realizado um delineamento composto com ponto central (DCC) que é definido pela equação 1.

$$n^1 = 2k + Pc \quad (1)$$

Onde:  $n^1$  = número de ensaios para o DCC;

$k$  = número de fatores;

$Pc$  = número de pontos centrais.

O DCC apresenta dois níveis e dois fatores ( $2^2$ ) com 3 pontos centrais, obtendo 7 respostas de resistências a compressão, tração e abatimento. (Tabela 1).

Tabela 1 – DCC para obtenção dos resultados de resistência e abatimento

<b>Experimentos</b>	<b>Fator Água/Cimento</b>	<b>Cavacos de Aço (%)</b>	<b>Resistencia a compressão</b>	<b>Resistência a tração</b>	<b>Abatimento</b>
<b>1</b>	-1	-1	RC1	RT1	AB1
<b>2</b>	-1	+1	RC2	RT2	AB2
<b>3</b>	+1	-1	RC3	RT3	AB3
<b>4</b>	+1	+1	RC4	RT4	AB4
<b>5 (C)</b>	0	0	RC5	RT5	AB5
<b>6 (C)</b>	0	0	RC6	RT6	AB6
<b>7 (C)</b>	0	0	RC7	RT7	AB7

(C) = Pontos centrais

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

A partir da definição das variáveis para o DCC foi possível estabelecer os fatores e níveis propostos, constantes na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de planejamento com fatores e níveis propostos para o DCC

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
<b>Fator Água/Cimento</b>	0,40	0,55	0,70
<b>Adição de Cavacos de aço (%)</b>	2	6	10

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

Os pontos -1 (limite inferior) e +1 (limite superior) definem as faixas experimentais com valores mínimos e máximos, respectivamente. O ponto 0 (central) representa a faixa de valores intermediários entre os limites -1 e +1.

Tendo em vista as pesquisas já realizadas e buscando novas alternativas e melhores resultados, decidiu-se trabalhar com três porcentagens diferentes de adição de cavaco, sendo elas: 2%, 6% e 10% em relação a massa de cimento e variando entre três fatores água/cimento, sendo eles: 0,40, 0,55 e 0,70.

#### 4.2 Coleta dos cavacos de aço nas metalúrgicas

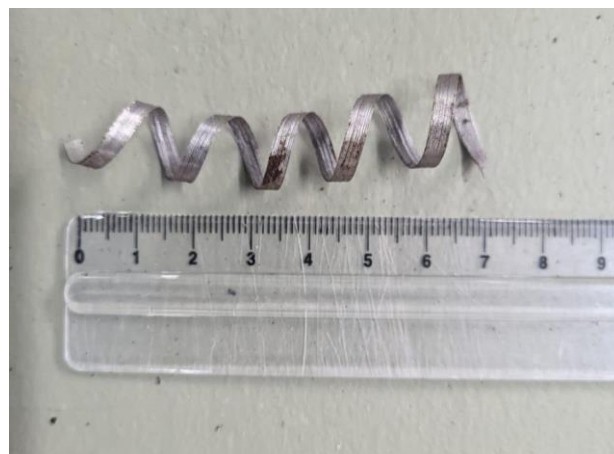
A coleta dos cavacos de aço foi realizada em metalúrgicas da cidade de Campina Grande/PB. Os cavacos coletados para esta pesquisa eram todos de formato tubular. A partir disso, realizou-se um processo manual de corte com tesoura para chapa para que fosse uniformizado os comprimentos desses resíduos que foram incorporados no concreto, variando entre 20 e 70 milímetros (Figura 9), pois é o tamanho padrão de fibras industrializadas encontradas no mercado.

Figura 9 – Cavacos coletados (a), cortados (b) e separados (c)

a)



b)



b)



c)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

#### 4.3 Preparação do concreto, moldagem e cura dos corpos de prova

O concreto foi produzido em uma betoneira com capacidade para 120 litros sendo realizadas um total de quatro betonadas e 20 corpos de prova. Os componentes utilizados para a fabricação do concreto foram o cimento Portland CP II F 32, Areia média, brita 02 e água potável, além dos cavacos que eram adicionados durante a

mistura. O traço escolhido foi de 1:2:3 em volume, por ser um traço comumente utilizado em obras estruturais para concretos de 25Mpa de resistência à compressão. A quantidade de cada material está exposta no Quadro 1.

Quadro 1 – Quantidade de cada material utilizado no concreto

<b>Quadro 1 – Quantidade de cada material utilizado no concretoAMOSTRA</b>	<b>CIMENTO (kg)</b>	<b>AREIA (kg)</b>	<b>BRITA (kg)</b>	<b>CAVACOS DE AÇO (kg)</b>
CONCRETO DE REFERÊNCIA	8,45	23,93	29,57	0
ADIÇÃO DE 2%	8,45	23,93	29,57	0,169
ADIÇÃO DE 6%	8,45	23,93	29,57	0,507
ADIÇÃO DE 10%	8,45	23,93	29,57	0,845

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

Os corpos de prova utilizados, seguindo a NBR 5738:2015, foram moldes cilíndricos com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura (Figura 10a). Preparou-se o concreto seguindo o traço 1:2:3 e variando a adição de cavacos e de água conforme o planejamento fatorial realizado anteriormente. Após a devida preparação do concreto em betoneira, os corpos de prova foram moldados (Figura 10b) e após 24 horas do preenchimento, foram desmoldados e submetidos a cura úmida de 28 dias em tanque com água (Figura 10c).

Figura 10 – Corpos de prova utilizados (a), moldados (b), cura úmida (c) e após 28 dias (d)

a)



b)



c)



d)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022.

## 4.4 Realização Dos Ensaios

### 4.4.1 Ensaio de Resistência a Compressão Axial

Todos os ensaios realizados nesta pesquisa seguiram as normas da ABNT descritas no Quadro 2. O ensaio de resistência a compressão axial do concreto consiste em aplicar uma carga compressiva gradualmente crescente em um corpo de prova cilíndrico ou cúbico, até que ocorra a sua ruptura. Para realizar o ensaio, foi necessário seguir algumas etapas.

Quadro 2 – Normas para a realização dos ensaios

<b>Código da norma</b>	<b>Título da norma</b>
<b>ABNT NBR 5739:2018</b>	Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos
<b>ABNT NBR 5738:2015</b>	Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova
<b>ABNT NBR 12655:2015</b>	Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento
<b>ABNT NBR 7222:2011</b>	Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos
<b>ABNT NBR 16889:2020</b>	Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

Inicialmente, os corpos de prova foram moldados com as dimensões especificadas pelas normas técnicas descritas no Quadro 1. Para este ensaio utilizou-se 7 pares de corpos de provas cilíndricos de 100mm de altura e 200mm de diâmetro conforme planejamento fatorial e mais 3 para o concreto de referência. Em seguida, eles foram ser curados em uma câmara úmida por um período de 28 dias, para que adquirissem a resistência adequada.

Após o período de cura, realizou-se o capeamento dos corpos de prova (Figura 11-a) e posteriormente foram colocados em uma prensa hidráulica. Neste ensaio foi utilizado a prensa hidráulica da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (Figura 11-b). Em seguida, uma carga compressiva foi aplicada ao corpo de prova de forma gradual, até que ocorresse a sua ruptura. Os valores de resistência obtidos no ensaio foram registrados e utilizados para posterior análise.



Figura 11 – Capeamento do corpo de prova (a) e Prensa hidráulica da UFCG (b)

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

#### 4.4.2 Ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado após 28 dias de cura em 7 pares de corpos de prova cilíndricos de concreto, com altura de 100mm e 200mm de diâmetro ensaiados conforme planejamento fatorial e mais 3 para o concreto de referência seguindo as instruções conforme a ABNT NBR 7222:2011.

O ensaio consistiu em aplicar uma carga de compressão axial nos extremos do corpo de prova, de modo que a força fosse aplicada em direções opostas e perpendiculares ao eixo longitudinal do cilindro. Para este ensaio foi utilizada uma prensa hidráulica (Figura 12a) do laboratório de materiais de construção da Uninassau em Campina Grande-PB.

No ensaio, o corpo de prova foi posicionado entre duas placas de carga planas e paralelas (Figura 12b), e uma carga foi aplicada por meio da prensa hidráulica até que ocorresse a ruptura do material. A carga máxima aplicada foi registrada e a resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação (2):

$$\sigma = \frac{2P}{\pi Dd} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma$  = resistência à tração por compressão diametral

P = carga máxima aplicada

D = diâmetro médio do corpo de prova

d = diâmetro do furo central do corpo de prova

Figura 12 – Prensa hidráulica Uninassau (a) e Corpo de prova posicionado para ensaio de tração (b)

a)



b)



#### 4.4.2 Ensaio de Consistência pelo abatimento de tronco de cone (Slump Test)

O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado retirando-se uma amostra de concreto para cada combinação conforme planejamento fatorial. Foram utilizados os seguintes materiais: Molde metálico cônico, Funil metálico, haste de adensamento, placa de base e régua ou trena conforme Figura 13.

No ensaio, foi necessário encher o molde em forma de tronco de cone vazio com o concreto, dividindo-o em três camadas iguais em altura. Cada camada foi compactada com 25 golpes uniformemente distribuídos em toda a área com uma haste de abatimento. Logo após, o molde foi erguido de forma vertical e posicionado ao lado da amostra de concreto para a verificação do abatimento.

Figura 13 – Materiais utilizados para abatimento de tronco de cone



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

#### 4.5 Avaliação dos resultados e conclusão

Após a realização de todos os ensaios, houve uma análise com base nos resultados obtidos para que se pudesse avaliar se a adição de cavacos ao concreto trouxe benefícios e melhorias nas propriedades do material. Os resultados foram avaliados segundo o planejamento fatorial com o auxílio do *Software Estatística 10.0* e em comparação ao concreto de referência sem a adição de cavacos de aço.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise descritiva dos dados

O Quadro 3 mostra os resultados da média das resistências a compressão axial, a resistência à tração e abatimento obtidos nos ensaios realizados e as métricas de medidas de tendência central e dispersão.

Quadro 3 – Descrição da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos ensaios

PERCENTUAL DE ADIÇÃO	RES. COMPRESSÃO MÉDIA (MPa)	DESvio PADRÃO RES. COMPRESSÃO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO RES. COMP. (%)	RES. TRAÇÃO MÉDIA (MPa)	DESvio PADRÃO RES. TRAÇÃO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%) RES. TRAÇÃO	ABATIMENTO MÉDIA (MM)	DESvio PADRÃO ABATIMENTO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%) ABATIMENTO
0%	25,91	0,1755	0,6773	3,16	0,1374	4,35	85,33	8,31	9,74
2%	24,67	1,42	5,76	4,08	0,059	1,44	80	3,43	13,75
6%	25,01	0,92	3,68	4,34	0,084	1,94	82,33	2,92	17,55
10%	21,75	0,95	4,37	3,71	0,242	6,53	33,5	4,5	15,43

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Com base nos dados do Quadro 3, é possível observar que em geral o coeficiente de variação, que expressa a variabilidade relativa dos dados, ficou abaixo dos 15% o que representa uma consistência nos resultados de resistência a compressão e tração, no entanto, o abatimento obteve uma maior variação, com 6% e 10% de adição de cavacos, que pode ser explicada pela aderência e homogeneização dos resíduos com a massa de cimento.

Com relação às médias notou-se que à medida que o percentual de adição aumenta, houve uma pequena redução gradual na resistência média de compressão. Porém, em relação a resistência à tração houve um aumento gradual conforme se aumentou o percentual de adição de resíduo.

## 5.2 Resistência a Compressão Axial

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão axial realizados conforme matriz de planejamento. O DCC forneceu 7 resultados e pode ser visualizado entre os experimentos de 1 a 7. Com este procedimento foi possível otimizar a realização dos experimentos, com alto grau de confiabilidade e redução no número de ensaios.

Tabela 3 – Resultados de Resistência a compressão axial para o delineamento proposto

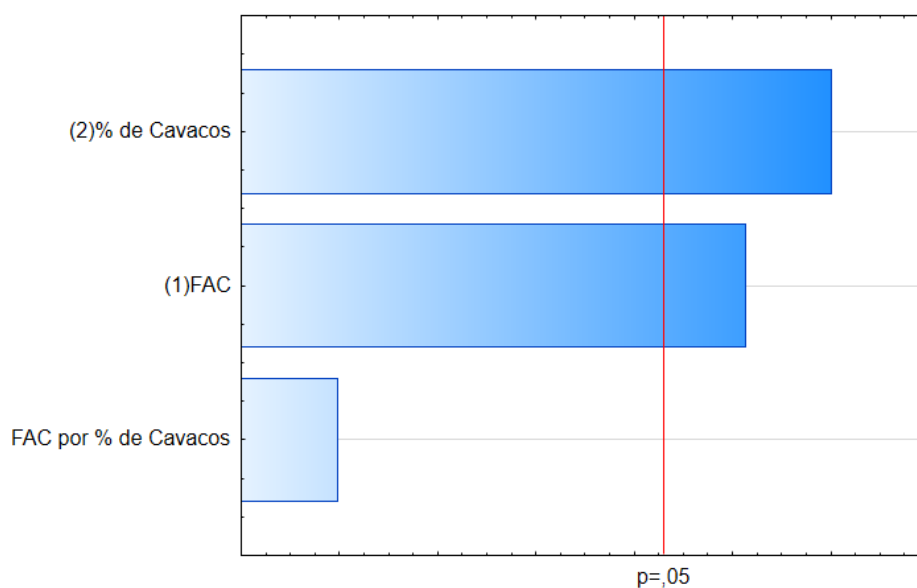
Experimentos	Fator Água/Cimento	Cavacos de Aço (%)	Resistencia a compressão (MPa)
1	0,40	2	25,90
2	0,40	10	22,70
3	0,70	2	23,10
4	0,70	10	20,80
5 (C)	0,55	6	25,20
6 (C)	0,55	6	25,80
7 (C)	0,55	6	23,90

(C) = Pontos centrais

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

O Gráfico de Pareto (Figura 14) mostra a influência de cada fator na resistência a compressão do concreto para o DCC. É possível notar que a quantidade de cavacos adicionados e o fator A/C têm influência no processo, no entanto, a interação entre eles não possui efeito expressivo ao nível de 5%. Dessa forma, é possível constatar que o fator mais expressivo na resistência a compressão axial foi o percentual de cavaco de aço adicionado no concreto.

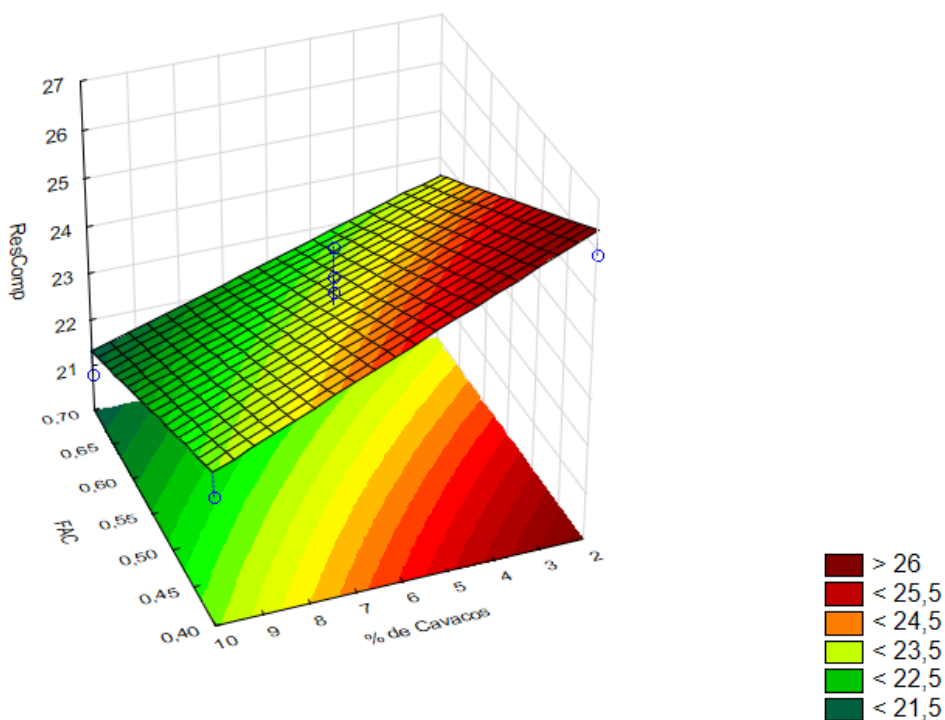
Figura 14 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC (Resistência a compressão)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

A Figura 15 mostra a superfície resposta obtida para o modelo DCC envolvendo as variáveis de percentual de cavacos de aço adicionados e o fator água/cimento. É possível verificar que, para o DCC, com o aumento do fator A/C a resistência a compressão do concreto caiu gradativamente. Bentz e Weiss (2018) destacam que o aumento do fator A/C geralmente resulta em uma menor compactação dos materiais constituintes do concreto, o que contribui para uma redução na resistência. Além disso, uma maior relação água/cimento pode promover uma pior distribuição do cimento na matriz do concreto, aumentando a formação de pasta de cimento e piorando as propriedades mecânicas.

Figura 15 – Superfície resposta do DCC para fator A/C x % de Cavacos de aço



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

Da mesma forma, através da Figura 15 é possível constatar que, para o DCC, o aumento da quantidade de cavacos de aço interfere significativamente na resistência a compressão axial do concreto. A presença de cavacos de aço no concreto pode criar descontinuidades e vazios entre os cavacos e a matriz de concreto. Esses vazios podem gerar pontos de concentração de tensões e reduzir a coesão entre os materiais. Isso pode resultar em uma diminuição da resistência à compressão do concreto. (IBRAHIM, M., et al., 2020)

A melhor interação em relação a resistência a compressão axial no concreto com adição de cavacos de aço se deu com um fator água/cimento de 0,55 e um percentual de 6% de cavacos. A diferença de resistência entre a melhor interação e o concreto de referência foi de apenas 4% já que a resistência média obtida na interação 0,55 por 6% foi de 25,01MPa e para o concreto de referência a resistência média foi de 25,91MPa.

Estudos sugerem que o tamanho e a forma dos cavacos de aço podem afetar a distribuição do material no concreto, e conseqüentemente, afetar as propriedades do concreto. Segundo HUANG, Y. et al. (2020) o uso de cavacos de aço em forma de palito pode melhorar a resistência à compressão do concreto em comparação com o uso de cavacos de aço em forma de lasca ou fragmentos irregulares. Isso ocorre porque os cavacos de aço em forma de palito podem ser melhor distribuídos no concreto, aumentando a aderência entre os cavacos de aço e a pasta de cimento e proporcionando um maior efeito de reforço.

O tamanho dos cavacos de aço, no entanto, pode ser um fator mais importante do que a forma na influência da resistência à compressão do concreto. A utilização de cavacos de aço menores, em geral, apresenta um melhor desempenho em termos de resistência à compressão. Em todo caso, é importante ressaltar que a influência do tamanho e forma dos cavacos de aço na resistência à compressão do concreto pode variar dependendo das características específicas do material e das condições de aplicação (KHAN, R. et al., 2018).

Essa mesma redução da resistência a compressão do concreto após adição de cavacos de aço foi notada por LI, M. et al. (2020) que utilizou três diferentes proporções de cavacos de aço em pó (2%, 3% e 4%) e por HAKIM, B. et al. (2023) que avaliou o efeito térmico e mecânico da adição de cavacos de aço no concreto, em diferentes proporções (até 10% em massa). Os resultados indicaram que a adição de cavacos de aço reduziu a resistência à compressão do concreto em todas as proporções testadas, em comparação com o concreto sem adição de cavacos de aço.

### **5.2.2 Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)**

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone - *Slump Test*, conforme matriz de planejamento, estão apresentados na Tabela 4. O DCC foi utilizado para obter os resultados, totalizando 7 experimentos numerados de 1 a 7.



Tabela 4 – Resultados de Resistência a compressão axial para o delineamento proposto

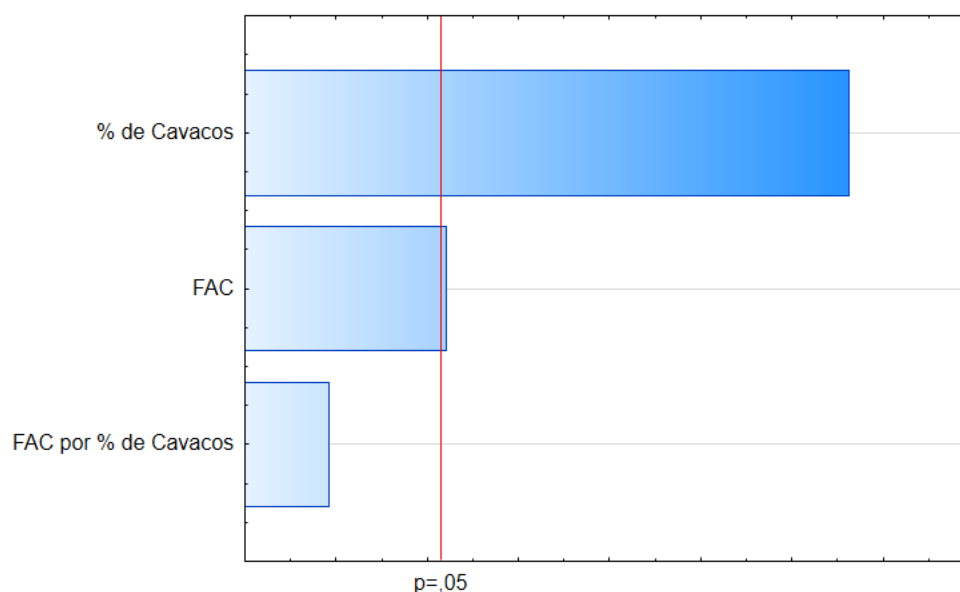
<b>Experimentos</b>	<b>Fator Água/Cimento</b>	<b>Cavacos de Aço (%)</b>	<b>Slump Test (cm)</b>
<b>1</b>	0,40	2	6,90
<b>2</b>	0,40	10	2,90
<b>3</b>	0,70	2	9,10
<b>4</b>	0,70	10	3,80
<b>5 (C)</b>	0,55	6	8,20
<b>6 (C)</b>	0,55	6	7,90
<b>7 (C)</b>	0,55	6	8,60

(C) = Pontos centrais

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

A influência de cada variável no ensaio de slump do concreto para o DCC está ilustrada no Gráfico de Pareto da Figura 16. É observável que a adição de cavacos e o fator A/C têm impacto no processo, sendo que o percentual de cavacos tem uma significância maior. Por outro lado, a interação entre esses fatores não apresenta um efeito significativo.

Figura 16 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC no Slump Test

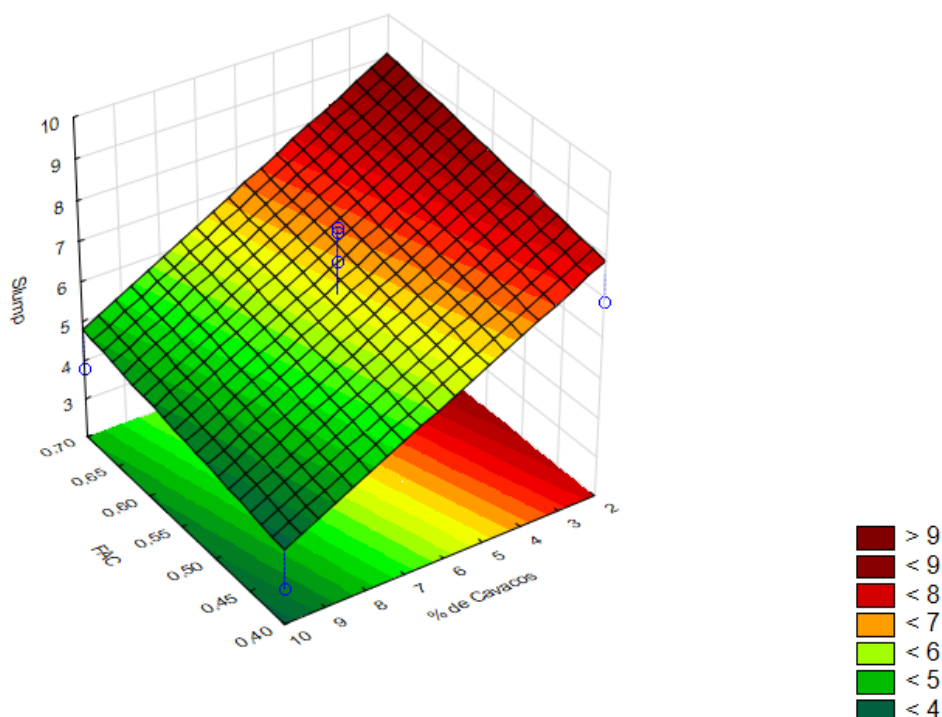


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

A Figura 17 mostra a superfície resposta obtida para o DCC envolvendo as variáveis de percentual de cavacos de aço adicionados e o fator A/C. É possível verificar que, para o DCC, com o aumento do percentual de cavacos de aço o *Slump Test* reduziu consideravelmente, em até 32%, reduzindo a trabalhabilidade do concreto. Esse efeito pode ser explicado pois os cavacos de aço atuam como obstáculos no sistema de agregados, interferindo na lubrificação entre as partículas do concreto e diminuindo a capacidade de deslizamento, resultando em uma menor fluidez.

TUNA, M.; KARADEMIR, D. (2020) relatam que a presença dos cavacos de aço pode causar uma maior demanda de água para manter a trabalhabilidade do concreto sem a adição desses materiais. Isso ocorre devido à absorção de água pelos cavacos e à necessidade de preencher os espaços vazios entre as partículas.

Figura 17 – Superfície resposta do DCC para fator A/C x % de Cavacos de aço x Slump

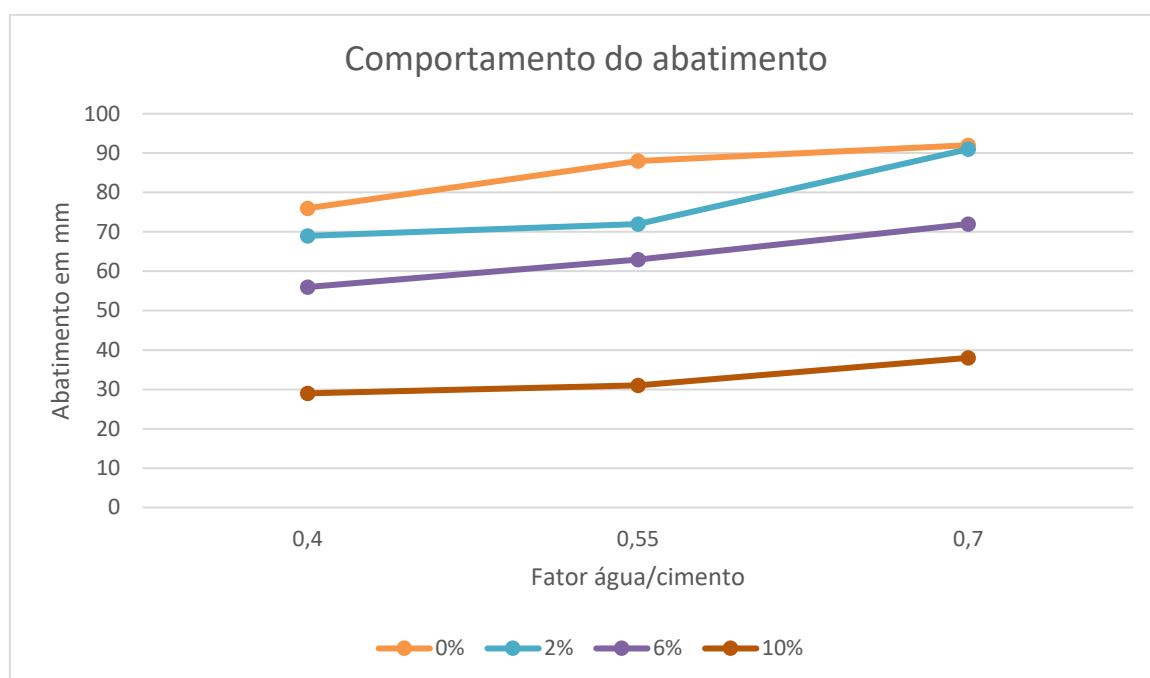


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

A variação na consistência do concreto já era esperada pois as fibras tendem a restringir a mobilidade principalmente dos agregados graúdos, dificultando a fluidez da mistura e diminuindo a trabalhabilidade. Além disso, quanto menor a quantidade de água na mistura, menor a trabalhabilidade do concreto. A Figura 17 mostra o comportamento do abatimento conforme a adição de cavacos e a variação do fator água/cimento em comparação com o concreto de referência.

Não existe um valor ideal de abatimento para concreto devido as diferentes formas de aplicação e as especificações do projeto. Em geral, para concretos convencionais, o valor ideal de abatimento fica entre 70 e 200 mm. No entanto, é importante ressaltar que valores muito elevados podem indicar uma maior quantidade de água no concreto, o que pode comprometer sua resistência e durabilidade. Por outro lado, valores muito baixos podem dificultar a sua aplicação e reduzir a sua trabalhabilidade.

Figura 18 – Comportamento do abatimento



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

A alteração no abatimento e a conseqüente redução da trabalhabilidade do concreto após adição de cavacos de aço também foi observado por ABEDINI, M. et al. (2023) que investigou o efeito da adição de diferentes quantidades de cavacos de aço em concreto de alta resistência e avaliou suas propriedades mecânicas e reológicas, incluindo o abatimento. Os resultados mostraram que o abatimento do concreto diminuiu com o aumento da quantidade de cavacos de aço.

Já SALEH, M. F. et al (2023), investigou a possibilidade de usar cavacos de aço reciclados como agregado grosso em concreto de alta resistência e avaliou sua influência no abatimento do concreto. Os resultados mostraram que a adição de até 10% em massa de cavacos de aço reciclados reduziu o abatimento do concreto.

### 5.3 Resistência a tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 5. O DCC foi utilizado para obter os resultados, totalizando 7 experimentos numerados de 1 a 7.

Tabela 5 – Resultados de Resistência à Tração para o delineamento proposto

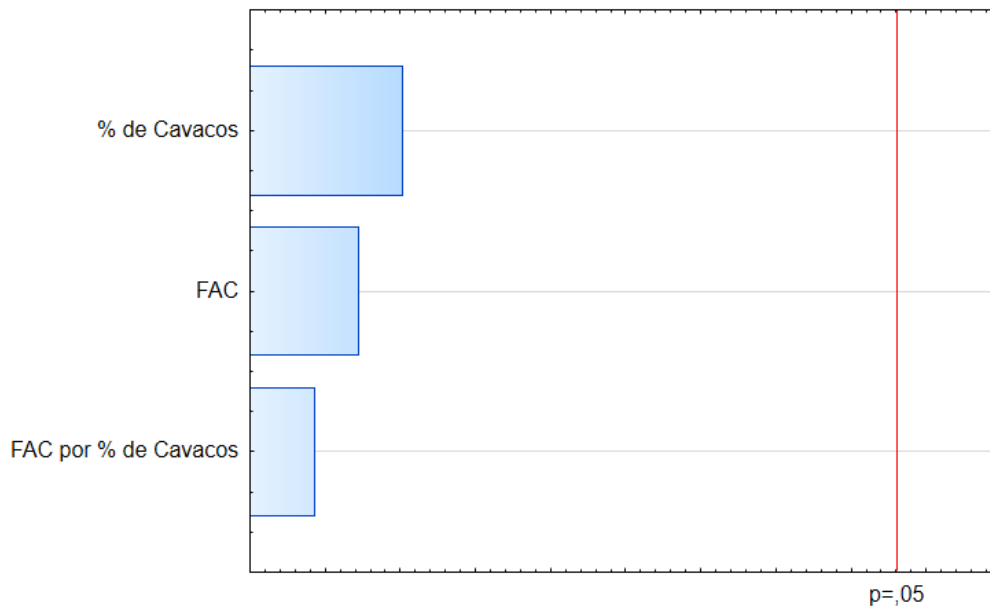
<b>Experimentos</b>	<b>Fator Água/Cimento</b>	<b>Cavacos de Aço (%)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>
<b>1</b>	0,40	2	4,13
<b>2</b>	0,40	10	4,01
<b>3</b>	0,70	2	3,89
<b>4</b>	0,70	10	3,41
<b>5 (C)</b>	0,55	6	4,36
<b>6 (C)</b>	0,55	6	4,92
<b>7 (C)</b>	0,55	6	4,11

(C) = Pontos centrais

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

A significância de cada variável no teste de resistência à tração para o DCC está ilustrada no Gráfico de Pareto da Figura 19 é possível notar que não houve um impacto significativo, ao nível de 5%, da adição de cavacos e da relação água/cimento no processo.

Figura 19 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC na Resistência à Tração



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

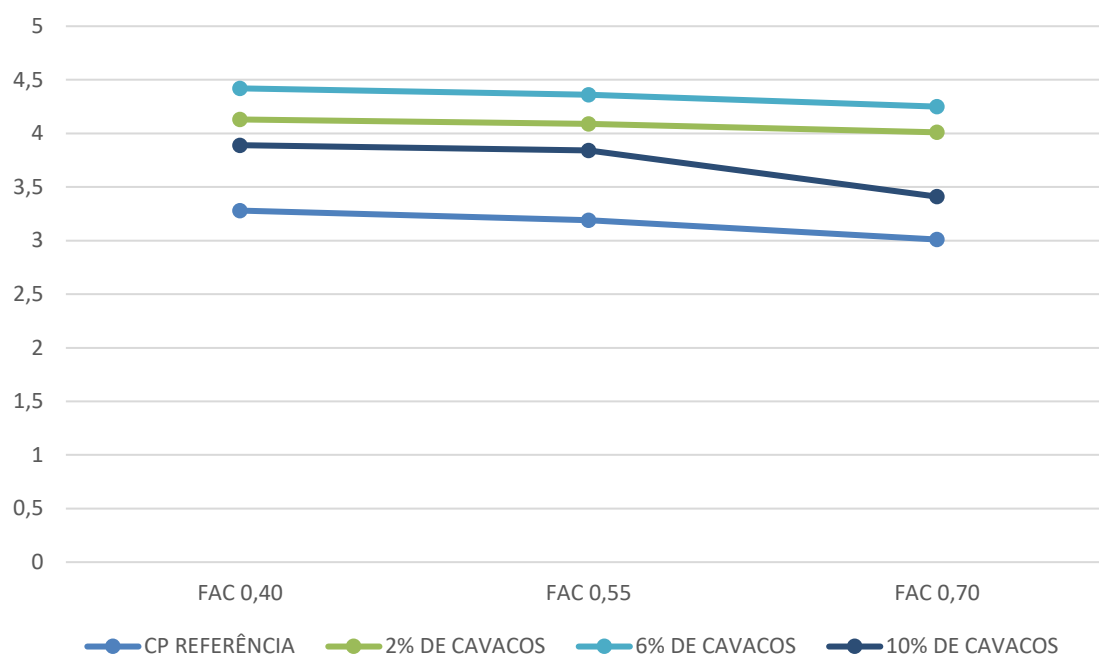
Embora o Gráfico de Pareto tenha mostrado que não houve significância nos níveis escolhidos para o fator A/C e para o percentual de cavacos de aço no DCC em relação à resistência à tração, quando comparado com o concreto de referência o aumento percentual de resistência à tração foi de 34% com um fator A/C de 0,40 e um percentual de cavacos de aço de 6% como mostra a Tabela 6 e ilustra a Figura 20.

Tabela 6 – Resistência à tração por compressão diametral em Mpa aos 28 dias de cura

	CP REFERÊNCIA	CP 2% DE CAVACO	CP 6% DE CAVACO	CP 10% DE CAVACO
<b>A/C 0,40</b>	3,28	4,13	4,42	3,89
<b>A/C 0,55</b>	3,19	4,09	4,36	3,84
<b>A/C 0,70</b>	3,01	4,01	4,25	3,41

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

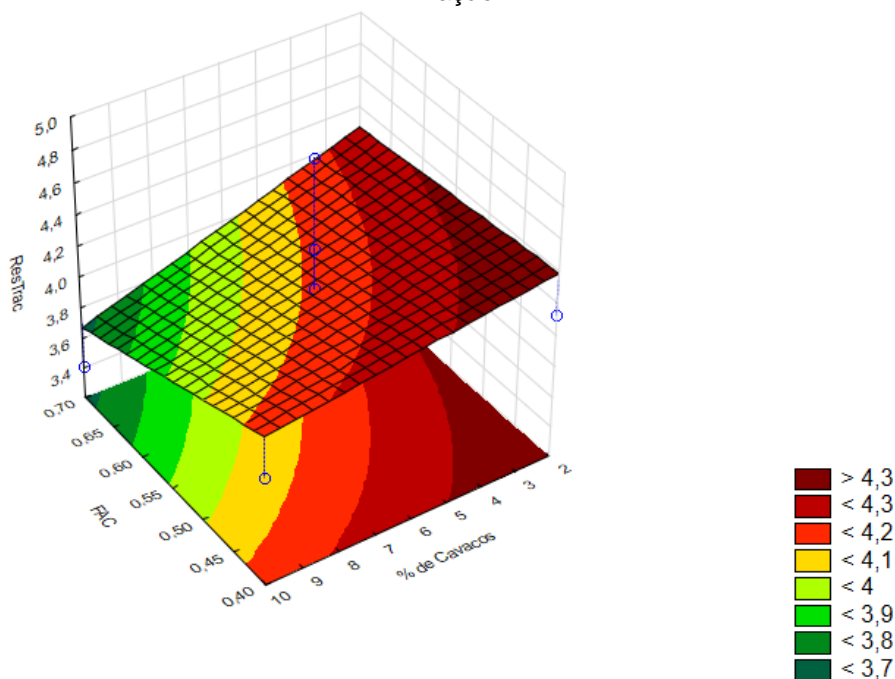
Figura 20 – Comportamento da resistência à tração



Fonte: Autor, 2023.

Através da superfície resposta obtida para o DCC em relação a resistência à tração (Figura 21) é possível observar que há um aumento da resistência conforme o percentual de cavacos aumenta, porém há uma redução quando o percentual ultrapassa os 6%. Além disso, como já era de se esperar, a resistência à tração tende a reduzir conforme se aumenta o fator A/C. Ainda assim, nenhuma dessas alterações se mostrou significativa para o modelo ao nível de 5%.

Figura 21 – Superfície resposta do DCC para o fator A/C x % de Cavacos de aço x Resistência à Tração



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

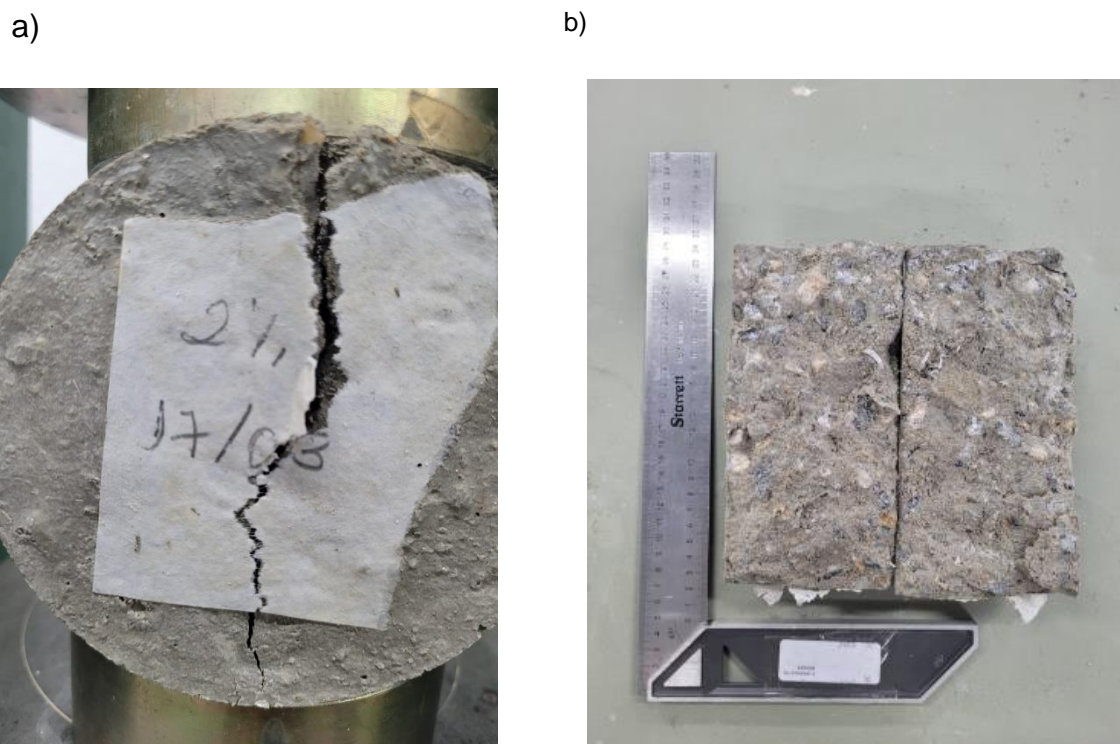
A adição de cavacos de aço pode melhorar a aderência entre o aço e a matriz de concreto, resultando em uma melhor transferência de tensões entre os dois materiais pois os cavacos de aço melhoram a tenacidade do concreto, ou seja, sua capacidade de absorver energia antes da ruptura. Isso ocorre porque os cavacos de aço dispersam a tensão e ajudam a dissipar a energia durante o carregamento, reduzindo a propagação de fissuras e aumentando a capacidade de absorção de energia do concreto. (TUNA, M.; KARADEMIR, D. 2020)

Além disso, é possível notar que o percentual de 10% de cavacos de aço embora possuísse um maior teor de partículas foi o que resultou em uma menor resistência quando comparado aos demais percentuais de adição. Esse efeito pode ser explicado pela descontinuidade gerada pela incorporação de cavacos de aço em grande quantidade, gerando pontos frágeis na estrutura resultando em uma diminuição na capacidade do concreto em resistir às forças de tração aplicadas.



Vale salientar que não houve grandes variações da resistência à tração quando o percentual de cavacos de aço aumentou, porém todos os concretos com percentuais de adição resultaram em uma maior resistência quando comparado ao concreto sem adição. Durante o ensaio foi possível observar que mesmo forçando o rompimento, o corpo de prova não se desintegrou totalmente (Figura 22), pois os cavacos de aço aderiram bem na matriz de concreto e mesmo que já houvesse a fissura, o cavaco unia as partes.

Figura 22 – Comportamento e aspecto do corpo de prova rompido no ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

## 6. CONCLUSÃO

A partir da revisão da literatura, do planejamento fatorial e da análise experimental, verificou-se que a resistência a compressão do concreto com a adição de cavacos reduziu, mas não sofreu grandes alterações mesmo quando o fator água/cimento variou entre 0,40 e 0,70. A diferença quando comparado ao concreto de referência foi em média de 4%. A melhor interação para a resistência a compressão foi com o fator A/C de 0,55 e um percentual de adição de 6% alcançando 25,01 Mpa.

Em relação a resistência à tração houve um aumento de até 34% devido a adição de cavacos de aço quando comparado ao concreto de referência, porém com o percentual de 10% de cavacos, a resistência apresentou uma queda em relação aos outros níveis de adição. Isso acontece devido à descontinuidade gerada pela incorporação de cavacos de aço em grande quantidade, gerando pontos frágeis na estrutura.

No que se refere ao abatimento do concreto, percebeu-se uma alteração significativa na consistência conforme se variava o fator A/C e o percentual de cavacos pois as fibras tendem a restringir a mobilidade principalmente dos agregados graúdos, dificultando a fluidez da mistura e diminuindo a trabalhabilidade. A combinação que mais se aproximou do *Slump Test* do concreto de referência foi com fator A/C de 0,70 e 2% de cavacos de aço com um resultado de 9,1cm. O percentual de 10% apresentou um concreto bastante seco com resultados que variaram entre 3 e 4cm.

Dessa forma, trabalhar com um concreto com adição de cavacos de 10% em relação a massa de cimento seria improvável já que a trabalhabilidade do concreto fica quase nula e seria necessário o incremento de algum aditivo para melhorar esta propriedade, mas que poderia influenciar nas demais. O concreto com 2% e 6% se comportaram bem em relação ao abatimento e possuíam trabalhabilidade aceitável.

Sendo assim, a adição de cavacos de aço no concreto se mostra viável quanto às variáveis e modelo estudados, porém há ainda limitações e variáveis que podem ser estudadas. Nesse sentido, sugere-se que futuras pesquisas investiguem outros tipos de formatos de cavacos, outras formas de adição ou substituição parcial no concreto e incrementos de aditivos ou outros materiais alternativos que melhorem a trabalhabilidade do mesmo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655:2015**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16889:2020**: Agregados-Ensaio de determinação de teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5739**: Concreto Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2019.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7222:2011**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7680**: Concreto Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão. Rio de Janeiro. 2015.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9479**: Argamassa e concreto-Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. 2006.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9479**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro. 2017.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1996.
- ADAS, A. M.; BANGASH, M. Y. H. **Workability, strength and durability of self-consolidating concrete incorporating silica fume and recycled concrete aggregates**. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, p. 124101, 2020.
- AFZALI-NANIZ, O.; MAZLOOM, M. **Assessment of the influence of micro- and nano-silica on the behavior of self-compacting lightweight concrete using full factorial design**. *Asian Journal of Civil Engineering*, [s.l.], v. 20, n. 1, p. 57-70, 6 out. 2018.
- AIREY, D. W.; AIREY, G. D. The mechanical properties of high-performance concrete using steel slag as coarse aggregate. ***Construction and Building Materials***, v. 181, p. 345- 356, 2018.

ALWAEELI, M. **The implementation of scale and steel chips waste as a replacement for raw sand in concrete manufacturing.** *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 137, p. 1038- 1044, nov. 2016.

ALWAEELI, M; NADZIAKIEWICZ, J. Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete. ***Construction and Building Materials***, [s.l.], v. 28, n. 1, p. 157-163, mar. 2012.

ANDRADE, Jairo J. de O.; TUTIKIAN, Bernardo F. **Resistência mecânica do concreto.** In: ISAIA, Geraldo C (Editor). *Concreto: ciência e tecnologia volume I*. São Paulo: IBRACON, 2016.

BARBOZA, L. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. ***Revista Matéria***, v. 23, n. 3, Sept. 2018.

BASCOUL, R. et al. Fiber-reinforced rubberized concrete for structural applications: A review. ***Construction and Building Materials***, v. 303, p. 124247, 2021.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** London and New York: *Modern Concrete Technology Series*, 2.ed. 2007.

BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. Performance-based specifications for concrete: Past, present, and future. ***Cement and Concrete Research***, v. 114, p. 58-70, 2018.

BEUSHAUSEN, H. D.; ALEXANDER, M. G. Experimental characterization of early-age cracking in concrete. ***Cement and Concrete Research***, v. 116, p. 263-275, 2019.

BHARATHI, S. H.; SREEKUMARAN, S. A probabilistic approach to the design of reactive powder concrete mixes modified using slag. ***Materials Today: Proceedings***, [s.l.], v. 43, p. 1276-1282, 2021.

BONALUMI, D. M., et al. Influence of Fiber Geometry on the Rheological Behavior of Self- Compacting Concrete. ***Revista IBRACON de Estruturas e Materiais***, 14(2), 417-442, 2021.

BORGES, P. H. R. et al. **Estudo da reologia do concreto autoadensável com adição de fibras de aço.** In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto, 2019, Foz do Iguaçu. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto, 2019.

CARLI, A de. **Utilização de cavacos metálicos no desenvolvimento de um concreto com adição de fibras.** 2020. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, IMED - Faculdade Meridional, Passo Fundo, 2020.

CARVALHO, Alina S.; BARBOSA, Anderson H.; GRANJA, Jailma M. M.; FERRAZ, Ricardo F.; SILVA, Rita de Cássia L. e. **Concreto com fibras de borracha reciclada de pneus.** Juazeiro: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2018. Acesso em: 25 de set. de 2019.

CASTRO, P. F. et al. Steel fibers derived from waste tires for reinforcement of cementitious composites: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117835, 2020.

CHEN, J., et al. Fracture and mechanical performance of steel fiber reinforced cementitious composites under uniaxial tensile loading. **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 123160, 2021.

CHOI, Y.; YUAN, R. L. Experimental Relationship Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength of GFRC and PFRC. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1578-1591, 2005.

COSTA, J. D. M; SAVARIS, G; BALESTRA, C. E. T. Resistência ao cisalhamento direto do concreto reforçado com fibras de aço. **Revista de Engenharia Civil Imed**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 115, 1 dez. 2019.

DENARDI, A. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. UFRGS, Porto Alegre, 2016.

DIAS, J. C. R.; MAZZARO, J. V. V.; REIS, S. C.; NUNES, G. V.; LIBERATO, F. de M. **Comportamento do concreto reforçado com cavacos de aço e alumínio: resistência à tração por compressão diametral**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 51880-51889, maio 2021.

DUAN, P. et al. Mechanical properties of reactive powder concrete incorporating waste steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118-135, 2020.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; MEDEIROS, U. C. Q. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 195-209, 2018.

ELATY, M. A. A. A.; GHAZY, M. F. **Evaluation of consistency properties of freshly mixed concrete by cone penetration test**. *HBRC Journal*, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 1-12, abr. 2016.

EMON, M. A. B.; MANZUR, T.; YAZDANI, N. **Improving performance of light weight concrete with brick chips using low cost steel wire fiber**. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 106, p. 575-583, mar. 2016.

FERNANDES, S. C.; BARROS, R. P.; FERREIRA, A. de S.; BARROS, L. M. Produção de concreto de alta resistência com utilização de superplastificante e adição de microssilica. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 9, n. 12, e44991211380, p. 1- 14, 28 dez. 2020.

FERNÁNDEZ-CANTELI, A.; LÓPEZ-COLINA, C. **Influence of fibers on the mechanical and fracture properties of high-strength concrete with recycled aggregates**. *Construction and Building Materials*, v. 230, p. 117064, 2020.

FERREIRA, M., et al. Fresh and Mechanical Properties of Concrete with Recycled Aggregate. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 12(2), 493-514, 2019.

FIORENTIN, L. D., et al. Influence of Different Mineral Additions on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 13(5), 1280- 1303, 2020.

GARCÍA, V. J.; MÁRQUEZ, C. O.; ZÑIGA-SUÁREZ, A. R.; ZUÑIGA-TORRES, B. C.; VILLALTA-GRANDA, L. J. **Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: review and new insights.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 343-363, 19 maio 2017.

GENCEL, O.; OZEL, C.; BROSTOW, W.; MARTINEZ-BARRERA, G. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. **Materials Research Innovations**, v. 15, p. 216 225, 2011.

GHANNAM, S., NAJM, H., ROSA VASCONEZ, R., 2016. **Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand.** *Sustain. Mater. Technol.* 9, 1 e 9.

GONÇALVES, J. et al. Influence of coarse recycled aggregates on the mechanical and durability properties of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121517, 2021.

GUO, Y. B.; GAO, G. F.; JING, L.; SHIM, V. P. W. **Quasi-static and dynamic splitting of high-strength concretes tensile stress strain response and effects of strain rate.** *International Journal of Impact Engineering*, [s.l.], v. 125, p. 188-211, mar. 2019.

HAKIM, B. et al. **The use of graphene oxide as a nanomaterial for cement composites: A review.** *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123790, 2023.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concreto.** Brasília: Pini, 1992.

HERSCOVICI, H. L.; ROEHL, D.; SÁNCHEZ FILHO, E. de S. Estudo experimental de vigas curtas de concreto com fibras de aço sujeitas à flexão. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 288-307, 2019.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2009. 640 p.

HUANG, Y. et al. **Mechanical behavior and strain compatibility of high-performance recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119064, 2020.

IBRAHIM, M. et al. Mechanical properties of high-strength lightweight foamed concrete reinforced with glass fiber. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120071, 2020.

KESHAVARZ, Z.; MOSTOFINEJAD, D. **Steel chip and porcelain ceramic wastes used as replacements for coarse aggregates in concrete**. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 230, p. 339-351, set. 2019.

KHAN, R. et al. Influence of fiber volume fraction on the mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 920-932, 2018.

LARSEN, I. L.; THORSTENSEN, R. T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: a review. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 256, p. 119459, set. 2020.

LIMA, R. F. et al. Influence of rice husk ash and silica fume on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124-131, 2021.

LORENZI, A. **Análise comparativa entre concreto convencional e reforçado com fibras através de ensaios ultrassônicos**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2020.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Universidade de São Paulo USP Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP. 2017.

LUCZKIEWICZ, C; MENEGAT, M. O.; FIGUEIREDO, A. M. B. Destinação de resíduos sólidos gerados por empresas metalúrgicas localizadas no município de Chapecó - SC. **Revista Tecnológica**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 284-299, sep. 2015.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MARINHO, M. R. M; CASTRO, W. B. **Planejamento fatorial: uma ferramenta poderosa para os pesquisadores**. Campina Grande - Paraíba: COBENGE, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MELLO, P. H. C. de. **Utilização de resíduos de usinagem do tipo cavaco em substituição a fibra de aço no concreto para pisos industriais**. 2021. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009. 656 p.

NEVES, C. F. C., SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; J., E. Variables search technique applied to gas separation. **Química Nova**, v.25, n 2, p.327-329, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p.

OLIVEIRA, M. de; LIMA, V. M; YAMASHITA, S. M. A.; ALVES, P. S.; PORTELLA, A. C. **Experimental Planning Factorial: a brief review**. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, [s.l.], v. 5, n. 6, p. 166-177, 2018.

OZBAKKALOGLU, T.; LIM, S. H. Mechanical properties of concrete containing steel fibers recycled from end-of-life tires. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 313-326, 2018.

RASHID, M. M. et al. Mechanical properties and microstructure of self-compacting concrete containing carbon nanofiber under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118890, 2020.

REIS, E. J. et al. Mechanical performance of self-consolidating concrete incorporating fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119515, 2020.

RIBEIRO, F. et al. Mechanical behavior of recycled concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 120689, 2021.

ROCHA, B. R. et al. Characterization of the mechanical behavior of self-compacting concrete incorporating mineral additions: A review. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118395, 2020.

RUIZ, A. C. et al. Use of waste tire steel fibers as reinforcement for cementitious composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 26-42, 2019.

SALEH, M. F. et al. Mechanical properties of high-strength concrete containing nanomaterials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 659-677, 2023.

SANCHEZ, O. E. D.; TRUJILLO, F. G. **Revision bibliográfica entre el concreto auto reparable y el concreto convencional**. 2020. 58 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica da Colômbia, Bogotá, 2020.

SANTIAGO, C. M. P. et al. **Influence of water-to-cement ratio and age on compressive strength of concrete**. *ACI Materials Journal*, v. 113, n. 4, p. 455-462, 2020.

SENGUL, O. Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 122, p. 649-658, set. 2016.



SILVA, E. M. da; SILVA, É. J. F. da; PIRES, E. V.; CARVALHO, C. M. de; PIMENTEL, W. R. de O.; NASCIMENTO JÚNIOR, P. A. do. **Uso de planejamento fatorial no estudo do potencial fitotóxico de *Amburana cearensis* (Fabaceae), *Delonix regia* (Fabaceae), *Tabebuia avellaneda* (Bignoniaceae) sobre sementes de alface.** *Diversitas Journal*, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 859-880, 30 jan. 2021.

SILVA, W. A. et al. Use of waste PET bottles fibers for improvement of the mechanical behavior of cement-based composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 441-452, 2018.

SIQUEIRA, R. C. et al. Efeito do tipo de cimento e traço na resistência à compressão do concreto. **Materiais de Construção**, v. 70, n. 279, p. 21-31, 2020.

SOULTANA, A.; GALETAKIS, M. **Utilization of Quarry Dust and Calcareous Fly Ash for the Production of Lightweight Cellular Micro-Concrete Synthesis and Characterization.** *Buildings*, [s.l.], v. 10, n. 12, p. 214, 25 nov. 2020.

SOUZA, A. J. de. **Processo de fabricação por usinagem:** Parte 1. UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Apostila.

SOUZA, R. M. de; MAGALHÃES, R. R.; RODRIGUES, T. R. C.; FERNANDES, A. S.; MACHADO, G. R.; COTRIM, F. R.; AQUINO, S. de S. **Evaluation of the compressive strength in concrete structures from non-destructive tests.** *Brazilian Journal of Development*, [s.l.], v. 7, n. 6, p. 59614-59632, 17 jun. 2021.

TUNA, M.; KARADEMIR, D. Mechanical properties of high-strength self-compacting concretes incorporating metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119337, 2020.

YAO, Y. et al. Experimental study on tensile properties and energy absorption of steel fiber reinforced concrete under quasi-static and dynamic loads. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123095, 2021.

ZENERE, T. A.; CASSOL, G. Análise de desempenho do concreto com substituição de uma porcentagem do agregado miúdo por resíduos de usinagem da indústria metal mecânica. **Ignis, Caçador**, v. 6, n. 3, p. 93-112, set. 2017.