

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

RENATA GOMES MARDERO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**

CAXIAS DO SUL

2024

RENATA GOMES MARDERO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vinício Ceconello

CAXIAS DO SUL

2024

RENATA GOMES MARDERO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vinício Cecconello

Aprovada em 25 / 11 / 2024

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Luciano Zatti
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

MARDERO, Renata Gomes. **Análise do desempenho da adição de resíduos de usinagem na propriedade mecânica do concreto**. 2024. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 2024.

Este trabalho apresenta a avaliação do desempenho do concreto com adição de resíduos metálicos de usinagem, como alternativa sustentável para a construção civil. Traços contendo 1%, 1,5% e 2% de adição de resíduos foram testados quanto ao abatimento do tronco de cone, a absorção de água por capilaridade, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e resistência à compressão. O traço com 1,5% de resíduos apresentou a menor absorção de água, favorecendo a durabilidade e bons resultados de resistência à tração por compressão diametral. O traço com 2% também mostrou bons resultados de resistência, destacando a resistência à tração por compressão e na flexão, embora tenha a menor trabalhabilidade dos traços, reduzindo a facilidade de manuseio no estado fresco. Enquanto o traço com 1% apresentou algumas melhorias nas propriedades mecânicas em relação ao concreto convencional, mas menos expressivas do que as demais adições. De forma geral, o traço que obteve melhores desempenho foi o de 1,5% de adição de resíduo, seguido pelo traço com 2% de adição. Este estudo aponta que a adição de resíduos de usinagem no concreto é uma alternativa eficaz e ecologicamente responsável, com melhorias significativas nas propriedades do concreto e uma contribuição relevante para a diminuição de resíduos da indústria.

Palavras-chave: resíduo de usinagem; concreto reforçado; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

MARDERO, Renata Gomes. **Analysis of the performance of lathe machine scrap addition on the mechanical properties of concrete**. 2024. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 2024.

This study presents the evaluation of the performance of concrete with the addition of lathe machine scrap, as a sustainable alternative for civil construction. Mixtures containing 1%, 1.5% and 2% of waste addition were tested for slump, water absorption by capillarity compressive attraction strength, flexural tensile strength and compressive strength. The mix with 1.5% of waste exhibited the lowest water absorption, favoring durability, and good results of tensile strength by collaboration. The mix with 2% also showed good strength results, particularly in tensile strength by traction and flexure, although it has a lower workability of the mixes, reducing ease of handling in the fresh state. Meanwhile, the mix with 1% showed some improvements in mechanical properties in relation to conventional concrete, but less expressive than the other additions. Overall, the mix with 1.5% waste addition demonstrated the best performance, followed by the mix with 2%. This study indicates that the addition of the machine scrap to concrete is an effective and environmentally responsible alternative, with significant improvements in concrete properties and a relevant contribution to the reduction of industrial waste.

Keywords: lathe machine scrap; reinforced concrete; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fissuração em vigas de concreto sem fibras e com fibras de aço.....	14
Figura 2 - Concentração de tensões em concreto sem reforço de fibras.....	15
Figura 3 - Concentração de tensões em concreto com reforço de fibras.....	15
Figura 4 – Curva média de carga por deslocamento no ensaio de tração na flexão com diferentes consumos de fibra de aço.....	16
Figura 5 – Classificação NBR ISO 3685 para resíduos de usinagem	19
Figura 6 - Resistência à flexão, tração e compressão.....	20
Figura 7 - Gráfico da resistência à compressão pelo teor de substituição.....	20
Figura 8 – Gráfico da resistência à tração por compressão diametral pelo teor de substituição	21
Figura 9 - Fluxograma de atividades	24
Figura 10 - Curva granulométrica do Agregado miúdo	26
Figura 11 - Curva granulométrica dos Agregados graúdos (Brita 0 e Brita 1).....	27
Figura 12 - Resíduo de usinagem utilizado	29
Figura 13 - Sequência produção do concreto	30
Figura 14 - Dispositivo para realização do ensaio de tração na flexão	34
Figura 15 - Abatimento do tronco cone	36
Figura 16 - Absorção de água por capilaridade.....	37
Figura 17 - Resistência à tração por compressão diametral	39
Figura 18 - Resistência à tração por compressão diametral ao longo do tempo.....	39
Figura 19 – Resultados da resistência à tração na flexão	41
Figura 20 – Resultados da resistência à tração na flexão ao longo do tempo.....	41
Figura 21 - Comparação resistências à tração em 49 dias	42
Figura 22 – Resultados da resistência à compressão.....	43
Figura 23 – Resultados da resistência à compressão ao longo do tempo.....	43

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Misturas, percentuais de adição e quantidade de cavaco por m ³	22
Tabela 2 - Consumo de materiais do traço	23
Tabela 3 - Características CP IV-32	25
Tabela 4 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados	27
Tabela 5 - Massa específica agregados graúdos.....	28
Tabela 6 - Massa unitária agregados	28
Tabela 7 - Componentes dos traços de concreto.....	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	Objetivos específicos.....	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1	CONCRETO	11
2.1.1	Componentes do concreto	12
2.2	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS	13
2.2.1	Características e propriedades	13
2.2.2	Dosagem de concretos reforçados com fibras metálicas.....	16
2.3	INDÚSTRIA DA USINAGEM	17
2.3.1	Tipos e formas de cavacos.....	18
2.4	CONCRETO REFORÇADO COM RESÍDUOS METÁLICOS	19
2.4.1	Dosagem de concreto com adição de resíduo metálico	22
3	MÉTODOS E MATERIAIS	24
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	24
3.1.1	Água.....	25
3.1.2	Cimento	25
3.1.3	Agregados.....	26
3.1.4	Resíduo de usinagem	28
3.2	FABRICAÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.2.1	Definição da dosagem	29
3.2.2	Fabricação do concreto.....	30
3.2.3	Moldagem dos corpos de prova	30
3.3	MÉTODOS DE ENSAIO.....	31
3.3.1	Abatimento do tronco de cone.....	32
3.3.2	Absorção de água por capilaridade.....	32
3.3.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	33
3.3.4	Tração na flexão	34
3.3.5	Compressão.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36

4.1	ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	36
4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	37
4.3	RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO.....	38
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	42
5	CONCLUSÕES	45
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE A - GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO	51
	APÊNDICE B – GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO (BRITA 0)	52
	APÊNDICE C – GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO (BRITA 1)	53
	APÊNDICE D – MASSAS COLETADAS PARA ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	54
	APÊNDICE E - RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	55
	APÊNDICE F – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	56
	APÊNDICE G – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	57
	APÊNDICE H – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO..	58

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de reaproveitamento ou destinação mais adequada para sucata e resíduos da indústria metalúrgica tem se tornado cada vez mais evidente. Nesse contexto, a Construção Civil apresenta-se como uma alternativa viável, aproveitando os benefícios que esses materiais podem oferecer. A Lei 12.305, de 2010, reforça a importância do gerenciamento dos resíduos sólidos e incentiva práticas de produção e consumo sustentáveis, além de promover a reciclagem.

Segundo Figueredo (2011), a baixa capacidade de deformação do concreto quando submetido a tração e o comportamento frágil são características negativas do concreto tradicional, por isso é utilizada armaduras de aço para resistir aos esforços de tração. Ainda, o concreto reforçado com fibras surge como uma alternativa ao concreto armado, uma vez que o módulo de elasticidade e a resistência mecânica são propriedades que ajudam a reforçar o concreto convencional.

De acordo com Shrivastava e Joshi (2014) a função das fibras no concreto reforçado com fibra de sucata de aço é melhorar a durabilidade, ductibilidade pós pico, resistência ao impacto, resistência a fadiga, resistência a tração pré fissura e fissuras por retração térmica. Para que isso ocorra as fibras devem ter comprimento suficiente, módulo de elasticidade maior que o concreto e devem ter uma boa aderência ao concreto.

Conforme Kwon et al. (2015), os resíduos de usinagem são mais baratos que as fibras de aço encontradas no mercado, sendo semelhantes em componentes e propriedades. Com isso, quando adicionados ao concreto, ambos resíduos de usinagem e fibra de aço, mantém o mesmo desempenho.

O resíduo de usinagem, conhecido popularmente como cavaco, é obtido através de ferramentas e maquinários visando obter o formato e acabamento final de uma determinada peça. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, por ser um polo metal mecânico de grande importância para o Brasil acaba por ter grandes volumes desse resíduo disponível e precisando de um destino correto, para não serem descartados de forma incorreta.

Com o aumento populacional e industrial, ocorre por consequência, o aumento da disponibilidade de resíduos metálicos gerados pela indústria. No qual esses resíduos poderão ser utilizados para a produção de concreto reforçado com fibra (CRF) a um custo menor do que fibras metálicas (Qureshi, 2016).

O uso de resíduos metálicos provenientes de indústria de usinagem como alternativa de reforço ao concreto convencional se revela uma alternativa sustentável e economicamente viável do ponto de vista ambiental e social. Tendo isso em vista, o objetivo principal dessa pesquisa é avaliar o comportamento do concreto com adição de 1%, 1,5% e 2% de resíduo de usinagem, nos intervalos de 7 dias, 28 dias e 49 dias.

1.1 OBJETIVOS

Analisar o desempenho dos concretos com a adição de resíduos de usinagem, no estado fresco e endurecido.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) avaliar propriedades mecânicas do concreto com adição de resíduos de usinagem;
- b) avaliar a absorção capilar do concreto com adição de resíduos de usinagem;
- c) identificar a porcentagem de adição de resíduo de usinagem no concreto que apresentou o melhor desempenho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados conceitos e estudos relacionados ao tema, bem como as referências necessárias para melhor entendimento do assunto.

2.1 CONCRETO

Em termos amplos, o concreto é qualquer material ou massa produzido a partir de um meio cimentante, normalmente, esse meio é formado pela reação entre cimento hidráulico e água, mas atualmente essa definição pode abranger uma vasta gama de produtos. Além disso o concreto pode ser fabricado com diferentes tipos de cimento e pode incluir pozolanas, como cinza volante, sílica ativa, escória de alto-forno, além de adições minerais, polímeros, aditivos, agregados de concreto reciclado e fibras (Neville e Brooks, 2010).

Conforme Malhort e Mehta (1996) atualmente no mundo o cimento Portland é o material mais empregado na construção civil. Desde simples casas até mesmo barragens, passando por edifícios de concreto armado, o concreto é amplamente utilizado em diversos tipos de estruturas. Ele se destaca como uma alternativa economicamente viável na maioria dos casos, com resistência e durabilidade adequadas, além disso, em relação com outros materiais sua produção não requer grande quantidade de energia.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto é amplamente utilizado na engenharia por diversas razões, incluindo a facilidade de moldar elementos estruturais de diferentes formas e tamanhos, capacidade de resistir a água, baixo custo e disponibilidade de materiais, mesmo em áreas remotas. Além do mais suas propriedades podem ser ajustadas conforme a necessidade do concreto conforme o tipo e as proporções dos seus componentes.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2023), no Brasil em 2022 o consumo de concreto foi de 62,8 milhões de toneladas, tendo a capacidade de produção de 94 milhões de toneladas por ano. O país possui 93 parques produtores de cimento distribuídos em 82 municípios e 23 estados brasileiros, gerando 18 mil empregos diretos.

2.1.1 Componentes do concreto

Os componentes do concreto são basicamente agregado miúdo e graúdo, água e cimento e sua correta seleção é importante para que o desempenho final desejado seja atingido.

Para Petrucci (1982), agregado é um material granular, normalmente inerte, sem forma ou volume definido, com propriedades e dimensões adequadas para projetos de engenharia. No concreto podem fornecer volume, melhoram a durabilidade, aumentam a estabilidade e controlam a expansão e contração.

Segundo Neville e Brooks (2010) três quartos do volume total do concreto são preenchidos pelos agregados. Além de que do ponto de vista econômico é mais vantajoso uma mistura que utilize maiores volumes de agregado e menores de cimento, na medida do possível. No entanto, este custo-benefício deve ser equilibrado com base nas propriedades desejadas para o concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022) os agregados podem ser naturais ou artificiais, o agregado miúdo é composto de grãos que passam pela peneira com a abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,15 mm. Já o agregado graúdo é composto por grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na de 4,75 mm.

Conforme trazido por Mehta e Monteiro (2005), a água é fundamental para as propriedades aglomerantes do cimento, uma vez que são as reações de hidratação do cimento que possibilitam a união entre os componentes do concreto. A relação entre a quantidade de água adicionada e a quantidade de cimento utilizado na produção do concreto é crucial para determinar a sua resistência final.

De acordo com a Associação Brasileira de cimento Portland (2024) “O cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água”. Na forma de concreto, transforma-se em uma pedra artificial que pode ser moldada em diferentes formas e volumes conforme a necessidade e a demanda do mercado da construção civil. Devido a essas características o concreto é o segundo material mais consumido pelo homem, perdendo apenas para a água.

Segundo Petrucci (1982), o cimento Portland é feito de argila, calcário e minério de ferro, que juntos formam o clínquer. Depois de moído, o clínquer recebe a

adição de gesso para reduzir a velocidade de pega, isto é, a velocidade de hidratação das partículas do cimento e assim formar o cimento.

Yazigi (2008) aponta três aspectos diferentes a serem analisados nas propriedades do cimento Portland. O primeiro são as propriedades do cimento em seu estado natural, ou seja, pó. O segundo aspecto são as propriedades da mistura do cimento e água, ajustada às proporções adequadas para cada aplicação. O terceiro aspecto é a propriedade da mistura da pasta de cimento com o agregado.

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS

Em diversas situações é preciso que o concreto resista a esforços de tração e flexão requerendo o uso de reforços longitudinais e transversais. Porém, novas formas de contornar essa situação vem sendo desenvolvidas, como o reforço do concreto convencional e do concreto armado com fibras metálicas, a qual já são utilizadas há algum tempo (Salvador et al. 2015).

De acordo com Lee e Barr (2003) foi durante a década de 60 que se deu o início do desenvolvimento de concretos estruturais reforçado com diversos tipos de fibras como uma alternativa de reforço. A adição de fibras no concreto ajuda a melhorar as propriedades mecânicas, bem como resistência a tração e compressão, capacidade de absorção de energia, módulo de elasticidade e controle de fissuração (Bentur e Mindess, 2007).

Alta resistência e alto módulo de elasticidade são características das fibras de aço que atuam no reforço do concreto já endurecido, podendo até em alguns casos substituir a armadura convencional. As fibras de carbono na qual possuem maior capacidade de resistência não são comumente utilizadas como reforço devido ao seu elevado custo (Figueiredo, 2011).

2.2.1 Características e propriedades

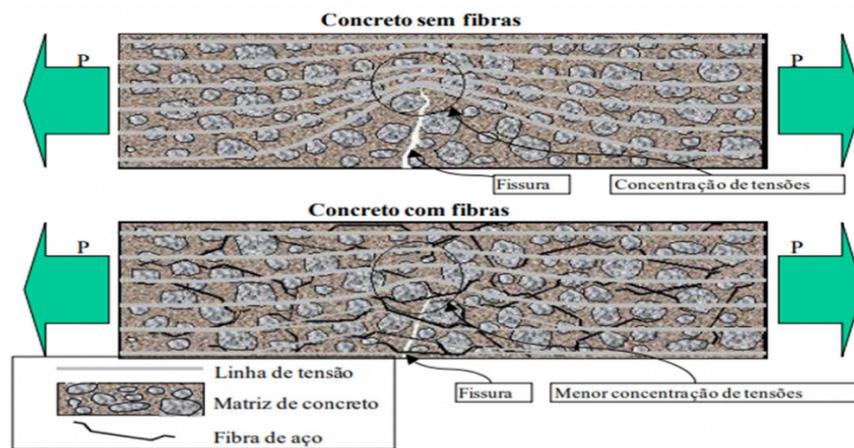
No Brasil, utiliza-se a norma NBR 15530 (ABNT, 2019) “Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio” para regulamentar a utilização de fibras de aço no reforço de estruturas de concreto.

O concreto reforçado com fibras é conhecido por proporcionar ao concreto convencional diversas vantagens e melhorias a qual permitem sua aplicação em rodovias, pavimentos, paredes, pisos ou pré-fabricados. Os principais benefícios

trazidos com a adição das fibras são: aumento da energia absorvida, maior resistência ao fogo, aumento da resistência à tração residual pós ruptura, melhora na ductilidade, menor fragilidade do concreto e controle do início das fissuras, bem como seu desenvolvimento e propagação (Elsaigh; Robberts; Kearsley, 2011).

Conforme Figueiredo et al. (2000), as fibras utilizadas para reforço de estruturas de concreto são elementos descontínuos, cuja seção transversal é significativamente menor do que seu comprimento. No concreto sem fibra ou concreto simples, uma fissura formará uma barreira para a propagação de tensão de tração, implicando numa concentração de tensão na extremidade da fissura e se essa tensão superar o valor da tensão crítica, ocasionará uma ruptura inesperada do material. Já no concreto com fibras, elas servem como pontes para a transferência da tensão pelas fissuras, na qual a concentração de tensão na extremidade será minimizada, com isso ocorre uma redução na velocidade de propagação das fissuras, ou seja, apresenta certa capacidade de resistência após a fissuração, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fissuração em vigas de concreto sem fibras e com fibras de aço

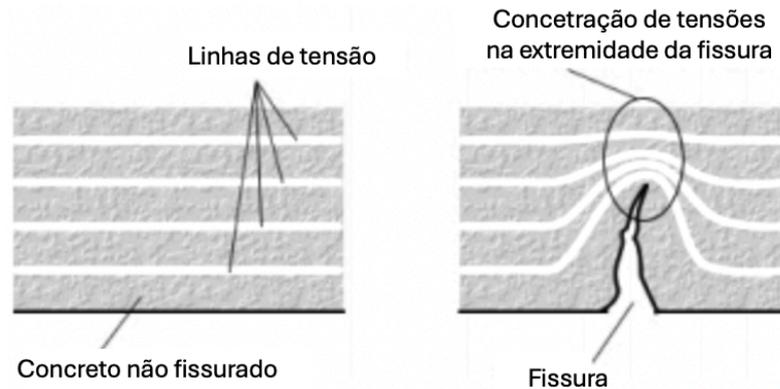


Fonte: Figueiredo et al. (2000)

De acordo com Barros, (2009) quando ocorre uma fissura no concreto simples irá apresentar uma barreira para a propagação da tensão. Na Figura 2 é possível observar que no momento em que aparece a fissura no concreto simples as linhas de tensão que anteriormente passavam pelo local necessitam contornar a fissura para permitir a sua propagação, ou seja, se concentram na extremidade da fissura provocando o crescimento da mesma até o momento que a força mecânica vence a resistência do concreto e causa a ruptura do mesmo. Já a Figura 3 representa a

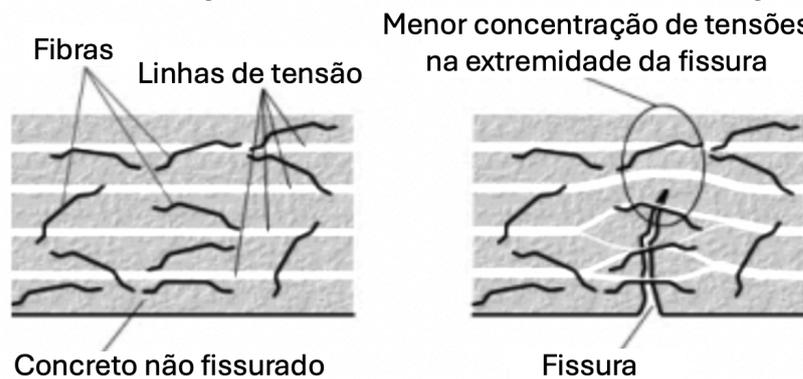
mesma situação anterior no concreto reforçado com fibras, que ocorre o retardamento da fissura, com as fibras agindo como pontes transferindo os esforços de um lado para o outro do concreto.

Figura 2 - Concentração de tensões em concreto sem reforço de fibras



Fonte: Barros (2009)

Figura 3 - Concentração de tensões em concreto com reforço de fibras



Fonte: Barros (2009)

Para Buratti et al. (2011), as fibras de aço são mais eficientes em aumentar a tenacidade à flexão do concreto do que fibras sintéticas, ou seja, usadas mais em aplicações estruturais. Por sua vez as fibras sintéticas são mais utilizadas para a redução da abertura de fissuras devido a retração.

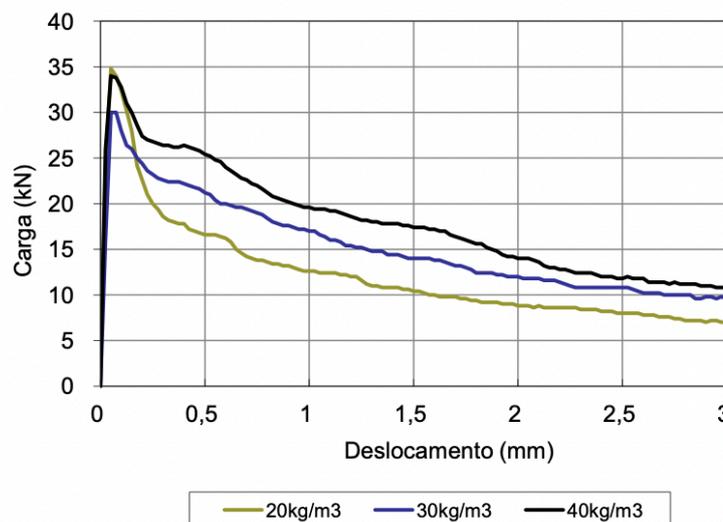
Segundo Johnston (1994), as fibras metálicas além de serem muito eficazes no controle das fissuras, também melhoram diversas propriedades mecânicas do concreto. Primeiro, elas reforçam a matriz sobre todos os modos de carregamento que induzem a tração, como tração direta, retração restringida ou na flexão e cisalhamento. Segundo, elas melhoram à torção, à fadiga, a ductibilidade e tenacidade e a resistência ao cisalhamento em relação ao concreto simples.

2.2.2 Dosagem de concretos reforçados com fibras metálicas

Abbas et al. (2014) utilizou fibras de aço de comprimento de 8 mm, 12 mm e 16 mm e diâmetro constante de 0,2 mm, em dosagem de 1%, 3% e 6% do volume total do concreto de alto desempenho, com isso conseguiu-se aumentar a resistência a compressão do concreto independentemente do comprimento. A resistência a tração e flexão apresentaram um aumento significativo com a maior dosagem de fibras e quanto menos o comprimento maior a capacidade de carga no pico e apresentaram comportamento de encruamento por deformação aprimorado com a mistura se comparado com fibras mais longas. Propriedades de durabilidade também foram melhoradas conforme a dosagem do concreto foi maior, neste caso o comprimento das fibras não influenciaram no resultado.

De acordo com Figueiredo et al. (2000), “as fibras são dosadas não em número, mas em volume ou massa por metro cúbico de concreto”, onde neste trabalho, foi estabelecido o consumo de fibras sendo de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³. Na Figura 4 é possível observar a curva média de carga (kN) por deslocamento (mm) no ensaio de tração na flexão com deslocamento controlado. Na qual apresenta como trecho inicial da matriz de concreto trabalha antes da fissura, denominado de trecho elástico inicial, na qual ocorre até um deslocamento de cerca de 0,04 mm, ficando praticamente estável. Após a fissuração a carga resistida aumenta com o crescimento da quantidade de fibras de aço no concreto.

Figura 4 – Curva média de carga por deslocamento no ensaio de tração na flexão com diferentes consumos de fibra de aço



Fonte: Figueiredo et al. (2000)

2.3 INDÚSTRIA DA USINAGEM

Segundo Machado et al. (2009) a indústria da usinagem desempenha um papel importante na economia brasileira, contribuindo significativamente para o desenvolvimento e progresso do país. Fabricação de peças e componentes essenciais para diversos setores, seja na produção de peças automotivas, aeroespaciais ou médicas, a usinagem é a base para a criação de produtos de alta qualidade, muito em virtude também dos riscos que essas peças oferecem se falharem. Usinagem refere-se ao processo de moldar e finalizar peças metálicas, geralmente são usados metais como aço liga para construção mecânica e ferro fundido, através da remoção de material, onde o resíduo dessa remoção é chamado popularmente de “cavaco”.

Conforme Ferraresi (1977), essa indústria utiliza técnicas avançadas, como fresamento e torneamento, transformando blocos de metal em produtos precisos e personalizados. Para garantir a confiabilidade e precisão das peças produzidas, o controle de qualidade desempenha um papel muito importante. Processos rigorosos de inspeção e testes garantem que os produtos atendem ou superem as expectativas dos clientes, fortalecendo a reputação da indústria.

“Cavaco” é o termo, usado no processo de usinagem, que é designado para os excessos removidos das peças, promovido pela ação de uma ferramenta de corte, cujo objetivo é obter uma peça com forma e dimensões definidas. É um processo muito comum nas indústrias metalúrgicas, siderúrgicas e dentre outras. Ou seja, quanto mais resíduos gerados no processo, maior é o desperdício e em muitos casos sendo necessário rever o processo ou tamanho inicial/bruto da peça. A coleta desse material de forma eficiente permite manter as áreas de trabalho livres de interferências e de riscos de acidente (Almeida, 2014).

De acordo com o Instituto Aço Brasil, no ano de 2022, foram produzidos 34,1 milhões de toneladas de aço no Brasil, o que representa apenas 1,9% da produção mundial. Demonstrando o quanto ainda existe espaço para o crescimento do mercado brasileiro de produção de aço.

Segundo Mello et al. (2024), a produção de peças de aço está diretamente ligada a produção de resíduos de usinagem, na qual um torno pode gerar em média entre 3 e 4 quilogramas de resíduo por dia. No processo de usinagem em torno de 10% da produção é transformada em resíduos (Machado et al. 2015).

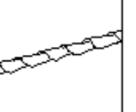
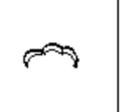
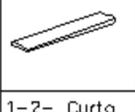
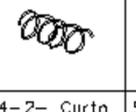
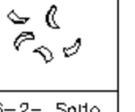
2.3.1 Tipos e formas de cavacos

Os cavacos podem ser classificados em diversos tipos, os mais usuais são cavaco contínuo, cavaco parcialmente contínuo, cavaco descontínuo e cavaco segmentado (Machado et al. 2015). Essas quatro classificações podem ser observadas mais detalhadamente a seguir:

- a) cavaco contínuo: é gerado quando o material usinado conta com poucas zonas de ruptura, ou seja, materiais dúcteis, formando assim cavacos longos e contínuos (Souza, 2011);
- b) cavaco parcialmente contínuo: é um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos, também denominado cavaco de cisalhamento e são constituídos de lamelas justapostas bem distintas (Ferraresi, 1977);
- c) cavaco descontínuo: é gerado a partir do resultado da usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferro fundido (Santos, 2007);
- d) cavaco segmentado: possui grandes deformações contínuas (Machado et al. 2015).

O cavaco pode ser classificado em diversas formas, como em hélice, espiral, fita ou virgula, conforme pode ser observado mais detalhadamente na Figura 5. Dentro dessas formas existe as indesejadas e as boas, as indesejadas são os cavacos longos que por sua vez oferecem risco ao operador, ocupa muito espaço dificultando o transporte e ainda podem danificar a ferramenta quanto prejudicar o acabamento superficial. Já as boas que ocupam pouco volume, são facilmente removidos e não obstruem o local de trabalho (Silva, 2008).

Figura 5 – Classificação NBR ISO 3685 para resíduos de usinagem

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônica	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: NBR ISO 3685 (ABNT, 2017)

A NBR ISO 3685 (ABNT, 2017) classifica o resíduo gerados no processo de usinagem em oito tipos com base em sua forma e características estruturais, sendo eles: cavaco em fita, tubular, espiral, helicoidal tipo arruela, helicoidal cônico, em arco, fragmentado e tipo agulha. Essas categorias se subdividem em variantes de comprimento e forma, como cavacos longos e curtos, plano e cônico, longo, curto e emaranhado e conectado e solto. Essa classificação do resíduo permite um manuseio mais eficaz, garantindo que cada tipo do resíduo seja direcionado corretamente, seja para a reutilização e reciclagem, seja para um descarte ecologicamente adequado.

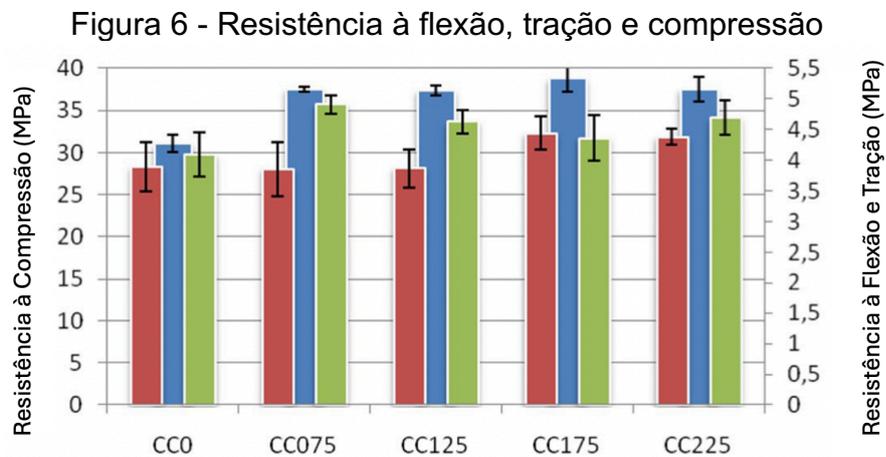
2.4 CONCRETO REFORÇADO COM RESÍDUOS METÁLICOS

Segundo Shrivastava e Joshi (2014), o concreto reforçado com fibra de sucata de aço (CRFSA) é constituído de cimento Portland, agregados, água e reforçados com fibra de sucata de aço distribuídas aleatoriamente. A função das fibras no CRFSA é melhorar a ductibilidade pós-pico, durabilidade, resistência à fadiga, resistência à tração pré-fissura, resistência ao impacto e eliminar fissuras por temperatura e retração.

A trabalhabilidade do concreto reforçado com resíduo metálico é semelhante à do concreto tradicional quando a relação água-aglomerante era alta. Já a resistência a compressão diminui minimamente à medida que a taxa de incorporação dos resíduos é aumentada, no entanto com adição de 2% de sucata a resistência à

compressão foi maior que a maioria dos concretos convencionais e a resistência à flexão também é superior em concretos reforçados com sucata de aço do que concretos tradicionais (Bae et al., 2014).

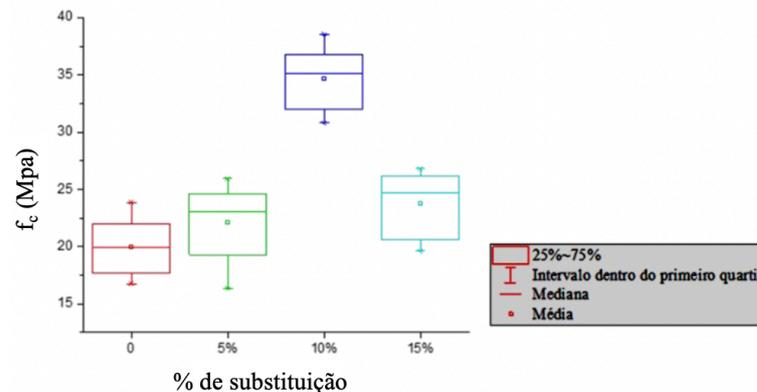
Loch et al. (2023) comparou o concreto convencional aos concretos com diferentes quantidades de adição de cavaco, sendo eles resistência a flexão, tração e compressão, com resultados demonstrados na Figura 6, sendo representados em azul, vermelho e verde, as resistências à compressão, à tração e à flexão respectivamente. O qual ficou evidente que o concreto com adição de 1,75% (CC175) foi o que obteve melhor desempenho em relação ao de referência.



Fonte: Loch et al. (2023)

Mello et al. (2023) realizaram ensaios de resistência na compressão e resistência a tração por compressão. Na Figura 7 é observado os resultados da resistência à compressão.

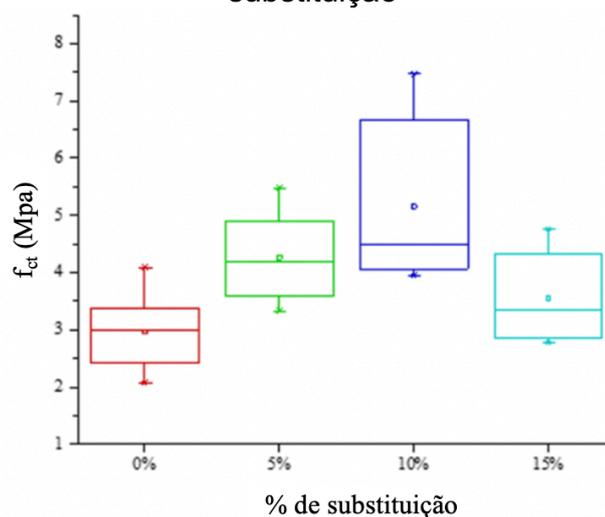
Figura 7 - Gráfico da resistência à compressão pelo teor de substituição



Fonte: Mello et al. (2023)

Na resistência a compressão os traços com substituição de 5%, 10% e 15% obtiveram resultados médios respectivamente de 10,74%, 73,70%, 19,07% melhores que o traço sem substituição. Já na Figura 8 é observado os resultados da resistência à tração por compressão.

Figura 8 – Gráfico da resistência à tração por compressão diametral pelo teor de substituição



Fonte: Mello et al. (2023)

Já na resistência a tração por compressão diametral os mesmos traços obtiveram, respectivamente, resultados médios de 43,75%, 73,70% e 19,62% melhores do que o traço base. Mostrando assim que o traço com substituição de 10% da areia foi o que obteve melhores resultados, sendo possível afirmar assim que a substituição apresentou melhores significativas do comportamento mecânico do concreto.

Qureshi, Raina e Rufaie (2016) realizaram diversos ensaios com concretos com adição de 0%, 1%, 1,5% e 2% de resíduos metálicos, como o de trabalhabilidade, resistência a tração por fendilhamento e resistência a flexão e características de deformação sob carga. O ensaio de trabalhabilidade foi realizado através do “*slump test*” que obteve valores de abatimento diminuindo conforme o aumento da adição de resíduos, sendo isso considerado benéfico. Para os demais ensaios os resultados também foram positivos para todas as porcentagens de adição de resíduo, destacando-se 1,5% de adição que obteve os melhores resultados em relação as demais porcentagens.

Para Soon-Oh et al. (2015), o uso de resíduos de usinagem na fabricação de concretos reforçados se mostrou ser uma alternativa viável e econômica. A melhor especificação do cavaco foi de 2 mm de largura e 40 mm de comprimento, com uma proporção da mistura de 1,5% do volume total. Para o ensaio de trabalhabilidade foi necessário o aumento do uso de superplastificante a medida que o comprimento da sucata de aço aumenta, indicando uma redução na trabalhabilidade do concreto reforçado em relação ao convencional. A resistência à compressão houve uma pequena redução, sem um real significado prático. A resistência à flexão houve um aumento significativo com o uso do resíduo.

2.4.1 Dosagem de concreto com adição de resíduo metálico

Loch et al. (2023) definiu o traço de referência do concreto como sendo 1: 2,87: 2,13, com relação de água/cimento de 0,48 e cimento Portland Pozolâmico (CP IV 32) para estar dentro dos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018) em virtude de o cavaco estar sujeito a oxidação, no qual foram inseridas 4 porcentagens diferentes de cavaco em relação ao volume total de concreto de referência, sendo elas 0,75%, 1,25%, 1,75% e 2,25%. Na Tabela 1 é possível observar um resumo da mistura e seus respectivos percentual de adição de resíduo e quantidade em quilogramas (kg) de cavaco adicionado a cada metro cúbico (m³) de concreto.

Tabela 1 - Misturas, percentuais de adição e quantidade de cavaco por m³

Mistura	Percentual de adição (% vol.)	kg/m ³
Referência	0,00	0,00
CC075	0,75	2,55
CC125	1,25	4,25
CC175	1,75	5,95
CC225	2,25	7,65

Fonte: Loch et al. (2023)

Já Mello et al. (2023) adotaram uma metodologia diferente, sendo a substituição de parte do agregado miúdo por resíduos metálicos nas proporções de 5%, 10% e 15% do traço base. O traço base foi feito a fim de obter 30 MPa de resistência. Na Tabela 2 é possível observar os percentuais de substituição, quantidade de cimento, resíduos, areia e brita, bem como o fator água/cimento.

Tabela 2 - Consumo de materiais do traço

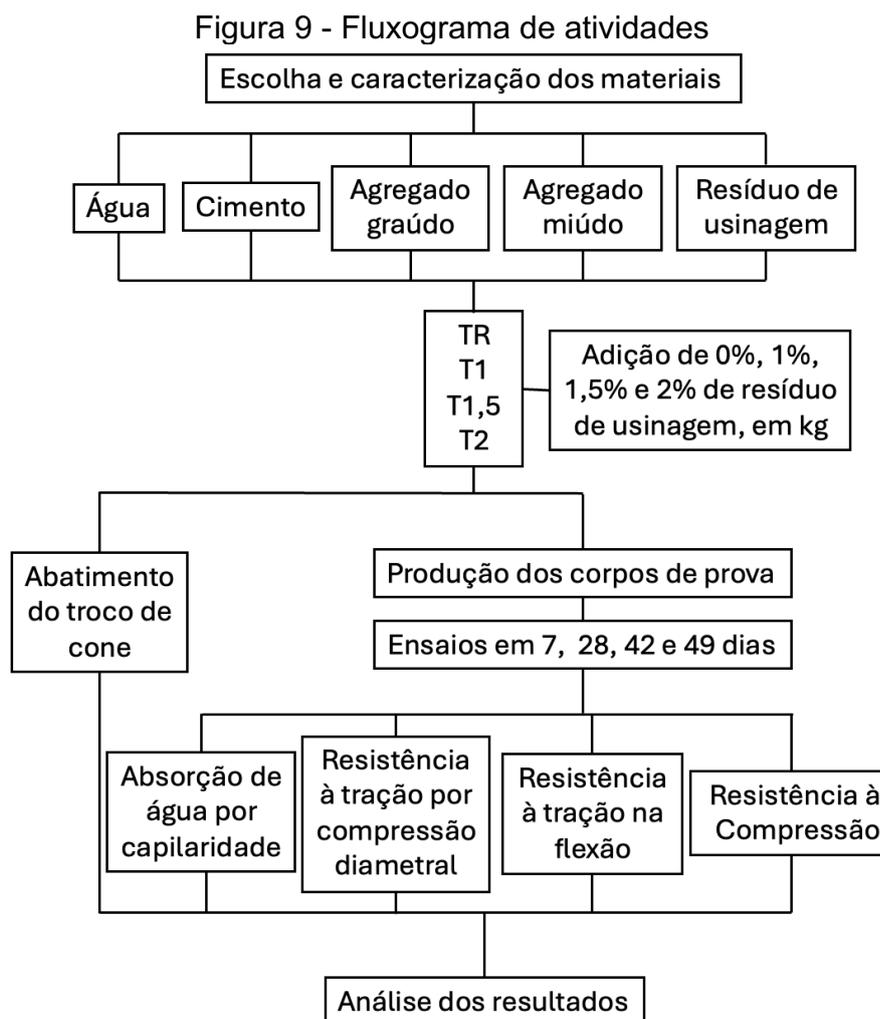
Traço	% de substituição	Fator a/c	Cimento (kg/m ³)	Resíduos (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)
T1	0	0,5	489,71	0,00	959,83	1332,00
T2	5	0,5	489,71	24,49	935,34	1332,00
T3	10	0,5	489,71	48,97	910,86	1332,00
T4	15	0,5	489,71	73,46	886,37	1332,00

Fonte: Mello et al. (2023)

Com base nos aspectos abordados na fundamentação teórica desta pesquisa, é importante destacar a ampla gama de possibilidades de uso dos resíduos na indústria da construção civil. Por isso, é importante realizar pesquisas que visem avaliar e promover novas composições e aplicações, visando garantir confiança e segurança as empresas e clientes.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Neste capítulo serão abordadas as atividades a serem realizadas sequencialmente no programa experimental para alcançar os resultados deste trabalho. O fluxograma das atividades a serem realizadas, bem como os materiais utilizados e os ensaios realizados, podem ser observados na Figura 9.



Fonte: Autora (2024)

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados nesta campanha experimental realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade de Caxias do Sul são provenientes de Caxias do Sul (RS) e suas proximidades. Visando haver maior proximidade com a fonte dos recursos e ajudar a economia local. Os materiais foram separados em cinco itens, sendo eles água, cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e resíduo de usinagem.

3.1.1 Água

A água utilizada para este experimento é proveniente do Serviço Municipal de Água e Esgoto (SAMAÉ) que é responsável pelo tratamento e distribuição da água em Caxias do Sul.

3.1.2 Cimento

O aglomerante utilizado para os ensaios foi o Cimento Portland Pozolânico classe 32 (CPIV-32), produzido pela empresa Votorantim, escolhido devido as características e disponibilidade local. O CPIV-32 é um material composto de 15% a 50% de material pozolânico, possui maior durabilidade e alta resistência a compressão em idades avançadas. Para a confecção dos corpos de prova optou-se pela utilização de cimentos de mesmos lotes para todos os traços, para assim evitar possíveis diferenças nas características.

Em virtude da suscetibilidade do resíduo de usinagem à oxidação, o CP IV-32 foi escolhido por produzir concretos de menor porosidade reduzindo assim a entrada de dióxido de carbono (CO_2) e água no interior do concreto (Loch et al., 2023). Diversas características dos cimentos Portland e seus requisitos podem ser observados na NBR 16697 (ABNT, 2018). Algumas características do cimento escolhido podem ser observadas no Tabela 3.

Tabela 3 - Características CP IV-32

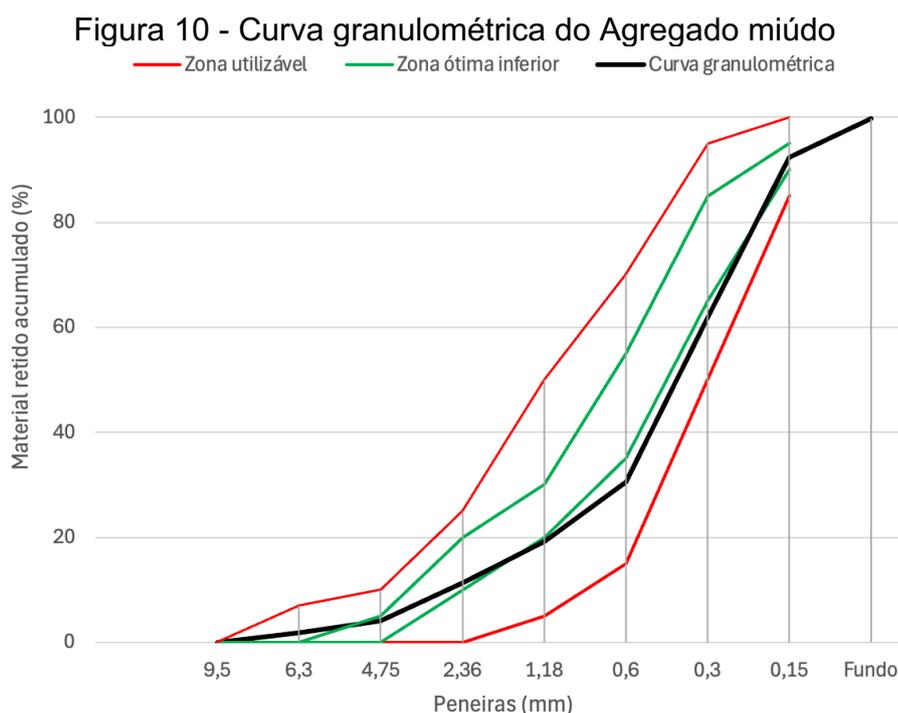
Tipo de cimento		CP IV
Classe		32
Finura	Resíduo na peneira 75 μm (%)	$\leq 8,0$
Tempo de início de pega (min)		≥ 60
Expansibilidade a quente (mm)		≤ 5
Resistência a compressão (MPa)	3 dias	$\geq 10,0$
	7 dias	$\geq 20,0$
	28 dias	$\geq 32,0$

Fonte: Adaptado NBR 16697 (ABNT, 2018)

3.1.3 Agregados

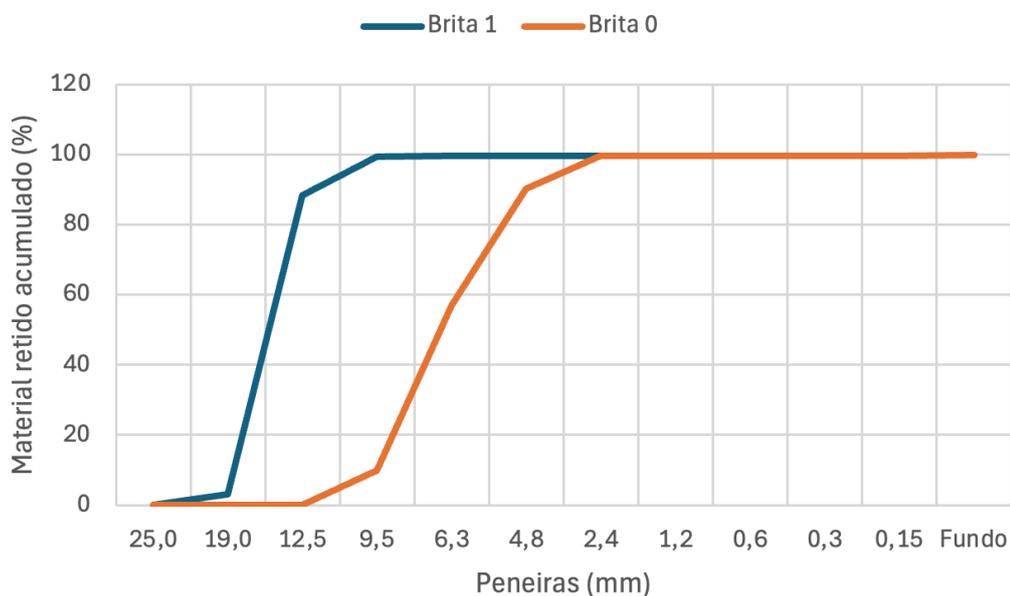
O agregado miúdo que foi utilizado na produção do concreto é a areia de rio facilmente encontrada em Caxias do Sul. Já agregado graúdo, que foi utilizado é de origem basáltica numa mistura de partes iguais de brita 1 e brita 0, de acordo com Mello (2024) e Loch (2023). Antes da utilização dos agregados miúdos e graúdos foi determinado diversos aspectos da composição dos agregados de acordo com normas vigentes para cada tópico.

A determinação da granulometria dos agregados foi dada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022), a qual indica limites para o agregado determinando a granulometria ideal, visando o melhor desempenho dos agregados no concreto. O ensaio consiste em coletar duas amostras de aproximadamente um kg cada para cada um dos agregados, para então passar os materiais pelas peneiras, realizando a pesagem de material retido em cada uma das peneiras e no fundo. Para o agregado miúdo a norma estabelece zona utilizável e zona ótima, com resultados para este trabalho apresentados na Figura 10 e valores descritos no Apêndice A. Já para os agregados graúdos a norma não estabelece as zonas utilizáveis e ótimas, os resultados dos agregados graúdos podem ser observados na Figura 11, respectivamente, e valores apresentados nos Apêndices B e C.



Fonte: Autora (2024)

Figura 11 - Curva granulométrica dos Agregados graúdos (Brita 0 e Brita 1)



Fonte: Autora (2024)

A dimensão máxima característica foi determinada a partir da abertura nominal da peneira em que o agregado apresenta um valor igual ou inferior a 5% na porcentagem retida acumulada. Já para o módulo de finura foi realizada a soma de todas as porcentagens retidas acumuladas para as peneiras da série normal, sendo uma grandeza adimensional. Os resultados da dimensão máxima característica e do módulo de finura podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados

	Agregado miúdo	Agregado graúdo - Brita 0	Agregado graúdo - Brita 1
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	9,5	12,5
Módulo de finura	2,19	5,98	7,00

Fonte: Autora (2024)

A massa específica do agregado miúdo foi determinada conforme a NBR 9776 (ABNT, 1987) pelo método do frasco de Chapman. O ensaio foi feito utilizando duas amostras e resultou na massa específica média de 2,585 g/cm³.

A determinação da massa específica do agregado graúdo foi dada conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). O preparo do ensaio consiste em pesar 3 kg de amostra do agregado graúdo que é retido na peneira 4,8 mm, lavar o material a fim de remover completamente os finos, colocar a amostra para secar na estufa a uma temperatura de (105 ± 5) °C até massa constante, remover e deixar esfriar o material. Com os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa específica agregados graúdos

	Brita 0	Brita 1
Massa específica do agregado seco (g/cm^3)	2,67	2,68
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3)	2,43	2,55
Absorção da água (%)	6,29	3,33

Fonte: Autora (2024)

A massa unitária dos agregados foi realizada com base no Método C da NBR 16972 (ABNT, 2021). Os resultados obtidos neste ensaio podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa unitária agregados

Material	Agregado graúdo – Brita 0	Agregado graúdo – Brita 1	Agregado miúdo
Massa unitária (g/cm^3)	1,36	1,41	1,60
Massa unitária (kg/m^3)	1359,02	1409,25	1603,54

Fonte: Autora (2024)

Após a realização dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos e graúdos conforme as normas técnicas vigentes foi possível determinar que os materiais a serem utilizados encontram-se dentro dos parâmetros adequado para a utilização no concreto. Esses resultados contribuem para que sejam alcançadas as propriedades mecânicas desejadas.

3.1.4 Resíduo de usinagem

O resíduo de usinagem utilizado é proveniente de uma empresa metalúrgica de Caxias do Sul. Após a coleta, os resíduos que possuíam comprimentos maiores foram cortados preferencialmente em tamanhos de 40 a 60 mm de

comprimento, sendo tamanhos indicados por Qureshi (2016) como sendo os que obtiveram melhores resultados nos ensaios propostos. O material utilizado pode ser observado no seu estado de coleta na Figura 12.

Figura 12 - Resíduo de usinagem utilizado



Fonte: Autora (2024)

Os resíduos de usinagem utilizados são do tipo tubular curto e em arco, conforme classificação da NBR ISO 3685 (ABNT, 2017). Esses resíduos são provenientes do aço SAE 4320 da Gerdau e possui massa específica de $7,85 \text{ g/cm}^3$.

3.2 FABRICAÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1 Definição da dosagem

Para a fabricação do concreto foi determinado um traço de referência como sendo 1:1,88:2,86 (Qureshi, 2016), considerando cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, numa proporção de 50% para cada um dos dois tipos. Já a relação água/cimento determinada inicialmente como sendo 0,5 com base em Mello (2024) e posteriormente foi ajustada para 0,6 para que se tivesse uma melhor trabalhabilidade. As porcentagens de adição de resíduo de usinagem no concreto foram determinadas com base em Bae et al. (2014), Qureshi (2016) e Shrivasta (2014), como sendo 1%, 1,5% e 2% da massa em quilograma dos materiais secos. A qual foram nomeados como TR sendo traço de referência, T1 com 1% de adição, T1,5 com 1,5% de adição e T2 com 2% de adição.

3.2.2 Fabricação do concreto

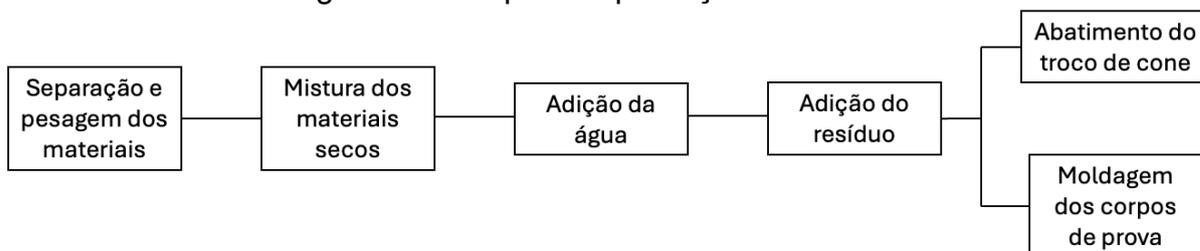
A fabricação do concreto sem e com adição de resíduos de usinagem foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade de Caxias do Sul. Na Tabela 7 é possível observar as quantidades de cada componente em cada traço, onde o único item a variar a quantidade foi o resíduo de usinagem, popularmente chamado de cavaco. Para a devida mistura do concreto foi determinada uma ordem de inserção de cada material, conforme convencionalmente é feito, podendo ser observada na Figura 13.

Tabela 7 - Componentes dos traços de concreto

Traço	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Cavaco (kg)	Água (L)
TR	1,0	1,88	2,86	0,0	0,6
T1	1,0	1,88	2,86	0,0574	0,6
T1,5	1,0	1,88	2,86	0,0861	0,6
T2	1,0	1,88	2,86	0,1148	0,6

Fonte: Autora (2024)

Figura 13 - Sequência produção do concreto



Fonte: Autora (2024)

3.2.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de provas para concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os moldes cilíndricos possuem a altura igual ao dobro do diâmetro, neste caso 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro e os corpos de provas prismáticos possuem a seção transversal quadrada de no mínimo 150 mm e comprimento de pelo menos 50 mm maior que o vão de ensaio e 50 mm maior que três vezes a dimensão transversal.

Na fase de preparação dos moldes foi aplicado nas faces internas um lubrificante que não reage com o cimento. Para então realizar o preenchimento dos moldes, bem como o adensamento por camadas respeitando valores da norma, e após o adensamento da última camada foi realizado o rasamento da superfície com a borda do molde utilizando uma régua metálica.

Nas primeiras 24 horas é realizada a cura dos corpos de prova de maneira que eles fiquem cobertos de material não reativo e não absorvente. Passado esse tempo os corpos de prova são armazenados em cura submersa até o momento do ensaio.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Este estudo envolveu a realização de ensaios nas propriedades do concreto, no estado fresco e endurecido, tanto com adição de resíduos, como sem a adição de resíduos de usinagem. No estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento do concreto e no estado endurecido os corpos de prova foram ensaiados para absorção de água por capilaridade, resistência a tração por compressão diametral, tração na flexão e compressão, esses ensaios foram realizados para os quatro traços previamente definido.

Os ensaios devem ser feitos a partir da realização da moldagem e cura de corpos de provas que devem seguir estritamente a NBR 5738 (ABNT, 2015) que rege esse tópico. O “*slump test*” ou abatimento do tronco de cone é utilizado para determinar a consistência do concreto, o abatimento do concreto ao final do ensaio é dado em milímetros, sempre de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). Para determinar a resistência a tração por compressão é realizada a aplicação da carga de forma constante diretamente no corpo de prova cilíndrico, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). Já a resistência à tração na flexão, descrita pela NBR 12142 (ABNT, 2010), na qual utiliza corpos de prova prismáticos e a aplicação da força ocorre de forma perpendicular as faces superior e inferior do corpo de prova, que por sua vez este apoiado próximo as extremidades. E, por fim, o ensaio de compressão, em que ocorre a aplicação de carga axial constante por minuto, cessando quando ocorre a queda abrupta no carregamento que indica o rompimento do corpo de prova, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.3.1 Abatimento do tronco de cone

A determinação da consistência dos quatro traços de concreto no estado fresco foi realizada a partir do abatimento do tronco de cone, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020). Para isso é necessário molde no formato cônico metálico com alças na parte superior e suportes na parte inferior, haste de adensamento com a ponta esférica, placa base, régua metálica e concha de seção U.

Primeiramente foi colocado a placa base sobre uma superfície rígida, horizontal, plana e livre de vibrações e o cone sobre a base. Para assim realizar o preenchimento do cone, utilizando a concha, em três camadas cada uma recebendo 25 golpes com a haste de adensamento, durante todo o processo de preenchimento foi necessário segurar com os pés os suportes do cone para que se mantenha estável e depois limpar a placa base para então retirar o cone verticalmente de forma cuidadosa. Imediatamente após a retirada do cone deve ser feita a medida da diferença da altura do molde e do corpo de prova, com resultado expresso em milímetros.

3.3.2 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade para os quatro traços de concreto foi realizada a partir da NBR 9779 (ABNT, 2012), aos 42 dias após a moldagem dos corpos de prova. Foram utilizados 2 corpos de prova cilíndricos por traço, totalizando 8 corpos de prova. Para isso é necessário um recipiente capaz de comportar os corpos de prova na vertical e um suporte para que os corpos de prova fiquem afastados do fundo do recipiente.

A preparação do ensaio consiste em secar os corpos de prova em estufa a (105 ± 5) °C até obter massa constante, resfriar e determinar a massa seca do corpo de prova, inserir os corpos de prova dentro do recipiente sobre o suporte, preencher com água o recipiente de modo que o nível da água permaneça constante a (5 ± 1) mm. Primeiramente é realizada a pesagem dos corpos de provas com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h contadas a partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, os mesmo precisam estar previamente enxugados com um pano úmido, a cada pesagem os corpos de prova voltam para o contato com a água, após a última pesagem os corpos de prova voltam para a cura submersa para posteriores ensaios.

Para o cálculo da absorção de água por capilaridade é realizado através da Equação 1.

$$C = \frac{A-B}{S} \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

- C Absorção de água por capilaridade (g/cm²);
- A Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado (g);
- B Massa do corpo de prova seco (g);
- S Área da seção transversal (cm²).

3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral para os quatro traços de concreto foi realizada a partir da NBR 7222 (ABNT, 2011), aos 7, 14 e 28 dias após a moldagem dos corpos de prova. Foram utilizados corpos de provas cilíndricos, sendo 2 corpos de prova por traço por data de ensaio, totalizando 24 corpos de prova. Para isso é necessário uma máquina para a aplicação da força e o uso de um dispositivo auxiliar que facilita o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio.

O ensaio consistiu em colocar o corpo de prova de maneira que ele fique posicionado de modo que o plano axial do corpo de prova coincida com o eixo de aplicação da força, colocar entre o corpo de prova e os pratos da máquina duas tiras de madeira, ajustar a máquina até que seja obtida uma compressão capaz de manter o corpo de prova no lugar e assim aplicar a carga de forma contínua até a ruptura. Para o cálculo do valor de tração é feito através da Equação 2, utilizando o valor da força aplicada.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \dots\dots\dots(2)$$

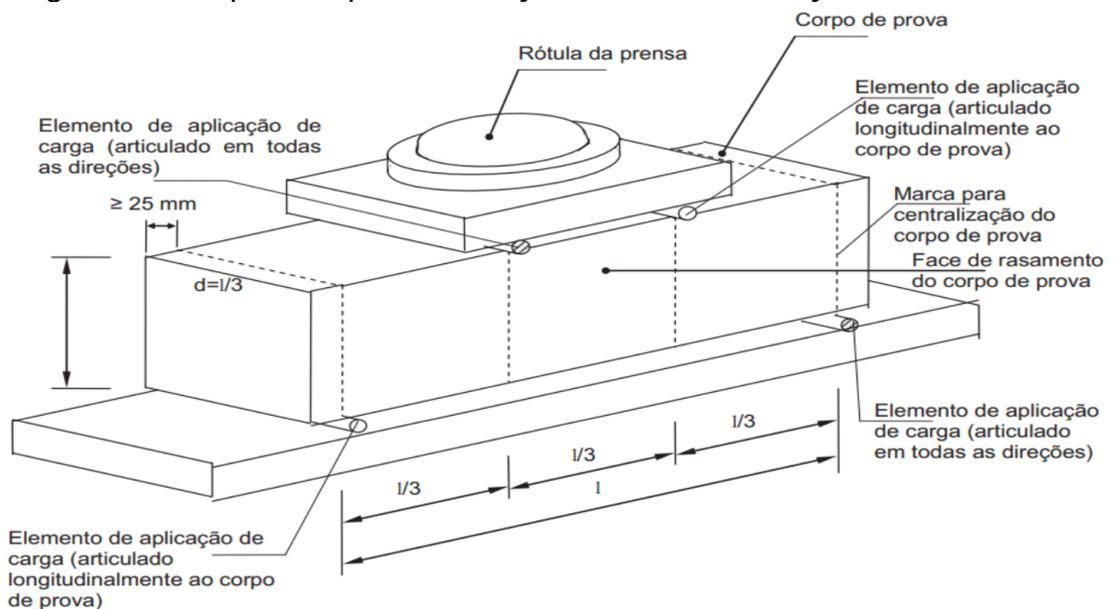
Onde:

- $f_{ct,sp}$ Resistência a tração por compressão diametral (MPa);
- F Força máxima obtida no ensaio (N);
- d Diâmetro do corpo de prova (mm);
- l Comprimento do corpo de prova (mm).

3.3.4 Tração na flexão

A determinação da resistência a tração na flexão para os quatro traços de concreto foi realizada a partir da NBR 12142 (ABNT, 2010), aos 28 e 49 dias após a moldagem dos corpos de prova. Foram utilizados corpos de provas prismáticos, sendo 3 corpos de prova por traço por data de ensaio, totalizando 24 corpos de prova. Para isso é necessário uma prensa que garanta a aplicação da força perpendicularmente às faces inferior e superior do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Dispositivo para realização do ensaio de tração na flexão



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010)

O ensaio consistiu em colocar o maior lado do corpo de prova de forma centralizada sobre os apoios e assim é aplicada a força de forma contínua até a ruptura, com a finalidade de provocar tração na parte inferior do corpo de prova. Após é realizada a medição do corpo de prova em sua seção de ruptura, para determinar a altura e largura média. Para o cálculo do valor de tração é feito através da Equação 3, utilizando o valor da força aplicada, considerando a largura e altura do corpo de prova como sendo 100 mm e a distância entre vãos de apoio como sendo 280 mm.

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \dots \dots \dots (3)$$

Onde:

$F_{ct,f}$ Resistência à tração na flexão (MPa);

- F Força máxima registrada no ensaio (N);
- l Dimensão entre vãos de apoio (mm);
- b Largura média do corpo de prova (mm);
- d Altura média do corpo de prova (mm).

3.3.5 Compressão

A determinação da resistência a compressão para os quatro traços de concreto foi realizada a partir da NBR 5739 (ABNT, 2018), aos 7, 28 e 53 dias após a moldagem dos corpos de prova. Foram utilizados corpos de provas cilíndricos, sendo 3 corpos de prova por traço por data de ensaio, totalizando 36 corpos de prova. Para isso é necessário uma máquina prensa que possua ajuste de altura, prato de compressão inferior fixado a máquina e prato de compressão superior provido de articulação.

O ensaio consistiu em colocar o corpo de prova verticalmente centrado no prato inferior e ajustada a altura do prato superior. Para então realizar uma força aplicada de forma contínua e sem choques sob o corpo de prova através do prato de compressão superior. O carregamento só deve parar quando houver uma queda na força, indicando a ruptura. Para então realizar o cálculo do carregamento através da Equação 4.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

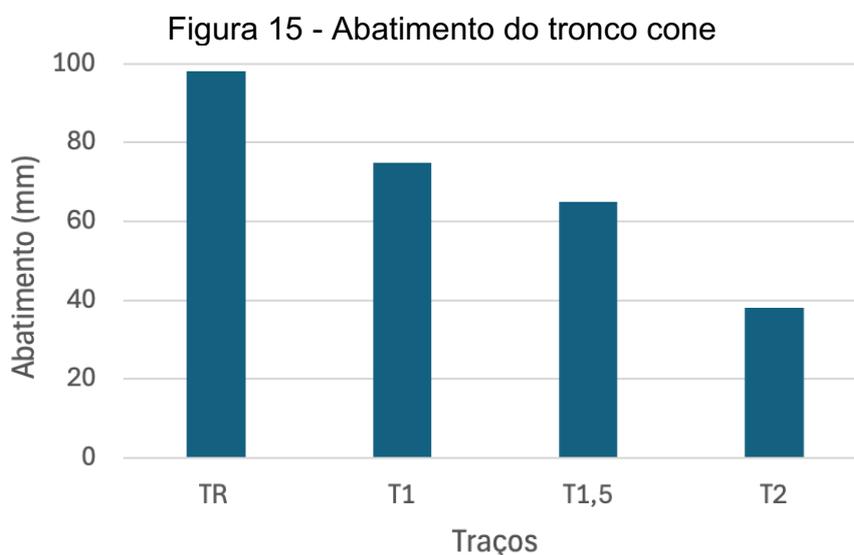
- f_c Resistência à compressão (MPa);
- F Força máxima alcançada no ensaio (N);
- D Diâmetro do corpo de prova (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados no âmbito do estudo proposto para este trabalho. Os resultados dos ensaios foram apresentados em cinco tópicos, sendo eles: abatimento do tronco cone, absorção de água por capilaridade, resistência a tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

4.1 ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

O ensaio de abatimento do tronco de cone realizado com base na NBR 16889 (ABNT, 2020), foi determinado para cada um dos quatro traços. Inicialmente a relação água cimento havia sido definida como sendo 0,5 e foi ajustada para 0,6 para todos os traços a fim de obter uma melhor trabalhabilidade do concreto. O abatimento do concreto obteve valores decrescentes conforme o aumento da adição de resíduo de usinagem, com valores de 98 mm, 75 mm, 65 mm e 38 mm, respectivamente para os traços TR, T1, T1,5 e T2. Esses valores podem ser observados na Figura 15 para a melhor visualização da diminuição do abatimento nos traços.



Fonte: Autora (2024)

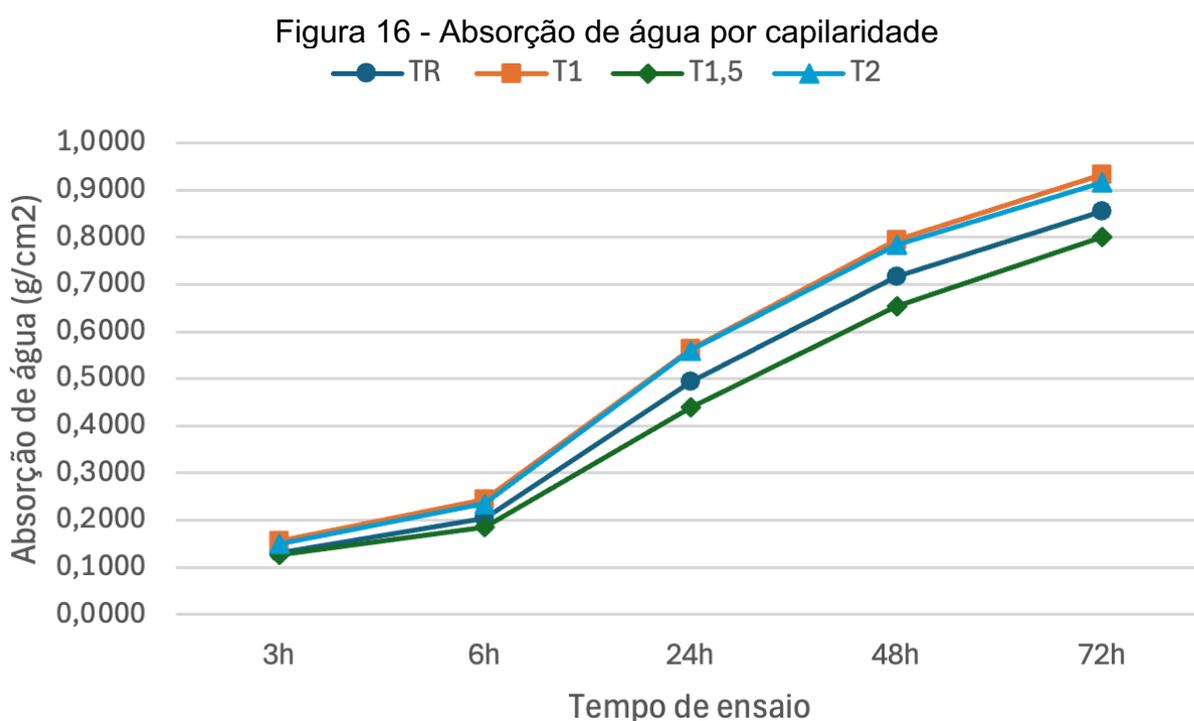
A partir dos resultados obtidos foi possível observar que o abatimento do tronco de cone teve uma redução de 23%, 34% e 61%, para os traços T1, T1,5 e T2 respectivamente. Esse decréscimo era esperado em virtude do aumento da adição de

resíduo, visto que conforme o aumento da adição menor se torna a trabalhabilidade do concreto.

De acordo com Shrivastava e Joshi (2014) e Qureshi, Raina e Rufaie (2016) os valores do abatimento do tronco cone decrescem conforme o aumento da adição de resíduo. Já para Soon-Oh et al. (2015) para manter a trabalhabilidade conforme o aumento da adição de resíduos ocorre o aumento da adição de superplastificante, indicando que se não houvesse essa adição de superplastificante a trabalhabilidade do concreto diminuiria conforme o aumento da adição dos resíduos. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados neste trabalho.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012), em que foram utilizadas duas amostras para cada um dos quatro traços, com verificação das massas no início do ensaio e em 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, considerando a área da seção transversal do corpo de prova como sendo 78,54 cm². Na Figura 16 é apresentado os resultados para todos os tempos de ensaio, com valores das massas coletadas para ensaio e resultados detalhados nos Apêndice D e E.



Fonte: Autora (2024)

Para concretos reforçados com resíduos metálicos o ideal é menor absorção de água possível, uma vez que a absorção de água esta diretamente ligada a permeabilidade do concreto. Quanto maior for a absorção mais água e potencialmente mais agentes agressivos podem penetrar no concreto, esse fator sendo particularmente crítico para concretos com resíduos metálicos pois a entrada de água e íons agressivos (cloretos e sulfatos) podem acelerar a corrosão dos componentes metálicos, comprometendo a durabilidade do concreto.

O menor índice de absorção de água por capilaridade observado no traço T1,5 pode ser justificado pela interação equilibrada entre o resíduo e a matriz cimentícia. Essa proporção parece ter alcançado um ponto de otimização onde o resíduo atua como um micro enchimento, reduzindo a porosidade e interrompendo a conectividade dos poros capilares. Além disso, há a possibilidade de o resíduo, nessa quantidade, ter favorecido a formação de uma estrutura mais densa e uniforme na matriz, preenchendo os espaços vazios sem criar aglomerações ou interferir negativamente no processo de hidratação do cimento.

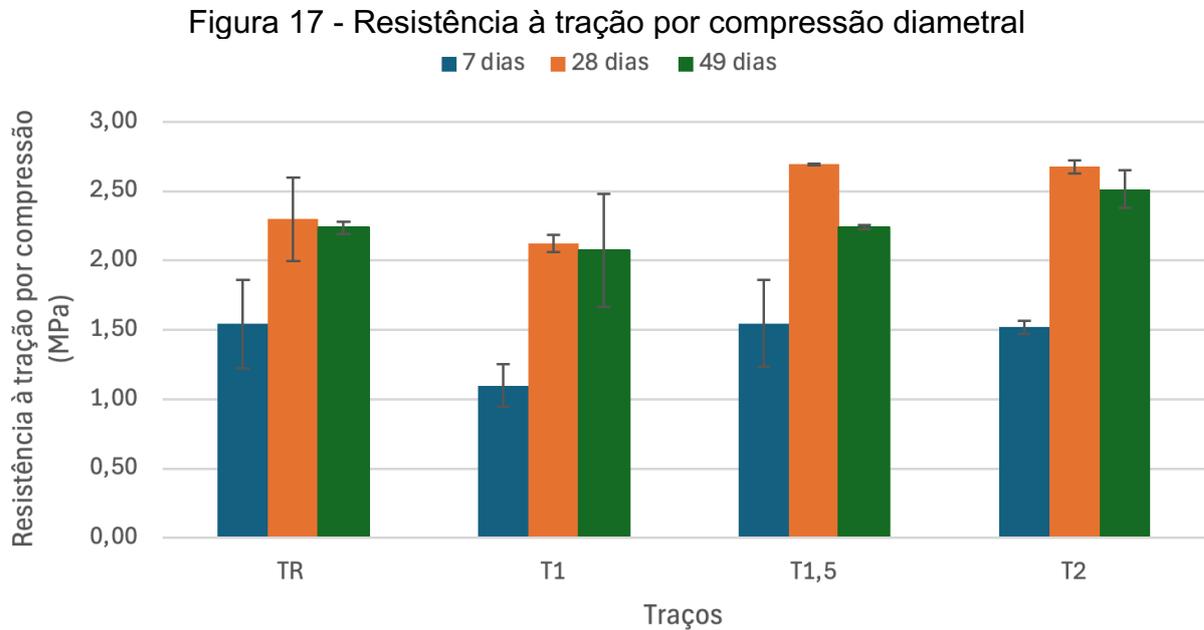
Em adições menores, como no traço T1, a quantidade de material pode ter sido insuficiente para impactar significativamente a redução da porosidade. Já em proporções maiores, como no traço T2, o excesso pode ter causado efeitos adversos, como aglomerações, micro defeitos ou alterações no equilíbrio da hidratação, que aumentam a conectividade dos poros. O traço de referência apresenta um comportamento típico de uma matriz cimentícia convencional, sem o benefício de preenchimento proporcionado pelo resíduo.

No caso deste trabalho o traço que obteve a menor absorção de água foi o traço T1,5, seguido pelo traço de referência, e pelos traços T2 e T1, estes últimos com valores muito próximos. Assim, a menor absorção do T1,5 reflete um equilíbrio ideal na proporção de adição, onde o resíduo atua de forma eficiente, melhorando a densidade e a estrutura da matriz, reduzindo a penetração de água por capilaridade.

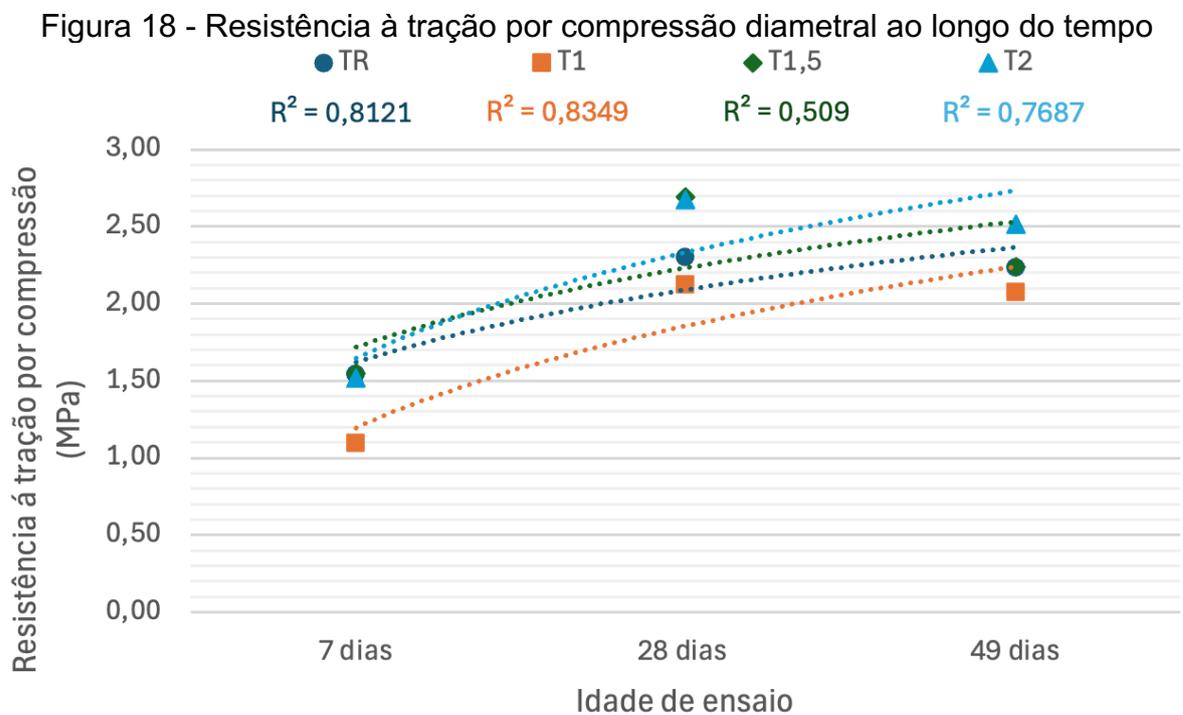
4.3 RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO

Na determinação da resistência à tração por compressão diametral foram utilizados seis corpos de prova cilíndricos para cada um dos quatro traços. Os rompimentos foram realizados com 7 dias, 28 dias e 49 dias. Os dados obtidos em laboratório foram processados para minimizar o impacto de possíveis falhas nos

materiais ou problemas de moldagem. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 17 e na Figura 18 e valores detalhados no Apêndice F.



Fonte: Autora (2024)



Fonte: Autora (2024)

A análise dos resultados permitiu observar que, aos 7 dias, o traço T1 apresentou uma redução de aproximadamente 28% na resistência à tração em

comparação com o traço de referência, enquanto os traços T1,5 e T2 mostraram valores semelhantes ao do traço de referência. Aos 28 dias, houve uma redução de cerca de 8% na resistência do traço T1 em relação ao traço de referência, e um aumento de aproximadamente 17% para os traços T1,5 e T2.

Em 49 dias o traço T1 obteve uma redução de aproximadamente 7% em relação ao traço de referência, o traço T1,5 alcançou praticamente o mesmo valor de resistência, enquanto o T2 obteve um aumento de 12%. Observa-se que, embora o traço de referência apresente os maiores valores absolutos em 7 dias, esse comportamento não se mantém nos tempos de cura mais avançados (28 e 49 dias), nos quais o traço T2 apresenta os melhores resultados em termos de resistência.

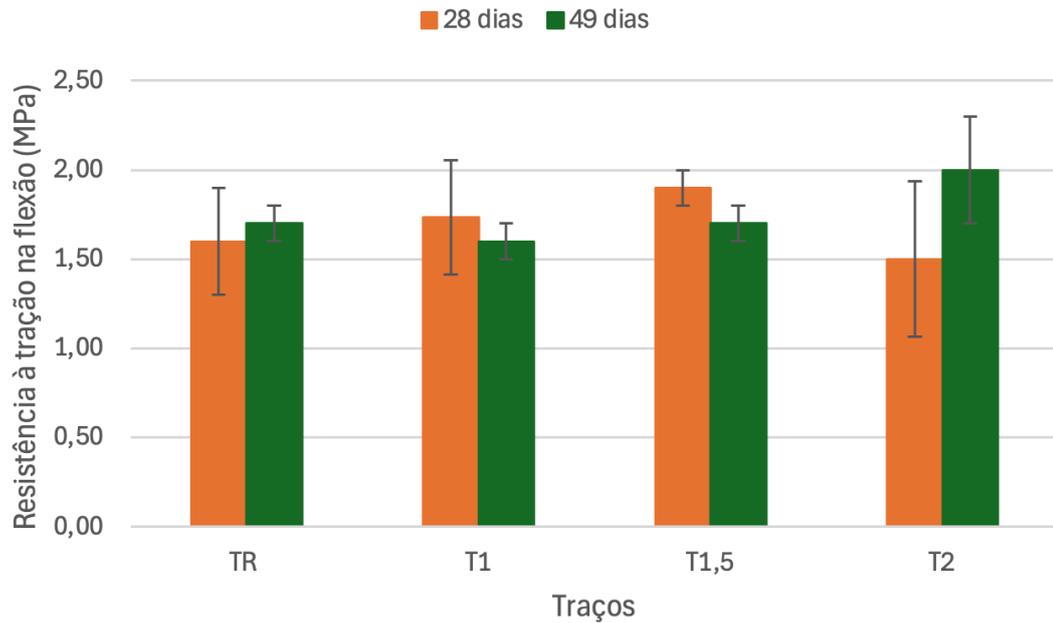
A linha de tendência do T2 apresenta o comportamento mais consistente e uniforme, com um crescimento contínuo da resistência ao longo do tempo. O coeficiente de determinação reflete uma boa correlação entre os dados experimentais e o modelo ajustado, mostrando que o traço com 2% de resíduo conseguiu equilibrar os efeitos do material adicionado na matriz cimentícia. Comparado ao traço T1, que apresenta resistência intermediária, e ao traço T1,5, que exibe comportamento mais disperso e menos previsível, o T2 demonstra ser o traço mais eficiente em termos de estabilidade e desempenho ao longo do tempo.

Portanto, o traço T2 apresenta o melhor desempenho geral, superando os demais traços, incluindo o traço de referência, em 28 e 49 dias, destacando-se como uma alternativa promissora, especialmente para aplicações onde a consistência e o ganho contínuo de resistência são mais relevantes do que o desempenho inicial.

Para Mello et al. (2023) o traço com 10% de substituição do agregado foi o que atingiu melhor resultado de resistência à tração por compressão diametral em relação ao traço de referência, seguido pelos traços com 5% e 15% de substituição respectivamente. O que indica que a adição de resíduo auxilia no aumento da resistência à tração por compressão assim como ocorreu neste trabalho.

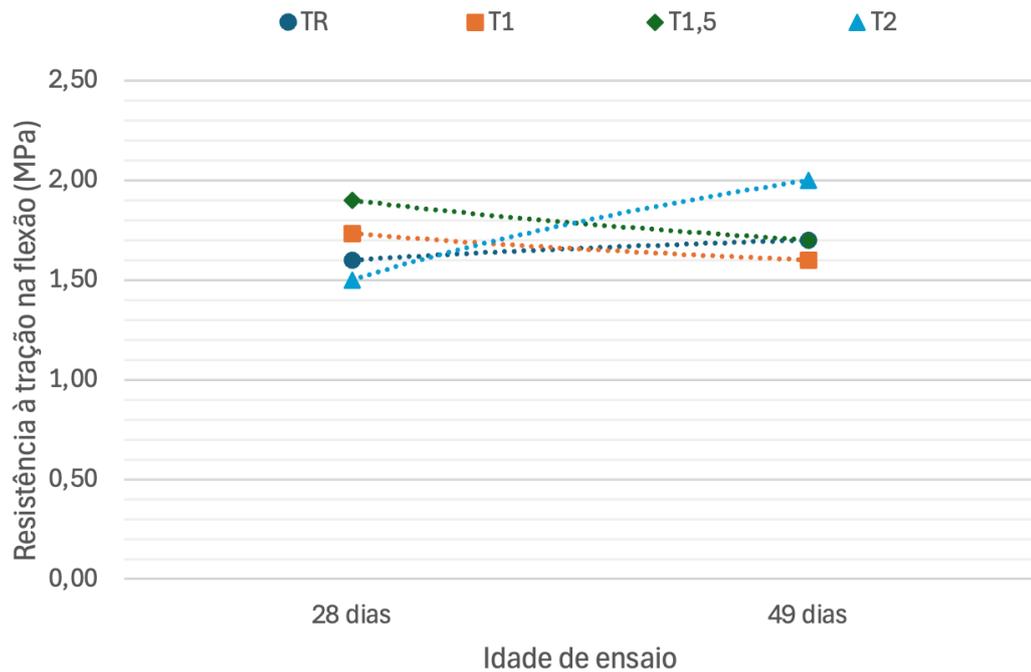
Para a determinar a resistência à tração na flexão, foram utilizados seis corpos de prova prismáticos para cada um dos quatro traços. Os rompimentos foram realizados com 28 dias e 49 dias. Os dados obtidos em laboratório foram processados para reduzir possíveis interferências de materiais com falhas ou problemas de moldagem. Os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 19 e na Figura 20 e valores detalhados encontram-se no Apêndice G.

Figura 19 – Resultados da resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2024)

Figura 20 – Resultados da resistência à tração na flexão ao longo do tempo



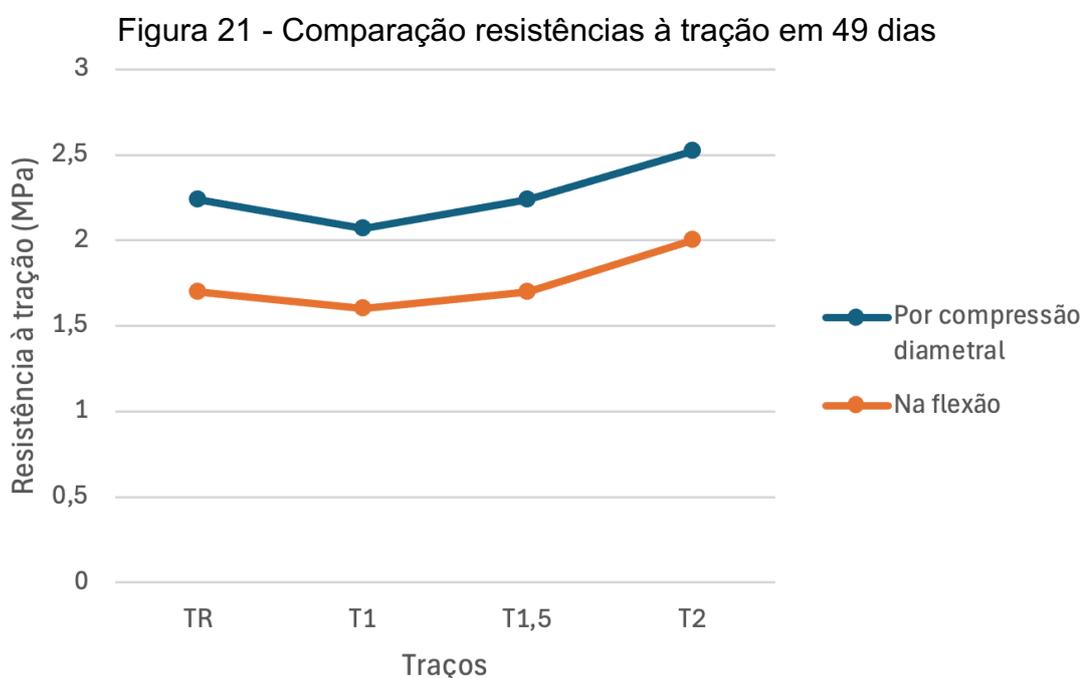
Fonte: Autora (2024)

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que com 28 dias o T2 teve uma redução de aproximadamente 6% no valor da resistência a tração em relação ao traço de referência, enquanto os traços T1 e T1,5 obtiveram aumento de 8% e 18% respectivamente em relação ao traço de referência. Já em 49 dias, o traço

T1 obteve uma redução de 6% em relação ao traço de referência, o traço T1,5 obteve em média o mesmo resultado, enquanto o traço T2 obteve um aumento de 18%.

Loch et al. (2023) obtiveram o melhor resultado como sendo um aumento de 19% com o traço com 0,75% de adição de resíduo, seguido por 2,25%, 1,25% e 1,75%, respectivamente, esse aumento pode estar ligado à união do resíduo de usinagem ao concreto.

Após os resultados aos 49 dias dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e na flexão foi possível realizar a comparação entre ambos os resultados. Os resultados dessa comparação podem ser observados na Figura 21.



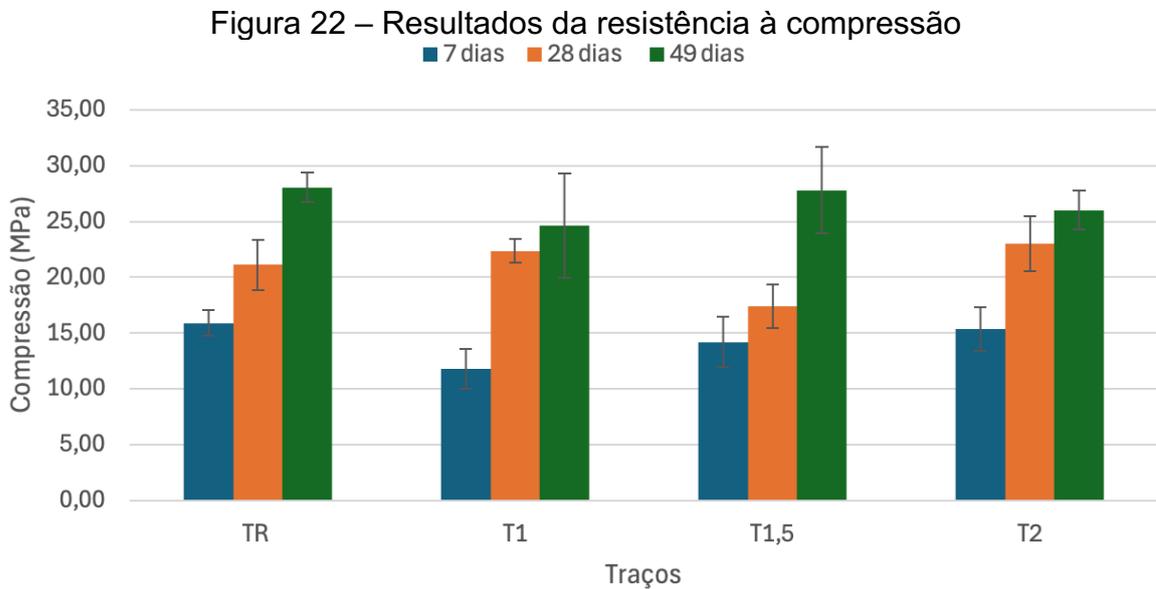
Fonte: Autora (2024)

Para todos os traços houve um aumento proporcional de aproximadamente 30% da resistência à tração na flexão para a resistência à tração por compressão. Esse aumento constante em todos os traços sugere uma relação direta entre esses dois ensaios, independentemente do valor de adição de resíduo de usinagem.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

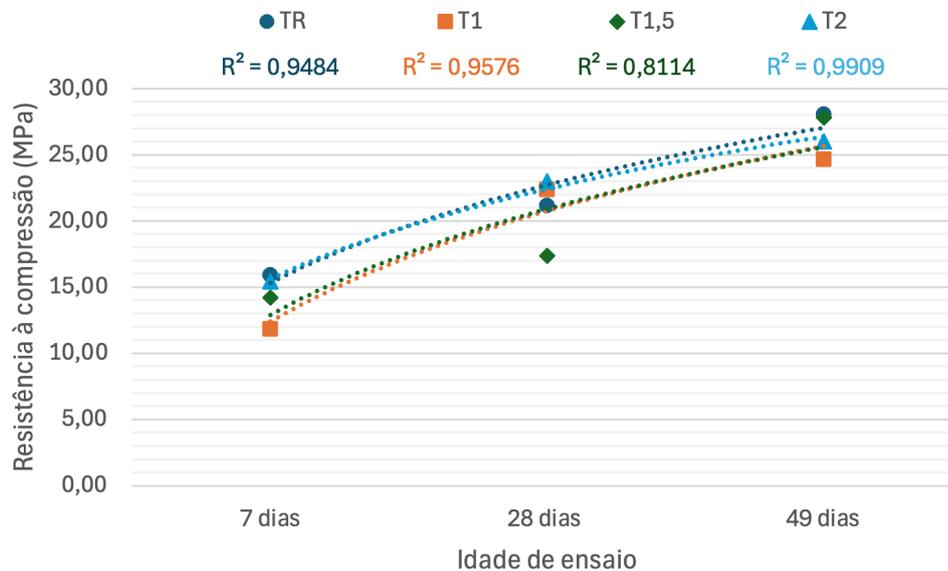
Para determinar a resistência à compressão, foram utilizados nove corpos de prova cilíndricos para cada um dos quatro traços. Os rompimentos foram realizados com 7 dias, 28 dias e 49 dias. Os dados obtidos em laboratório foram processados

para reduzir possíveis interferências de materiais com falhas ou problemas de moldagem. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 22 e na Figura 23 e valores detalhados encontram-se no Apêndice H.



Fonte: Autora (2024)

Figura 23 – Resultados da resistência à compressão ao longo do tempo



Fonte: Autora (2024)

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que com 7 dias os traços T1, T1,5 e T2 tiveram uma redução, respectivamente, de 25%, 10% e 3% no valor da resistência à compressão em relação ao traço de referência. Já em 28 dias o traço com T1,5 obteve uma redução de aproximadamente 17% em relação ao traço de

referência, enquanto os traços T1 e T2 obtiveram um aumento de 5% e 8%, respectivamente.

Em 49 dias os traços T1 e T2 obtiveram uma redução de 12% e 8% respectivamente, enquanto o traço com 1,5% de adição obteve praticamente o mesmo valor do traço de referência. Com base nas linhas de tendência foi possível observar que o traço de referência foi o que obteve o melhor resultado, sendo seguido pelos traços T2, T1 e T1,5, todos obtendo valores muito próximos.

Conforme Qureshi, Raina e Rufaie (2016) e Shrivastava e Joshi (2014) o traço com 1,5% de adição de resíduo foi o que obteve melhor resultado de resistência à compressão, em contrapartida o traço com 2% de adição obteve uma redução no valor da resistência em relação ao traço de referência. Loch et al. (2023) obteve o melhor resultado para compressão no traço com 1,75% de adição, seguido por 0,75%, 2,25% e 1,25%, todos com melhor resultado em relação ao traço de referência.

Para Mello et al. (2023) o traço com 10% de substituição do agregado foi o que atingiu melhor resultado em relação ao traço de referência, seguido pelos traços com 15% e 5% de substituição respectivamente. No entanto Soon-Oh et al. (2015) obtiveram resultados uma ligeira diminuição conforme o aumento da adição de resíduos.

Os resultados de Soon-Oh et al. (2015) vão de encontro aos resultados deste trabalho para 7 dias e 49 dias de ensaio de resistência à compressão. Já Qureshi, Raina e Rufaie (2016), Shrivastava e Joshi (2014) e Mello et al. (2023) estão alinhados com os resultados obtidos em 28 dias de ensaio.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi investigada a influência da adição de diferentes porcentagens de resíduo de usinagem nas propriedades mecânicas do concreto, com ênfase na resistência à compressão, tração por compressão e tração na flexão. Conclui-se ao final da pesquisa que os resultados obtidos são consistentes e apresentam relação com outros estudos utilizados como base. De forma geral, o concreto reforçado com resíduo metálico oferece resultados esperados e satisfatórios para os traços com 1,5% de adição e 2% de adição de resíduo.

No estado fresco o ensaio de abatimento do tronco de cone foi utilizado para analisar o comportamento do concreto com adição de resíduo metálico, onde foi observado a redução no valor do abatimento conforme o aumento da adição. Para o ensaio de absorção de água por capilaridade o traço T1,5 foi o que obteve a menor absorção. Este traço tende a ser o que terá melhor durabilidade e resistência a processos de degradação, como a corrosão das partículas metálicas.

Os concretos reforçados com resíduo metálico no ensaio de resistência à tração por compressão diametral obtiveram aumento do valor para os traços T2 e T1,5 em relação ao traço de referência. E o ensaio de resistência à tração na flexão o traço que obteve o melhor desempenho foi o T2, o T1,5 obteve praticamente o mesmo valor do que o traço de referência. Esses resultados são justificados pela resistência à tração do aço ser mais elevada do que a do concreto e pela união do resíduo metálico à matriz cimentícia.

Referente ao comportamento do concreto com adição de resíduo de usinagem na resistência a compressão observou-se uma tendência a diminuir em relação ao traço de referência. Essa diminuição não foi considerada significativa e também pode estar ligada a problemas na moldagem. Levando em consideração que o propósito do concreto reforçado com resíduo metálico é aumentar a resistência à tração, o qual foi encontrado nesta pesquisa.

Os resultados desta pesquisa foram satisfatórios, destacando os traços T1,5 e T2 como os que obtiveram melhores resultados nos ensaios propostos. Para esses traços foi possível afirmar com um grau considerável de precisão que houve uma melhora no comportamento mecânico do concreto reforçado com resíduo metálico. Esse aprimoramento pode estar relacionado ao fato de os resíduos serem de aço, material com resistência mecânica superior à da areia. Além disso, a diversidade de

formas e tamanhos dos resíduos, até certos teores, possibilita um preenchimento mais eficaz dos vazios na matriz do concreto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a grande variedade de assuntos que podem ser abordados em pesquisas com temas semelhantes ao deste trabalho, são apresentadas a seguir algumas sugestões para estudos futuros:

- a) identificar porcentagens de adição de resíduo metálicos diferentes, com menores diferenças de quantidade de material entre os traços;
- b) adotar uma menor relação água/aglomerante;
- c) repetir os traços, alterando a ordem de mistura dos materiais para verificar a influência no estado fresco e endurecido.

REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 429-441, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTALAND. **Básico sobre cimento**. Disponível em: < <https://abcp.org.br/cimento/> >

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e Concretos Endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2017.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155f. Dissertação (Pós-graduação). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

Bae S, Jeon J, Kwon S, Lee H, Kim S, 2014. Characteristics evaluation of lathe scrap for manufacturing fiber reinforced cementitious composites. **Journal of the Korean Society of Disaster information**, v. 10, n. 3, p. 432-441, 2014.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2 ed. Nova Iorque, NY: Taylor and Francis, 2007. 624 p. ISBN 0367446235

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui o Código Civil. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1-22, 3 ago. 2010. PL 203/1991.

BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibra de aço. **Caderno de graduação**, Maceió, AL, v. 3, n. 1, p. 43-56, nov. 2015.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behavior of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2713-2722, 2011.

ELSAIGH, W. A.; ROBBERTS, J. M.; KEARSLEY, E. P. Modeling the behavior of steel-fiber reinforced concrete ground slabs. **Journal of Transportation Engineering**, v. 137, n. 12, p. 882-888, dez. 2011.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977. 751 p. ISBN 9788521208594

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. **Fifth International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC)**, Lyon, 2000.

FIGUEREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil II da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2011.

HOLANDA, K. M. A.; PINHEIRO, L. M. Desempenho estrutural de concretos reforçados com fibras. **43º Congresso Brasileiro do Concreto**, Anais, Foz do Iguaçu – PR, 2001.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Indústria do Aço em números 2023**. Disponível em <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/06/AcoBrasil_Minianuario_2023.pdf>

JOHNSTON, Colin D. **Fibre-reinforced cement and concrete: advances in concrete technology**. 1 ed., CRC Press, 2019, 380 p.

KWON, S.; BAE, S.; LEE, H.; KIM, S.; PARK, J. Influence of Measurements of lathe scrap on the characteristics of fiber reinforced cementitious composites. **Journal of the Korean Society of Disaster information**. v. 10, n. 3, p. 432-441, 2015.

LEE, M. K.; BARR, B. I. G. Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 25, n. 3, p. 321-332, abr. 2003.

LOCH, A.; GURKEWICZ, R. P.; WANDERLIND, A.; PICCININI, A. C.; PIVA, J. H.; ANTUNES, E. G. P. Análise do efeito da adição de cavacos de aço nas propriedades mecânicas do concreto. **Cerâmica Industrial Revista do técnico cerâmico brasileiro**, v. 28, n. 1, out. 2023.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**, 3 ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2015. 408 p. ISBN 9788521208464

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. 1. ed. London: CRC Press, 1996. 208 p. ISBN 978-1-138-41404-4 MEHTA, P. K.;

MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. Ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2008.

MELLO, P. H. C.; ALTOÉ, S. P. S.; GIDRÃO, G. M. S. Caracterização mecânica do concreto reforçado por fibras de limalha de aço. **Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, Foz do Iguaçu, PR, v. 8, p. 1-7, out. 2023.

MELLO, P. H. C.; ALTOÉ, S. P. S.; GIDRÃO, G. M. S.; RIBEIRO, O. G. N.; THOMAZOTTI, P. M. Análise mecânica de concretos com substituições parciais de agregados por limalha de aço. **Revista Matéria**, v. 29, n. 1, 2024

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. São Paulo, SP: Brookman Editora Ltda., 2010. 448 p. ISBN 978-858260-071-9

QURESHI, Z. N.; RAINA, Y. M.; RUFAIE, S. M. A. Strength characteristics analysis of concrete reinforced with lathe machine scrap. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 4, n. 4, p. 210-217, jul./ago. 2016.

SALVADOR, R. P.; FERNANDES, J. F.; FIGUEIREDO, A. D. Assessment of concrete reinforced with low content of fibres for structural purposes according to standard. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 961-974, 2015

SANTOS, Sandro Cardoso. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1 ed. Artliber, 2015. 248 p. ISBN 8588098385.

SHRIVASTAVA, P.; JOSHI, Y. P. Reuse of lathe waste steel scrap in concrete pavements. **International Journal of Engineering research and Applications**, v. 4, n.12, p. 45-54, dez. 2014

SILVA, M. A. da. **Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular**. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2008.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números do setor**. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php> >

SOON-OH, K.; SU-HO, B.; HYUN-JIN, L.; KIM, S. W.; JUNG-LUN, P. Influence of Measurements of Lathe Scrap on the Characteristics of Fiber Reinforced Cementitious Composites **Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures**, v. 6, n. 2, p. 70-76, jun. 2015.

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

APÊNDICE A - GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO

Amostra Abertura das peneiras (mm)	M1 (g)	1001,4	M2 (g)	1000,12	(%) retida média	(%) retida acumulada média
	Amostra 1		Amostra 2			
	Determinação (g)	(%) retida	Determinação (g)	(%) retida		
25,0	0	0%	0	0%	0%	0%
19,0	0	0%	0	0%	0%	0%
12,5	0	0%	0	0%	0%	0%
9,5	0	0%	0	0%	0%	0%
6,3	16,63	2%	20,03	2%	2%	2%
4,8	22,87	2%	21,38	2%	2%	4%
2,4	70,55	7%	73,65	7%	7%	11%
1,2	79,57	8%	78,45	8%	8%	19%
0,6	112,24	11%	115,31	12%	12%	31%
0,3	302,73	30%	321,54	32%	31%	62%
0,15	318,82	32%	293,8	30%	31%	92%
Fundo	75,21	8%	72,58	7%	7%	100%
Total	998,62	100%	996,74	100%	100%	
Perda (%)	2,78	0%	3,38	0%	0%	

APÊNDICE B – GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO (BRITA 0)

Amostra	M1 (g)	999,6	M2 (g)	1001,04	(%) retida média	(%) retida acumulada média
Abertura das peneiras (mm)	Amostra 1		Amostra 2			
	Determinação (g)	(%) retida	Determinação (g)	(%) retida		
25,0	0	0%	0	0%	0%	0%
19,0	0	0%	0	0%	0%	0%
12,5	0	0%	0	0%	0%	0%
9,5	98,39	10%	98	10%	10%	10%
6,3	471,99	47%	471,07	47%	47%	57%
4,8	320,72	32%	346,33	35%	33%	90%
2,4	104,91	10%	80,62	8%	9%	100%
1,2	0	0%	0	0%	0%	100%
0,6	0	0%	0	0%	0%	100%
0,3	0,49	0%	0,42	0%	0%	100%
0,15	0,28	0%	0,3	0%	0%	100%
Fundo	1,04	0%	1,4	0%	0%	100%
Total	997,82	100%	998,14	100%	100%	
Perda (%)	1,93	0%	2	0%	0%	

APÊNDICE C – GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO (BRITA 1)

Amostra	M1 (g)	999,6	M2 (g)	1001,04	(%) retida média	(%) retida acumulada média
Abertura das peneiras (mm)	Amostra 1		Amostra 2			
	Determinação (g)	(%) retida	Determinação (g)	(%) retida		
25,0	0	0%	0	0%	0%	0%
19,0	45,04	5%	16,42	2%	3%	3%
12,5	821,9	82%	881,7	88%	85%	88%
9,5	125,13	13%	97,51	10%	11%	99%
6,3	3,41	0%	1,44	0%	1%	100%
4,8	0	0%	0	0%	0%	100%
2,4	0	0%	0	0%	0%	100%
1,2	0	0%	0	0%	0%	100%
0,6	0	0%	0	0%	0%	100%
0,3	0	0%	0	0%	0%	100%
0,15	0,54	0%	0,5	0%	0%	100%
Fundo	2,58	0%	2,84	0%	0%	100%
Total	998,6	100%	1000,41	100%	100%	
Perda (%)	1	0%	0,63	0%	0%	

**APÊNDICE D – MASSAS COLETADAS PARA ENSAIO DE ABSORÇÃO DE
ÁGUA POR CAPILARIDADE**

Traço	CP	Tempo de ensaio					
		0h	3h	6h	24h	48h	72h
TR	1	3296,8	3310,04	3317,18	3343,52	3362,56	3373,95
	2	3298,82	3306,21	3310,54	3329,67	3345,54	3356,07
T1	1	3376,84	3388,46	3395,07	3420,59	3439,72	3451,76
	2	3306,24	3319,34	3326,48	3351,15	3368,18	3377,96
T1,5	1	3371,91	3381,96	3386,25	3405,69	3423,14	3435,38
	2	3427,92	3437,96	3442,75	3463,1	3479,38	3490,13
T2	1	3467,92	3480,99	3488,54	3516,44	3534,64	3544,76
	2	3481,98	3492,58	3498,26	3521,48	3538,52	3549,09

APÊNDICE E - RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Traço	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
	3h	6h	24h	48h	72h
TR	0,1313	0,2044	0,4938	0,7161	0,8556
T1	0,1574	0,2449	0,5644	0,7946	0,9335
T1,5	0,1279	0,1857	0,4390	0,6537	0,8001
T2	0,1507	0,2349	0,5604	0,7847	0,9164

**APÊNDICE F – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tempo	Traço	Resultados (MPa)	Média	Desvio Padrão
7 dias	TR	1,77	1,54	0,32
		1,32		
	T1	0,99	1,10	0,15
		1,21		
	T1,5	1,77	1,55	0,31
		1,32		
	T2	1,55	1,52	0,05
		1,49		
28 dias	TR	2,51	2,30	0,30
		2,08		
	T1	2,17	2,12	0,06
		2,08		
	T1,5	2,70	2,69	0,01
		2,69		
	T2	2,64	2,68	0,05
		2,71		
49 dias	TR	2,20	2,24	0,05
		2,27		
	T1	2,36	2,07	0,41
		1,78		
	T1,5	2,25	2,24	0,01
		2,23		
	T2	2,61	2,52	0,13
		2,42		

APÊNDICE G – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Tempo	Traço	Resultados (MPa)	Média	Desvio Padrão
28 dias	TR	1,3	1,60	0,30
		1,6		
		1,9		
	T1	2,1	1,73	0,32
		1,6		
		1,5		
	T1,5	1,9	1,90	0,10
		1,8		
		2,0		
	T2	2,0	1,50	0,44
		1,2		
		1,3		
49 dias	TR	1,6	1,70	0,10
		1,8		
		1,7		
	T1	1,6	1,60	0,10
		1,5		
		1,7		
	T1,5	1,7	1,70	0,10
		1,8		
		1,6		
	T2	2,3	2,00	0,30
		2		
		1,7		

APÊNDICE H – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tempo	Traço	Resultados (MPa)	Média	Desvio Padrão
7 dias	TR	17	15,90	1,15
		16		
		14,7		
	T1	12	11,80	1,81
		9,9		
		13,5		
	T1,5	15,6	14,20	2,25
		11,6		
		15,4		
	T2	17,3	15,40	1,95
		15,5		
		13,4		
28 dias	TR	20,6	21,13	0,61
		21		
		21,8		
	T1	19,6	22,37	2,54
		24,6		
		22,9		
	T1,5	16,5	17,37	1,03
		18,5		
		17,1		
	T2	25,4	23,00	2,45
		23,1		
		20,5		
49 dias	TR	28,3	28,03	1,32
		26,6		
		29,2		
	T1	29,6	24,63	4,64
		23,9		
		20,4		
	T1,5	24,6	27,80	3,87
		26,7		
		32,1		
	T2	24,1	26,00	1,73
		26,4		
		27,5		