



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO
PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

FABIANO NAZARIO SANTOS

MECÂNICA DA FRATURA NÃO LINEAR APLICADA AO ESTUDO
DO CONCRETO

Itajubá

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO
PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

FABIANO NAZARIO SANTOS

MECÂNICA DA FRATURA NÃO LINEAR APLICADA AO ESTUDO
DO CONCRETO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica como
parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Hídrica.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Gonçalves

Itajubá

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO
PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

FABIANO NAZARIO SANTOS

MECÂNICA DA FRATURA NÃO LINEAR APLICADA AO ESTUDO
DO CONCRETO

Dissertação aprovada por banca examinadora em 23 de maio de 2025, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia Hídrica*.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Paulo César Gonçalves
Profa. Dra. Valquíria Claret dos Santos
Prof. Dr. Lucas Ramon Roque da Silva
Dra. Maria Auxiliadora de Barros Martins

Itajubá

2025

Sumário

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivos	9
1.1.1 Objetivos específicos	9
1.2 Justificativa	10
1.3 Planejamento do trabalho	11
1.4 Revisão bibliométrica	13
1.5 Estado da arte	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Etapas de deformação progressiva em elementos de concreto sujeitos à flexão simples – Estádios de deformação	20
2.2 Mecânica da fratura	22
2.2.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica – MFLE:	24
2.2.2 Mecânica da Fratura Não Linear – MFNL:	26
2.3 Estudo da fratura para vigas de concreto reforçadas com fibras	28
2.3.1 Modelo de fratura duplo-K	29
2.3.2 Modelo de efeito de contorno	29
2.3.3 Modelo de fissura fictícia	30
2.3.4 Modelo de fissura efetiva	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais	32
3.1.1 Cimento	32
3.1.2 Resíduo do Corte de mármore e granito (RCMG)	34
3.1.3 Aditivo Superplastificante	35
3.1.4 Fibras PVA	36
3.1.5 Agregado miúdo – Areia média natural de rio	37
3.1.6 Agregado graúdo – Brita 0	37
3.2 Ensaios de caracterização	38
3.3 Métodos	39
3.3.1 Cimento	40
3.3.2 Areia natural - Massa específica e massa específica aparente	41
3.3.3 Areia natural – Análise granulométrica agregado miúdo	48
3.3.4 Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.	48
3.4 Estudo da Dosagem	49
3.4.1 Dosagem concreto convencional	49
3.4.2 Dosagem concreto autoadensável:	50
3.5 Ensaios de Concreto	51
3.5.1 Concreto estado fresco	51
3.5.2 Concreto estado endurecido	53
4 RESULTADOS	62
4.1 Caracterização	62
4.1.1 Cimento	62
4.1.2 Resíduo de Corte de mármore e granito (RCMG)	63
4.1.3 Areia natural - Massa específica e massa específica aparente	63
4.1.4 Areia natural – Análise granulométrica agregado miúdo	64
4.2 Concreto no estado fresco	49
4.2.1 Dosagem	49

4.2.2 Concreto convencional	49
4.2.3 Concreto autoadensável:	50
4.3 Comportamento Mecânico do Concreto	51
4.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico	51
4.3.2 Módulo de elasticidade estático	52
4.3.3 Ensaio de compressão	53
4.3.4 Ensaio de resistência à tração na flexão	53
5 CONCLUSÃO	63
APÊNDICE A	66
APÊNDICE B	69
APÊNDICE C	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

Resumo

Com o crescimento contínuo da construção civil, a busca por materiais inovadores vem demandando cada vez mais pesquisas e estudos para sua implantação no mercado de trabalho. O estudo de concretos mais duráveis contribui para a construção de infraestruturas mais resistentes e sustentáveis, reduzindo custos com reparos e aumentando a segurança das edificações e obras públicas no país. Com o intuito de promover uma maior durabilidade das estruturas de edificações e de elementos de concreto para obras de infraestrutura e grandes obras o uso de concretos especiais, como o CAA, vem se tornando, também, uma alternativa muito promissora no mercado da construção civil. Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas e a resistência à fissuração de elementos de concreto, em escala reduzida, mediante ensaios de flexão a três pontos. Para esse propósito, foram realizadas análises experimentais a partir dos resultados obtidos com o sistema CMOD, o qual permite coletar curvas de carga x alongamento por meio de Clip-Gage instalado em entalhes pré-existentes e controlados na parte inferior dos espécimes, possibilitando a mensuração precisa da abertura de fissuras. O programa de ensaios contou com a investigação de quatro tipos de concreto: o Concreto Convencional (CCV), o Concreto Convencional Reforçados com Fibras de PVA (álcool polivinílico) (CCVRFP), o Concreto Autoadensável (CAA) e o Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de PVA (CAARFP), sendo este último desenvolvido com a incorporação de resíduos nos traços. Os resultados mostram, que o concreto autoadensável (CAA), até mesmo sem adição de fibras, superou o concreto convencional (CCV). Observou-se, principalmente, um aumento de quase 25% na resistência inicial à fissura. Isso revela uma melhor coesão da matriz e uma melhor resposta mecânica em relação a abertura da primeira fissura. Espera-se ainda com essa pesquisa contribuir para a escolha de materiais sustentáveis e eficientes, associando a adição de resíduos e fibras a um desempenho estrutural aprimorado e adequado às exigências dessas infraestruturas.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável (CAA), concreto convencional (CCV), fissuras.

Abstract

With the continuous growth of the construction industry, the search for innovative materials has increasingly required research and studies for their implementation in the job market. The study of more durable concretes contributes to the construction of stronger and more sustainable infrastructures, reducing repair costs and increasing the safety of buildings and public works in the country. In order to promote greater durability of building structures and concrete elements for infrastructure and large-scale works, the use of special concretes, such as Self-Compacting Concrete (SCC), has also become a very promising alternative in the construction market. Thus, this study aims to evaluate the mechanical properties and cracking resistance of concrete elements, on a reduced scale, through three-point bending tests. For this purpose, experimental analyses were carried out based on the results obtained using the CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) system, which allows the collection of load versus displacement curves using a clip-gage installed in pre-existing and controlled notches on the bottom face of the specimens, enabling accurate measurement of crack openings. The testing program involved the investigation of four types of concrete: Conventional Concrete (CC), Conventional Concrete Reinforced with PVA (Polyvinyl Alcohol) Fibers (CCVRFP), Self-Compacting Concrete (SCC), and Self-Compacting Concrete Reinforced with PVA Fibers (SCCVRFP), the latter developed with the incorporation of waste materials into the mix. The results show that self-compacting concrete (SCC), even without the addition of fibers, outperformed conventional concrete (CC). Notably, an increase of nearly 25% in the initial cracking resistance was observed. This indicates better matrix cohesion and improved mechanical response in relation to the formation of the first crack. This research is expected to contribute to the selection of sustainable and efficient materials, combining the addition of waste and fibers with enhanced structural performance suitable for the demands of such infrastructures.

Keywords: Self-Compacting Concrete (SCC), Conventional Concrete (CC), Cracking.

1 INTRODUÇÃO

Já é consenso no meio técnico que o concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo, com uma função vasta na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Este fato sempre impulsionou a preocupação com a qualidade deste material, motivando pesquisas cada vez mais avançadas, que buscam o melhor desempenho e durabilidade de suas estruturas.

Devido à relativa deficiência do concreto em relação a sua baixa resistência à tração, as peças estruturais de concreto fissuram-se mesmo com tensões de pequena ordem (LEONHARDT, F., 2012). Neste contexto, o concreto armado passou a representar a solução mais adequada como elemento estrutural, no qual, tal matéria é associada ao aço. A viabilidade das estruturas de concreto armado é fundamentada em dois princípios: a aderência entre as superfícies do aço e concreto e da possibilidade de ocorrência de regiões fissuradas de concreto (fenômeno intrínseco ao material concreto) (CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; 2014). Para o adequado comportamento do concreto armado, o qual está sempre passível ao fenômeno de fissuração, é essencial o controle da formação e a propagação do estado de fissuração. Esse controle visa não somente garantir as condições de segurança das estruturas ao colapso, mas também, serve como mecanismo de controle da durabilidade do material (BENTUR, A., & MINDESS, S., 2007).

As fissuras são um dos tipos mais comuns de anomalias nas estruturas de concreto, esse tipo de patologia coloca em risco a estabilidade das construções. Estas manifestações patológicas são muito correntes na atualidade da construção civil e podem se manifestar, tanto na fase de concretagem, quanto depois do endurecimento do concreto. Elas podem ser provocadas por mau posicionamento da armadura, uso inadequado da estrutura, resultado de sobrecargas não previstas em projeto, falhas no dimensionamento, cura deficiente ou mesmo espessura deficiente do cobrimento da camada de concreto que protege o aço. Outro fator que pode gerar fissuras nas estruturas são os recalques de fundações (THOMAZ E., 2020). Essas fissuras estão diretamente relacionadas à durabilidade da estrutura, que é um caminho aberto para outras manifestações patológicas destrutivas do concreto, por exemplo, corrosão, lascamento, perda de resistência, ou até mesmo, sua desintegração progressiva (C.L. PAGE, M.M. PAGE, 2007).

Por outro lado, há uma considerável demanda de pesquisas para mitigar os problemas causados e muitas são as medidas que ajudam a diminuir a formação e a propagação de fissuras. O uso de concretos autoadensáveis (CAA) são um bom exemplo (DEVI, S. S.; VIVEK, S. S.,

2024), assim como a adição de: fibras de aço ou polipropileno; aditivos minerais, como cinzas volantes e escória de alto-forno granulada; entre outros (DEVI; AGGARWAL; SAINI, 2020).

O concreto convencional é naturalmente frágil e tem pouca resistência a cargas elevadas em situações de tração.

É intrínseco à natureza dos materiais cimentícios a existência de regiões micro fissuradas na zona de transição pasta-agregado. Nesse contexto, os materiais cimentícios são classificados, na literatura, como materiais quase-frágeis. O comportamento desses tipos de materiais se caracteriza pôr na zona micro fissurada, em que o material é parcialmente destruído, mas ainda é capaz de transferir as tensões (P.C. GONÇALVES; L. PALERMO JR.; S.P.B. PROENÇA, 2018).

A tenacidade do concreto autoadensável ou concreto de alto desempenho, no entanto, foi considerada eficaz quando fibras dúcteis foram usadas. De acordo com Alberti et al., 2015, uma maior quantidade de fibras de polipropileno na mistura aumenta a resistência à tração e a tenacidade dos compósitos cimentícios de alto desempenho. Além disso, fibras de aço e polipropileno aumentaram a resistência à tração compressiva e flexural dos CAAs, assim como a resistência ao impacto e redução do efeito de retração, muito comum neste tipo de concreto, pela incorporação de fibras, sejam elas de aço ou polipropileno.

Seu uso, historicamente, não é uma novidade, a utilização de fibras remonta há três mil anos, com a utilização de palhas para reforço de tijolos de argila, crinas de cavalos em materiais cimentícios, reduzindo sua conhecida fragilidade, tornando estes compósitos em materiais mais dúcteis (ILLSTON, 1994).

Concretos de alto desempenho como CAA contêm altos volumes de pós, necessários para reter uma tensão de escoamento adequada e viscosidade plástica da mistura fresca e para reduzir a exsudação ou segregação, mas altos níveis de adição de cimento levarão a altos custos e temperaturas de hidratação elevadas. A esse respeito, o uso de aditivos minerais, como cinza volante, escória de alto-forno ou filler de calcário, deve ser feito de uma maneira que melhore a trabalhabilidade da mistura de concreto sem aumentar o seu custo (ASLANI & NEJADI, 2013).

Neste contexto, esse trabalho visa o estudo de novas alternativas no controle mais eficaz do estado de fissuração do concreto submetido aos esforços de tração na flexão, por meio do estudo experimental e analítico com uso de concretos inovadores, como o CAA e adição de fibras de álcool polivinílico (PVA). Pretende-se, com essa pesquisa, contribuir para a possibilidade de aumento da resistência mecânica do concreto tracionado íntegro entre fissuras adjacentes e, conseqüentemente, aumentar sua resistência ao estado de fissuração, resultando

em estruturas que atendam aos requisitos de durabilidade e colaborar com os estudos no âmbito da Mecânica da Fratura Não Linear.

Neste trabalho, optou-se por utilizar um resíduo da indústria de marmoraria, proveniente do corte e do polimento de peças de mármore e granito e a adição de fibras de PVA, que nada mais são do que um álcool polivinílico sintético em forma de fibra com atributos químicos e físicos que as tornam especialmente adequadas para adição em compósitos cimentícios, modificados com polímeros, tornando-se uma alternativa, muito utilizada atualmente na construção civil, para o controle de fissuras, melhorias nas propriedades de tração na flexão e resistência à abrasão do concreto (GUIMARÃES, 2010).

1.1 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas relacionadas à resistência à tração na flexão de elementos prismáticos de concreto, em escala reduzida, por meio de ensaios de flexão a três pontos. O programa experimental será composto por corpos de prova confeccionados com concreto convencional (CCV), concreto convencional reforçado com fibras de PVA (CCVRFP), concreto autoadensável (CAA) e concreto autoadensável reforçado com fibras de PVA (CAARFP).

O principal foco foi investigar o comportamento mecânico em relação ao estado de fissuração, por meio da análise comparativa dos resultados obtidos entre os diferentes tipos de concreto. Além disso, espera-se que o uso dos concretos autoadensáveis, com e sem a adição de fibras, promova uma melhoria na tenacidade, contribuindo para o controle eficiente da formação e propagação de fissuras e ampliando as possibilidades de aplicação desses materiais em estruturas sujeitas a condições críticas.

1.1.1 Objetivos específicos

- Revisão da literatura para uma compreensão mais aprofundada dos temas sobre as principais causas de manifestação patológica em estruturas de concreto relacionadas ao estado de fissuração excessivo e estudo da mecânica da fratura aplicada ao concreto, prevendo o comportamento não-linear;
- Caracterização das propriedades físicas dos materiais utilizados;
- Estudo dos traços e preparação dos corpos de prova para os ensaios: Ensaio para os testes de autoadensabilidade para o modelo de CAA, sem substituição de resíduos segundo os critérios da NBR 15823 -2, NBR 15823-4, NBR 15823-5.

- Estudos de substituição de parte dos finos por resíduos de reaproveitamento nos modelos CAA, com posterior ensaios de caracterização de autoadensabilidade.
- Ensaios de flexão a três pontos dos corpos de prova prismáticos confeccionados no programa, para determinar as curvas carga x deslocamento (CMOD) e avaliar a resistência à fissuração, de acordo com as normas, ASTM C1609:2010 e NBR 16940:2021;
- Ensaios de módulo de elasticidade, compressão, compressão diametral e obter os resultados segundo a ASTM C1609 e ABNT NBR 16940, para tenacidade (G), resistência do primeiro pico (f_l), as resistências residuais (L/600, L/150), Limite de proporcionalidade (LOP) e resistências residuais à tração na flexão ($f_{R,1} = 0,5$ mm, $f_{R,2} = 1,5$ mm, $f_{R,3} = 2,5$ mm e $f_{R,4} = 3,5$ mm).
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios mecânico dos concretos, procurando identificar as diferenças na capacidade de carga e na propagação das fissuras entre os diferentes traços.
- Verificar a possível melhora da tenacidade e no controle da propagação de fissuras nos espécimes com adição de fibras de PVA e resíduos em relação ao espécime controle.

1.2 Justificativa

Com o crescimento contínuo da construção civil, a busca por materiais inovadores vem demandando cada vez mais pesquisas e estudos para sua implantação no mercado de trabalho. Frente às exigências de promover maior durabilidade das estruturas de edificações e de elementos de concreto para obras de infraestrutura e grandes obras, como barragens, o uso de concretos especiais, como o CAA, vem se tornando uma alternativa muito promissora no mercado da construção civil. Desta forma, este trabalho de pesquisa tem a intenção de contribuir com o avanço desses novos materiais para sua consolidação no mercado da construção civil como um todo, podendo permitir o aumento da durabilidade e da resistência dos elementos de concreto armado. Ademais, pretende-se, também, colaborar com a sustentabilidade do meio ambiente, uma vez que o CAA prevê substituição de materiais naturais por resíduos descartados na natureza, promovendo, com o reaproveitamento, uma diminuição dos descartes inadequados, que podem ocupar grandes áreas em aterros, diminuir a utilização

de recursos naturais, reduzindo a extração destes materiais não-renováveis, como jazidas de areia e pedra.

1.3 Planejamento do trabalho

Este trabalho de pesquisa foi planejado para ser realizado por meio das seguintes etapas:

1. Estudo teórico para o entendimento do comportamento de elementos estruturais de concreto fissurados, por meio de uma adequada revisão bibliográfica da literatura;
2. Programa de ensaios experimentais foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil e de Estruturas, do IRN, localizados no Bloco 9, o qual envolverá:
 - Estudo de traço para os concretos convencional (CCV) com e sem adição de fibras e autoadensável (CAA), com e sem adição de fibras, além da adição de resíduos nos traços de CAA;
 - Ensaios no estado fresco para verificar os atendimentos dos critérios para classificar o concreto em CAA, conforme parâmetros definidos nas normas: ABNT NBR 15823-2:2017, ABNT NBR 15823-4:2017 e a ABNT NBR 15823-5:2017;
 - Confeção de corpos de prova prismático com CCV, CCVRFP, CAA e CAARFP para ensaios de determinação das resistências à tração na flexão a 3 pontos;
 - Ensaios de resistências à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos com CCV, CCVRFP, CAA e CAARFP, conforme ilustrados na Figura 1, para obter as curvas carga x alongamento.

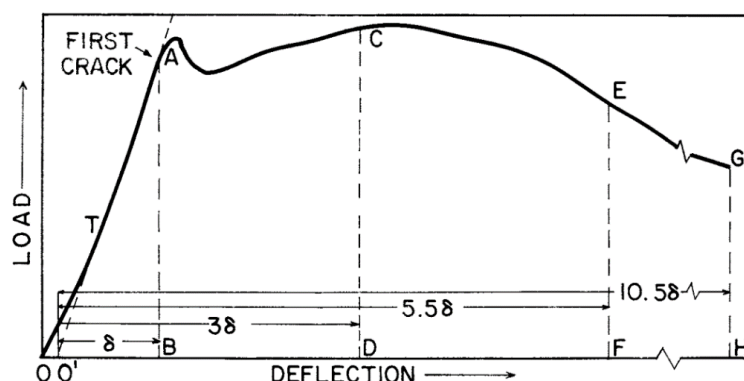
Figura 1: Ensaio de modelo reduzido de viga em concreto simples convencional



Fonte: Faria et. al. (2018)

3. Análise dos resultados obtidos nos ensaios, em termos das curvas carga x deflexão. Comparação dos resultados obtidos em termos da máxima carga alcançada entre os modelos com CCV e CAA;
4. Cálculo do Módulo de Ruptura, conforme critérios da norma ASTM C78 (Flexural Strength of Concrete), em relação à abertura da primeira fissura - First crack strength (quando a curva carga x alongamento atinge o pico). Os resultados obtidos entre os dois modelos CCV e CAA serão comparados para identificar o melhor comportamento de resistência do concreto à primeira fissura.
5. Cálculo da Resistência à Fratura (*Fracture toughness*) de acordo com os critérios da norma ASTM C1609 (2010) – Método de ensaio padrão do desempenho à flexão de concreto reforçado com fibras. Esse método prevê a capacidade de absorção de energia relacionada à primeira abertura de fissura (*First crack strength*) do concreto, a qual é denominada Tenacidade (*toughness*). A tenacidade, segundo a C1609 (2010), pode ser obtida pela área sob a curva carga x alongamento, deflexão até uma deflexão especificada, conforme ilustrada na Figura 2.

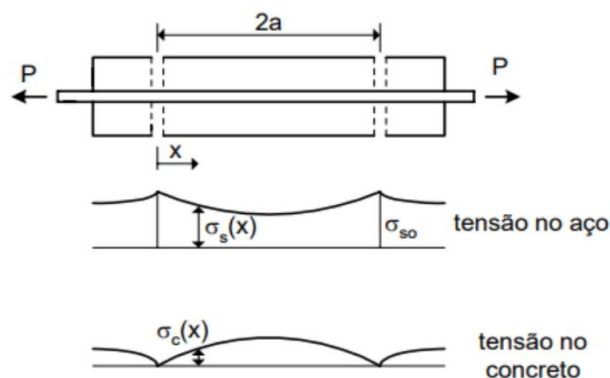
Figura 2: Procedimento para o cálculo da energia em relação à primeira fissura do concreto



Fonte: ASTM C1018 (1991)

6. Análise da colaboração do concreto tracionado íntegro entre fissuras, de acordo com os critérios e procedimentos da norma CEB/1985. De acordo com as especificações da NBR 6118:2014, no dimensionamento de estruturas de concreto armado aos esforços de flexão simples no Estado Limite Último (ELU), as tensões resistentes de tração normais à seção transversal devem ser desprezadas. Esta etapa visa, portanto, a contribuir com o estudo para um melhor aproveitamento do concreto e com consequente diminuição da taxa de aço. Neste contexto, o equilíbrio do esforço externo devido à flexão, passa a contar, também, com a resistência à tração do concreto entre fissuras, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Elemento de concreto fissurado com reforço de aço, sob tração simples.



Fonte: Araújo (2003)

Os métodos utilizados neste trabalho, abrangeram os estudos dos materiais, através de sua caracterização e a formulação dos traços de concreto convencional e autoadensável.

O projeto buscou mostrar e detalhar as etapas essenciais do processo de pesquisa/execução. Para fácil compreensão e execução organizada, um fluxograma (figura 24) do trabalho, desde o estágio de estudos teóricos até a conclusão, é apresentado na seção a seguir.

O trabalho contará com a realização de investigações experimentais de acordo com os procedimentos e normas definidos.

Interpretação dos resultados: nessa fase, os dados definidos são comparados com o que era esperado no início. Por último, mas não menos importante, conclusão: Aqui, as principais descobertas e recomendações futuras são discutidas.

1.4 Revisão bibliométrica

A revisão bibliométrica tem por objetivo mapear o perfil e os interesses da comunidade científica e acadêmica com relação aos tópicos em questão. Para fazê-la, foi utilizado o banco de dados da Scopus e Web of Science (WOS).

Os critérios empregados nesta pesquisa para ambas as bases de dados foram os seguintes: limitação à busca somente por artigos, inclusão de publicações dos últimos 10 anos e foco na área de aplicação (Engenharia Civil), obtendo os resultados mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Número de artigos, banco de dados Scopus e WOS - 19/03/2025.

(continua)

Palavras-chave	Nº de artigos Scopus	Nº de artigos WOS
“Marble powder” and “self-compacting-concrete”	28	98
“Flexural strength beams” or “Crack mouth opening displacement”	427	126

(conclusão)

Palavras-chave	Nº de artigos Scopus	Nº de artigos WOS
Toughness or "fracture resistance concrete"	1883	2902
"Concrete cracking" or "fiber reinforced concrete"	3039	6132
"Reinforced concrete beams"	4185	2371

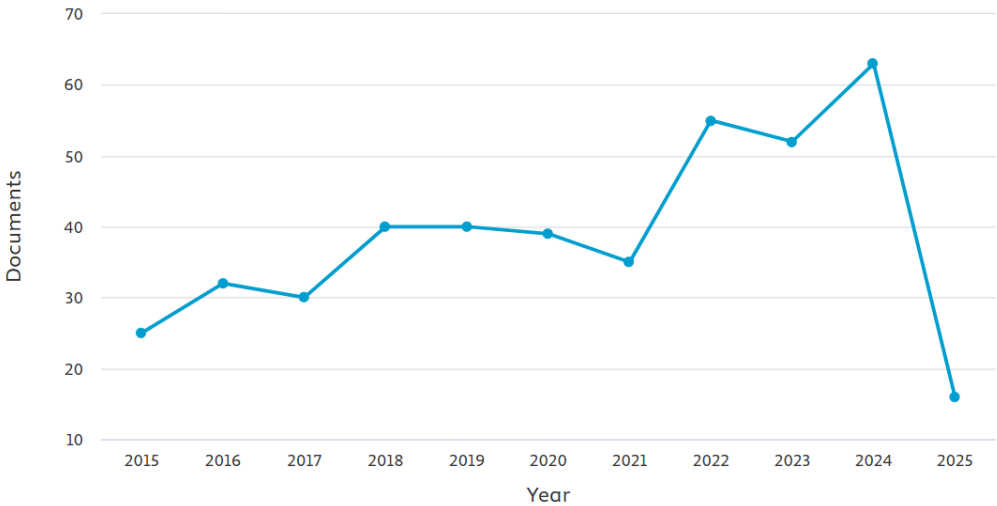
Fonte: próprio autor.

Optou-se por utilizar, para a revisão bibliográfica, o banco de dados da Scopus, utilizando a seguinte string de pesquisa: “Flexural strength beams” or “Crack mouth opening displacement”, a qual melhor reflete a estrutura e o escopo deste estudo. Os títulos dos artigos encontrados, por esta busca, mostraram-se mais pertinentes para a análise conduzida neste trabalho.

Nota-se que na string escolhida o número de trabalhos publicados é relativamente baixo, o que por si só, já justifica este trabalho de pesquisa.

Há um constante crescimento no interesse sobre o tema, como mostram as vastas publicações, demonstrado na Figura 4. Foi tomado como ponto de partida estudos dos 10 anos anteriores até os dias atuais.

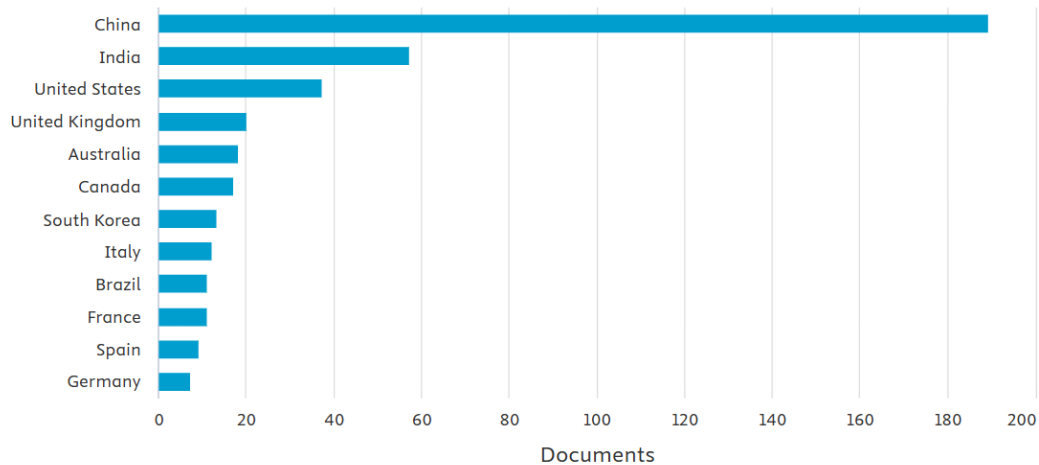
Figura 4: Artigos publicados entre os anos 2015 até 2025.



Fonte: Scopus 19/03/2025.

No Brasil, este assunto é pouco explorado, uma vez que há apenas 11 artigos publicados, fato este justifica o país estar entre as nações com menos publicações. A Figura 5 mostra onde houve mais publicações nos últimos dez anos.

Figura 5: Artigos publicados por países entre os anos de 2015 até 2025.

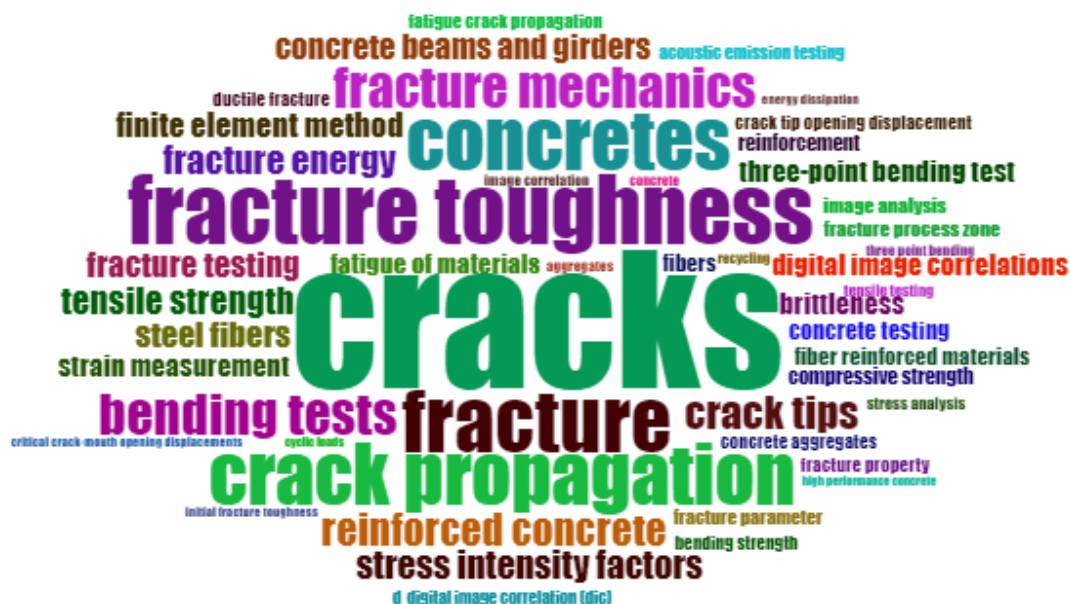


Fonte: Scopus 19/03/2025.

Para confirmar a seleção da string de pesquisa, foram conduzidas diversas avaliações adicionais por meio do programa RStudio, utilizando a ferramenta Bibliometrix, a qual tem como finalidade realizar uma análise bibliométrica mais completa.

No primeiro estágio da análise, foi examinada a frequência das palavras-chave presentes na string de pesquisa. A Figura 6 exibe as palavras que mais se destacam nos artigos obtidos por meio da string selecionada. As três palavras mais frequentes são: “crack mouth opening displacement”, com 222 ocorrências, seguida por “cracks”, também com 222 ocorrências, e “fracture toughness”, que aparece em 110 casos, num total de 427 artigos.

Figura 6: Frequência das palavras-chave presentes na string.



Fonte: acervo do autor.

O trabalho em questão possui grande relevância no campo da construção civil contemporânea, pois visa o aprimoramento da durabilidade e da resistência de estruturas de concreto. O tema é pouco desenvolvido em nosso país, no que se refere a concretos reforçados com fibra. Seu estudo, de maneira específica, que se refere à tração na flexão, foi muito pouco explorado até o momento, o que torna este trabalho relevante. Outra questão marcante é que explorara o conhecimento de materiais de construção civil mais duráveis e eficientes, sendo, também, materiais de descarte (Resíduo do Corte de mármore e granito - RCMG). Tal característica contribui para a redução da emissão de carbono, e, como consequência, dos impactos ambientais.

1.5 Estado da arte

No presente item da pesquisa, foram analisados, de acordo com a revisão bibliométrica, diversos artigos dos últimos dez anos (2015-2025) os quais citam os temas concreto convencional, concreto autoadensável, com e sem adição de fibras, CMOD, além de adições minerais. As propriedades avaliadas e alguns dos principais autores, cujos seus trabalhos de pesquisa se aproximam das condições adotadas neste trabalho, estão listados a seguir:

Os autores ALBERTI, M. G. et al. 2015, compararam o concreto autoadensável com o convencional vibrado, ambos reforçados com diferentes dosagens de fibras. Os concretos foram analisados nos estados fresco e endurecido e pode-se perceber maiores resultados para altos teores de fibras. O intuito dessa pesquisa era estudar uma alternativa para substituir e/ou diminuir o uso das barras de aço na construção civil.

Dentre outros pesquisadores que também investigaram os benefícios da adição de fibras no concreto, pode-se citar ABOUSNINA, R. et al. O trabalho realizado por estes, no ano de 2021, analisa diversos testes físicos, mecânicos e microestruturais, dentre eles, a trabalhabilidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão. Os resultados encontrados revelaram que, com a adição das fibras, o concreto obteve uma redução em sua trabalhabilidade, mas seus resultados foram significativos em suas propriedades mecânicas.

Por sua relevância, ZHANG, P. et al. (2023) contribuíram para o desenvolvimento do tema estudado neste trabalho, pois seus estudos comprovaram que concretos reforçados com fibra apresentam uma resistência elevada, excelente controle de fissuração, alta tenacidade à fratura, além de analisar os modelos de fratura, incluindo o double-K, efeito de borda, a fissura fictícia e a efetiva.

Os autores ADHIKARY et al., em 2019, publicaram em seu artigo um estudo sobre concreto com adição de fibras, realizando ensaios no estado fresco e endurecido do concreto para observar as diferenças nas propriedades de trabalhabilidade e resistência entre eles. Os testes de resistência à tração na flexão foram realizados nos 28 dias de cura para determinar as propriedades de resistência e as análises de deslocamento de abertura da boca da fissura (CMOD). O trabalho demonstra o comportamento pós-fissuração das amostras. Na resistência à tração na flexão, os concretos com adição de fibras obtiveram uma melhora em seu comportamento pós-fissuração. Outras observações importantes sobre as amostras foram que a concentração de fibras na mistura de concreto influenciou muito o espalhamento e as propriedades de auto compactação e sua resistência à compressão diminuiu com a adição de fibras.

KAZMI et al., 2020, também descrevem como positiva a influência da adição de fibras sintéticas ao concreto, melhorando sensivelmente os resultados de resistência à tração na flexão, portanto, fibras sintéticas melhoram o desempenho mecânico e pós-fissuração, obtendo um concreto mais dúctil e com uma maior absorção de energia.

A publicação de ZHOU, W. et al., 2022 abordaram os temas das propriedades da fratura do concreto com fibras de polipropileno (0%, 1%), com adição de pó de borracha (0 %, 5%, 10%, 15%). Os testes de resistência à tração na flexão foram realizados variando a temperatura (25°C, 100°C, 200 °C, 400 °C, 600 °C). Utilizaram-se técnicas de emissão acústica para analisar o surgimento e a propagação das fissuras. Os resultados obtidos demonstraram que a adição do pó de borracha no concreto e as fibras de polipropileno retardaram o processo de propagação das fissuras e melhoram sua capacidade de deformação. Para os testes já citados, utilizaram-se vigas entalhadas em um ensaio de três pontos, e, avaliando-se os resultados, constatou-se que o deslocamento de abertura da boca da fissura aumenta e a ductilidade melhora significativamente.

Nos estudos de WEI, Y. et al. 2022, foram analisados concretos simples, ou seja, concreto convencional e concretos com adição de fibras de polipropileno em teores de 0; 0,6; 0,9 e 1,5 kg/m³. Os testes foram realizados em 14, 28 e 60 dias de cura. Os ensaios mostraram que ao se adicionar um teor de fibra maior que 1,2 kg/m³, a trabalhabilidade do concreto é prejudicada, no entanto, a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão aumentaram em relação ao concreto convencional. Verificou-se ainda que o aumento da resistência não ocorre de forma proporcional ao aumento do teor de fibras. Concluiu-se que concretos reforçados com fibra de polipropileno possuem uma maior tenacidade e uma significativa resistência à fissuração.

O artigo de ZHU, D. et al., de 2021, faz um estudo das propriedades de compressão e de resistência à tração na flexão de concretos reforçados com fibras de polipropileno, avaliando a tenacidade dos corpos de prova, a resistência à compressão e resistência à tração na flexão. As amostras tiveram, para adição de fibra, valores de 1,5% e 2% e para a adição de cinza volante, valores de 20% e 60%. Os resultados indicaram que com 2% de adição de fibra de polipropileno e 60% de cinza volante, o corpo de prova tem uma maior resistência à compressão, melhor resistência à fissuração e maior tenacidade quando comparada ao concreto convencional. Para o cálculo da Tenacidade foram utilizadas as normas ASTM e a JSCE-SF4.

ALI, A. et al., publicaram um estudo em 2022, com a finalidade de observar o comportamento do CAA reforçado com fibras de polipropileno no estado fresco, no estado endurecido e sua durabilidade. O concreto em análise contou com a adição de pó de mármore em substituição por parte do cimento, nas proporções de 4%, 8%, 12% e 16% e as fibras foram incorporadas em teores de 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4%. Quanto a durabilidade os testes analisaram a permeabilidade à água e migração de cloretos. Concluiu-se que a trabalhabilidade do CAA apresentou uma redução quando os teores de fibra são maiores, mas apresentou um bom desempenho em dosagens mais elevadas de pó de mármore. A adição das fibras não afetou a resistência à compressão e a permeabilidade, porém houve uma melhora em sua resistência a tração por compressão diametral e à flexão. A incorporação do resíduo de mármore teve uma interação considerável com as fibras de polipropileno, o que torna viável sua aplicação. O concreto obteve uma significativa melhora com substituição do cimento por 12% de pó de mármore e com uma adição de 3% de fibras.

HADDADOU, N. et al. (2015), estudaram diversos tipos de CAA com diferentes adições de fibras (aço, polipropileno e vidro) e adições de três diferentes tipos de minerais (pó de mármore, metacaulim e pó de calcáreo), com 0,34 de relação água/cimento, as fibras foram combinadas e a adição fixada em 60 kg/m³. Foram analisadas as propriedades no estado fresco com ensaios de espalhamento, caixa “L”, estabilidade e teor de ar. No estado endurecido os ensaios realizados foram: resistência à compressão, resistência à flexão, tração por compressão diametral e ultrassom. Os melhores resultados foram obtidos com CAA com fibras de aço combinadas com fibras de polipropileno e pó de mármore como adição mineral.

GEORGE et al. (2021), descrevem que o Composto Cimentício Projetado (ECC) é um tipo especial de concreto reforçado com fibras curtas, apresentando alta deformabilidade (3-7%) comparado ao concreto comum (0,01%). Fibras de PVA e PP aumentam a resistência à flexão do ECC. O ECC tem aplicações em pavimentos de pontes e lajes. Fibras de PVA oferecem alto desempenho de reforço, com elevada resistência e boa resistência ao

fissuramento. Apesar do custo inicial mais alto, o ECC demonstra benefícios a longo prazo superiores ao concreto normal.

Este estudo, de JU et al. (2022), investiga o efeito de fibras de aço, PVA e híbridas no concreto de alto desempenho (HPC). A adição dessas fibras melhora a resistência e tenacidade do HPC, com um teor crítico de 1% para fibras de PVA. Fibras de aço e PVA atuam em diferentes escalas para aumentar a tenacidade e resistência. A pesquisa envolveu testes de propriedades frescas, resistência à compressão e à flexão, e tenacidade. Os resultados contribuem para o entendimento da otimização do uso de fibras em HPC.

SAID et al. (2015), em seu estudo investigaram o efeito de fibras de álcool polivinílico (PVA) na resistência à compressão e flexural de compósitos cimentícios projetados (ECC). A resistência à compressão do ECC diminui com o aumento do índice de reforço. As lajes de PVA-ECC não atingiram a ductilidade desejada devido à ruptura das fibras. O comportamento de strain-hardening e múltiplas fissuras foi observado em lajes com índices de reforço mais elevados. O artigo propõe uma nova definição como extensão à ASTM C 1018 para ECC PVA.

O estudo realizado por SARAN e SELVAN (2024), avalia o desempenho da aderência entre vergalhões e concreto reforçado com fibras de PVA. Também examina a aderência entre elementos de concreto comum e concreto reforçado com PVA. O concreto reforçado com PVA apresentou melhor desempenho de aderência em comparação ao concreto comum. A aderência melhora com o aumento da rugosidade da superfície de contato. A pesquisa quantifica o impacto das fibras de PVA nas propriedades mecânicas do concreto.

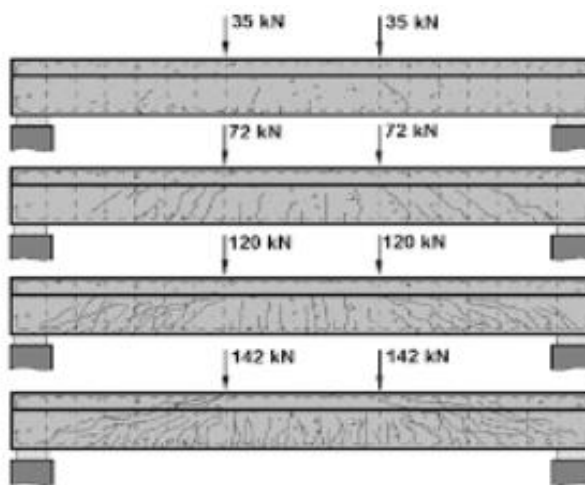
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O fenômeno da formação e propagação das fraturas ocorre em diversos materiais, incluindo sólidos como metais, concreto e cerâmica. É um processo complexo que envolve a criação e a expansão de trincas ou rachaduras no material, podendo levar a sua falha eventual. No concreto, a formação de fissuras pode ser causada por retração do material durante o processo de cura, variações de temperatura ou cargas excessivas aplicadas. A propagação das fissuras ocorre principalmente devido à aplicação de cargas adicionais, que podem resultar em fraturas mais extensas e comprometer a integridade estrutural (KUMAR MEHTA; M MONTEIRO, 2014).

A viabilidade das estruturas de concreto armado é fundamentada em dois princípios: a aderência entre as superfícies do aço e concreto e da possibilidade de ocorrência de regiões fissuradas de concreto (CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; 2014). Devido à

natureza intrínseca do concreto, a formação de um estado de microfissuras presentes na zona de transição pasta – agregado é inevitável. O fenômeno de fissuração do concreto se acentua consideravelmente quando sua resistência à tração é atingida e superada (Figura 7). Neste caso, ocorre uma abrupta redução da rigidez do material, com consequente aumento das deformações (LEONHARDT, F., 2012), podendo com essas fissuras, gerar outras patologias destrutivas no concreto, como por exemplo, o surgimento da corrosão, o lascamento, a perda de resistência, ou até mesmo, sua desintegração progressiva.

Figura 7: Viga de concreto à flexão. Evolução do estado de fissuração.



Fonte: Pinheiro, L. M, et al. (2007)

Neste contexto, o estado de fissuração das peças de concreto deve ser controlado, em vista não só das condições de segurança das estruturas, mas como mecanismo de controle da durabilidade do material. O excesso das aberturas de fissuras e a propagação do estado de fissuração sem controle pode levar a redução da vida útil da estrutura, e, até mesmo, ao seu colapso. Portanto, é fundamental o controle rígido da formação e da propagação de fissuras nos elementos de concreto estrutural, seja armado ou simples. A NBR 6118:2014 apresenta critérios de durabilidade das estruturas de concreto armado, em especial recomendações para o controle de abertura de fissuras, nas seções 6, 7, bem como nas seções que abordam as análises de durabilidade de acordo com os Estados Limites de Serviço (E.L.S.).

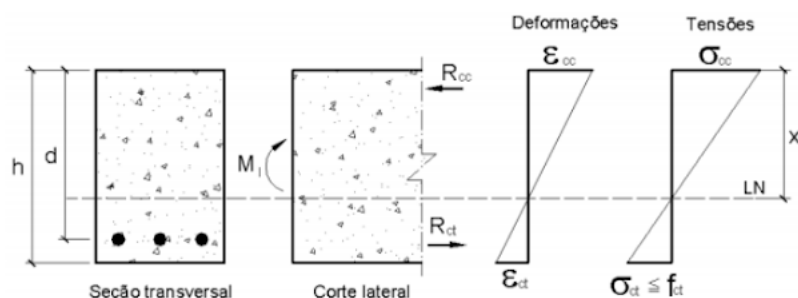
2.1 Etapas de deformação progressiva em elementos de concreto sujeitos à flexão simples – Estádios de deformação

Todo elemento de concreto armado, quando se aplica um carregamento externo está sujeito à ação de um momento fletor solicitante. Quando este momento fletor cresce

continuamente, uma determinada seção transversal deste elemento passará a sofrer três níveis de deformação, isto é, estará submetido aos Estádios de Deformação.

O Estádio de deformação I é mais conhecido como estágio de deformação elástica, e é representada na figura 8. Durante esta fase, o concreto se comporta como um material elástico, sofrendo deformações ainda reversíveis, quando submetidos aos carregamentos externos.

Figura 8: Estádio de Deformação I

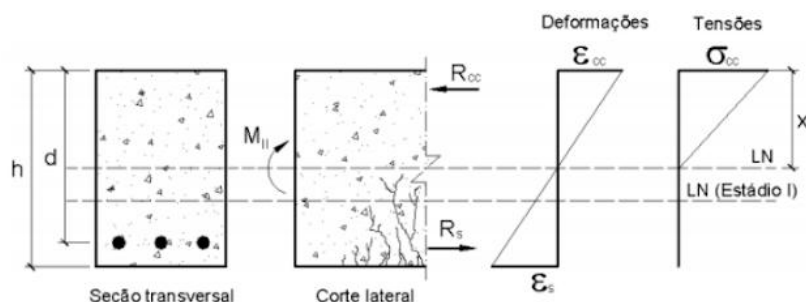


Fonte: Pinheiro, L. M, et al. (2007)

No estágio I, as deformações são consideradas pequenas e as tensões aplicadas estão dentro da faixa elástica do concreto. Nessa fase, as fissuras são microscópicas e não afetam significativamente a resistência estrutural. No Estádio I, é feito o cálculo do momento de fissuração, o qual marca a transição entre o Estádio I e o Estádio II.

O estágio II de deformação do concreto é conhecido como estágio de deformação plástica. Nessa fase, o concreto começa a apresentar deformações permanentes, que não são recuperadas quando a carga é removida. Esse estágio ocorre quando as tensões aplicadas excedem a capacidade de resistência do concreto, levando-o além de seus limites elásticos. Esta deformação está representada na figura 9, que apresenta as deformações e as tensões neste estágio.

Figura 9: Estádio de Deformação II

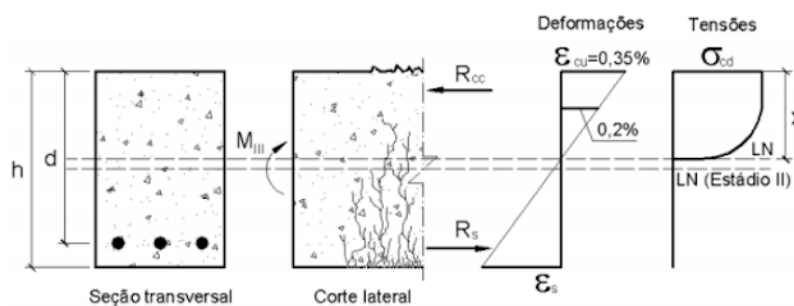


Fonte: Pinheiro, L. M, et al. (2007)

As fissuras no concreto se tornam mais visíveis e se desenvolvem de forma mais pronunciada. O material começa a apresentar uma maior fluência, ou seja, a deformação continua mesmo com uma carga constante. Nesse estágio, a capacidade de carga do concreto é reduzida, pois ele perde sua capacidade de resistir a tensões elevadas. Se as deformações plásticas continuarem a aumentar, o concreto pode eventualmente sofrer colapso estrutural.

O estágio de deformação III do concreto é conhecido como o estágio de fluência. Durante essa fase, o concreto continua a sofrer deformação, mesmo quando a carga é constante. É uma deformação lenta, mas contínua que ocorre posteriormente ao estágio II, também conhecido como estágio de encruamento. As deformações ocorrem pelo rearranjo molecular e à fluência dos componentes do concreto. As deformações e as tensões sofridas neste estágio são mostradas na figura 10.

Figura 10: Estádio de Deformação III



Fonte: Pinheiro, L. M, et al. (2007)

2.2 Mecânica da fratura

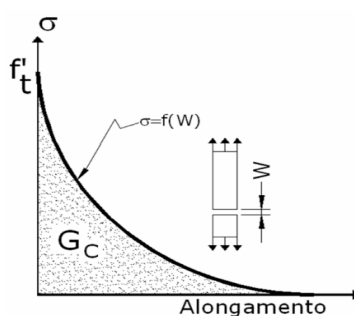
No que tange ao estudo do concreto armado, visando sua qualidade e eficiência, diversas pesquisas vem contribuindo, desde sua concepção, tanto sobre a melhora da aderência entre aço e concreto, como no melhor controle do estado de fissuração do material (D. L. ARAÚJO; et al, 2013). A mecânica da fratura em concreto estuda os processos pelos quais as trincas se desenvolvem e se propagam no material. Isso envolve a análise das propriedades mecânicas do concreto, a caracterização da tenacidade à fratura do material e a avaliação da taxa de crescimento das trincas.

O comportamento do concreto fissurado, devido aos efeitos do esforço de tração, inicialmente foi abordado por meio da mecânica da fratura linear, como extensão do modelo apresentado por Inglis (1913) e proposto por Kaplan (1961). A partir de então, numerosos estudos foram publicados abordando a propagação e a estabilidade de fissuras e métodos de teste mecânico de fratura. Porém, em todos os modelos, o concreto foi considerado com

comportamento elástico-linear, cujos resultados desencorajaram a continuidade dessa abordagem. Neste âmbito, no final dos anos 70, a teoria não linear passou a ser explorada nos estudos das estruturas de concreto (Bazant e Oh 1983). Vários trabalhos foram publicados, como Hillerborg, Modeer e Petersson (1976), Modeer (1979), Petersson (1980a, 1980b, 1980c), Petersson e Gustafsson (1980), Hillerborg (1980), Hillerborg e Petersson (1981), no que tange a abordagem e o estudo de modelo mecânico de fratura adequado para analisar as micro e macro fratura de concreto simples e armado e materiais similares.

No contexto dos materiais quase-frágeis, vários ensaios experimentais de estruturas de concreto sujeitos aos esforços de flexão, demonstraram ser mais adequado estudar o comportamento pós pico por meio da curva carga x alongamento ao invés da curva tensão x deformação, comumente empregada nas análises da mecânica da fratura (Figura 11).

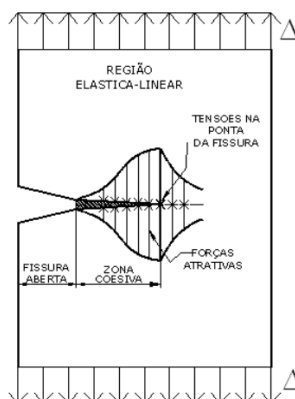
Figura 11: Curva carga x alongamento ensaio de tração



Fonte: Gonçalves et.al. (2018)

Nos resultados desses ensaios, foi possível notar que, após o pico de carga, algumas deformações ocorriam em uma região muito estreita e aumentavam muito rapidamente, enquanto fora da zona coesiva, essas permaneciam relativamente baixas, conforme ilustrado na Figura 12 (PETERSSON, 1981).

Figura 12: Distribuição de tensões na ponta da fissura (Modelo de zona coesiva)

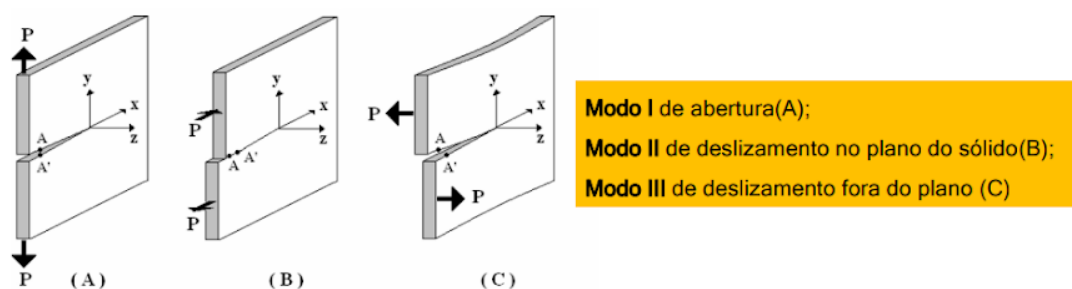


Fonte: Gonçalves et.al. (2018).

2.2.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica – MFLE:

Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é um campo de estudo que se concentra na análise do comportamento de materiais frágeis quando submetidos a condições de carregamento que levam à fratura. A MFLE é baseada na premissa de que a propagação de uma fissura em um material pode ser analisada pelos princípios da mecânica elástica linear (ANDERSON, Ted L, 2005). Na MFLE, a propagação de trincas é investigada, usando conceitos como tensão, deformação, energia de deformação e de fratura. A teoria assume que o material se comporta linearmente elástico, o que significa que a deformação é proporcional à tensão aplicada e que não ocorre deformação plástica. A teoria é amplamente utilizada para prever a vida útil de componentes estruturais, avaliar a segurança e confiabilidade de estruturas e desenvolver diretrizes de projeto para evitar falhas catastróficas. Um dos conceitos fundamentais da MFLE é o fator de intensidade de tensão (K), que descreve a magnitude da tensão em uma ponta de trinca (XU et al., 2021). O fator K é usado para determinar a taxa de crescimento da trinca em relação à aplicação de carga. Além disso, a MFLE também envolve a análise de outros parâmetros, como a tenacidade à fratura (K_{Ic}), que é uma medida da resistência do material à propagação de trincas. A figura 13 apresenta os modos de fissuração presentes nos sólidos.

Fig. 13: Modo de fissuração de sólidos



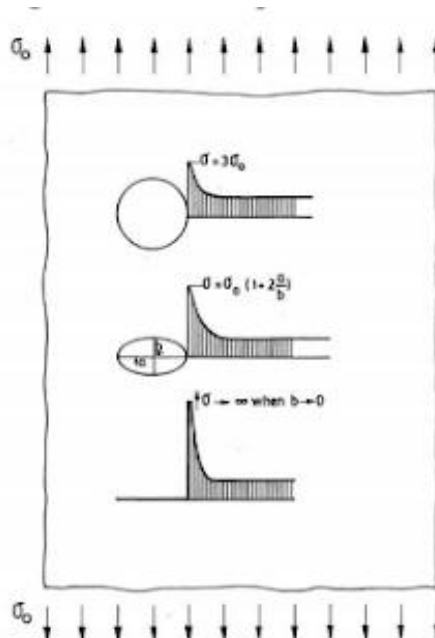
Fonte: Adaptado de Fundamentos de Mecânica de Fratura. 2 ed., 1995.

Início dos estudos do fenômeno de fissuras em materiais:

- Inglis (1913): propôs uma formulação matemática para calcular as tensões ao redor de um furo elíptico localizado no centro de uma placa finita, apresentando o conceito de singularidade na ponta da fissura.
- Griffith (1921): desenvolveu uma formulação com base no critério de energia para prever se uma fissura em materiais frágeis se propagaria de forma estável ou instável.

A figura 14 mostra esquema de uma placa infinitamente grande de um material elástico linear, submetida a uma tensão de tração uniforme σ_0 .

Fig. 14: Modo de fissuração de sólidos



Fonte: Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Terceira edição - 2005

A distribuição de tensão será afetada quando um orifício circular estiver presente na placa. No ponto mais crítico da borda do furo, a tensão atingirá três vezes a tensão aplicada, independentemente do tamanho do furo.

Quando o furo circular é substituído por uma elipse, a tensão σ_0 na ponta da fissura terá um valor que depende da relação entre os eixos da elipse, a/b .

Se o menor raio da elipse se aproximar de zero, o furo elíptico se torna uma trinca e a tensão na ponta da trinca aumenta infinitamente à medida que a razão a/b se aproxima do infinito. Isso implica que os critérios de tensão convencionais não podem ser aplicados nesse caso, pois o material falharia imediatamente ao ser submetido à carga.

Griffith propôs o conceito de balanço de energia para abordar o efeito global, mas enfrentava dificuldades ao analisar o comportamento isolado das fissuras. Irwin (1957) aprimorou o modelo ao apresentar um enfoque baseado no campo de tensões na região da ponta da fissura, utilizando o fator de intensidade de tensão K , determinado através da equação 3.1.

Uma fissura se forma quando ocorre uma distribuição específica de tensões na frente de sua ponta, possibilitando uma avaliação precisa do campo de tensões e da evolução de seu comportamento.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (3.1)$$

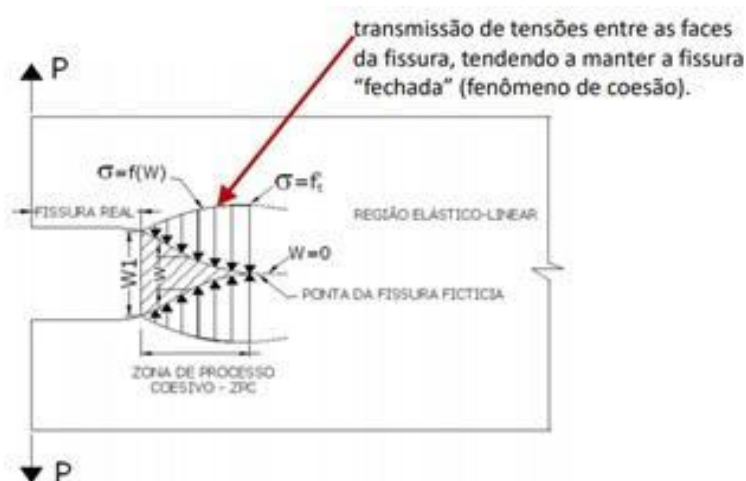
2.2.2 Mecânica da Fratura Não Linear – MFNL:

A mecânica da fratura não linear estuda o comportamento de materiais frágeis ou frágeis-dúcteis durante o processo de propagação de trincas. Nesse contexto, a não linearidade elástica refere-se à resposta não linear do material antes do início da fratura. Nos materiais frágeis, a propagação de trincas ocorre de forma repentina e catastrófica, sem uma significativa deformação plástica (Shah, S. P., et al, 1995). Já, nos materiais frágeis-dúcteis, a propagação da trinca é precedida por uma zona plástica ao redor da ponta da trinca.

A zona de processos inelásticos nos materiais quase-frágeis é identificada por uma região micro fissurada, conforme descrito por (BAŽANT; OH, 1983). Geralmente, essa região é representada por uma interface simples chamada de região coesiva, que se destaca pela sua capacidade de transferir tensões entre as faces da fissura.

No concreto, na zona de fissura coesiva, ocorre a propagação de fissuras devido à taxa de liberação de energia armazenada no material. Essa propriedade é caracterizada pela transição entre os agregados e a matriz da pasta de cimento, em que há transferência de tensões normais entre as faces da fissura coesiva, visto na figura 15. Essa transferência de tensões é uma característica intrínseca dos materiais quase-frágeis.

Fig. 15: Modelo de fissura coesiva



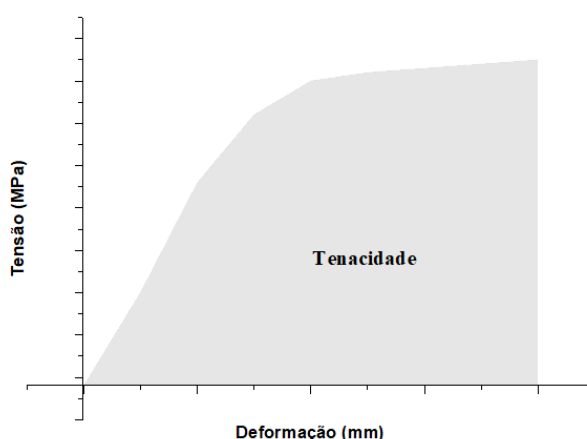
Fonte: Bazant Z, 1999 (Adaptado).

A quantidade da energia a ser absorvida por uma área de fissura unitária, com a abertura de fissura variando de zero a $W1$, é denominada Tenacidade, uma propriedade importante, pois indica a resistência do concreto a impactos e cargas dinâmicas.

A tenacidade do concreto é comumente medida pela área abaixo da curva de tensão-deformação em um diagrama correspondente (BERDIN; BESSON; BUGAT, 2004), figura 16. Quanto maior essa área, maior será a tenacidade do material, o que indica sua capacidade de absorver uma maior quantidade de energia antes de se romper, portanto, seu cálculo é dado pela equação 3.2:

$$\int_0^{w_I} \sigma d_w = G_c \quad (3.2)$$

Figura 16: Tenacidade – área sob a curva Tensão-deformação



Fonte: o próprio autor, adaptado da norma JSCE-SF4 (1984)

Duas relações podem ser utilizadas para descrever de forma mais precisa as propriedades de deformação de um material quase-frágil:

1. No início do ensaio, considerando o comportamento elástico simplificado do material, é possível estabelecer a relação entre tensão e deformação.
2. Na parte descendente da curva, que representa o “amolecimento” do material, pode ser estabelecida a relação entre força e abertura da fissura.

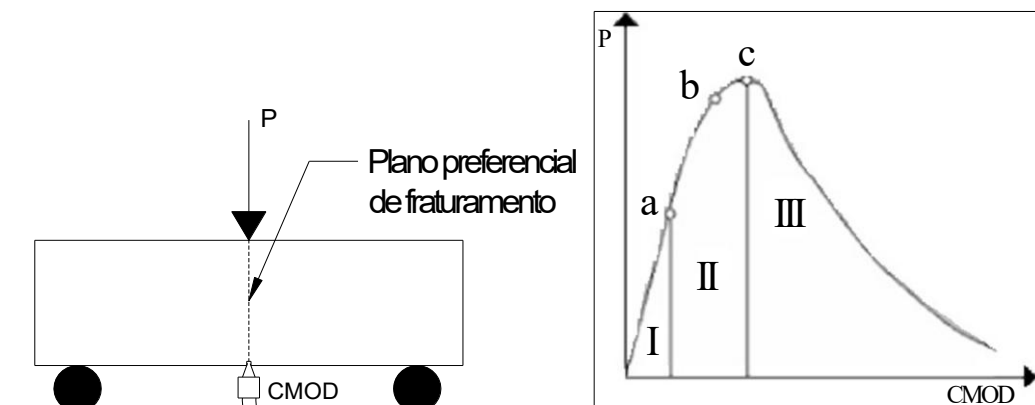
O estudo da ruptura quase-frágil envolve a análise de um sólido prismático em concreto que possui um entalhe simulando uma pré-fissura, e é submetido a uma carga de flexão (figura 17).

O ensaio é realizado em um ciclo fechado, no qual as respostas de deslocamento controlam a aplicação da carga. Para evitar um colapso repentino, é adotada uma taxa constante de deslocamento, permitindo que o sistema de ensaio monitore sistematicamente a carga aplicada.

Esse tipo de ensaio é conhecido como ensaio controlado, ou seja, é realizado sob condições de controle de deslocamentos. Alternativamente, pode ser realizado com controle de

deformações ou usando o CMOD (Crack Mouth Opening Displacement, ou deslocamento de abertura da entrada do entalhe).

Figura 17: Sólido prismático com entalhe e CMOD



Fonte: adaptado pelo autor, de FERREIRA; HANAI, 2017.

I: A presença de microfissuras dispersas no volume do sólido é considerada elástico-linear para todos os efeitos.

II: À medida que a carga é aumentada a partir do ponto a , as microfissuras começam a se tornar mais pronunciadas. Uma faixa de microfissuração (zona de acumulação de danos) começa a se formar, resultando em deslocamentos que gradualmente se afastam da linearidade até atingir o ponto b .

III: O processo de coalescência ocorre, no qual as microfissuras se fundem para formar uma fissura maior. Isso caracteriza a localização da deformação (FERREIRA; HANAI, 2017).

2.3 Estudo da fratura para vigas de concreto reforçadas com fibras

A forma como os materiais de concreto se comporta em relação à fratura é crucial para o desempenho mecânico e executa um papel fundamental, tanto no projeto, quanto na avaliação de segurança das estruturas de concreto (BEYGI et al., 2013). Um modelo de fratura preciso é fundamental na engenharia para prever o comportamento de fissuração em estruturas de concreto, permitindo compreender o mecanismo de fratura e capturar as falhas que ocorrem nessas estruturas (ZHANG et al., 2023). Estudos apontam modelos de fraturas para concretos reforçados com fibra de aço, que são: modelo de fratura duplo-K, modelo de efeito de contorno, modelo de fissura fictícia, modelo de fissura efetiva entre outros.

2.3.1 Modelo de fratura duplo-K

Xu; Reinhardt (1999) introduziram o Método de Deslocamento de Campo de Deformação Duplo-K (DKFM) como uma abordagem para caracterizar a propagação de trincas em materiais quase-frágeis durante a fratura. Neste método, eles relacionaram o comprimento da trinca em qualquer momento após sua iniciação em um material frágil à soma do comprimento da trinca elástica de tensão, juntamente com o comprimento da trinca elástica virtual, no DKFM.

No modelo de fratura duplo-K, considera-se que existem duas trincas paralelas no material, que podem se propagar independentemente uma da outra. Essas trincas são representadas como frentes de fratura planares. Cada trinca tem uma direção de propagação específica e está associada a uma energia de fratura crítica, conhecida como K_{Ic} (para a trinca principal), que é o fator de intensidade de tensão de fissura inicial gerada pela carga de fissuração inicial P_{ini} na ponta da fissura pré-formada, o e K_{IIc} (para a trinca secundária) é o fator de intensidade de tensão crítica gerado pela carga máxima P_{max} na ponta da trinca crítica (XU; REINHARDT, 1999), estes parâmetros estão relacionados somente às propriedades do material sem levar em conta a geometria e o tamanho do corpo de prova. Essas energias de fratura crítica representam a quantidade de energia necessária para propagação de cada trinca. Neste modelo, os parâmetros K_{Ic} e K_{IIc} , durante o surgimento e expansão da fissura, dividem o processo em três etapas (ZHANG et al., 2023):

Estágio inicial da trinca:

$$K_c \leq K_{Ic}$$

Estágio estável de propagação de trincas:

$$K_{Ic} < K_c \leq K_{IIc}$$

Estágio de propagação de trinca instável:

$$K_c > K_{IIc}$$

Em que, K_c é o fator de intensidade de tensão.

2.3.2 Modelo de efeito de contorno

A abordagem teórica do efeito de contorno é empregada para examinar o comportamento de fissuras em estruturas de concreto, levando em conta a interação das fissuras com o material circundante, resultando em um efeito de contorno. Quando uma fissura se forma em uma estrutura de concreto, ela gera uma concentração de tensões nas regiões próximas a ela (Hu XZ,

Liang L, Yang ST. 2013). Essas tensões podem levar ao desenvolvimento de novas fissuras e ao aumento da propagação das fissuras existentes. Além disso, o modelo também considera a interação entre as fissuras e o material circundante, levando em conta que a presença das fissuras diminui a resistência e a capacidade de deformação do concreto nas áreas próximas, devido à perda de continuidade estrutural (HEMLEBEN, C.; SPINDLER, M.; ANDERSON, O. R., 1989). Essa abordagem é importante para entender o comportamento das fissuras em concreto e auxilia na previsão do seu crescimento e no dimensionamento de estruturas com fissuras. Ela também permite propor medidas de reforço e intervenção para evitar a propagação das fissuras e garantir a segurança e durabilidade das estruturas.

A tenacidade à fratura instável pode ser avaliada analiticamente pela carga máxima P_{max} e seu correspondente deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) usando fórmulas da mecânica da fratura elástica linear (MFEL) (QING; LI, 2013).

A mecânica da fratura elástica linear é governada pela Lei de Irwin ou Equação de Griffith, que relaciona a tensão aplicada à ponta de uma fissura com o tamanho crítico da fissura para a propagação da fratura. A fórmula geral é dada pela equação 3.3:

$$K = Y \times \sigma \times \sqrt{(\pi \times a)} \quad (3.3)$$

Em que:

K é o fator de intensidade de tensão (stress intensity factor);

Y é um fator de geometria que depende da forma da fissura;

σ é a tensão aplicada à ponta da fissura;

a é o tamanho da fissura.

Essa fórmula descreve o comportamento da fratura em materiais elásticos lineares, levando em conta a influência do fator de intensidade de tensão na propagação da fratura.

2.3.3 Modelo de fissura fictícia

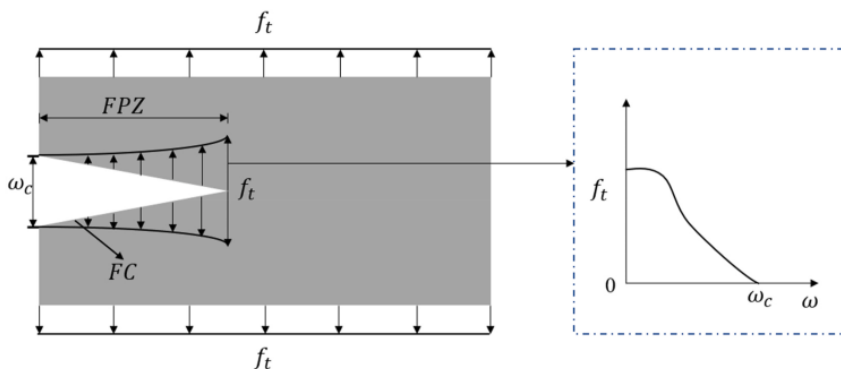
O surgimento de fissuras no concreto é um processo progressivo que envolve o desenvolvimento de deformações na região pré-pico, seguido pela localização de deformações e a formação de uma fissura visível na região pós-pico. Em um sólido prismático de concreto, com entalhe em sua face inferior, quando submetido ao esforço de flexão, uma zona de microfissuras se desenvolve na região à frente da extremidade do entalhe, a qual reduz consideravelmente a concentração de tensões neste ponto. Nesta região, ocorre transferência de tensões normais entre as faces da fissura coesiva, que é uma propriedade intrínseca dos

materiais quase frágeis. As faces da fissura não estão totalmente separadas e surgem forças moleculares atrativas, denominadas forças coesivas.

No contexto da simulação numérica para análise da propagação das fissuras no concreto, um modelo de zona de processo coesivo foi inicialmente proposto e discutido no início da década de sessenta, por Dugdale (1960) e Barenblatt (1961). Nessa região coesiva, onde ocorre o fenômeno característico do concreto sob tração, é denominada de modelo de fissura fictícia. Em outras palavras, a região de processo de fratura é composta por várias regiões de microfissuras que são substituídas por fissuras fictícias no concreto, o qual "equivale a uma área contendo microfissuras e alguns ligamentos restantes para a transferência de tensões" Xu, S., e Reinhardt, H. W. (1999).

Quando a tensão na ponta da trinca fictícia atinge um valor limite, ou seja, a resistência do concreto à tração, f_t , a trinca fictícia começa a se propagar e o material começa a sofrer danos. A tensão coesiva presente na superfície da fissura fictícia diminui à medida que o material danificado se separa. Na figura 18, o modelo de fissura fictícia é baseado na curva força-deformação do material sob tensão obtida do módulo de Young, f_t e energia de fratura (G_f).

Figura 18: Modelo de fissura fictícia e curva de tensão-deformação do concreto



Fonte: ZHANG et al., 2023)

2.3.4 Modelo de fissura efetiva

A ideia principal do modelo de fissura efetiva, consiste em substituir a energia consumida na zona de fratura do entalhe pré-existente por meio do efeito de dissipação de energia equivalente durante a formação de trincas adicionais livres de tração. Em seguida, essas trincas adicionais são sobrepostas à profundidade do entalhe pré-existente na viga. No processo de fratura do concreto, no modelo de fissura efetiva, as microfissuras se originam a partir do entalhe de acordo com que se vai aumentando a carga. À medida que as microfissuras se unem,

elas gradualmente se expandem. Esse padrão de desenvolvimento e origem da trinca resulta em um comportamento pré-pico não linear na relação entre carga aplicada e o aumento da deflexão. Assume-se que a rigidez do entalhe no corpo de prova se mantém constante até atingir o pico de carga, e a fratura do corpo de prova só irá ocorrer somente após o desenvolvimento completo da microfissura (ZHANG et al., 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, apresenta-se de forma detalhada os materiais usados e os métodos aplicados para conduzir a pesquisa, assegurando que os testes possam ser replicados e garantir a confiabilidade dos resultados.

3.1 Materiais

O estudo das características dos materiais do concreto é de suma importância. Esses dados, obtidos seguindo todas as prescrições das normas técnicas aplicáveis aos insumos utilizados, fornecem informações necessárias sobre as características do material, como tamanho de partícula, densidade e finura, que são muito importantes no dimensionamento da mistura e na pesquisa sobre o comportamento do concreto.

Para o CCV, os materiais utilizados serão, o cimento Portland CP II - E, agregado miúdo (Areia), agregado graúdo (Brita 0) e a água, nas proporções adequadas adquiridas pelo estudo de traço. O CCVRFP foi utilizado os mesmos materiais, com a diferença da adição da fibra de álcool polivinílico (PVA), na menor proporção indicada pelo fabricante (Kuraray).

Para o CAA os materiais constituintes foram: o cimento Portland CP II - E, agregado miúdo (Areia), agregado graúdo (Brita 0), adição do pó de mármore e do aditivo superplastificante (ADI-SUPER H25) e para o CAARFP teve a adição adicional da fibra PVA.

3.1.1 Cimento

Cimento Portland CP II é o cimento mais utilizado na construção civil, portanto, o mais acessível em várias partes do Brasil, e é produzido pela fusão de clínquer (material proveniente da calcinação de calcário e argila) com adições de escória de alto forno e materiais pozzolânicos. A escória utilizada no cimento melhora suas propriedades mecânicas, sua trabalhabilidade, além de reduzir o calor de hidratação e a permeabilidade e contribuir para a redução do dióxido de carbono (CO₂). As pozzolanas são materiais à base de silício que, ao reagirem com o hidróxido de cálcio, presente no cimento formam, durante a hidratação, como resultado

compostos que aumentam a resistência e durabilidade do concreto (Mehta, P. K., & Monteiro, P. J.M., 2014).

O cimento CP II E, figura 19, possui particularidades em relação aos outros tipos do mesmo produto, reduz o calor de hidratação, aumenta a trabalhabilidade e a permeabilidade.

Figura 19: Amostra do cimento CP II E.



Fonte: o próprio autor.

Para um grande volume de concretagem, esta característica pode ser favorável, pois a liberação de calor através da hidratação é menor, o que evita fissurações. Por este motivo, o cimento empregado neste trabalho será o CP II E 32, fabricado pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), e as características do material está compilado na tabela 2:

Tabela 2: Características do cimento CP II E 32 - CSN

Propriedade	Valor típico
Finura (peneira 75 μm)	$\leq 12\%$
Massa específica	2,90 a 3,10 g/cm^3
Massa específica aparente	1,10 e 1,30 g/cm^3
Área específica (Blaine)	300 a 400 m^2/kg
pH em solução aquosa	12
Cor	Tende a ser de cor cinza claro, ligeiramente mais clara devido à presença de escória
Início de pega	≥ 60 minutos
Fim de pega	≤ 600 minutos
Resistência à compressão aos 7 dias	≥ 20 MPa
Resistência à compressão aos 28 dias	≥ 32 Mpa

Fonte: o próprio autor.

3.1.2 Resíduo do Corte de mármore e granito (RCMG)

Como o RCMG é um material fino (figura 20), ele foi usado como adição mineral para melhora da viscosidade do CAA. A pasta foi adquirida em empresas de marmoraria da cidade, obtidas através do beneficiamento dos mármore e granitos, secou-se ao ar livre, no Laboratório de Estruturas da UNIFEI. Após a secagem passou-se o material, destorroado previamente, pela peneira com malha de 1,20 mm, utilizando-se o material passante.

Figura 20: Amostra do RCMG.



Fonte: o próprio autor.

Seu efeito no concreto pode ser examinado em termos de propriedades mecânicas, durabilidade e reologia.

Os principais efeitos na confecção de CAA são: a melhor trabalhabilidade e fluidez, a substituição de alguns dos agregados por resíduos finamente moídos como RCMG, pode realmente tornar o concreto mais reológico (ALCÂNTARA, 2004) — portanto, de maior fluxo, o que é muito importante em concretos autoadensáveis. Esses resíduos podem atuar como lubrificantes entre os cimentos, resultando em mais coesão e concreto fluido. Segundo Alcântara e Santos (2012), a adoção da relação finos/cimento variando de 0,35 a 0,50 mostra-se altamente eficaz no controle da segregação do concreto.

A trabalhabilidade do concreto aumenta porque as partículas finas do resíduo ajudam a diminuir a separação dos agregados e o problema de exsudação de água no concreto autoadensável. Isso é especificamente relevante para a qualidade do CAA em termos de homogeneidade e resistência final.

Outro benefício desta adição à mistura de concreto está ligado à redução da porosidade e da permeabilidade do compósito cimentício; o que pode induzir em melhorias na resistência à penetração de cloretos ou outros agentes agressivos (MARTINS, 2021). É esse aumento na densidade de massa da matriz devido à presença de resíduos de mármore contendo calcita que

tem sido responsável por uma maior estabilidade do concreto em ambientes altamente agressivos.

Além disso, o uso de resíduos de mármore e granito como agregado em CAA também ajuda a tornar a construção ambientalmente mais sustentável por meio da redução do uso de materiais virgens naturais e do nível de resíduos depositados em aterros sanitários. Isso também é conhecido por compensar alguma quantidade de emissão de CO₂, já que a produção de cimento é uma das atividades mais poluentes considerando a emissão de gases de efeito estufa.

O RCMG aumenta o encolhimento do concreto, especialmente em água de mistura não ajustada. Mais encolhimento pode levar à vulnerabilidade a rachaduras, a menos que medidas preventivas suficientes sejam tomadas, como por exemplo, a adição de fibra.

A utilização de resíduos de mármore e granito para CAA parece uma alternativa muito interessante, capaz de melhorar a sustentabilidade e o desempenho do concreto no que se refere às respostas de trabalhabilidade e durabilidade.

3.1.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante é um composto químico que, ao ser adicionado ao concreto, melhora suas propriedades de trabalhabilidade e fluidez. Isso é resultado de sua capacidade de dispersar as partículas de cimento e dos agregados, facilitando o manuseio do concreto.

Estes aditivos são geralmente compostos por lignossulfonatos, policarboxilatos ou polímeros de alto peso molecular, que, ao contato com o cimento, tem a capacidade de aderir as suas partículas, criando uma repulsão eletrostática que impede sua aglomeração, reduzindo a necessidade de uma maior quantidade de água na mistura para a consistência desejada, produzindo concretos mais fluidos.

Concretos com adição de superplastificante apresentam uma menor tendência à segregação e/ou exsudação quando bem dimensionados, além de proporcionar uma superfície mais lisa e homogênea, melhorando seu acabamento superficial.

Além da dosagem correta, especificada pelo fabricante, alguns fatores devem ser considerados para a obtenção do concreto desejado, como, a temperatura ambiente, tempo em que a mistura é agitada e os materiais constituintes da mistura.

O aditivo utilizado é fornecido pela empresa ADITIBRAS, da linha ADI-SUPER, da família H25, que tem em sua base de fabricação polímeros de éteres carboxílicos modificados, que conferem à mistura uma alta fluidez, com uma relação água/materiais cimentícios muito

baixa, gerando um produto final com alta resistência mecânica inicial e final. As principais propriedades deste material, segundo o fabricante, estão listadas na tabela 3:

Tabela 3: Propriedades do superplastificante ADI-SUPER H25 da Aditibras.

Característica	Descrição
Uso principal	Aditivo redutor de água de alta eficiência
Aplicação	Concretos de alta performance e CAA
Base química	Policarboxilato modificado
Dosagem	Varia de 0,3% a 2,0% do peso do cimento, conforme a
Recomendada	necessidade de fluidez e resistência
Resistência inicial	Aumenta a resistência inicial e final
pH	Entre 5 e 7
Densidade	Aproximadamente 1,05 g/cm ³

Fonte: manual do fabricante (adaptado pelo autor).

3.1.4 Fibras PVA

São adições utilizadas para combater a fissuração nos concretos, aumentando sua durabilidade. Elas aumentam não só o controle do aparecimento de fissuras, devido à dispersão das fibras no meio, reforçando a estrutura e auxiliando na melhoria da distribuição das tensões aplicadas. Como aumentam a sua resistência à tração, restringem também a propagação das fissuras, uma vez instaladas, impedindo seu aumento, reduzindo possíveis colapsos estruturais. Proporcionam ainda uma redução de retração e aumentam sua resistência ao impacto.

A fibra utilizada, neste trabalho, é a KURALON™ da fabricante Kuraray, mostrada na figura 21. É um produto sintético feito de resina PVA (álcool polivinílico).

Figura 21: Amostra da fibra de PVA.



Fonte: o próprio autor.

A empresa Kuraray iniciou a produção comercial desta fibra em 1950 e agora possui uma longa história de uso em compósitos de cimento.

As fibras de PVA contém propriedades excepcionais, como alta resistência, alta aderência à matriz de cimento e resistência à alcalinidade e aos raios UV.

As características indicadas pelo fabricante são mostradas na tabela 4:

Tabela 4: Característica da fibra Kuralon.

Fibra	Diâmetro	Comprimento	Densidade	Dosagem	
	(μm)	(mm)	(Kg/m^3)	Vol %	(Kg/m^3)
Kuralon K-II™ RF 400	290	15	1,3	0,46-0,75	6,0-10

Fonte: Manual do fabricante (adaptado pelo autor).

Para o desenvolvimento do trabalho, foi fixado o valor de médio de 6 Kg/m^3 de adição de fibras.

3.1.5 Agregado miúdo – Areia média natural de rio

A areia média (figura 22) tem os grãos variando entre 0,25 mm e 2,0 mm, geralmente, são arredondadas devido ao atrito ocasionado pelo movimento das partículas no leito do rio. Estas características a torna mais estável, facilitando o arranjo dentro da mistura do concreto.

É um dos insumos mais utilizados na construção civil na produção de argamassas, concreto, asfalto entre outros.

Figura 22: Amostra de areia natural.



Fonte: o próprio autor.

3.1.6 Agregado graúdo – Brita 0

A brita é o insumo proveniente da trituração do quartzo e seu diâmetro variando entre 9,5 mm até 12,5 mm, como mostrada na figura 23.

Sua adição colabora com o aumento da resistência e a durabilidade do concreto. Naturalmente resistente, sua utilização é amplamente utilizada em estruturas que sofreram cargas, além de serem duráveis e resistentes a intemperes, o que aumenta a vida útil das estruturas de concreto, sejam eles armados ou não.

Figura 23: Amostra da brita 0.



Fonte: o próprio autor.

3.2 Ensaios de caracterização

A caracterização dos materiais constitui uma etapa primordial de qualquer investigação experimental, e o concreto não é uma exceção. O propósito da caracterização no presente estudo é definir as propriedades físicas e químicas dos materiais, incluindo o cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, aditivos, entre outros, e garantir a alta qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

As normas de caracterização dos materiais utilizados neste trabalho estão descritas na tabela 5:

Tabela 5: Normas para caracterização dos materiais.

(continua)

Material	Norma	Descrição
Cimento	ABNT NBR 16697:2018	Cimento Portland comum. Estabelece as características físicas e químicas do cimento, os requisitos de ensaio, os limites de composição química, as propriedades mecânicas, entre outros aspectos.
	ABNT NBR 16605:2017	Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica

3.3.1 Cimento

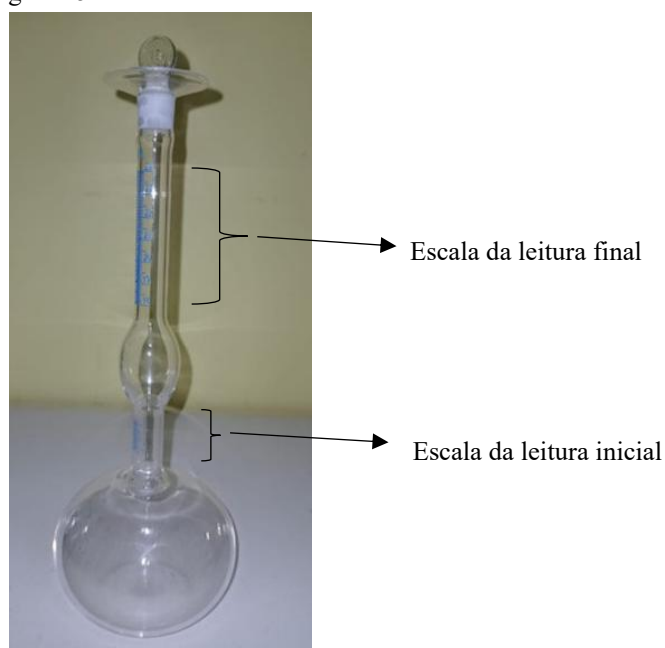
Para o cimento, as características físicas e químicas foram adquiridas através dos dados disponibilizados pelo fabricante. O ensaio realizado foi o de massa específica, seguindo as prescrições da norma ABNT NBR 16605:2017.

Foram realizados dois ensaios para se obter uma média dos valores, os quais apresentaremos a seguir:

Ensaio

Para o ensaio, adiciona-se querosene ou outro líquido que não reaja com o cimento, até um volume inicial que fique entre as marcas de 0 a 1 cm³, em seguida é vertida, no frasco de Le Chatelier, 60 g de cimento, agita-se a mistura para eliminar as bolhas de ar contidas na solução e anota-se o valor final do volume. Na figura 25 está representada o frasco com as escalas onde se realizam as leituras iniciais e finais de volume.

Figura 25: Frasco de Le Chatelier



Fonte: o próprio autor.

A massa específica é dada pela equação 3.3.1, a seguir:

$$\rho = \frac{m}{v_2 - v_1} \quad (3.3.1)$$

Em que:

ρ massa específica (g/cm³)

v_1 leitura do volume inicial (cm³)

v_2 leitura do volume final (cm³)

3.3.2 Areia natural - Massa específica e massa específica aparente

A massa específica da areia é muito importante para o concreto, pois influencia diretamente em sua densidade, resistência e trabalhabilidade. Areias com massa específica mais alta oferecem concretos mais densos e resistentes. Além disso, sua determinação permite definir a proporção correta de materiais na mistura para que o concreto esteja em conformidade com a especificação do projeto e uniforme em toda a sua estrutura. A análise seguiu as diretrizes impostas pela NM 52:2009. Foram realizados dois ensaios para obter-se uma média.

Para o ensaio, tomou-se 1 kg do material para cada amostra, deixando as mesmas submersas em água durante 24 horas, seguindo para a secagem prévia, por ação de um soprador térmico, afim de se adquirir, para cada uma das amostras, o estado saturado superfície seca (SSS), que é observado quando ao se colocar o material no molde e aplicar um adensamento (25 golpes) com a haste de socamento, o agregado desmorona, não guardando a forma do molde (Figura 26).

Figura 26: Determinação da condição SSS



Fonte: acervo do autor.

Com o a condição atingida, ou seja, desmoronamento da areia assim que se retira o molde troncocônico, toma-se cerca de 500 g deste material para a determinação da massa específica, utilizando-se do picnômetro de 500 ml. O procedimento segue as seguintes etapas, coloca-se a amostra no picnômetro, registra-se a massa do conjunto, enche-se o frasco com água até cobrir toda amostra até próximo a marca de 500 ml, movimentar o frasco com o intuito de eliminar as bolhas de ar, completar com água até a marca de 500ml e determina-se a massa total, após este procedimento, esvaziar o frasco, coletando toda amostra e seca-la em estufa até constância de massa e pesar o agregado seco.

Massa Específica Aparente do Agregado Seco (d_1):

$$d_1 = \frac{m}{V} \quad (3.3.2.a)$$

Em que:

d_1 = massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)

m = massa da amostra seca em estufa (g)

V = volume do frasco (cm³)

Massa Específica do Agregado Saturado Superfície Seca (d_2):

$$d_2 = \frac{m_s}{V} \quad (3.3.2.b)$$

Em que:

d_2 = massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³)

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V = volume do frasco (cm³)

Massa Específica Real do Agregado (d_3):

$$d_3 = \frac{m}{V - V_a} \quad (3.3.2.c)$$

Em que:

d_3 = massa específica real do agregado (g/cm³)

m = massa da amostra seca em estufa (g)

V = volume do frasco (cm³)

V_a = volume de água adicionada ao frasco (cm³)

Cálculo do Volume de Água Adicionada (V_a):

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (3.3.2.d)$$

Em que:

m_1 = massa do conjunto (frasco + agregado) (g)

m_2 = massa total (frasco + agregado + água) (g)

ρ_a = massa específica da água (g/cm³), geralmente 1,00 g/cm³ a 23°C

3.3.3 Areia natural – Análise granulométrica agregado miúdo

A distribuição granulométrica da areia é muito importante para atingir uma qualidade maior do concreto produzido porque afeta principalmente a resistência e a durabilidade do material.

A norma que prescreve este ensaio é a ABNT NBR 17054:2022 – Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.

A análise é conduzida passando-se a areia por um conjunto de peneiras da série normal (4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm) nas quais, separa-se individualmente os vários tamanhos de grãos, que são componentes do agregado. Essa distribuição granulométrica determina o diâmetro máximo, o módulo de finura e a curva granulométrica do material ensaiado.

O módulo de finura é determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Seu valor indica se o agregado em questão é mais fino ou mais grosso. Quanto maior for este resultado, mais grosso será o agregado. A classificação pelo módulo de finura é determinada de acordo com os seguintes limites:

- Areia fina: módulo de finura entre 1,55 e 2,2;
- Areia média: módulo de finura entre 2,2 e 2,9;
- Areia grossa: módulo de finura entre 2,9 e 3,5.

Já o diâmetro máximo é determinado pela abertura da malha da peneira onde a porcentagem retida acumulada do material é igual ou menor a 5%.

3.3.4 Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

O ensaio tem por objetivo determinar a massa específica, que não considera os vazios; a massa específica aparente, que considera os vazios entre os grãos e a absorção de água dos agregados, que em nosso trabalho é a brita, proveniente da trituração do quartzo.

O procedimento segue norma da ABNT NBR NM 53e seguem as etapas descritas a seguir:

A primeira etapa consiste em preparar a amostra, separando cerca de 2 Kg do agregado, tomando-se o cuidado de retirar as impurezas contidas na amostra (pó, argila, matéria orgânica), em seguida levar a estufa para secagem, em estufa a 105 – 110 °C, até a constância de massa, deixar resfriar até a temperatura ambiente.

Na segunda etapa devemos saturar a amostra, imergindo o agregado seco em água por 24 horas, com o objetivo de se atingir a condição saturada superfície seca (SSS), esta condição é obtida ao se retirar o agregado da imersão e seca-lo superficialmente com um pano úmido, sem remover a água interna contida no agregado e registrar sua massa (m_{sss}), após este procedimento realiza-se a pesagem hidrostática, que consiste em colocar os agregados na condição SSS submersos em água, em um cesto metálico, acoplados a uma balança e registrar a massa submersa (m_{sub}).

A próxima etapa é colocar o agregado novamente em estufa para secagem e após o resfriamento, anotar a massa seca (m_{sec}).

Os cálculos são:

Massa específica real

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{sss} - M_{sub}} \quad (3.34.a)$$

Massa específica aparente

$$\rho_{aparente} = \frac{M_{sec}}{M_{sec} - M_{sub}} \quad (3.3.4.b)$$

Absorção de água (%)

$$Abs = \left(\frac{M_{sss} - M_{sec}}{M_{sec}} \right) \times 100 \quad (3.3.4.c)$$

3.4 Estudo da Dosagem

A dosagem de concreto é um método para determinar a quantidade correta de materiais, como cimento, agregados (areia e brita), água e aditivos necessários para a fabricação da mistura com as propriedades desejadas. A dosagem adequada é importante para garantir a resistência, durabilidade e trabalhabilidade do concreto.

3.4.1 Dosagem concreto convencional

Para a dosagem do concreto convencional, foi utilizado o método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

O método utilizado pela ABCP foi inspirado no da ACI (American Concrete Institute), adaptado para utilização dos agregados encontrados em nosso país.

3.4.2 Dosagem concreto autoadensável:

A dosagem de concretos autoadensáveis compreende a determinação das proporções adequadas para garantir a mistura, a fluidez e a capacidade de se auto adensar.

O traço utilizado neste trabalho será uma reprodução do concreto estudado por Martins, M. A. de B. (2021). O método empregado para a confecção do mesmo foi proposto por Gomes, Gettu e Agulló (2003) que consiste em obter a dosagem ideal de concreto através das otimizações da pasta e dos finos e outros materiais que comporão a matriz cimentícia.

O método de dosagem proposto por Gomes, Gettu e Agulló (2002.2003) para concreto autoadensável é dividido em três fases principais: a fase 1, está relacionada à composição da pasta. A relação água/cimento é determinada pelas características específicas desejadas no concreto.

A quantidade de adições, se utilizada, tem que atender às características exigidas e a quantidade de superplastificante é determinada pelo ponto de saturação das amostras avaliadas no cone Marsh. O limite de saturação é estabelecido como a razão de saturação que leva a um ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ dentro do gráfico log T versus quantidade de superplastificante. A melhor relação das adições é aquela que faz com que a pasta cubra a maior área, sem vazamentos, e leva entre 20 e 35 segundos para atingir 115 mm de largura.

Para a fase 2, o Esqueleto Granular é analisado. Os agregados graúdos e finos formam uma estrutura granular, caracterizada pela maior densidade seca e menor teor de vazios. A densidade e o teor de vazios são apurados experimentalmente através da norma Mercosul MN 45 (2006) ajustada para composições de agregados não compactados.

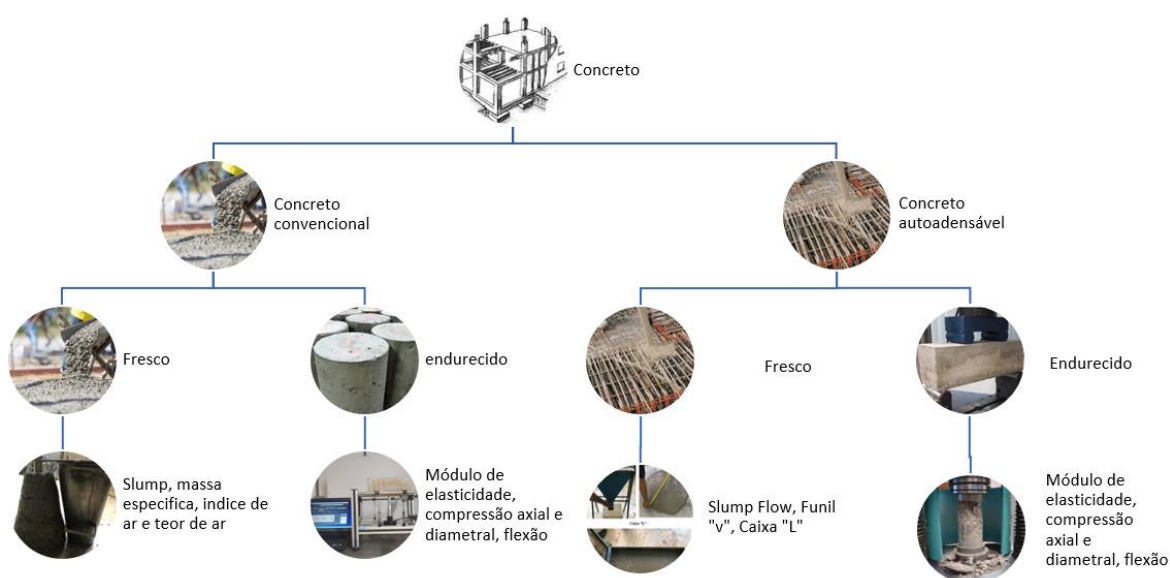
Finalmente, na fase 3, determina-se o volume ideal da pasta. Adicionando-se esta mistura aos agregados até que o concreto atenda aos requisitos de autoadensabilidade, ensaia-se o concreto e avaliam-se sua capacidade de espalhamento, sua habilidade de passar entre obstáculos e a não segregação.

Este tipo de estudo de dosagem, permite uma determinação dos parâmetros da pasta e do esqueleto granular, separadamente, além de avaliar a viscosidade e a fluidez da pasta, fatores primordiais no comportamento dos CAAs. O método contribui para uma redução da porosidade e retração do concreto minimizando o volume da pasta.

3.5 Ensaios de Concreto

Os ensaios de concreto foram divididos, como demonstrado no fluxograma apresentado na figura 27, realizados ensaios tanto no concreto convencional, como no autoadensável, na primeira etapa, os dados são adquiridos ainda com o concreto fresco, já na segunda, estes dados são obtidos através de ensaios com o concreto endurecido.

Figura 27: Fluxograma dos ensaios.



Fonte: o próprio autor.

Como descrito anteriormente, antes da primeira etapa, fez-se o estudo dos traços, para obter as quantidades de cada material constituinte do compósito cimentício.

A quantidade de concreto necessário para o estudo foi de 0,047 m³, quantidade necessária para o preenchimento de três formas prismáticas de 150 x 150 x 500 mm e oito formas cilíndricas de 100 x 200 mm.

3.5.1 Concreto estado fresco

Para o concreto no estado fresco, os ensaios foram divididos entre o concreto convencional e o concreto autoadensável, os seguintes ensaios foram realizados:

1. Concreto Convencional

No concreto convencional os ensaios, divididos em fase fresca, seguiram as prescrições das normas brasileira.

Slump Test: regido pela norma ABNT NBR 16889:2020 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, esta norma descreve o método para determinar a consistência do concreto fresco, aplicável aos concretos plásticos e coesos.

Consiste em colocar sobre uma base nivelada uma placa onde será colocado o molde troncocônico, ambos devem ser umedecidos e preencher rapidamente o molde com o concreto, em três camadas, cada uma delas deve preencher um terço da altura total do molde, adensar cada camada, com a haste de adensamento, com 25 golpes uniformemente distribuídos, tomando-se o cuidado de não ultrapassar as camadas, ou seja, os golpes devem apenas penetrar a superfície da camada anterior. Limpar a placa base ao redor do molde, levantando-o com cuidado no sentido vertical, imediatamente após a retirada do molde, medir seu abatimento que nada mais é do que a diferença da altura do molde e a altura do concreto após ser desmoldado.

Massa específica, índice de ar e teor de ar: a norma que prescreve o método de ensaios é a ABNT NBR 9833:2009 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e o teor de ar pelo método gravimétrico.

O método consiste em colocar o concreto fresco em um recipiente com medidas conhecidas, para a determinação de seu volume, ele deve ser cilíndrico, indeformável. Determinar a massa do recipiente limpo antes de se despejar o concreto em seu interior, o preenchimento de ser realizado em três camadas seguidas de adensamento que devem seguir o mesmo procedimento da determinação da consistência, fazer o rasamento após a última camada, proceder com a limpeza externa do recipiente e determinar sua massa. Após estes procedimentos efetuar os cálculos descritos na norma.

2. Concreto autoadensável:

Para o concreto autoadensável, no estado fresco, foram realizados três testes, ilustrados na figura 29: espalhamento ou *Slump Flow*, regido pela norma ABNT NBR 15823-2:2017, utilizada para medir a fluidez e, como o próprio nome diz, verifica sua capacidade de espalhamento, seus limites aceitáveis para considerarmos um CAA ficam entre 550-850 mm. A caixa “L” ou *L-box*, sua norma é a ABNT NBR 15823-4:2017, utilizado para medir a capacidade de escoamento do concreto, que consiste em passar o concreto entre barras, para simular a ferragem nas caixarias das obras, e verificar sua habilidade em passar pelas barras, quando o mesmo para de fluir e estabiliza, mede-se a altura no início da caixa (H2), onde o CAA começa a fluir, e repetindo a medição da altura no final da caixa (H1). A razão entre estes valores (H2/H1) deve ser maior que 0,8. Por último, o ensaio do Funil “V”, regido pela ABNT NBR 15823-5:2017, que mede a capacidade de fluidez e a viscosidade, o procedimento para ensaiar o CAA é simplesmente despejar o concreto dentro do funil, após preencher todo o aparelho, libera-se a abertura no gargalo, e toma-se o tempo que o concreto leva para escoar. Este tempo deve estar entre o intervalo de 6 a 12 segundos. Quanto menor o tempo, verifica-se uma maior fluidez, e ao contrário, um tempo maior indica uma maior viscosidade.

Figura 29: Ensaios concreto estado fresco para CAA.



Fonte: próprio autor.

3.5.2 Concreto estado endurecido

Neste trabalho foram realizadas algumas análises do concreto no estado endurecido, cujos ensaios efetuados para a caracterização mecânica estão descritos a seguir.

1. Módulo de elasticidade dinâmico:

Para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), a ABNT NBR 8522-2:2021 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração, conduziram a aquisição dos dados, que estão listados no Apêndice B e seus valores médios mostrados na tabela 16.

Este ensaio foi realizado utilizando o aparelho da Sonelastic®, figura 30, do laboratório de mecânica da Universidade Federal de Itajubá, o aparelho mede o módulo de elasticidade dinâmico através de excitação por impulso.

Figura 30: Aparelho Sonelastic®, módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: o próprio autor.

Fez-se necessário a transformação do módulo de elasticidade dinâmico para o de elasticidade estático uma vez que métodos dinâmicos geralmente darem uma superestimativa na rigidez do concreto, por eles serem menos sensíveis à criação de microfissuras e deformação permanente sob cargas reais. O módulo estático é muito melhor indicado em termos do comportamento estrutural do concreto dentro de condições práticas de carregamento. Neville (1995) e Carino (1994) estudaram a conversão do módulo de elasticidade dinâmico em módulo de elasticidade estático para o concreto. Também foi descoberto por Carino que o módulo dinâmico é maior devido à menor sensibilidade das microfissuras internas que aparecem em carregamentos estáticos. Carino sugeriu correções empíricas que levam em consideração as variáveis do concreto jovem e endurecido. O presente autor sugeriu, também, que concretos com alta resistência podem ter módulo de elasticidade dinâmico muito próximo do estático, enquanto concretos mais porosos apresentam uma maior discrepância.

Neville sugere que o módulo dinâmico pode ser de 10 % a 20 % maior que o estático. Portanto, esta relação pode ser descrita pela equação 3.5.2.

$$E_c = k \cdot E_d \quad (3.5.2.a)$$

Em que:

E_c módulo de elasticidade estático

k coeficiente que geralmente varia de 0,7 a 0,9

E_d módulo de elasticidade dinâmico

2. Ensaio de resistência compressão

A norma que descreve o método de ensaio para a determinação da resistência à compressão de corpos de prova (cp) cilíndricos é a ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, utilizou-se amostras de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Para o ensaio recorreu-se a máquina universal de ensaios do laboratório de estruturas, da marca Time Testing Machines – WAW – 1000C, do Instituto de Recursos Naturais (IRN), da Unifei, com capacidade de 1000 Ton. A máquina realiza diversos ensaios, como, compressão, tração, cisalhamento.

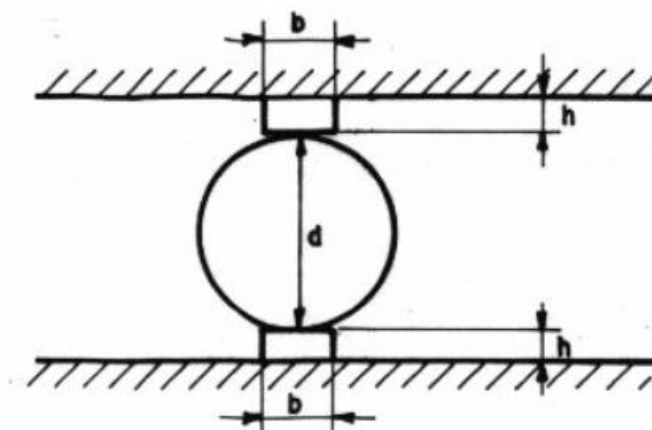
A realização do ensaio dar-se-á após sua cura úmida até a idade de ensaio e a regularização da superfície de base e topo dos cps, para se ter uma superfície lisa e plana, posiciona-se o cp na máquina, o carregamento deve ser feito continuamente e sem choques e sua velocidade deve-se manter constante até a ruptura do cp.

3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio é regido pela norma ABNT NBR 7222:2011 – Concreto e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Neste trabalho, utilizou-se cps de concreto nas dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, o posicionamento do cp na máquina está ilustrado na figura 31, executa-se o carregamento contínuo e sem choques, com velocidade constante até o rompimento da amostra.

Figura 31: posicionamento do corpo de prova.



Fonte: ABNT NBR 7222:2011.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela expressão 3.5.2.b.

$$f_{ct, sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3.5.2.b)$$

Em que:

$F_{ct, sp}$ resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

F força máxima, expressa em newtons (N);

d diâmetro do dorpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

4. Resistência à tração na flexão

A melhor forma de caracterizar concretos reforçados com fibra é através dos ensaios que avaliam os índices de tenacidade e parâmetros de resistência à flexão. Esses parâmetros de fratura podem ser descritos pela relação entre força e abertura de fissura. Para este tipo de compósito, utilizam-se as normas JSCE-SF4 (1984), ASTM C1609 (2019), EN 14651 (2007) e ABNT NBR 16940 (2021). Para este trabalho usaremos as seguintes normas: americana (ASTM C1609:2019), a brasileira (ABNT NBR 16940:2021) e a ASTM C 78:2022, por melhor se enquadrarem no escopo deste trabalho e estão descritas a seguir.

5. ASTM C 78 (2022) – Método de teste padrão para Resistência à flexão do concreto.

Esta norma é utilizada para ensaios de concreto sem adição de fibras, o método de ensaio abrange a determinação da resistência à flexão do concreto através da utilização de uma viga simples com carregamento a três pontos.

Utilizou-se este método para a realização do ensaio das vigas CCV e CAA sem adições de fibra.

O resultado obtido é o do módulo de ruptura, ou seja, a resistência à tração na flexão e cálculo da tenacidade, foram usados cps de altura e largura iguais de 150 mm e um comprimento de 500 mm.

O cálculo da resistência à tração na flexão é obtido pela expressão 3.5.2.c:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.5.2.c)$$

Em que:

R = resistência à tração na flexão (módulo de ruptura), em MPa;

P = carga máxima aplicada pela máquina de ensaio, em N;

L = distância entre apoios (vão), em mm;

b = largura da viga, em mm;

d = altura da viga, em mm.

Para a tenacidade, foi calculada a área abaixo da curva gerada até a deflexão correspondente a $L/150$, ou seja, o comprimento total do vão durante o ensaio dividido por 150.

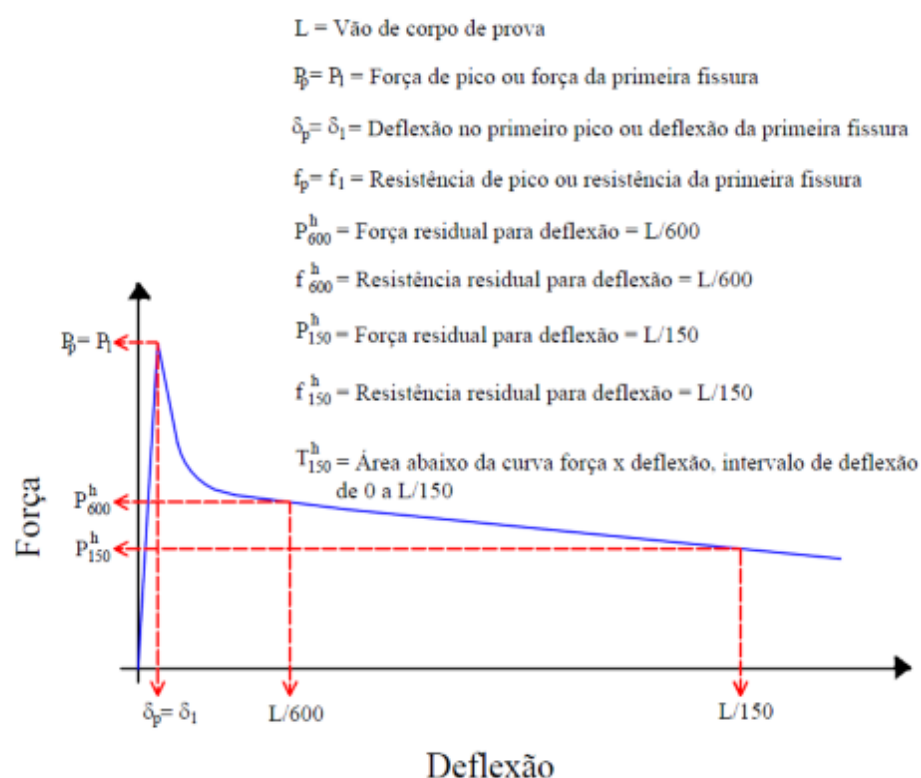
6. ASTM C1609 (2019) – Método de ensaio padrão do desempenho á flexão de concreto reforçado com fibras

Muito utilizada durante anos, a norma ASTM C1018 (1997) foi substituída pela ASTM C1609 (2010), pois apresentava o índice de tenacidade dependente da definição da primeira fissura e não considerava o tamanho e a geometria dos corpos de prova.

Esta norma, assim como a JSCE-SF4 (1984), utiliza corpos de prova prismáticos com as mesmas medidas da norma japonesa e o ponto final de deflexão, obtido no ensaio é de $L/150$.

A força de ruptura e as forças residuais são obtidas através da curva força x deflexão (Figura 32).

Figura 32: Curva força x deflexão



Fonte: ASTM C1609 (2019).

Uma particularidade da ASTM é a velocidade de carregamento durante o ensaio que é definida por deflexões específicas e dependentes da dimensão dos CP utilizado (tabela 6).

Tabela 6: Velocidade de carregamento

Dimensão do corpo de prova (CP)	Velocidade inicial até L/900 de deflexão	Velocidade secundária (L/900 – L/150) de deflexão
100 x 100 x 350 mm	0,025 – 0,075 mm/min	0,05 – 0,2 mm/min
150 x 150 x 500 mm	0,035 – 0,1 mm/min	0,05 – 0,3 mm/min

Fonte: ASTM C1609 (2019).

A maior força é registrada na curva de força x deflexão como sendo a força responsável pelo surgimento da primeira fissura. Essa norma possui uma resposta adequada para compósitos que exibem comportamento de fissura única. No entanto, para compósitos que apresentam múltiplas fissuras, a força de pico real não é observada devido à queda de carga na curva de força x deflexão. A resistência à flexão de primeira fissura nem sempre é encontrada na parte inicial da curva de força x deflexão quando o corpo de prova possui um comportamento elasto-plástico. Os cálculos de resistência à flexão da primeira fissura e suas resistências residuais são calculadas pelas equações 6.a, 6.b e 6.c:

$$f_1 = P_1 \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (6.a)$$

$$f_{600}^h = P_{600}^h \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (6.b)$$

$$f_{150}^h = P_{150}^h \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (6.c)$$

Em que:

f_1 Resistência do primeiro pico (MPa);

f_{600}^h, f_{150}^h Resistências residuais para CP com altura h, para deflexões L/600 e L/150, respectivamente (Mpa);

P_1 Força do primeiro pico (N);

P_{600}^h, P_{150}^h Forças residuais para CP de altura h, para deflexões L/600 e L/150, respectivamente (N);

L Vão entre os apoios no ensaio (mm);

b Largura do CP (mm);

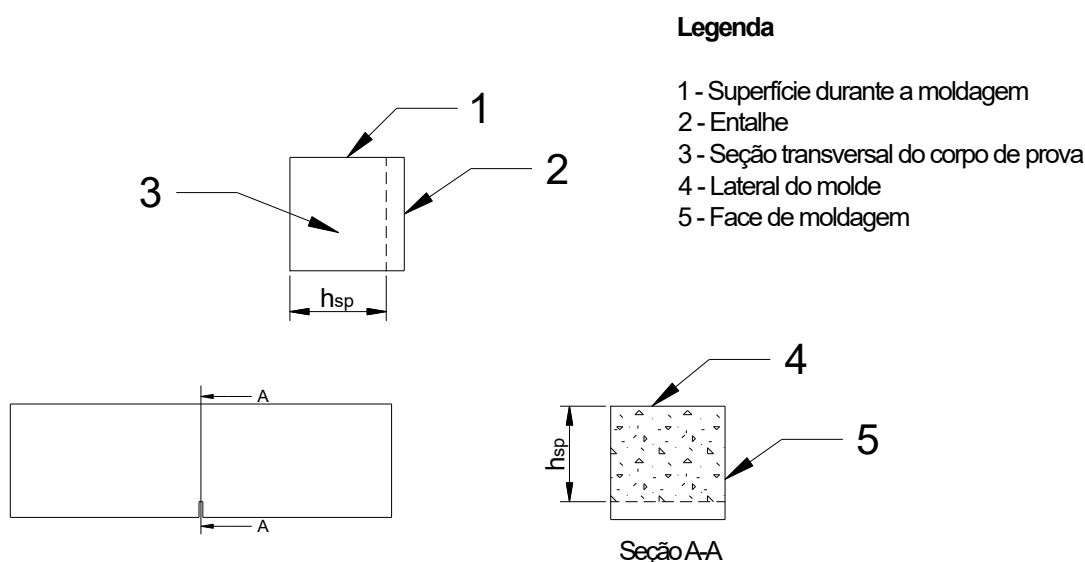
h Altura do CP (mm).

7. ABNT NBR 16940:2021 – Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio

Esta norma tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, medindo e quantificando a resistência à fratura do concreto quando ensaiado à flexão.

Deve ser criado um entalhe na amostra, seguindo as orientações apresentadas na Figura 33. Este ensaio é realizado na amostra entalhada, pois este entalhe será usado para induzir a fissura de forma controlada. Ou seja, para que a fissura, durante o ensaio, propague na região central da viga em estudo e onde será inserido o dispositivo (Clip Gauge) a ser utilizado no controle do CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) para determinação da abertura da trinca durante o ensaio.

Figura 33: Execução de entalhe



Fonte: ABNT NBR 16940:2021

Para este procedimento de teste, duas opções de capacidades de controle podem ser especificadas: medição possível por meio da medida da abertura do entalhe (CMOD) ou medição pelo deslocamento vertical do corpo.

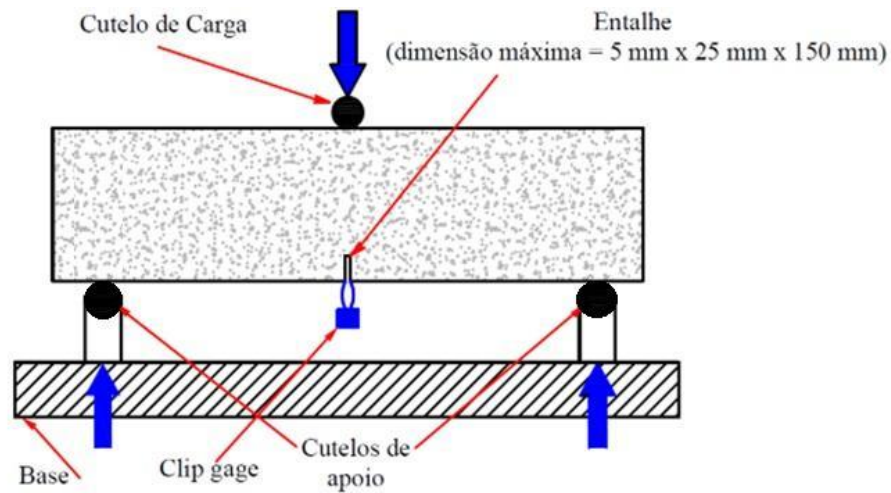
Antes de se iniciar o ensaio, os pontos de apoio devem ter sua distância verificada através de duas medições, com uma precisão de 0,1 mm. O ensaio não deve ser iniciado enquanto os roletes não estiverem devidamente apoiados contra o corpo de prova, a figura 34 retrata a forma como o corpo de prova deve ser posicionado no equipamento.

No caso de um aparelho de teste, com controle da taxa, na qual o CMOD é aumentado, ele é executado de forma que a taxa de aumento do CMOD seja mantida constante em 0,05 mm/min até CMOD = 0,1 mm. Após essa abertura do entalhe, o equipamento deve ser operado

de forma que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,2 mm/min até a finalização do ensaio. O ensaio é finalizado quando o valor da abertura atinja pelo menos 4 mm.

Se a falha começar fora do entalhe, em qualquer lado do corpo durante o teste, esta amostra deve ser descartada.

Figura 34: Posicionamento do corpo de prova



Fonte: ADEL et al., 2014, modificado pelo autor.

Para os cálculos dos resultados do limite de proporcionalidade e resistência residual à tração na flexão, deve-se, a princípio, efetuar a equivalência entre o CMOD e o deslocamento vertical, esta relação é expressa pela equação 7.a:

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \quad (7.a)$$

Em que:

δ Deflexão (mm);

CMOD Abertura de fissura.

O limite de proporcionalidade (LOP) é calculado pela equação 7.b a seguir:

$$f_L = \frac{3 F_L l}{2b(h_{sp})^2} \quad (7.b)$$

Em que:

f_L é o LOP, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

F_L é a carga correspondente ao LOP, expressa em newtons (N);

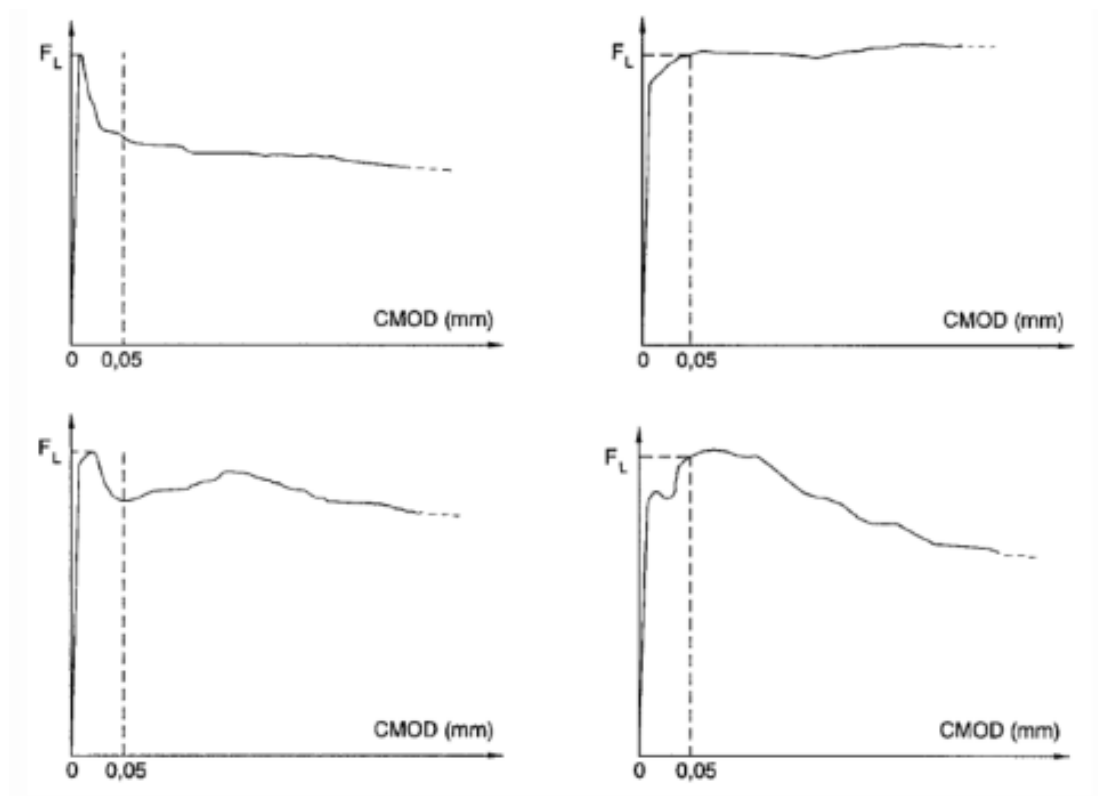
l é o comprimento do vão, expresso em milímetros (mm);

b é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h_{sp} é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

O valor de F_L deve ser lido do gráfico como uma linha paralela ao eixo de carga a uma distância de 0,05 mm no gráfico de carga vs CMOD. O valor máximo de carga na faixa de 0 a 0,05 mm (Figura 35) deve ser tomado para o valor de F_L . O LOP deve ser dado com exatidão de 0,1 N/mm².

Figura 35: Diagramas típicos de carregamento versus CMOD



Fonte: ABNT NBR 16940:2021

A resistência residual à tração na flexão $f_{R,j}$, é expressa pela equação 7.c:

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2b (h_{sp})^2} \quad (7.c)$$

Em que:

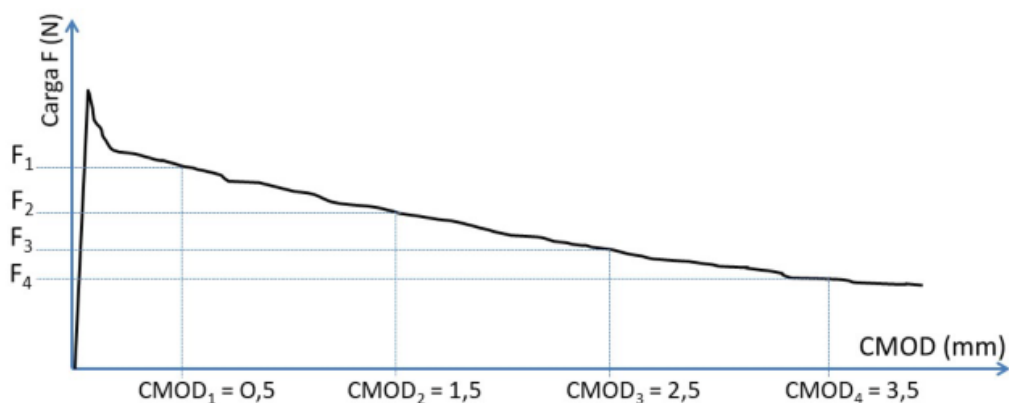
$f_{R,j}$ é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao $CMOD = CMOD_j$ (com $j= 1,2,3,4$), expressa em newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

F_j é a carga correspondente ao $CMOD = CMOD_j$ (com $j= 1,2,3,4$), expressa em newtons (N), conforme mostrado na figura 36;

l é o comprimento do vão, expresso em milímetro (mm);

b é a largura do corpo de prova, expressa em milímetro (mm);
 h_{sp} é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Figura 36: Diagrama carga versus CMOD, identificando as cargas residuais



Fonte: ABNT NBR 16940:2021

4 RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os dados e as informações obtidas, através dos ensaios, durante o desenvolvimento da pesquisa.

Os primeiros apontamentos serão das caracterizações dos materiais utilizados e que foram mencionados no item 3.2 e, posteriormente, apresentar-se-á os resultados que permitem avaliar o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras de PVA.

4.1 Caracterização

Como dito anteriormente, no item 3.1 deste trabalho, a caracterização dos materiais é uma etapa fundamental em qualquer pesquisa experimental, os ensaios realizados são listados a seguir.

4.1.1 Cimento

O ensaio realizado foi o de massa específica, seguindo as prescrições da norma ABNT NBR 16605:2017.

Foram realizados dois ensaios para se obter uma média dos valores, os quais apresentaremos na tabela 7.

Tabela 7: Resultados massa específica do cimento CP II E

Amostras	Massa Específica (g/cm ³)
Amostra 1	2,93
Amostra 2	2,94
Média	2,935

Fonte: o próprio autor.

4.1.2 Resíduo de Corte de mármore e granito (RCMG)

Para o RCMG, os ensaios realizados foram: o de massa específica e seguiram-se as prescrições da norma NM 52:2009^a, como mostrado na tabela 8, assim como os resultados da análise granulométrica:

Tabela 8: Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura da peneira (mm)	RCMG	
	% retida	% acumulada
# 4.80	0,00	0,00
# 2.40	0,00	0,00
# 1.20	1,31	1,31
# 0.60	2,03	3,34
# 0.30	2,30	5,64
# 0.15	9,79	15,43
Fundo	58,64	100,00
D_{máx} característica	0,60 mm	
Módulo de finura (MF)	1,26	
Massa específica	2,83 g/cm ³	

Fonte: o próprio autor.

4.1.3 Areia natural - Massa específica e massa específica aparente

Para a determinação das massas específica e massa específica aparente, foram utilizadas 2 amostras e o resultado destas análises está organizado na tabela 9.

Tabela 9: determinação das massas específicas, aparente e saturada superfície seca da amostra.

Volume do picnômetro aferido $V = 496,24 \text{ cm}^3$		
Amostras	Amostra 1	Amostra 2
Volume de água adicionada (V_a)	293,70 cm^3	317,00 cm^3
Massa do agregado Sat. Sup. Seca (m_s)	500,03 g	500,03 g
Massa do frasco + agregado (m_1)	804,60 g	758,30 g
massa do frasco + agregado + água (m_2)	1098,30 g	1075,30 g
Massa da amostra seca em estufa (m)	494,90 g	495,00 g
Massa específica aparente	2,44 g/cm^3	2,76 g/cm^3
Massa específica condição SSS	2,47 g/cm^3	2,79 g/cm^3
Massa específica	2,51 g/cm^3	2,84 g/cm^3

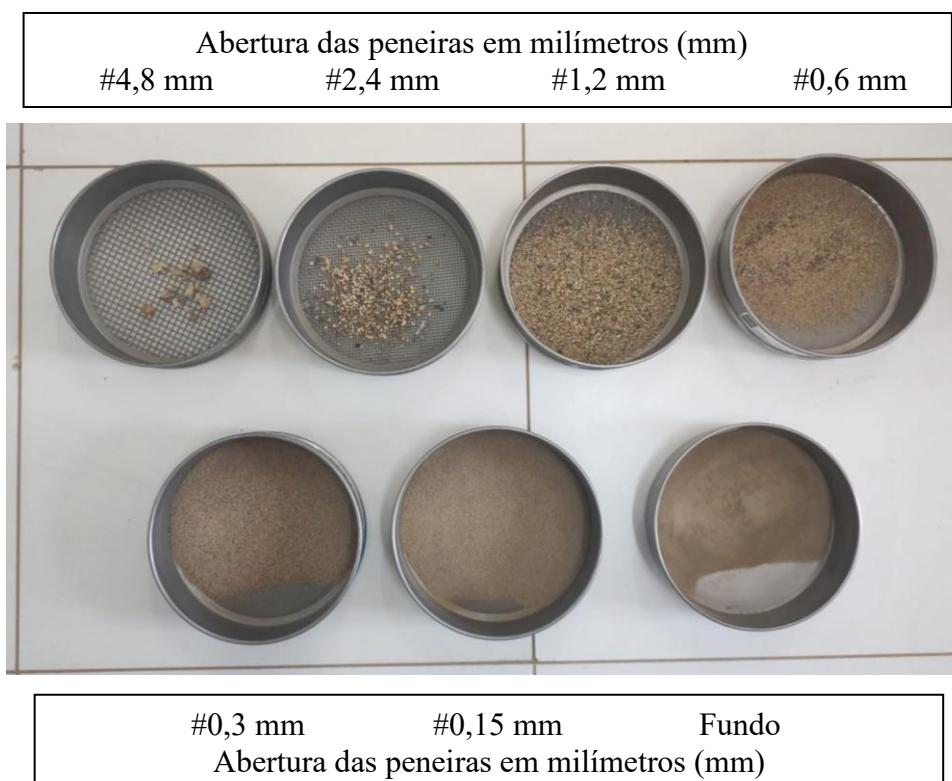
Fonte: o próprio autor.

4.1.4 Areia natural – Análise granulométrica agregado miúdo

O ensaio seguiu as orientações da ABNT NBR 17054:2022.

A figura 39 mostra a distribuição das partículas retidas em cada peneira, após a realização do ensaio granulométrico e os resultados estão listados a seguir.

Figura 39: Grãos retidos nas peneiras da série normal.



Fonte: acervo do autor.

A tabela 10 mostra os resultados obtidos do módulo de finura e diâmetro máximo característico das amostras 1 e 2.

Tabela 10: Resultado da distribuição granulométrica do agregado miúdo (amostras 1 e 2).

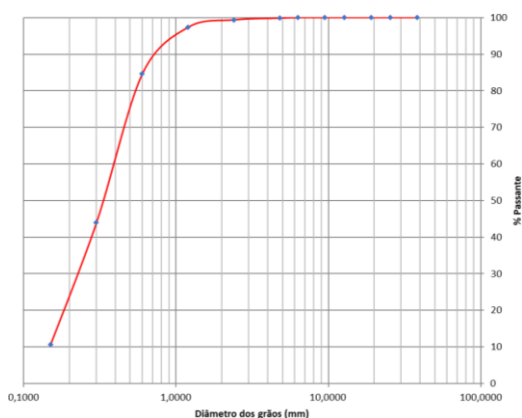
Abertura da peneira (mm)	Areia natural – Agregado miúdo (Amostra 1)		Areia natural – Agregado miúdo (Amostra 2)	
	%retida	%acumulada	%retida	%acumulada
# 4.80	0,13	0,13	0,08	0,08
# 2.40	0,49	0,62	0,41	0,49
# 1.20	2,00	2,62	1,95	2,44
# 0.60	12,74	15,36	12,44	14,88
# 0.30	40,65	56,01	44,19	59,07
# 0.15	33,32	89,33	29,72	88,80
Fundo	10,67	100,00	11,20	100,00
D_{máx} característico	1,20 mm		1,20 mm	
Módulo de finura (MF)	1,64		1,65	

Fonte: acervo do autor.

De acordo com o módulo de finura, o agregado é uma areia fina.

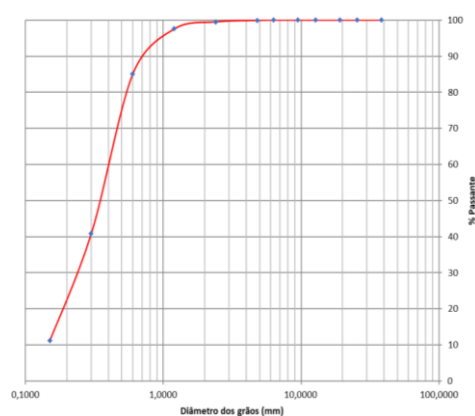
As figuras 40 e 41 mostram a distribuição granulométrica da areia natural, através de sua curva granulométrica das respectivas amostras.

Figura 40: Curva granulométrica da areia natural (amostra 1)



Fonte: próprio autor.

Figura 41: Curva granulométrica da areia natural (amostra 2)



Fonte: próprio autor.

4.2 Concreto no estado fresco

Os ensaios de concreto são divididos em duas etapas, na primeira, os dados são adquiridos ainda com o concreto fresco, já na segunda etapa, estes dados são obtidos através de ensaios com o concreto endurecido.

4.2.1 Dosagem

Os estudos de dosagem seguiram os métodos descritos nos itens 3.4.1 pra concretos convencionais e 3.4.2 para os concretos autoadensáveis e seus resultados e a tabela 11 apresenta os valores obtidos para o traço em massa para os concretos estudados.

Tabela 11: Traços dos concretos.

Mistura	Cimento	RCMG	Areia	Brita	SP	Água	Fibra
CCV	25,55	-	31,55	47,45	-	11,50	-
CCVRFP	24,02	-	33,52*	44,64	-	9,54*	0,28
CAA	21,36	6,40	40,17	35,39	0,85	8,78	-
CAARFP	21,36	6,40	42,19	35,39	0,85	6,75	0,28

* Valor corrigido devido a umidade da areia.

Fonte: próprio autor.

4.2.2 Concreto convencional

Para o concreto convencional, no estado fresco, foram realizados os testes, ilustrados na figura 42, de “Slump”, massa específica fresca, índice de ar e o teor de ar.

Figura 42: Ensaio estado fresco do CVV.



Fonte: acervo do próprio autor.

A tabela 12 lista os resultados, e as respectivas normas que estabelecem o método a ser utilizado para os ensaios são: ABNT NBR 16889:2020 e ABNT NBR 9833:2009.

Tabela 12: Resultados do concreto convencional no estado fresco.

Concreto	Sulmp (mm)	Massa Específica (Kg/m ³)	Indice de ar	Teor de ar (%)
CCV	400	2337,668	1,08	2,66
CCVF	605	2397,324	1,01	0,59

Fonte: próprio autor.

Observa-se na Tabela 12 que o abatimento do CCV aumentou com a adição das fibras o que mostra um concreto mais trabalhável. Wei et al. (2022) observaram que a trabalhabilidade foi reduzida com a adição de fibras de polipropileno e Abousnina et al. (2021) mostraram que a adição de 6 kg/m³ de fibras diminuiu a trabalhabilidade do concreto em 8,1%.

4.2.3 Concreto autoadensável:

Para o concreto autoadensável, no estado fresco, foram realizados três testes, ilustrados na figura 38: espalhamento ou *Slump Flow*, caixa “L” ou *L-box* e por último, o ensaio do Funil “V”.

Na tabela 13 estão listados os resultados referentes aos testes do concreto autoadensável (CAA) e concreto autoadensável com reforço de fibras de PVA (CAARFP) no estado fresco.

Tabela 13: resultados do concreto autoadensável no estado fresco.

Concreto	Sulmp Flow (mm)	T 500 (s)	Funil “V” (s)	Caixa “L”
CAA	760	5	9	0,94
CAARFP	700	11	12	0,82

Fonte: próprio autor.

De acordo com a Tabela 13, a adição de fibras no CAA diminuiu o espalhamento e aumentou o tempo T500 e a viscosidade da mistura. Esse resultado está de acordo com Ali et al. (2022) os quais afirmam que adição de fibras poliméricas torna a mistura mais viscosa, retardando assim o fluxo do concreto, resultando em uma diminuição na trabalhabilidade.

Na tabela 14, são mostrados os valores de limite para cada um dos parâmetros estudados (Slump Flow, T500, Funil “V”, Caixa “L”).

Tabela 14: valores limites para os parâmetros de Slump flow, T500, Funil V e Caixa L.

Ensaio	Unidade	Classe	Intervalo de Valores (limites típicos)	Interpretação
Slump Flow	mm	SF1	550 – 650 mm	Baixa fluidez (usos com forte confinamento)
	mm	SF2	660 – 750 mm	Fluidez média (uso geral)
	mm	SF3	760 – 850 mm	Alta fluidez (elementos densamente armados)
Tempo T500 (Slump Flow)	segundos	-	2 – 5 s	Tempo para o concreto atingir 500 mm de diâmetro
Funil V	segundos	VS1	≤ 8 s	Alta fluidez, pouca viscosidade
		VS2	9 – 25 s	Fluidez média, maior coesão
Caixa L	razão (H2/H1)	PA ≥ 0,80	≥ 0,80	Boa capacidade de passagem (entre armaduras)
		PA < 0,80	< 0,80	Capacidade de passagem insuficiente

Fonte: próprio autor.

4.3 Comportamento Mecânico do Concreto

Para o concreto endurecido, os procedimentos ensaiados foram: determinações do módulo de elasticidade dinâmico (ABNT NBR 8522-2:2021), resistência a compressão (ABNT NBR 5739:2018), resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011), resistências à tração na flexão (ABNT NBR 16940:2021)

4.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), a ABNT NBR 8522-2:2021 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração, conduziram a aquisição dos dados (Apêndice B) e seus valores médios mostrados na tabela 15.

Tabela 15: Resultados do modo de elasticidade dinâmico.

Misturas	Ed (GPa)
CCV	33,183
CCVRFP	34,383
CAA	38,410
CAARFP	37,457

Fonte: o próprio autor.

4.3.2 Módulo de elasticidade estático

O módulo pode ser calculado pela expressão descrita no item 4.24 deste trabalho. Como descrito anteriormente, os autores Neville (1995) e Carino (1994) foram os precursores da conversão do módulo de elasticidade dinâmico em módulo de elasticidade estático para o concreto.

Usando valor médio para o k , ou seja, 0,8, obteve-se os valores de módulo de elasticidade estático para as amostras estudadas, conforme a tabela 16.

Tabela 16: Módulo de elasticidade dinâmico e estático, com desvio padrão.

Amostra	Ed (GPa)	Ec (GPa)
CCV	33,183 ^(0,529)	26,546
CCVRFP	34,383 ^(0,274)	27,506
CAA	38,410 ^(0,352)	30,728
CAARFP	37,457 ^(0,710)	29,966

* Valores entre parênteses são os desvios padrões de cada amostra de concreto.

Fonte: o próprio autor.

O concreto autoadensável (CAA) apresentou o maior módulo de elasticidade dinâmico (38,4 GPa) e estático (30,7 GPa), com pequena diferença ao ser reforçado com fibras. Poucos estudos focam no módulo de elasticidade, Abousnina et al. (2021) relataram uma pequena redução no módulo de elasticidade do concreto com fibras. Os autores atribuíram ao fato de o módulo de elasticidade da fibra plástica ser menor que o do concreto o que afeta negativamente o módulo de elasticidade total.

4.3.3 Ensaio de compressão

Para o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos e para a compressão diametral, os resultados dos valores médios destas análises estão organizados na tabela 17 e o resultado de todos os corpos de prova se encontram no Apêndice C.

Tabela 17: Resultados médios de resistência a compressão e resistência à tração por compressão diametral.

Concreto	Resistencia a compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
CCV	26,86 ^(0,94)	2,70 ^(0,63)
CCVRFP	31,65 ^(0,71)	3,08 ^(0,35)
CAA	38,54 ^(0,23)	3,18 ^(0,36)
CAARFP	32,06 ^(1,03)	3,33 ^(0,36)

* Valores entre parênteses são os desvios padrões de cada amostra de concreto.

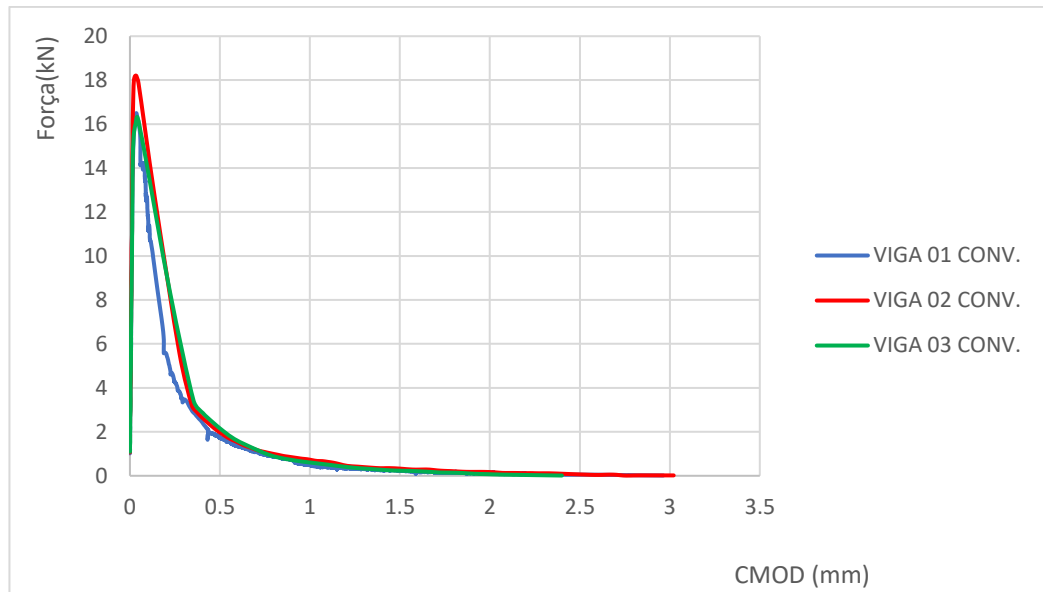
Fonte: o próprio autor.

Como indicado na Tabela 17 a resistência a compressão no CAA é maior que no CCV e isso pode ser explicado devido ao RCMG que deixou a matriz mais densa. A adição de fibras no CCV aumentou a resistência a compressão em 18%, no entanto no CAA a resistência foi reduzida em 17%. Ali et al. (2022) reportaram que, com a adição de fibras de PP, a resistência à compressão aumentou atingindo até 34,53 MPa com adição de 3% de fibras e 12% de pó de mármore em CAA. Adhikhari et al. (2019) também demonstraram aumento na resistência à compressão no CCV com fibras, reforçando o resultado desta pesquisa. No estudo de George et al (2021) foi investigado fibras de polipropileno e fibras de PVA em concreto e observaram não houve aumento significativo quanto a resistência à compressão do material.

4.3.4 Ensaio de resistência à tração na flexão

Para os concretos CCV, sem a adição das fibras, ensaiados à tração na flexão, foram geradas curvas, dos três corpos de prova (cp) e estão mostradas nas figuras 43.

Figura 43: Curva de resistência à tração na flexão do CCV.

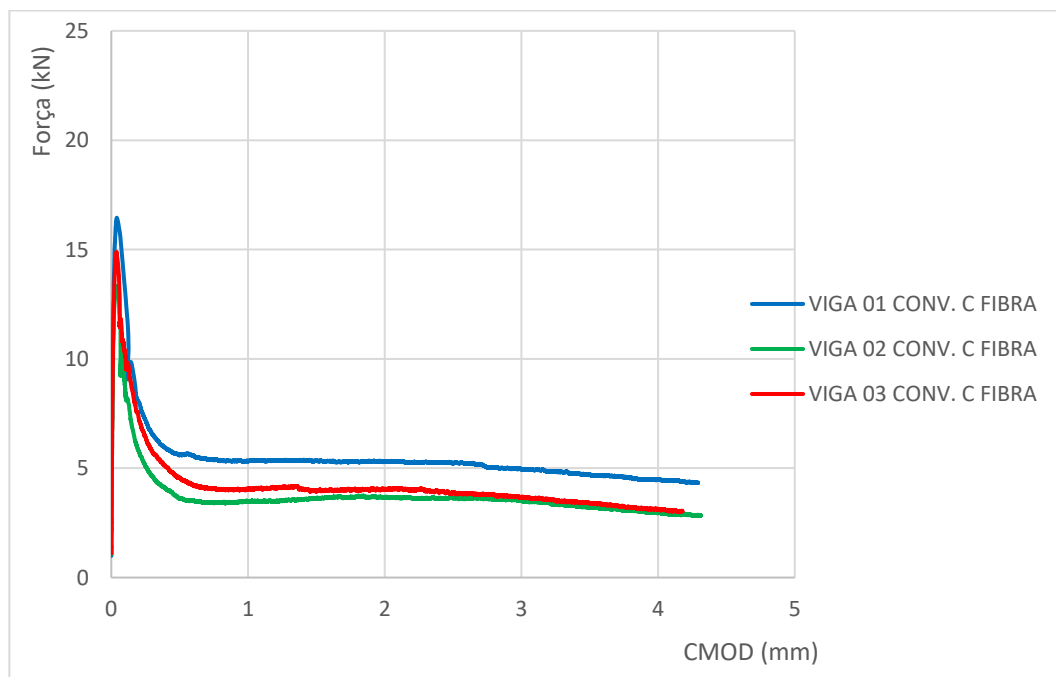


Fonte: o próprio autor.

Os resultados demonstrados na figura 43, indicam um concreto frágil, onde a ruptura se deu bruscamente com alguns dos cps não conseguindo atingir 3 mm de abertura de CMOD, também observado por KAZMI et al., 2020.

Para os concretos CCV, com a adição das fibras, ensaiados à tração na flexão, foram geradas curvas mostradas nas figuras 44.

Figura 44: Curva de resistência à tração na flexão do CCVRFP.

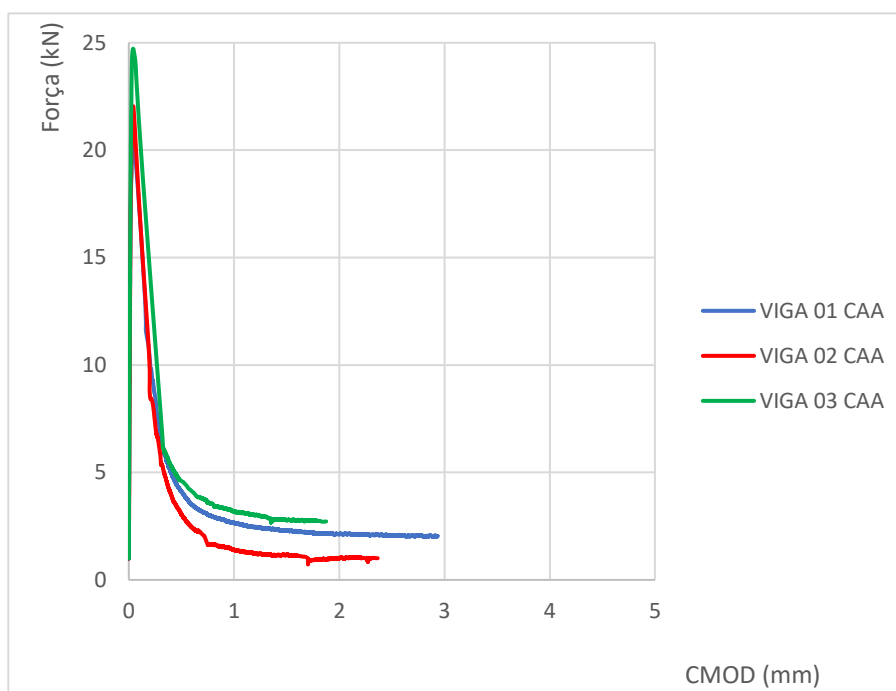


Fonte: o próprio autor.

Concretos convencionais reforçados com fibra obtiveram um melhor desempenho pós fissuração, o concreto se torna mais dúctil e absorve melhor a energia, estas mesmas observações foram encontradas nos trabalhos de KAZMI et al., 2020 e ZHOU, W., et al., 2022 entre outros.

Para os ensaios dos CAA sem adição das fibras, os resultados de da tração na flexão são mostrados nas figuras 45.

Figura 45: Curva de resistência à tração na flexão do CAA.

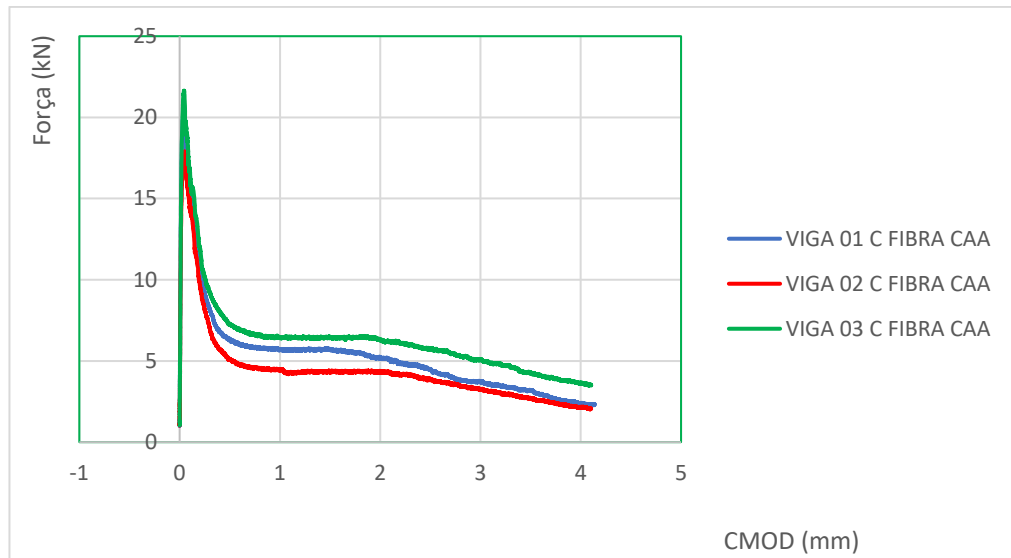


Fonte: o próprio autor.

Os CAA sem adição também tiveram um comportamento frágil, com ruptura brusca, sem ao menos chegar a uma deformação superior a 3 mm, embora tenha aumentado significativamente o LOP em relação ao CVV sem adição.

Já a figura 46, representa os resultados dos ensaios de tração na flexão dos corpos de prova dos CAARFP.

Figura 46: Curva de resistência à tração na flexão do CAARFP.

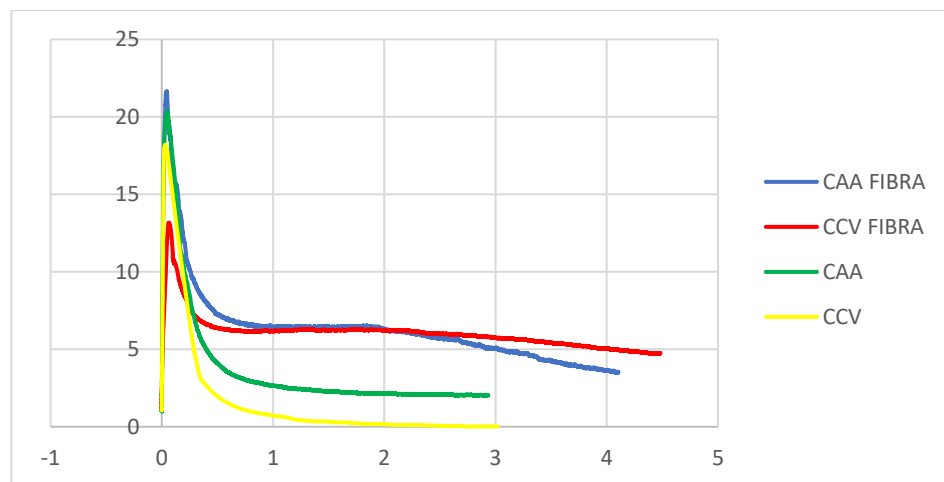


Fonte: o próprio autor.

Para os concretos CAARFP, houve um aumento considerável em relação ao CVV e CVVRFP, uma maior tenacidade e um excelente controle de fissuração, resultados semelhantes ao observados por ZHANG, P. et al., 2023. Já Yuan, Jia (2021) e Liang et al. (2024) destacam que as fibras podem melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à fissuração do CCV. Liang et al. (2024) mostram que a fibra de basalto inibe a iniciação de microfissuras, enquanto a fibra de polipropileno é mais eficaz contra a propagação de macrofissuras.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os traços ensaiados, a figura 47, apresenta os melhores resultados para a resistência à tração na flexão das amostras.

Figura 47: Curva de comparação dos melhores resultados de resistência à tração na flexão das amostras ensaiadas.



Fonte: o próprio autor.

O concreto autoadensável com e sem adição de fibras, alcançaram melhores resultados quanto à resistência a primeira fissura, esperava-se o mesmo com o concreto convencional reforçado com fibras, mas, por se tratar de uma microfibras sua aderência a matriz de concreto ficou comprometida e sofreu um escorregamento dentro da matriz cimentícia como pode-se visualizar na figura 48, nota-se que a maioria das fibras se encontram inteiras sem sinal de que tenham se partido.

Figura 48: Detalhe das fibras após o ensaio de flexão viga de CVV.



Fonte: o próprio autor.

Resultados segundo a ASTM C1609, ABNT NBR 16940, para tenacidade (G), resistência do primeiro pico (f_1), as resistências residuais (L/600, L/150), estão apontadas na tabela 18.

Tabela 18: Resultados segundo a norma ASTM C1609.

(continua)

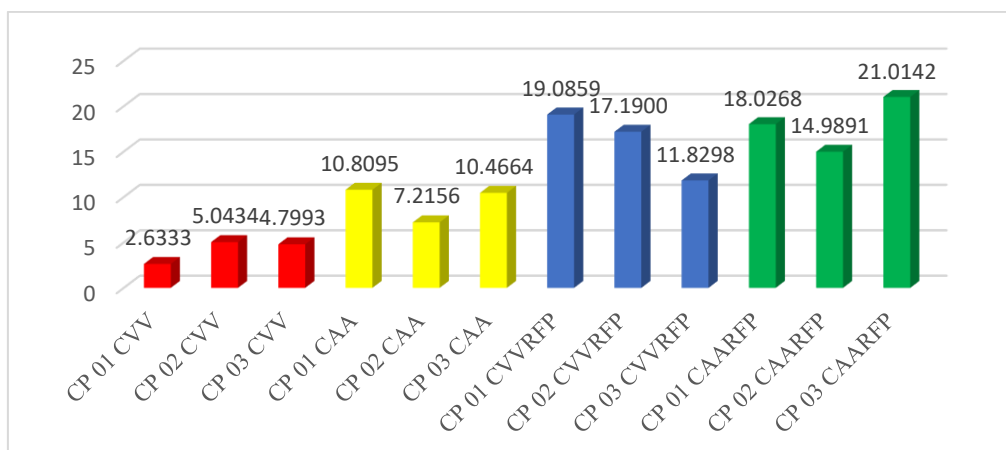
	G (L/150)	f_1	L/600	L/150
Concreto	J	MPa	MPa	MPa
CCV 01	2,63	2,28	0,19	0,003

(conclusão)				
Concreto	G (L/150)	f _i	L/600	L/150
	J	MPa	MPa	MPa
CCV 02	5,04	2,12	0,21	0,003
CCV 03	4,79	2,30	0,22	0,002
CCVRF 01	19,9	2,42	1,16	1,09
CCVRF 02	17,2	2,20	0,64	0,67
CCVRF 03	11,8	2,32	0,76	0,69
CAA 01	10,8	2,95	0,58	0,38
CAA 02	7,21	2,63	0,39	0,19
CAA 03	10,5	2,78	0,70	0,51
CAARF 01	18,0	2,46	1,10	0,71
CAARF 02	15,0	2,56	0,86	0,62
CAARFP 03	21,0	2,50	1,25	0,95

Fonte: o próprio autor.

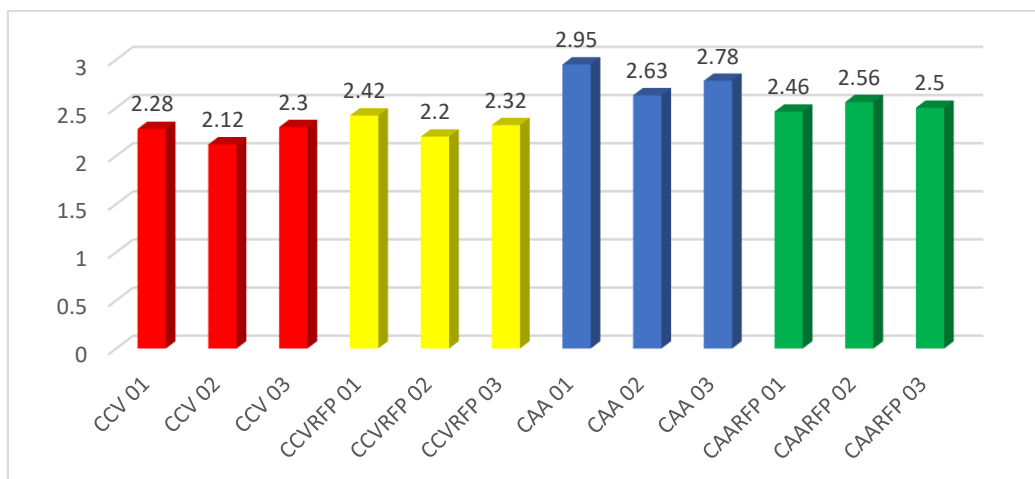
A figura 49 mostra, para uma melhor visualização, os resultados obtidos da tenacidade para todos os espécimes de concreto estudados, segundo a norma ASTM C 1609. Nota-se um aumento significativo da tenacidade em relação ao concreto convencional, tanto no CCVRF, como nos CAA com e sem fibra, mas o efeito das fibras no concreto CAA em relação ao concreto convencional com fibra não foi muito significativo, obtendo um aumento de 12%.

Figura 49: Tenacidade (G).



Fonte: o próprio autor.

Na figura 50 pode-se observar, os resultados obtidos da resistência do primeiro pico (f_l) para todas as amostras de concreto estudados, segundo a norma ASTM C 1609. Para estes cálculos notou-se que os concretos reforçados com fibra e autoadensáveis obtiveram uma resistência maior ao surgimento da primeira fissura, apesar de em valores absolutos não notarmos um ganho, o concreto autoadensável obteve um ganho de 25% em relação ao concreto convencional.

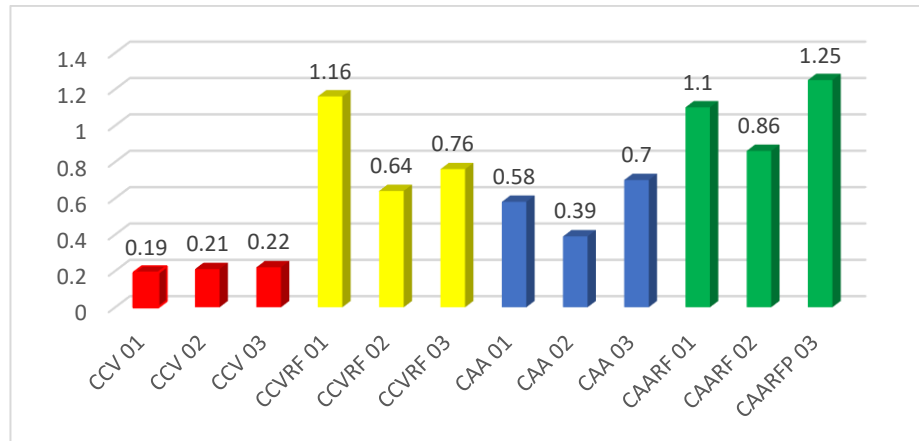
Figura 50: Resistência à primeira fissura (f_l).

Fonte: o próprio autor.

Para as resistências residuais, as figuras 51 e 52, mostram os efeitos da fibra e do concreto autoadensável, nas aberturas de CMOD indicados pela norma americana, respectivamente.

Para as resistências residuais, ou seja, aquela após o surgimento da primeira fissura, em que o concreto ainda continua resistindo as cargas, observou-se um aumento significativo desta propriedade em relação ao concreto convencional, já entre os concretos com o reforço das fibras este ganho foi na ordem de 25% em média.

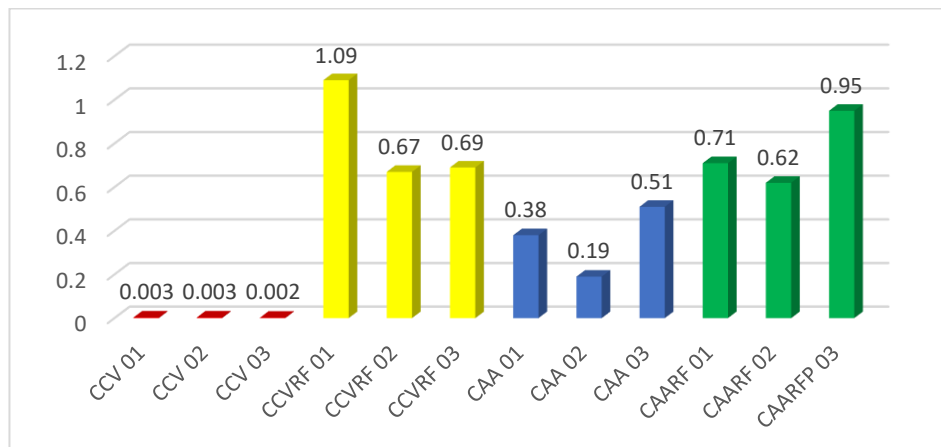
Figura 51: resistência residual L/600.



Fonte: o próprio autor.

Para resistências residuais L/150, onde a abertura da fissura é maior, os ganhos em relação ao concreto convencional ficam evidentes, com ganhos muito significativos tanto para os concretos autoadensáveis, bem como, para os reforçados com fibra, nesta fase adiantada da fissura, para a fibra utilizada, praticamente não houve diferença em os CCVRF e os CAARFP.

Figura 52: resistência residual L/150.



Fonte: o próprio autor.

Os resultados segundo a norma ABNT NBR 16940, para LOP e resistências residuais correspondentes as aberturas do CMOD (0,5 mm, 1,5mm, 2,5 mm e 3,5 mm) estão indicadas na tabela 19.

Tabela 19: Resultados segundo a norma ABNT NBR 16940.

Amostra	LOP	F 0,5 CMOD	F 1,5 CMOD	F 2,5 CMOD	F 3,5 CMOD
CVV 01	4,59	1,74	0,24	0,05	-
CVV 02	5,07	1,91	0,31	0,05	0,010
CVV 03	4,54	2,02	0,22	0,01	0,008
CVVRFP 01	3,67	6,37	6,24	5,99	5,430
CVVRFP 02	3,72	3,63	3,64	3,63	3,220
CVVRFP 03	4,15	4,55	3,96	3,89	3,410
CAA 01	5,67	4,09	2,29	2,07	-
CAA 02	6,14	3,02	1,16	-	-
CAA 03	6,88	4,58	2,78	-	-
CAARFP 01	5,64	6,36	5,73	4,47	3,190
CAARFP 02	4,98	5,10	4,30	3,87	2,690
CAARFP 03	6,03	7,24	6,48	5,71	4,280

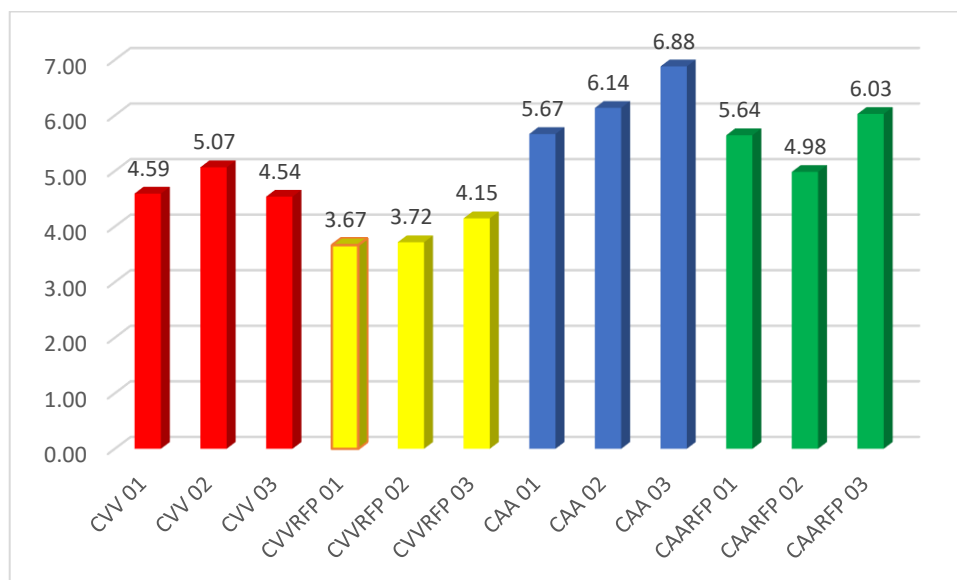
Fonte: o próprio autor.

O limite de proporcionalidade é o ponto referente, no ensaio de flexão, ao comportamento elástico do concreto, é o ponto em que surge a primeira fissura na parte tracionada do concreto.

Para o limite de proporcionalidade (figura 53), o concreto autoadensável sem a adição de fibras foi a amostra que obteve um maior desempenho em relação aos outros concreto. A fibra, neste caso, não teve o rendimento esperado, talvez pela adição ser a menor quantidade proposta pelo fabricante.

Para as resistências residuais, o grupo composto pelos CVV (sem fibras), suas resistências residuais caem após a fissura, sofrendo uma ruptura brusca, o que sugere um comportamento frágil, o material perde sua capacidade de resistir após a fissura.

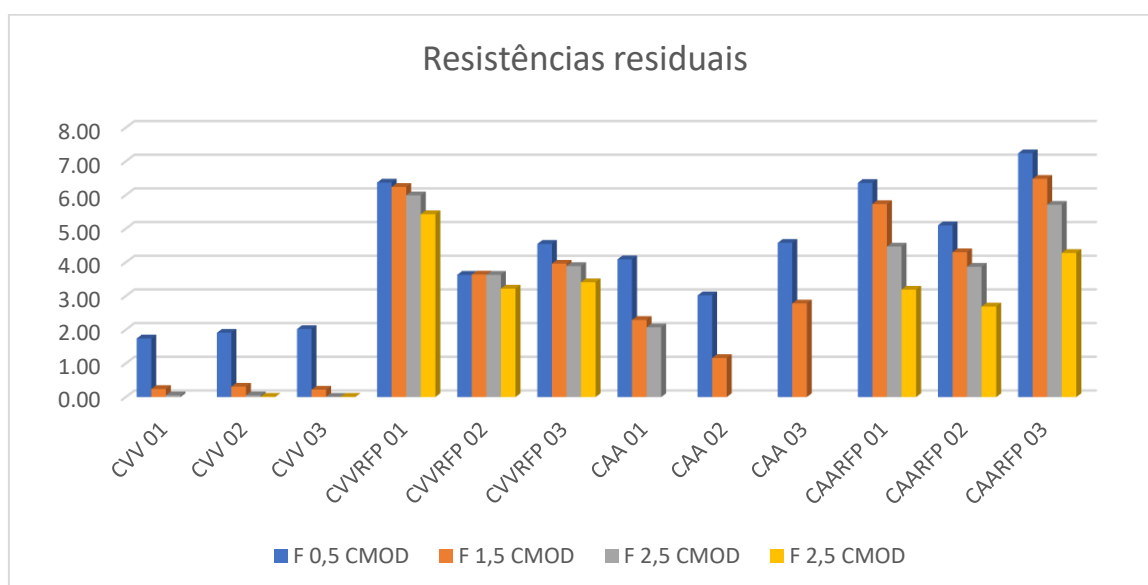
Figura 53: Limite de proporcionalidade (LOP).



Fonte: o próprio autor.

Para os parâmetros de resistência residuais à tração na flexão, os concretos com adição de fibras apresentaram ganhos em relação ao traço CVV e CAA e em média o concreto auto adensável com adição de fibras, obteve cerca de 28% de ganho em relação ao concreto convencional com adição de fibras (Figura 54).

Figura 54: Resistências residuais à tração na flexão.



Fonte: o próprio autor.

Os traços com fibras demonstraram melhora significativa na resistência residual e na tenacidade, especialmente no CAARFP, com ganho médio de 25% em relação ao CCV. Zhu et al. (2021) verificaram que fibras de polipropileno aumentam a resistência à fissuração e tenacidade. Abousnina et al. (2021) mostraram que a adição de 6 kg/m³ de fibras aumentou a resistência à tração em 41,9% e modificou o tipo de ruptura para um comportamento mais dúctil. Verificaram ganho de tenacidade, embora a resistência ao pico não tenha sido significativamente afetada.

O concreto CAARFP obteve os melhores resultados nas resistências residuais em todas as aberturas de fissura (CMOD), com destaque para 3,5 mm, onde atingiu 4,28 MPa. Adhikhari et al. (2019) também observaram desempenho elevado em CMOD, com resistência de 4,3 MPa em 3,5 mm de deslocamento para concretos com maior teor de fibras.

A análise dos resultados obtidos nesta pesquisa evidencia um desempenho superior em termos de tenacidade dos concretos reforçados com fibras de PVA, especialmente no traço autoadensável (CAARFP), que apresentou carga residual elevada mesmo em grandes aberturas de fissura (CMOD), alcançando valores da ordem de 4,28 MPa. Esse comportamento indica uma alta capacidade de absorção de energia e controle de fissuração pós-pico, o que está em consonância com as propriedades próprias das fibras de PVA, como elevado módulo de elasticidade e excelente adesão à matriz cimentícia. Em comparação, Ali et al. (2022) relataram um aumento moderado da tenacidade em concretos autoadensáveis com fibras de polipropileno (PP), com ganhos de até 11,36% na resistência à flexão, enquanto Abousnina et al. (2021) e Adhikhari et al. (2019) obtiveram resistência residual semelhante à da presente pesquisa apenas com teores de fibra consideravelmente maiores (até 9 kg/m³). Além disso, Zhu et al. (2021), ao investigar compósitos cimentícios com fibras de PP, observaram comportamento mais dúctil, efeito também verificado nesta pesquisa, mas alcançado com uma formulação mais simples e eficiente. Esses dados reforçam a eficácia do uso de fibras de PVA na melhoria do desempenho pós-fissuração e na promoção de comportamento dúctil em concretos, superando em muitos aspectos os resultados obtidos com fibras sintéticas convencionais.

5 CONCLUSÃO

Objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas relacionadas à resistência à tração na flexão e o principal foco foi investigar o comportamento mecânico em relação ao estado de fissuração, por meio da análise comparativa dos resultados obtidos entre os diferentes tipos de concreto. esperava-se que o uso dos concretos autoadensáveis, com e sem a adição de

fibras, promova uma melhoria na tenacidade, contribuindo para o controle eficiente da formação e propagação de fissuras.

Este estudo proporcionou uma avaliação sistemática, comparando o comportamento mecânico sob flexão em quatro concretos diferentes – convencional, convencional com fibras, autoadensável e autoadensável com fibras, levando-se em conta os requisitos das normas ASTM C1609 e ABNT NBR 16940. Analisamos a tenacidade (G), a resistência à primeira fissura (f_i), resistências residuais (em $L/600$ e $L/150$), o limite de proporcionalidade (LOP), módulo de ruptura (R) e resistências residuais à tração na flexão ($fR,1$ a $fR,4$).

Os resultados mostram, que o concreto autoadensável (CAA), até mesmo sem adição de fibras, superou o concreto convencional (CCV). Observamos, principalmente, um aumento de quase 25% na resistência inicial à fissura. Isso revela uma melhor coesão da matriz e uma melhor resposta mecânica em relação a abertura da primeira fissura.

A tenacidade, conforme ASTM C1609, foi maior com fibras, destacando-se o CAARFP, com mais de 30% de ganho sobre o CCV. Contudo, se compararmos o concreto convencional com fibras CCVRFP e o autoadensável com fibras CAARFP, o aumento foi perto de 12%, o que sugere a ação isolada das fibras o que se mostrou mais impactante do que a interação com a matriz autoadensável.

As resistências residuais, que demonstram a habilidade do concreto de aguentar cargas após a fissuração, manifestaram um aumento importante nos concretos com fibras quando confrontados com o CCV, com um aumento médio de 25%. Esses dados revelam que a inclusão das fibras, mesmo em proporções pequenas, auxilia em uma ruptura menos súbita e mais gradual, coisa que fica evidente nas etapas mais desenvolvidas após o surgimento da fissura, tal qual no estágio $L/150$.

Os testes de resistência residual à tração na flexão $fR,1$ a $fR,4$, baseados nos deslocamentos fixos da CMOD, fortaleceram tal comportamento. O traço CAARFP exibiu, em média, um ganho de 28% sobre o CCVRFP, firmando o efeito combinado entre a fluidez da matriz autoadensável e a presença das fibras na barreira da propagação da fissura. Ademais, incluir resíduos no concreto autoadensável com fibras CAARFP reforça a chance de utilização de um material estrutural mais eco-amigável, sem prejudicar sua resistência. Essa ideia satisfaz os pedidos da engenharia de hoje, que procura materiais mais potentes, com longa vida útil e menos estragos ao ambiente.

Em suma, o concreto autoadensável, principalmente junto com fibras de PVA e adições minerais, mostra grande potencial pra ser usado em infraestruturas, onde a resistência à fissuração, a ductilidade e a tenacidade são vitais. O estudo também mostra que, mesmo em

pouca quantidade, as fibras mudam bastante o comportamento do concreto após o surgimento da primeira fissura, melhorando a performance do concreto quando solicitado à tração indireta.

Portanto, o CAA se mostrou capaz de ser um compósito mais resistente a fissuração com alta tenacidade podendo substituir ou reduzir armaduras convencionais, especialmente em pisos industriais, túneis, pavimentos e estruturas pré-moldadas. Isso significa menor custo com aço, menos mão de obra, execução mais rápida.

Sugestões para trabalhos posteriores

O estudo da fibra em diferentes quantidades de adição faz-se necessário e, se possível, determinar uma dosagem ótima.

Deve-se estudar outras fibras em conjunto com a fibra de PVA, como por exemplo macro fibras.

APÊNCIDE A

Cálculo do traço de concreto

Segundo Rodrigues (1988), o cálculo dos concretos convencionais obedece às seguintes etapas:

- **Fixação da relação água/ cimento (a/c):**

Esta relação está diretamente relacionada com a durabilidade e a resistência mecânica do concreto, quanto maior a quantidade de água, menor será a resistência do concreto. Para se obter a relação de água/cimento, utiliza-se a curva de Abrams, que depende também da resistência do concreto desejada.

- **Estimativa do Consumo de Água do Concreto (Cag):**

Este parâmetro determina a consistência do concreto em seu estado fresco, que está intimamente ligada às características e às proporções dos materiais utilizados para a mistura. O consumo de água dependerá da granulometria, forma e textura do agregado, formas arredondadas e superfícies lisas, essas colaboram para uma menor necessidade de adição de água. A tabela 7, determina o consumo de água para concretos levando-se em conta as dimensões dos agregados e a consistência desejada para a mistura.

Tabela 7: Consumo de água aproximado (l/m³).

Abatimento do tronco de cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Parâmetros de dosagem do concreto – ABCP – 1998

- **Estimativa do Consumo de Cimento (C):**

Após a obtenção do consumo de água requerida pelo concreto e com a relação água/cimento adotada pela fixação da a/c, a quantidade de cimento pode ser calculada pela equação 16:

$$C = \frac{c_{ar}}{\frac{a}{c}} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto (Kg/m^3);
 C_{ar} = consumo de água requerida por metro cúbico de concreto (l/m^3);
 a/c = relação água/cimento.

- **Estimativa do Consumo de Agregados:**

O consumo de agregados é obtido através da análise do diâmetro máximo do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo.

O cálculo do consumo de agregados é dado pela equação 17:

$$C_p = V_b * MU_c \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

C_p = consumo de agregado graúdo;
 V_b = percentagem de agregado graúdo seco por m^3 de concreto;
 MU_c = massa unitária compactada do agregado graúdo.

Para o agregado miúdo, a estimativa de consumo é calculada pelo volume de concreto que nada mais é do que a soma dos volumes do cimento, água e agregados graúdo e miúdo. A equação 18, mostra o cálculo desta determinação:

$$v_m = 1 - \left(\frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_p}{\gamma_p} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} \right) \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

V_m = volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto;
 $\gamma_c, \gamma_p, \gamma_{ag}$ = massa específica do cimento, agregado graúdo e água, respectivamente;

Portanto, o consumo do agregado miúdo (areia) por metro cúbico de concreto é dado pela equação 19.

$$C_m = \gamma_m \times V_m \quad \text{Equação 19}$$

Na qual:

C_m = consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (Kg/m^3);
 γ_m = massa específica do agregado miúdo (Kg/m^3).

- **Apresentação do Traço do Concreto convencional:**

A apresentação do traço é a indicação da quantidade, em massa ou volume, de cada constituinte da mistura em relação à unidade de medida do cimento. Sua representação é feita da seguinte forma:

Cimento (1): areia: agregado graúdo: relação água/cimento

A representação do traço em massa seria:

$$1 : \frac{Cm}{C} : \frac{Cp}{C} : \frac{Cag}{C}$$

Para o nosso trabalho utilizamos o traço:

$$1: 1,318: 1,858: 0,45$$

- **Apresentação do traço do concreto CAA:**

Sua representação é feita da seguinte forma:

Cimento (1): pó de mármore: agregado miúdo: agregado graúdo: SP: Água

$$1: \frac{CRCMG}{C} : \frac{Cm}{C} : \frac{Cp}{C} : \frac{CSP}{C} : \frac{Cag}{C}$$

Para o nosso trabalho utilizamos o traço:

$$1: 0,299: 1,97: 1,66: 0,04: 0,40$$

- **Apresentação do traço do concreto CAARFP:**

$$1: \frac{CRCMG}{C} : \frac{Cm}{C} : \frac{Cp}{C} : \frac{CSP}{C} : \frac{Cag}{C} : \frac{Cf}{C}$$

Para o nosso trabalho utilizamos o traço:

$$1: 0,299: 1,97: 1,66: 0,04: 0,40: 0,013$$

APÊNCIDE B

Resultados do Módulo de Elasticidade Dinâmico

Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico obtidos por ensaio descritos pela norma ABNT NBR8522-2:2021 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração, tabela 20.

Tabela 20: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico.

(continua)

Concreto	Ed (GPa)
CCV CP 01 A	32,489
CCV CP 01 B	32,554
CCV CP 01 C	32,533
CCV CP 02 A	33,459
CCV CP 02 B	33,278
CCV CP 02 C	33,300
CCV CP 03 A	33,732
CCV CP 03 B	33,427
CCV CP 03 C	33,877
Média	33,183
Desvio Padrão	0,529
CVVRFP CP 01 A	34,084
CVVRFP CP 01 B	34,923
CVVRFP CP 01 C	33,995
CVVRFP CP 02 A	34,493
CVVRFP CP 02 B	34,390
CVVRFP CP 02 C	34,469
CVVRFP CP 03 A	34,324
CVVRFP CP 03 B	34,537
CVVRFP CP 03 C	34,237
Média	34,383
Desvio Padrão	0,274
CAA CP 01 A	38,678
CAA CP 01 B	38,038
CAA CP 01 C	38,689
CAA CP 02 A	38,230
CAA CP 02 B	37,897
CAA CP 02 C	38,256
CAA CP 03 A	38,514

(conclusão)

Concreto	Ed (GPa)
CAA CP 03 B	39,018
CAA CP 03 C	38,371
Média	38,410
Desvio Padrão	0,352
CAARFP CP 01 A	36,573
CAARFP CP 01 B	36,456
CAARFP CP 01 C	37,243
CAARFP CP 02 A	37,382
CAARFP CP 02 B	38,495
CAARFP CP 02 C	37,377
CAARFP CP 03 A	38,257
CAARFP CP 03 B	37,230
CAARFP CP 03 C	38,104
Média	37,457
Desvio Padrão	0,710

APÊNCIDE C

Resultados da compressão simples e compressão diametral

Tabela 21: Resultados de resistência à compressão e compressão diametral.

Concreto	Resistencia a compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
CCV CP 01	27,15	2,13
CCV CP 02	27,75	2,18
CCV CP 03	25,54	3,18
CCV CP 04	27,00	3,30
CCVRFP CP 01	31,44	2,81
CCVRFP CP 02	31,38	2,75
CCVRFP CP 03	31,08	3,40
CCVRFP CP 04	32,68	3,36
CAA CP 01	38,42	3,42
CAA CP 02	38,80	2,77
CAA CP 03	38,40	3,36
CAA CP 04	-	-
CAARFP CP 01	31,19	3,08
CAARFP CP 02	32,03	3,52
CAARFP CP 03	33,52	3,74
CAARFP CP 04	31,50	2,99

Fonte: acervo do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUSNINA, R. et al. Mechanical properties of macro polypropylene fibre-reinforced concrete. *Polymers*, v. 13, n. 23, p. 1–25, 2021.
- ADEL, M. et al. Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço. Dissertação de mestrado - Universidade federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Civil, 2014.
- ADHIKARY, S. K. et al. Investigation on the mechanical properties and post-cracking behavior of polyolefin fiber reinforced concrete. *Fibers*, v. 7, n. 1, 2019.
- ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 85, p. 182–194, 15 jun. 2015.
- ALCANTARA, M.A.M. Bétons auto-plaçants et fibrages hybrides: Composition, rhéologie et comportement mécanique. Toulouse, 2004, INSA, 192 p (thèse.).
- ALCANTARA, M.A.M.; SANTOS, B. V. O uso de resíduos como finos na fabricação do concreto autoadensável. In: Simpósio Latino Americano sobre Concreto Autoadensável, 1, 2012, Maceió: IBRACON, 2012.np.
- ALI, A. et al.. Influence of Marble Powder and Polypropylene Fibers on the Strength and Durability Properties of Self-Compacting Concrete (SCC). *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2022, Article ID 9553382, 12 pages. September 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9553382>
- ALLAM, Said M. et al. Evaluation of tension stiffening effect on the crack width calculation of flexural RC members. *Alexandria Engineering Journal*. Alexandria, p. 163-173. jan. 2013.
- ANDERSON, Ted L.; Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press, 2005.
- ARAÚJO, J. M. DE. *Curso de Concreto Armado*. V. 2. 4ª ed. Rio Grande: Dunas, 2014.
- ASLANI, F.; NEJADI, S. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering*, v. 53, p. 121–133, 1 out. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16940: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16697:2018 – Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16605:2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 17054:2022 – Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 52:2002 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522-2:2021 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração*. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833:2008 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro, 2008.
- ASTM: American Society for Testing and Materials. ASTM C1018: standard test method for flexural toughness and firstcrack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). West Conshohocken: ASTM; 1991.
- ASTM: American Society for Testing and Materials: C78/C78M – 16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- ASTM C 1609/C1609M – 2019 - Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ASTM Internacional, West Conshohocken, PA.
- BARENBLATT, G.I.. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. In: *Advances in Applied Mechanics*, 1962, V. 7, 55-129.
- BAŽANT, Z. P.; OH, B. H. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions*, v. 16, n. 3, p. 155–177, maio 1983.
- BENTUR, A., & Mindess, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Materials Science of Concrete, 2007.
- BERDIN, CLOTILDE.; BESSON, JACQUES.; BUGAT, S. Local approach to fracture. *Les Presses de l'Ecole des mines*, 2004.
- BEYGI, M. H. A. et al. The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete. *Materials & Design*, v. 50, p. 267–276, 1 set. 2013.

- CARINO, Nicholas J. Nondestructive testing of concrete: History and challenges. In: Proceedings of the International Workshop on Civil Infrastructure Systems: Application of intelligent systems and advanced materials on bridge systems. 1994. p. 343-99.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. *Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado*: segundo a NBR 6118:2014. 4ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2021.
- C.L. Page; M.M. Page. Durability of Concrete and Cement Composites. 2007.
- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. CEB Design Manual on Cracking and Deformations. Lausanne, 1985.
- D. L. Araújo; A. R. Danin; M. B. Melo; P. F. Rodrigues. Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 6 (2). Abril, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000200008>
- DEVI, S. S.; VIVEK, S. S. Self-Compacting Concrete Using Supplementary Cementitious Materials and Fibers: Review. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil EngineeringSpringer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024.
- DUGDALE, D.S.. Yielding of steel sheets containing slits. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1960, Vol.8, 100-104.
- FERREIRA, Luiz Eduardo Teixeira e HANAI, João Bento de. Mecânica da fratura e fraturamento do concreto. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais: conceituação, ciência dos materiais, rochas e solos, aglomerantes minerais. Tradução. São Paulo, SP: IBRACON, 2017. v. 1. . . Acesso em: 18 mar. 2025.
- GIACCIO, G.; TOBES, J. M.; ZERBINO, R. Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, v. 30, n. 4, p. 297–306, 1 abr. 2008.
- GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ E JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO. Concreto Auto-Adensável: Um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, agosto de 2003, Anais, CD-ROM, 2003.
- GONÇALVES, P.C.; PALERMO JR, L.; PROENÇA, S.P.B. *Analysis of two cohesive zone models for crack propagation in notched beams using the BEM*. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, v. 6, p. 1057-1066, 2018. 10.2495/CMEM-V6-N6-1057-1066.
- GUIMARÃES, D. Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos. 90 f. Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) –Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GODEFROID, Leonardo Barbosa. Fundamentos de Mecânica de Fratura. 2 ed. Ouro Preto: Imprensa Universitária UFOP, 1995.

- HADDADOU, N., et al. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with different mineral additions and fibers. *Journal of Building Materials and Structures*, 2(2), 41-50, 2015. <https://doi.org/10.34118/jbms.v2i2.19>
- HEMLEBEN, C.; SPINDLER, M.; ANDERSON, O. R. *Fracture of Concrete and Rock*. [s.l.] Springer New York, 1989.
- HU XZ, Liang L, Yang ST. Weibull-strength size effect and common problems with size effect models. In: *Proceedings of FraMCoS-8 Toleda, Spain*; 2013.
- ILLSTON, J. M. [Ed]. *Construction Materials; their nature and behaviour*. E & FN Spon, 2ed., 1994. 518p., London.
- ISABELA CRISTINA FERREIRA FARIA; GONÇALVES, P. C.; VALQUÍRIA CLARET DOS SANTOS; FABIANO NAZÁRIO SANTOS; CAIO VINÍCIUS SANTANA SANTOS. Reinforced concrete structures: the study of concrete collaboration between cracks. 60º Anais do Congresso Brasileiro do Concreto – CBC 2018.
- JAIN, A. et al. Effect of granite industry waste addition on durability properties of fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 340, p. 127727, 18 jul. 2022.
- JSCE-SF4-Method-of-Test-For-Flexural-Strength-and-Flexural-Toughness, 1984.
- KAZMI, S. M. S. et al. Mechanical and Post-Cracking Performance of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Synthetic Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 829, n. 1, 2020.
- KATZ, A.; BENTUR, A. Mechanical properties and pore structure of carbon fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 2, p. 214–220, 1 jan. 1994.
- KUMAR MEHTA, P.; M MONTEIRO, P. J. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Fourth Edition, 2014.
- MAHAKAVI, P.; CHITHRA, R. Impact resistance, microstructures and digital image processing on self-compacting concrete with hooked end and crimped steel fiber. *Construction and Building Materials*, v. 220, p. 651–666, 30 set. 2019.
- MARTINS, M. A. de B.; DA SILVA, L. R. R.; RANIERI, M. G. A.; BARROS, R. M.; DOS SANTOS, V. C.; GONÇALVES, P. C.; RODRIGUES, M. R. B.; LINTZ, R.C. C.; GACHET, L. A.; MARTINEZ, C.B.; Melo, M. de L. N. M. Physical and Chemical Properties of Waste Foundry Exhaust Sand for Use in SelfCompacting Concrete. *Materials JCR*, v. 14, p. 5629-5650, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14195629>.
- MARTINS, M. A. de B. Propriedades reológicas e durabilidade do concreto autoadensável de alta resistência com resíduo de corte mármore e granito e areia de exaustão de fundição. Tese Doutorado. Universidade Federal de Itajubá (2021).
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*; São Paulo: Pini, 1994. ISBN: 8572660402

- NEVILLE, A.M., Properties of Concrete AM 149. 4th Edition, Addison Wesley Longman Ltd., Essex, 1995.
- P.C. GONÇALVES, L. PALERMO JR.; S.P.B. PROENÇA. ANALYSIS OF TWO COHESIVE ZONE MODELS FOR CRACK PROPAGATION IN NOTCHED BEAMS USING THE BEM. *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.*, Vol. 6, No. 6 (2018) 1057–1066)
- PALIGA, Charlei Marcelo. *Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos*. 2008. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- PETERSSON, P.E. *Crack growth and development of Fracture Zone in Plain Concrete and similar materials*. Report N° TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund Sweden, 1981, 174p.
- PINHEIRO, L.M.; Muzardo, C. D.; Santos, S. P. Fundamentos do concreto e Projeto de Edifícios. Editora USP/São Carlos. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia. São Carlos, 2007.
- QING, L.; Li, Q. A theoretical method for determining initiation toughness based on experimental peak load. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 99, p. 295–305, 1 fev. 2013.
- RAMIREZ, C. Q. et al. Interfacial Bonding Strength in Cement Mortar Beams Reinforced with Metamaterial Bars. *MATERIALS RESEARCH JCR*, v. 25, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0383>.
- RAMKUMAR, K. B. et al. A Review on Performance of Self-Compacting Concrete – Use of Mineral Admixtures and Steel Fibres with Artificial Neural Network Application. *Construction and Building Materials*, v. 261, p. 120215, 20 nov. 2020.
- RILEM TC 162-TDF: *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Recommendation*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 33, p. 35, mar. 2000.
- RODRIGUES, E. *Dosagem do concreto*. Notas de Aula. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2003.
- SHAH, S. P., Swartz, S. E., & Ouyang, C. "Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and Other Quasi-Brittle Materials." John Wiley & Sons, 1995.
- SANTOS, V. C.; et al. Vigas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço Submetida à Flexão. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 16, p. 01-15, 2020. <https://doi.org/10.5216/reec.v16i1.50551>
- SILVA, I. E. da; et al. Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras híbridas. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina*, v. 44, e48549, 2023.
- SINGH, N.; Kumar, P.; Goyal, P. Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 26, p. 100882, 1 nov. 2019.

- SURENDRA, P.S.; Ouyang, C. *Failure of concrete: Fracture mechanics approach*. Anales de Mecanica de la Fractura. Vol. 9, 352-375, 1992.
- TARABIN, M. et al. Experimental and probabilistic analysis of the crack propagation in fiber reinforced concrete. *Engineering Failure Analysis*, v. 151, p. 107388, 1 set. 2023.
- Ted L. Anderson, T. L. Anderson. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, terceira edição. Ed. Taylor & Francis Group, 2005.
- THOMAZ, E.. *Trincas em edifícios - causas, prevenção e recuperação* - 2ª ed.. Editora Oficina de Textos, 2020. ISBN: 978-65-86235-07-4
- WEI, Y. et al. Experimental Study on Compressive and Flexural Performances of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete. *Hindawi Geofluids* Volume 2022, Article ID 4168918, 24 pages <https://doi.org/10.1155/2022/4168918>, 2022.
- XU, S.; Reinhardt, H. W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams, *International Journal of Fracture*, 1999.
- XU S, Li Q, RILEM Standard: testing methods for determination of the double-K criterion for crack propagation in concrete using wedge-splitting tests and three-point bending beam tests, recommendation of RILEM TC265-TDK *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* (2021) 54(6)
- ZHANG, P. et al. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 67, p. 105975, 15 maio 2023.
- ZHOU, W. et al. Fracture behavior of polypropylene fiber reinforced concrete modified by rubber powder exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 346, 2022.
- ZHU, D. et al. Investigation on the flexural toughness evaluation method and surface cracks fractal characteristics of polypropylene fiber reinforced cement-based composites. *Journal of Building Engineering*. Volume 43, November 2021.