



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VITOR MANOEL DE SOUZA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL  
DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO LM-  
*TWIST***

CARAÚBAS

2025

VITOR MANOEL DE SOUZA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL  
DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO LM-  
*TWIST***

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Karina Estrela Egídio

Coorientador: Breno Eduardo Carlos

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P436a Pereira, Vitor Manoel de Souza.  
Análise comparativa entre modelo numérico e experimental de concreto reforçado com macrofibras de polipropileno LM-Twist / Vitor Manoel de Souza Pereira. - 2025.  
94 f. : il.

Orientadora: Karina Estrela Egídio.  
Coorientador: Breno Eduardo Carlos.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2025.

1. Abaqus. 2. Concrete Damaged Plasticity (CDP). 3. Macrofibras de polipropileno. 4. Método dos Elementos Finitos (MEF). 5. Teoria da Plasticidade. I. Egídio, Karina Estrela, orient. II. Carlos, Breno Eduardo, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas  
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra  
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VITOR MANOEL DE SOUZA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL  
DE CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO LM-  
*TWIST***

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Engenharia Civil.

Defendida em: 11/12/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**KARINA ESTRELA EGÍDIO**  
Data: 29/12/2025 14:39:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Me. Karina Estrela Egídio**  
**Presidente**

Documento assinado digitalmente



**BRENO EDUARDO CARLOS**  
Data: 25/12/2025 09:29:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Breno Eduardo Carlos**  
**Membro Examinador**

Documento assinado digitalmente



**GILVAN BEZERRA DOS SANTOS JÚNIOR**  
Data: 26/12/2025 14:12:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos Santos Júnior**  
**Membro Examinador**

Documento assinado digitalmente



**RENATA DE OLIVEIRA MARINHO**  
Data: 27/12/2025 23:59:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Me. Renata de Oliveira Marinho**  
**Membro Examinador**

*Dedico este trabalho a minha mãe, Maria Genubia de Souza Monteiro, a minhas avós, Antônia Abigail Barra de Souza e Ana Anita de Araújo Pereira, a meu avô, Antônio de Souza Maia e meus irmãos, Gabriel, Valentina e Elison.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que por sua infinita bondade, ilumina a minha vida em cada momento, por estar comigo em minha trajetória, entre tantos momentos de desafio e desânimo. Certamente, sem ele nada alcançaria, foi a luz que iluminou meu caminho no final do túnel, concedendo-me esperança para perseverar pelos meus sonhos, mesmo quando eu não acreditava ser possível, estava comigo me dando força para continuar.

Quero agradecer a minha família, a qual sempre me apoiou nas decisões e nos desafios que enfrentei nesse período da graduação. Em especial, agradeço as mulheres que são a base da minha vida, que me inspiram a ser um homem com valores e princípios, mas também ir em busca dos meus sonhos, especialmente, à minha mãe Maria Genúbia de Souza Monteiro, às minhas tias Maria Juliana Jamille Barra de Souza Rebouças, Maria Gilnar de Souza Monteiro Pinto (*in memoriam*) e Maria Gilnadia de Souza Monteiro, às minhas avós Antônia Abigail Barra de Souza (*in memoriam*) e Ana Anita de Araújo Pereira, que um dia eu possa ter tanto a força quanto a humildade que elas possuem, assim como os vossos princípios.

Ao meu avô Antônio de Souza Maia (*in memoriam*) e a Daniel de Souza Freitas, por terem me ensinado seus valores, os quais norteiam a minha vida. À minha prima e madrinha Isabelly Christiny Monteiro de Souza Pinto por ter sempre acreditado em mim. A meus irmãos Gabriel, Valentina e Elison que motivam-me a cada dia ser uma pessoa melhor, sem dúvidas, vocês são a minha base.

Agradeço à minha orientadora Karina Estrela Egídio, a quem considero uma grande inspiração pela profissional que és, sendo sempre excepcional em tudo o que faz, com grande dedicação dentro e fora da universidade. Não tenham dúvidas, este trabalho foi desenvolvido apenas devido ao apoio que ela concedeu-me durante esse período de cerca de 1 ano. Apesar de eu não o ter merecido em alguns momentos, pelas faltas que cometi, agradeço-lhe por ter confiado em mim e por toda a paciência que teve comigo durante esse processo.

Agradeço ao meu coorientador Breno Eduardo Carlos por todas as orientações, experiências e conselhos que me passou durante o desenvolvimento desta pesquisa, sendo estas fundamentais para minha formação.

Sou muito grato a todos meus amigos, em especial, Vitória, Lizandra, Rafael, Saulinho, Bruno, Ronnis, Alison, Karizia, Elenilson, Neto, Junior, Francisco e Franklyn. Posso afirmar com convicção que eles foram fundamentais na minha trajetória de graduação e na minha formação como pessoa, sem eles nada disto teria sido possível.

À Raysla, por todo o apoio incondicional, pela compreensão nos momentos difíceis e pela motivação que sempre me impulsionou a seguir adiante.

Um grande agradecimento a todos os profissionais da UFERSA, especialmente, aos professores que durante a minha graduação contribuíram significativamente não somente com seus ensinamentos, mas também com suas grandes lições de vida, palavras apoio e motivação. Agradeço às Professoras Leonete Cristina de Araujo Ferreira Medeiros, Renata de Oliveira Marinho e Erica Natasche de Medeiros Gurgel Pinto, sem vocês, acho que hoje não estaria aqui, acredito que Deus coloca as pessoas certas em nossas vidas e vocês foram um alicerce para mim, mesmo que nunca tenha lhes contado, todos os desafios que enfrentei lembrava-me da bondade de vocês comigo, sou muito grato.

Durante a realização desta pesquisa lembrei-me as inúmeras vezes que quis desistir e tive a vontade de jogar tudo para o alto. Questionei-me muitas vezes qual seria o fim das minhas ações, assim como o próprio sentido da vida. Nesses últimos anos, refletindo sobre estes questionamentos, tenho compreendido que o sentido da vida está diretamente relacionado a direção que colocamos nos nossos esforços contínuos de cada dia, bem como nas ações que praticamos.

Acredito firmemente que a educação é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento humano e social. No entanto, antes de qualquer formação profissional, precisamos formarmo-nos ainda mais como humanos, capazes de enxergar e respeitar as pessoas, suas trajetórias e vivências, independentemente de sua formação ou classe social. No final, todos somos importantes, é preciso aprender a gastar-nos como uma vela, para enxergar que a grandiosidade desse mundo não está nas conquistas, mas nas pessoas que compõe os momentos de nossa existência.

Amparo-me sempre no que diz Platão no livro Apologia a Sócrates: “Enquanto tiver alento e capacidade, não deixarei de filosofar e de exortar a qualquer de vós que eu venha a encontrar: não vos preocupardes com o corpo nem com riquezas, mas pordes o maior empenho no aperfeiçoamento da alma”. Tenho a convicção, que neste momento tampouco sou e ainda tenho muito a melhorar e aprender. Reconheço que o caminho do crescimento pessoal e profissional será continuamente repleto de etapas que exigem paciência, disciplina e dedicação. Certamente, inúmeros desafios e dificuldades ainda virão, mas a partir deles conseguirei fortalecer a minha formação como pessoa.

A todas estas pessoas agradeço-lhes por contribuírem para a minha vida, este trabalho foi feito apenas por causa do apoio de vocês.

*Todo esse mundo visível é apenas um traço imperceptível na amplidão da natureza, que nem sequer nos é dado conhecer mesmo de um modo vago. Por mais que ampliemos as nossas concepções e as projetemos além dos espaços imagináveis, concebemos tão-somente átomos em comparação com a realidade das coisas. Esta é uma esfera infinita cujo centro se encontra em toda parte e cuja circunferência não se acha em nenhuma. E o fato de nossa imaginação perder-se nesse pensamento constitui, em suma, a maior característica sensível da onipotência de Deus. Que o homem, voltado para si próprio, considere o que é diante do que existe; que se encare como um ser extraviado neste canto afastado da natureza, e que, da pequena cela onde se acha preso, isto é, do universo, aprenda a avaliar em seu valor exato a terra, os reinos, as cidades e ele próprio. Que é um homem dentro do infinito?*

**Blaise Pascal (1623-1662)**

## RESUMO

Nas últimas décadas, o Concreto Reforçado com Fibras (CRF) tem se consolidado como uma alternativa promissora em aplicações de elementos estruturais, devido à sua capacidade de aprimorar o desempenho mecânico. Entre os principais tipos de fibras utilizadas, destacam-se as macrofibras de polipropileno LM-*Twist*, reconhecidas por contribuírem para o aumento da resistência mecânica à compressão axial, ductilidade e tenacidade, bem como para a redução da abertura de fissuras e da ocorrência do fenômeno de *spalling*. No entanto, ainda é observado uma dificuldade na determinação do teor ótimo de fibras, uma vez que os ensaios laboratoriais para diferentes percentuais demandam uma grande quantidade de corpos de prova, capazes de fornecer uma compreensão consistente da influência da incorporação para diferentes teores na matriz cimentícia. Nesse cenário, o uso de análises numéricas se mostra uma ferramenta primordial para superar tais limitações, visto que o seu emprego pode contribuir para a redução de custos, tempo de execução e a dependência da realização de ensaios físicos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo investigar a eficiência de um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para a predição das propriedades mecânicas do CRF com macrofibras de polipropileno. Na etapa experimental, foram moldados e ensaiados quatro traços: um traço de referência (REF) e três traços com adição de fibras, sendo A (0,20%), B (0,35%) e C (0,50%). Na etapa numérica, foi desenvolvido um código em *Python* para a geração do modelo tridimensional, submetido às mesmas condições do ensaio de compressão axial, empregando o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), disponível no software *Abaqus*. Os parâmetros elásticos, plásticos e de dano foram determinados a partir de resultados experimentais, equações normativas da ABNT NBR 6118 (2023) e métodos consagrados da literatura, como Carreira e Chu (1985) para compressão e Hordijk (1991) para tração. Os resultados mostraram a eficácia do uso de modelos numéricos para a representação adequada do comportamento experimental do CRF, obtendo valores de resistência média à compressão axial ( $f_{cm}$ ) e deslocamentos próximos aos alcançados por via experimental. Os traços REF e A (0,20%) apresentaram uma melhor aproximação, com erros de 3,50% e 3,24%, respectivamente. Além disso, foi observado a predominância da ruptura por cisalhamento, tanto experimentalmente quanto numericamente, evidenciando a adequabilidade da metodologia empregada. Desta forma, os resultados mostram a aplicabilidade do MEF associado ao modelo CDP para a representação do desempenho estrutural do CRF, mas também o potencial da simulação numérica para ampliar análises com menor custo e esforço experimental.

**Palavras-chave:** *Abaqus*. *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Macrofibras de polipropileno. Método dos Elementos Finitos (MEF). Teoria da plasticidade.

## ABSTRACT

In recent decades, Fiber-Reinforced Concrete (FRC) has been consolidated as a promising alternative for structural applications due to its ability to enhance mechanical performance. Among the main types of fibers employed, LM-Twist polypropylene macrofibers stand out, as they contribute to increased axial compressive strength, ductility, and toughness, in addition to reducing crack width and mitigating the occurrence of spalling. However, difficulties remain in determining the optimal fiber content, since laboratory testing for different fiber dosages requires a large number of specimens to provide a consistent understanding of the influence of fiber incorporation into the cementitious matrix. In this context, numerical analyses have proven to be a fundamental tool to overcome such limitations, as they can significantly reduce costs, execution time, and reliance on extensive experimental testing. Therefore, this study aims to investigate the efficiency of a numerical model based on the Finite Element Method (FEM) for predicting the mechanical properties of FRC reinforced with polypropylene macrofibers. In the experimental program, four concrete mixes were cast and tested: a reference mix (REF) and three fiber-reinforced mixes with fiber contents of 0.20% (A), 0.35% (B), and 0.50% (C). In the numerical stage, a Python-based routine was developed to generate a three-dimensional model, which was subjected to the same conditions as the axial compression test, using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) constitutive model implemented in the Abaqus software. Elastic, plastic, and damage parameters were defined based on experimental results, equations prescribed by ABNT NBR 6118 (2023), and well-established models from the literature, such as Carreira and Chu (1985) for compression and Hordijk (1991) for tension. The results demonstrated the effectiveness of the numerical approach in accurately reproducing the experimental behavior of FRC, achieving axial compressive strength ( $f_{cm}$ ) and displacement values close to those obtained experimentally. The REF and A (0.20%) mixes showed the best agreement, with errors of 3.50% and 3.24%, respectively. In addition, shear failure was identified as the predominant failure mode in both experimental and numerical analyses, confirming the adequacy of the adopted methodology. Overall, the findings highlight the applicability of FEM combined with the CDP model for representing the structural performance of FRC, as well as the potential of numerical simulations to expand parametric analyses with reduced cost and experimental effort.

**Keywords:** Abaqus. Concrete Damaged Plasticity (CDP). Polypropylene macrofibers. Finite Element Method (FEM). Plasticity theory.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Execução do <i>Slump Test</i> .....                                  | 22 |
| Figura 2- Tipos de ruptura conforme a NBR 5739.....                            | 26 |
| Figura 3- Comportamento mecânico a tração do CRF .....                         | 28 |
| Figura 4- Interação fibra-matriz do concreto sem fibras comparado ao CRF ..... | 29 |
| Figura 5- Fibras na matriz do concreto.....                                    | 30 |
| Figura 6- Principais tipos de fibras sintéticas e naturais. ....               | 32 |
| Figura 7- Influência da orientação das fibras .....                            | 34 |
| Figura 8- Fibra de polipropileno LM-Twist .....                                | 35 |
| Figura 9- Curva tensão-deformação do concreto no CDP.....                      | 37 |
| Figura 10- Comportamento de materiais submetidos a tensão uniaxial.....        | 40 |
| Figura 11- Diagramas de tensão-deformação característicos de materiais.....    | 42 |
| Figura 12- Constituintes do MEF .....                                          | 43 |
| Figura 13- Tipos de elementos finitos .....                                    | 43 |
| Figura 14- Representação dos graus de liberdade .....                          | 44 |
| Figura 15- Interface inicial <i>Abaqus</i> .....                               | 45 |
| Figura 16- Módulos do <i>Abaqus</i> .....                                      | 46 |
| Figura 17- Teoria de amolecimento proposta por Hordijk.....                    | 50 |
| Figura 18- Metodologia da pesquisa .....                                       | 51 |
| Figura 19- Materiais pesados e separados .....                                 | 54 |
| Figura 20- Moldes cilíndricos de plástico .....                                | 54 |
| Figura 21- Betoneira para preparação do concreto.....                          | 54 |
| Figura 22- Sequência de materiais na betoneira.....                            | 55 |
| Figura 23- Ensaio de <i>Slump Test</i> .....                                   | 55 |
| Figura 24- Moldagem dos corpos de prova .....                                  | 56 |
| Figura 25- Desmoldagem e cura submersa dos CP .....                            | 56 |
| Figura 26- Retificação dos corpos de prova .....                               | 57 |
| Figura 27- Ensaio de compressão axial do concreto .....                        | 58 |
| Figura 28- Código <i>Python</i> para obtenção do CP e das fibras.....          | 59 |
| Figura 29- Corpo de prova cilíndrico particionado .....                        | 60 |
| Figura 30- Fibras Confeccionadas .....                                         | 60 |
| Figura 31- Curva de Tensão em função da deformação inelástica.....             | 62 |
| Figura 32- Curva de dano em relação a deformação inelástica .....              | 62 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33- Curva de tensão em função da abertura de fissura.....                          | 63 |
| Figura 34- Curva de dano à tração em relação a abertura de fissura.....                   | 63 |
| Figura 35- União das fibras ao concreto.....                                              | 64 |
| Figura 36- Interação do tipo <i>embedded region</i> .....                                 | 65 |
| Figura 37- Interação do tipo <i>rigid body</i> .....                                      | 66 |
| Figura 38- Condições de contorno na face inferior e superior do CP .....                  | 67 |
| Figura 39- Malhas geradas .....                                                           | 68 |
| Figura 40- Traço de 0,70% com formação de agrupamentos de fibras.....                     | 69 |
| Figura 41- Resistência à compressão axial por traço .....                                 | 72 |
| Figura 42- Tipos de ruptura dos CP do traço REF .....                                     | 73 |
| Figura 43- Tipos de ruptura dos CP do traço A (0,20%).....                                | 73 |
| Figura 44- Tipos de ruptura dos CP do traço B (0,35%).....                                | 74 |
| Figura 45- Tipos de ruptura dos CP do traço C (0,50%).....                                | 74 |
| Figura 46- Resistência à tração comparada entre os CP.....                                | 75 |
| Figura 47- Carga máxima e deslocamento máximo para carga aplicada no traço REF .....      | 76 |
| Figura 48- Curva da Força em relação ao deslocamento para o traço de Referência (REF).... | 77 |
| Figura 49- Evolução do dano no traço RF.....                                              | 77 |
| Figura 50- Análise do tipo de ruptura do traço REF .....                                  | 78 |
| Figura 51- Carga máxima e deslocamento máximo na carga aplicada ao traço A (0,20%).....   | 78 |
| Figura 52- Curva da Força em função do deslocamento para o traço A .....                  | 79 |
| Figura 53- Análise do tipo de ruptura traço A.....                                        | 79 |
| Figura 54- Carga máxima e deslocamento máximo aplicado ao traço B (0,35%) .....           | 80 |
| Figura 55- Curva da Força em relação ao deslocamento para o traço B .....                 | 80 |
| Figura 56- Análise do tipo de ruptura traço B .....                                       | 81 |
| Figura 57- Carga máxima e deslocamento máximo aplicado ao traço C (0,50%) .....           | 81 |
| Figura 58- Curva Força em função do deslocamento do traço C .....                         | 82 |
| Figura 59- Evolução do dano no traço C .....                                              | 82 |
| Figura 60- Análise da ruptura do traço C .....                                            | 83 |
| Figura 61- Análise comparativa $f_c$ experimental e numérico.....                         | 83 |
| Figura 62- Análise comparativa deslocamento numérico e experimental.....                  | 84 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1- Classes de Resistência .....                                              | 21 |
| Tabela 2- Propriedades mecânicas das fibras .....                                   | 33 |
| Tabela 3- Propriedades e Características .....                                      | 36 |
| Tabela 4- Volume total necessário por traço .....                                   | 52 |
| Tabela 5- Quantidade de cada material para o traço .....                            | 53 |
| Tabela 6- Quantidade de fibras de polipropileno utilizadas .....                    | 53 |
| Tabela 7- Parâmetros Plásticos para o CDP .....                                     | 61 |
| Tabela 8- Propriedades plásticas de tensão e deformação fibras.....                 | 64 |
| Tabela 9- Interações utilizadas no modelo <i>Abaqus</i> .....                       | 65 |
| Tabela 10- Descrição das malhas dos componentes.....                                | 68 |
| Tabela 11- Resultados do Ensaio de <i>Slump Test</i> .....                          | 69 |
| Tabela 12- Resultados do ensaio de compressão axial para os traços analisados ..... | 71 |
| Tabela 13- Resistência média à tração direta dos CP .....                           | 75 |
| Tabela 14- Propriedades mecânicas para o concreto .....                             | 76 |

## SUMÁRIO

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>16</b> |
| 1.1 Objetivos.....                                     | 18        |
| 1.1.1 Objetivo geral .....                             | 18        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos .....                      | 18        |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                     | <b>19</b> |
| 2.1 Concreto .....                                     | 19        |
| 2.2 Propriedades no estado fresco .....                | 21        |
| 2.2.1 Consistência.....                                | 22        |
| 2.2.2 Plasticidade.....                                | 23        |
| 2.2.3 Trabalhabilidade .....                           | 23        |
| 2.3 Propriedades no estado endurecido .....            | 24        |
| 2.3.1 Resistência à tração .....                       | 24        |
| 2.3.2 Resistência à compressão .....                   | 25        |
| 2.3.3 Durabilidade .....                               | 26        |
| 2.4 Concreto Reforçado com Fibras .....                | 27        |
| 2.4.1 Influência da inserção de fibras no CRF .....    | 29        |
| 2.4.2 Tipos de Fibras .....                            | 31        |
| 2.4.3 Fibra de Polipropileno .....                     | 33        |
| 2.4.3.1 LM-Twist.....                                  | 35        |
| 2.5 Comportamento quase-frágil do concreto .....       | 36        |
| 2.6 Mecânica do dano .....                             | 39        |
| 2.7 Teoria da plasticidade.....                        | 39        |
| 2.8 Método dos elementos finitos.....                  | 42        |
| 2.9 Software <i>Abaqus</i> .....                       | 45        |
| 2.10 Concrete Damaged Plasticity (CDP).....            | 47        |
| 2.10.1 Modelo de compressão Carreira e Chu (1985)..... | 48        |
| 2.10.2 Modelo de tração Hordijk (1991) .....           | 49        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                              | <b>51</b> |
| 3.1 Procedimento Experimental .....                    | 52        |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.1 Definição do traço de concreto e coleta dos materiais .....  | 52        |
| 3.1.2 Moldagem dos corpos de prova.....                            | 53        |
| 3.1.3 Realização do ensaio .....                                   | 57        |
| 3.2 Procedimento Numérico .....                                    | 58        |
| 3.2.1 Confeção do modelo numérico .....                            | 59        |
| 3.2.2 Propriedades dos materiais .....                             | 60        |
| 3.2.3 Interações entre as partes .....                             | 64        |
| 3.2.4 Condições de contorno e carregamento.....                    | 66        |
| 3.2.5 Definição das Malhas .....                                   | 67        |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                         | <b>69</b> |
| 4.1 Análise Experimental .....                                     | 69        |
| 4.1.1 Ensaio de <i>Slump Test</i> .....                            | 69        |
| 4.1.2 Ensaio de Resistência à compressão axial.....                | 70        |
| 4.1.3 Resistência média à tração direta.....                       | 74        |
| 4.2 Análise Numérica .....                                         | 75        |
| 4.2.1 Traço de Referência (REF).....                               | 76        |
| 4.2.2 Traços com adições de Fibras.....                            | 78        |
| 4.2.2.1 Traço A (0,20%).....                                       | 78        |
| 4.2.2.2 Traço B (0,35%) .....                                      | 79        |
| 4.2.2.3 Traço C (0,5%) .....                                       | 81        |
| 4.3 Comparação entre os resultados numéricos e experimentais ..... | 83        |
| <b>5. CONCLUSÃO.....</b>                                           | <b>85</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS .....</b>                                        | <b>87</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento tecnológico juntamente com o aumento da densidade populacional, acarretaram em significativos avanços na indústria da construção civil, destacando-se a busca e o aprimoramento dos materiais de construção, bem como a proeminente necessidade de obter sistemas construtivos mais eficientes e sustentáveis. Esse desenvolvimento é impulsionado, sobretudo, pela exigência por edificações com alta qualidade construtiva, capazes de atender às demandas contemporâneas por segurança estrutural, durabilidade e redução dos custos de manutenção.

Nesse contexto, percebe-se que no setor da construção civil a busca por materiais alternativos apresenta uma grande relevância tanto no planejamento quanto na execução das obras civis, contribuindo consideravelmente para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas, assim como para a garantia da estabilidade estrutural das edificações. A utilização adequada desses materiais pode reduzir o surgimento de problemas relacionados a danos ou rupturas que afetam a qualidade e o uso das construções, agregando assim valor aos sistemas construtivos dentro da esfera econômica.

Entre estas soluções, as fibras poliméricas vêm se consolidando como uma excelente opção para reforçar o concreto, podendo auxiliar na redução da quantidade de fissuras que surgem em seu estado endurecido. Além de que, pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas e térmicas, a destacar a resistência ao impacto, à fadiga, tenacidade, tração e à abrasão (Doğan; Demir, 2021; Amaral Júnior; Silva; Moravia, 2017).

Nesse sentido, o uso de Concretos Reforçados com Fibras (CRF) tem aumentado consideravelmente no Brasil, pois ao se adicionar as fibras com módulo de elasticidade e resistência adequada, em um percentual apropriado, pode-se diminuir a fragilidade do concreto. A fibra na matriz do concreto irá tender a se distribuir de forma aleatória, reforçando assim todo o elemento estrutural, de forma a corroborar para a transferência de tensões quando o material for submetido aos esforços solicitantes (Figueiredo, 2011; Almeida; Parsekian; Carnio, 2022).

Para a melhoria das propriedades do CRF é imprescindível que sejam realizados estudos sobre a incorporação dos diferentes tipos de fibras disponíveis no setor, com destaque para as fibras de polipropileno. Nestes estudos, necessita-se que sejam feitos ensaios experimentais para analisar a variação do percentual de fibras e a sua relação nas propriedades mecânicas do material, o que muitas vezes irá exigir um considerável esforço laboratorial.

Todavia, nota-se que ainda persiste um desafio significativo, uma vez que grande parte das pesquisas envolvendo o uso de fibras apresentam limitações associadas ao número restrito de ensaios experimentais executados. Essas restrições comprometem a obtenção de um conjunto diversificado de resultados e, conseqüentemente, limita-se a compreensão das investigações realizadas.

Em meio a isto, as análises numéricas têm demonstrado ser uma ferramenta primordial para a realização de análises aprofundadas e na superação das limitações experimentais existentes, especialmente no que tange à economia de custos e tempo. Através da modelagem computacional, torna-se possível investigar de forma eficiente a influência do teor de fibras poliméricas, podendo-se então prever as propriedades mecânicas cruciais do concreto, como compressão axial, deformação e tração, levando em consideração os diferentes cenários e condições, permitindo validar, ajustar e expandir as informações obtidas em laboratório.

De acordo com Santos (2022), o Método dos Elementos Finitos (MEF) se destaca como uma abordagem fundamental em análises aprofundadas de problemas estruturais de alto grau de complexidade. O MEF adota como premissa o comportamento não linear dos materiais, o que possibilita que os modelos numéricos representem de forma mais fidedigna o comportamento mecânico real das estruturas. Outra vantagem, é que o uso desses modelos numéricos pode auxiliar no avanço técnico da aplicação das fibras em sistemas construtivos, de forma a mitigar possíveis problemas estruturais que venham a comprometer o desempenho das edificações.

Desta forma, o presente trabalho investigou a eficiência do emprego de um modelo numérico baseado no MEF para a predição dos resultados experimentais do CRF. A partir dessa análise numérica avaliou-se como o desempenho mecânico do concreto é influenciado pela variação da quantidade de fibras de polipropileno LM- *Twist*. Com isso, foi possível mostrar a viabilidade que estes modelos propiciam, tanto na redução de esforços laboratoriais quanto na possibilidade de ampliação de estudos representativos de ensaios de compressão axial com a variação dos teores de fibras.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Investigar a eficiência de um modelo numérico baseado no MEF para a predição das propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de polipropileno do tipo LM- *Twist*.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o comportamento mecânico experimental do CRF sob compressão axial comparado ao concreto convencional, para diferentes teores de fibras: 0,20%, 0,35% e 0,50%;
- Desenvolver um modelo numérico parametrizado em linguagem *Python*, incorporando a variação do percentual de fibras;
- Validar um modelo tridimensional baseado no MEF, utilizando o *software Abaqus*, por meio da correlação com dados experimentais obtidos em ensaios laboratoriais;
- Analisar a eficiência do uso de modelos numéricos em relação aos resultados experimentais, identificando as vantagens e as limitações encontradas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Concreto

O concreto é considerado um material compósito, o qual é composto essencialmente por cimento, agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia) e água, podendo apresentar em sua composição aditivos químicos (superplastificantes, plastificantes e incorporador de ar) e/ou adições (metacaulim, cinza volante e sílica ativa), que possuem como objetivo a melhoria das propriedades do concreto (Bastos, 2023).

Conforme Recena (2017), a dosagem do concreto está diretamente associada ao processo no qual são determinados os quantitativos dos materiais, nesta etapa almeja-se estimar a quantidade de materiais do traço, para que então seja possível atender aos requisitos mecânicos, químicos e físicos, paralelamente ao menor custo final. Logo, compreende-se que a finalidade da dosagem não é apenas a obtenção do melhor concreto, mas do concreto que seja mais adequado.

A preparação do concreto pode ser realizada de forma manual ou por meio de betoneiras utilizadas nos canteiros de obras, sendo esta forma de preparo denominada concreto (in loco). Mas também, pode ser preparado em usinas centrais de concreto, as quais denomina-se concreto usinado, tem-se por meio desta forma de preparo um controle mais rigoroso dos materiais utilizados no traço.

À medida que os constituintes do concreto são dosados e misturados irá se formar uma mistura homogênea, que por meio do auxílio de materiais de apoio, tais como, fôrmas e escoras, poderá ser feito a moldagem de peças com diferentes formatos. A exemplo, no setor da construção civil, pode-se observar aplicações em lajes de concreto armado, vigas, pilares e estruturas complexas, que necessitam de uma certa resistência mecânica aos esforços aos quais será submetida no decorrer de sua vida útil.

Entretanto, é importante ressaltar que a preparação do concreto nas obras civis, necessita de um controle tecnológico rígido, no qual seja possível alcançar por meio das dosagens dos materiais especificados as condições para a aplicação almejada, visando assim garantir as condições de segurança das construções para os seus usuários.

Para Valin Júnior *et al.* (2016), a inserção de boas práticas construtivas durante a produção do concreto é considerada imprescindível para o controle da qualidade, destacam-se a cura adequada, confecção correta de fôrmas e o controle tecnológico. Com a inserção destas boas práticas pode-se contribuir para que o concreto seja um material racional e durável, almejando assim o maior aproveitamento dos recursos que são empregados em sua produção,

enaltecendo-o como uma alternativa sustentável e que possui benefícios tanto tecnológicos, como econômicos.

Há diversos fatores que podem afetar a qualidade e a resistência final do concreto, entre eles, destacam-se a complexidade do seu comportamento durante o estado fresco quanto endurecido, a heterogeneidade existente nos materiais em sua composição, ou seja, a qualidade que estes materiais apresentam diante a sua falta de uniformidade. É perceptível também uma influência direta da mão de obra juntamente com a tecnologia empregada em sua fabricação, mas também os procedimentos executados nas etapas que envolvem o transporte do concreto e a moldagem dos corpos de prova (Seleghin, 2013).

O concreto convencional (CC) ao ser submetido a carregamentos externos tende a apresentar uma boa resistência à compressão, porém tem uma baixa resistência à tração, necessitando assim de materiais alternativos capazes de reforçá-lo a este tipo de esforço (Amaral Júnior; Silva; Moravia, 2017; Ahmad *et al.*, 2022). Em meio a isto, observa-se uma lacuna existente, no que se refere a busca por materiais que possam ser incorporados a matriz do concreto, e que assim consiga contribuir de forma significativa para a melhoria das suas propriedades.

Com os avanços tecnológicos que vem ocorrendo atualmente no setor da construção civil, é observado que há uma diversificação dos tipos de concretos, e a sua escolha, bem como a aplicação dependerá exclusivamente da finalidade da estrutura dimensionada. Em conformidade a ABNT NBR 8953 (2015), os concretos para fins estruturais podem ser classificados quanto a sua massa específica, resistência à compressão aos 28 dias e por sua consistência no estado fresco. No que se refere a sua massa específica o concreto pode apresentar a seguinte classificação:

- Concreto leve (CL): possui massa específica seca abaixo de  $2000 \text{ kg/m}^3$ ;
- Concreto normal (C): tem massa específica seca entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $2800 \text{ kg/m}^3$ ;
- Concreto pesado ou denso (CD): apresenta massa específica seca acima de  $2800 \text{ kg/m}^3$ .

Já quanto a resistência à compressão aos 28 dias, os concretos estruturais podem apresentar duas classes (Tabela 1), sendo o grupo I de resistência (C20 à C50) e o grupo II (C55 a C100). Estas classes podem ser caracterizadas como:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão inferior a 20 MPa, considerado não estrutural;
- Concreto de resistência normal: resistência à compressão entre 20 e 50 MPa;
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 50 MPa.

Tabela 1- Classes de Resistência

| <b>Classe de resistência Grupo I</b> | <b>Resistência característica à compressão (MPa)</b> | <b>Classe de resistência Grupo II</b> | <b>Resistência característica à compressão (MPa)</b> |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|
| C20                                  | 20                                                   | C55                                   | 55                                                   |
| C25                                  | 25                                                   | C60                                   | 60                                                   |
| C30                                  | 30                                                   | C70                                   | 70                                                   |
| C35                                  | 35                                                   | C80                                   | 80                                                   |
| C40                                  | 40                                                   | C90                                   | 90                                                   |
| C45                                  | 45                                                   | C100                                  | 100                                                  |
| C50                                  | 50                                                   | C100                                  | 100                                                  |

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8953, 2015.

A consistência do concreto no estado fresco, por sua vez, pode apresentar a seguinte classificação conforme especificado na ABNT NBR 8953 (2015):

- S10: possui abatimento  $\geq 10$  e  $< 50$  mm, aplicado como concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado;
- S50: possui abatimento  $\geq 50$  e  $< 100$  mm, aplicado em alguns tipos de pavimentos e fundações;
- S100: possui abatimento  $\geq 100$  e  $< 160$  mm, aplicado em elementos estruturais com lançamento convencional;
- S160: possui abatimento  $\geq 160$  e  $< 220$  mm, aplicado em elementos estruturais com lançamento bombeado;
- S220: possui abatimento  $\geq 220$  mm, aplicado em elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras.

## 2.2 Propriedades no estado fresco

Nesta seção, são descritas as principais propriedades do concreto no estado fresco para a compreensão das análises as quais esta pesquisa irá abordar. Para Onuki e Gasparetto (2013), ter a devida compreensão acerca do comportamento que o concreto possui no estado plástico irá contribuir para que no final das etapas da produção, seja obtido concretos endurecidos com boa qualidade. Assim, é preciso que o concreto seja tratado cuidadosamente e rigorosamente em sua fase plástica, posto que as deficiências encontradas nesta fase irão resultar em prejuízos que irão se perdurar durante a vida útil da peça produzida, podendo comprometer a sua durabilidade e o cumprimento de sua função.

### 2.2.1 Consistência

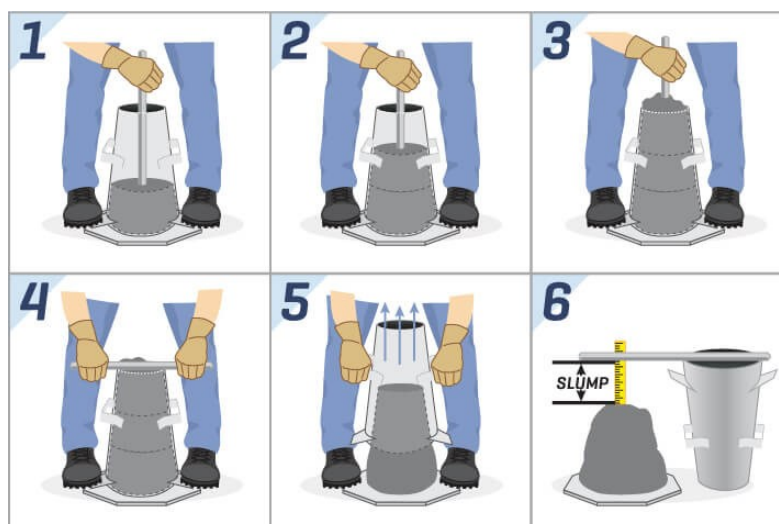
A consistência é considerada a propriedade do estado fresco do concreto na qual é possível observar a fluidez que a mistura irá apresentar e pode também indicar a facilidade que o material tem ao ser empregado sem a devida perda de sua homogeneidade (Onuki e Gasparetto, 2013). Para Bauer (2022), a consistência possui uma relação direta com os fatores característicos da mistura, tais como: o teor de água/mistura seca, a granulometria e a forma dos grãos dos agregados, os aditivos, o tempo e a temperatura.

Ademais, é necessário enfatizar que quanto maior a consistência do concreto preparado, maior será a sua facilidade de moldar-se e aderir entre as armaduras das estruturas na qual está sendo inserido. Por outro lado, quanto menor a consistência do concreto, haverá uma grande dificuldade de alocá-lo devidamente nas fôrmas, para então adquirir-se o formato desejado, havendo uma relação direta com o quantitativo de seus constituintes.

Conforme Coutinho *et al.* (2025), é fundamental que seja considerado a relação existente entre o índice de consistência e o quantitativo de água/cimento (a/c), visto que através desta relação será possível obter uma racionalidade dos materiais, de forma a reduzir os desperdícios, bem como proporcionar uma maior qualidade e durabilidade das estruturas.

A consistência pode ser medida por meio da execução do *Slump Test*, conhecido também como ensaio de abatimento do Tronco de Cone (Cone de Abrahms), onde pretende-se mensurar a fluidez do concreto produzido e a sua trabalhabilidade, contribuindo de forma considerável para o controle da qualidade e a uniformidade do material (Pereira e Maciel, 2021). Para se determinar a consistência da mistura do concreto fresco, é necessário seguir os procedimentos especificados pela ABNT NBR 16889 (2020), como é mostrado na Figura 1.

Figura 1- Execução do *Slump Test*



Fonte: Gilson Company, 2025.

### 2.2.2 Plasticidade

A plasticidade está diretamente relacionada a facilidade que o concreto no estado fresco irá apresentar de ser moldado sem se romper ou que haja a perda de sua integridade, estando assim intrinsicamente associada ao seu índice de consistência e ao grau de coesão dos constituintes do concreto. Entretanto, caso não haja uma coesão adequada poderá então ocorrer a segregação, ou seja, a separação dos agregados da pasta de cimento, e consequentemente, a exsudação (Bauer, 2022).

Segundo Onuki e Gasparetto (2013), é recomendável que o concreto possua uma maior plasticidade em condições nas quais as paredes das formas apresentem um elevado confinamento estrutural, marcadas por espaçamento reduzido entre as formas e armaduras densamente dispostas. A partir deste aumento da plasticidade pretende-se não apenas facilitar o adequado preenchimento dos espaços confinados, mas principalmente minimizar a ocorrência de vazios e imperfeições no elemento estrutural acabado

A plasticidade pode ser significativamente influenciada pelo teor de agregados miúdos presentes na composição da mistura, podendo afetar diretamente na relação água/cimento. Além de que, devido as partículas de areia apresentarem diferentes formatos/geometria, tais como: angulosas, alongadas ou rugosas, observa-se uma maior dificuldade na coesão, e consequentemente, no lançamento e adensamento (Braun e Schulze, 2018).

Quando as misturas de concreto possuem uma quantidade excessiva de agregados graúdos nota-se uma baixa coesão e mobilidade entre seus constituintes, em consequência disto, necessita-se um grande esforço para o lançamento e adensamento em suas formas (Araujo; Rodrigues; Freitas, 2000). No entanto, em situações que os grãos dos agregados graúdos sejam arredondados e com textura superficial lisa, irá ser exigido uma menor quantidade de água de amassamento, ao contrário ocorre para agregados com textura superficial rugosa o que contribui para o maior consumo de água e cimento (Braun e Schulze, 2018).

### 2.2.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é definida como a propriedade que determina a facilidade que há do concreto em ser misturado, lançado, adensado e ter o seu devido acabamento, levando-se em consideração que não haja uma maior perda em sua homogeneidade ou segregação no momento que é empregado, mas também que tenha-se a resistência final desejada (Neville, 2016). Para Onuki e Gasparetto (2013), as propriedades do concreto não devem ser

consideradas de forma isolada, e por isso que a consistência juntamente com a plasticidade poderá afetar na trabalhabilidade.

Contudo, o acréscimo de água na mistura não necessariamente irá contribuir para uma maior trabalhabilidade, na maioria dos casos, pode na verdade contribuir para a segregação e exsudação, assim como pode-se aumentar o abatimento do concreto, tornando-o mais fluído. Logo, é perceptível que a trabalhabilidade irá depender da seleção e proporção adequada dos materiais, que serão quantificados em conformidade as características corretas de cada constituinte, maximizando a qualidade final do concreto (Onuki e Gasparetto, 2013; Odumade *et al.*, 2020).

De acordo com Oliveira (2014), essa propriedade não é exclusivamente característica do material, como é no caso da consistência, na verdade irá depender também do local e das condições na qual será utilizado o concreto. Nesse sentido, o concreto que é adequado a uma obra de grande porte e com menor densidade de armadura não necessariamente será o mesmo para uma pequena construção com uma elevada quantidade de aço, é assim imprescindível que seja mensurado uma trabalhabilidade correta a sua aplicação, visando assim atingir a resistência à compressão dimensionada pelo projetista.

## **2.3 Propriedades no estado endurecido**

Nesta seção, serão compreendidas as principais propriedades do concreto no estado endurecido, visando agregar no entendimento dos resultados obtidos nesta pesquisa. Para Bauer (2022), o concreto deve ser considerado como um sólido a partir da pega, estando desta forma em constante evolução e podendo ser afetado pelas condições físicas, ambientais, mecânicas e químicas por meio de reações as quais ocorrem de forma lenta e que irão moldar as suas características.

### **2.3.1 Resistência à tração**

É observado em elementos construtivos de concreto que a resistência à tração é consideravelmente inferior a resistência à compressão, pois, o concreto apresenta uma certa deficiência quanto aos esforços de tração. Segundo Neville (2016), a resistência à tração é cerca de 10% da resistência à compressão, o que demonstra a necessidade de uma análise eficiente desta propriedade, mas também a busca por materiais alternativos capazes de aumentá-la.

Em estruturas de concreto é bastante comum a utilização de armaduras de aço para compensar a baixa resistência à tração do concreto, visando assim permitir que a estrutura

atenda sua funcionalidade suportando aos esforços de tração e flexão com segurança, e consequentemente, aumenta-se a vida útil dos elementos construtivos.

De acordo com Nilimaa e Nilforoush (2023), ter-se a devida compreensão da resistência à tração do concreto dimensionado permite estipular a carga na qual ocorrerá a fissuração da estrutura, melhorando a durabilidade do concreto. Para a estimativa desta propriedade são utilizadas as diretrizes da ABNT NBR 7222 (2011), a qual trata os procedimentos para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

### **2.3.2 Resistência à compressão**

A resistência à compressão é vista como uma das propriedades que possui mais relevância no concreto, visto que o material apresenta uma maior predisposição de resistir aos esforços de compressão. Para Mehta e Monteiro (2014), a resistência mecânica à compressão é uma característica do concreto que diz respeito a sua capacidade de resistir à tensão sem se romper.

É preciso destacar que a resistência à compressão do concreto, considerando-se o mesmo tipo de cimento, poderá ser influenciada por alguns parâmetros, como: qualidade dos materiais, forma e dimensão dos corpos de provas, fator água/ cimento e a idade do concreto (Onuki; Gasparetto, 2013). Ainda assim, Braun e Schulze (2018) ressaltam que a forma e granulometria dos agregados, bem como as condições nas quais ocorrem a cura são fatores que podem afetar na resistência final do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o fator água/cimento juntamente com a porosidade são os parâmetros que podem mais influenciar na resistência à compressão, estes por sua vez, apresentam uma correlação direta, na qual quanto maior a relação a/c e a porosidade, menor será a resistência. Contudo, como outrora fora destacado é de suma importância que seja dosado a quantidade de água adequada, a fim de que ocorra as reações do concreto e tenha-se a trabalhabilidade necessária para a aplicação.

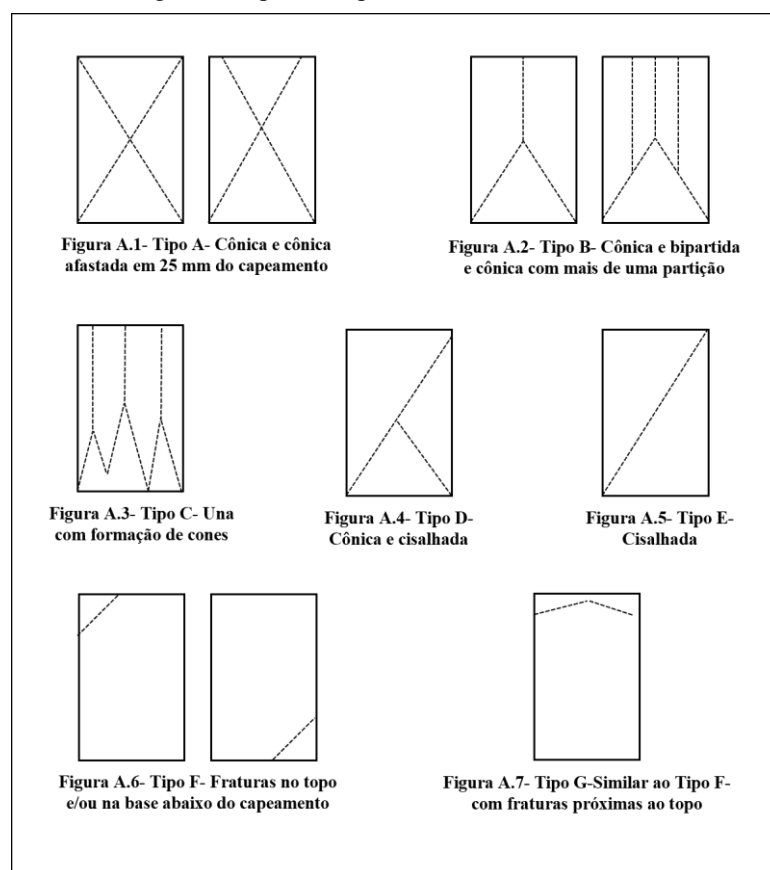
Para a análise da resistência à compressão é necessário que seja realizado duas etapas primordiais, a primeira será a moldagem de corpos de prova, seguindo os procedimentos prescritos na ABNT NBR 5738 (2015) e a segunda é a realização do ensaio de resistência à compressão, o qual segue as diretrizes da ABNT NBR 5739 (2018).

De acordo com Coutinho *et al.* (2025), a execução destes procedimentos desde a moldagem até o ensaio de resistência à compressão axial é considerada primordial para que se tenha um controle rígido da qualidade e que seja garantido a segurança das estruturas, ou seja,

que as suas propriedades mecânicas sejam mantidas em conformidade ao dimensionado na dosagem.

O ensaio de resistência à compressão é finalizado quando os corpos de prova atingem a sua capacidade de carga máxima, esta pode ser definida como a maior carga que o concreto suporta antes de ser deformado permanente. Logo, considera-se que ao atingir este estado final, o corpo de prova tenha sofrido a ruptura total, e por isso não poderá suportar uma carga maior que a apresentada na máquina do ensaio, essa ruptura conforme a ABNT NBR 5739 (2018) pode se apresentar por meio de diferentes tipos e formatos, sendo os principais representados na Figura 2.

Figura 2- Tipos de ruptura conforme a NBR 5739



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5739, 2018.

### 2.3.3 Durabilidade

A durabilidade é uma propriedade do concreto que está associada a capacidade do material resistir à ação do tempo, principalmente em situações que envolvem ataques químicos, à abrasão, vibração, choque, a água do mar ou qualquer outra condição que possa deteriorá-lo. É necessário ressaltar que a durabilidade depende da intensidade das condições de exposição que a estrutura de concreto é condicionada, ou seja, do tipo de ataque físico ou

químico que o material será submetido durante a sua vida útil (Onuki; Gasparetto, 2013; Bauer, 2022)

Ainda assim, Bauer (2022) enfatiza que a deterioração poderá ocorrer em menor ou maior grau diante a determinadas situações de exposição, o que poderá contribuir para que a estrutura de concreto seja conduzida de forma lenta e gradual a um processo contínuo de desagregação, e com isso pode-se comprometer a funcionalidade e a sua segurança estrutural. Todavia, estas condições que afetam a durabilidade da estrutura podem ser sanadas a partir de medidas corretivas e preventivas, as quais sejam capazes de mitigar as causas da destruição progressiva que pode ocorrer no material.

Logo, uma forma de reduzir os problemas relacionados a durabilidade de estruturas de concreto, pode se dar exclusivamente, a partir da realização de uma análise rigorosa antes da etapa de dosagem do concreto, na qual deve-se levar em consideração o tipo de obra e as condições que a estrutura será exposta, para então prosseguir com as etapas que envolvem o planejamento, a preparação e a execução do projeto.

## **2.4 Concreto Reforçado com Fibras**

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é um material do tipo compósito no qual são inseridas fibras na matriz do concreto convencional, tendo como finalidade o aprimoramento das propriedades mecânicas, de forma a conferir uma melhor ductilidade, resistência à compressão axial, resistência à tração e o controle da fissuração. É percebido também que a substituição de forma parcial ou total das barras de aço por fibras apresentam uma otimização da produtividade nos canteiros de obra, devido uma maior racionalização dos materiais construtivos (Almeida; Parsekian; Carnio, 2022; Abedi *et al.*, 2025).

No Brasil, atualmente, pode-se notar que as aplicações do CRF têm se intensificando por meio da realização de pesquisas referente aos diferentes tipos de fibras e as variações dos seus teores, assim como por meio da publicação de normas referentes a temática, sendo divididas em áreas de abrangência: concreto projetado para utilização em revestimentos de túneis, elementos pré-moldados e pavimentos industriais (Almeida; Parsekian; Carnio, 2022).

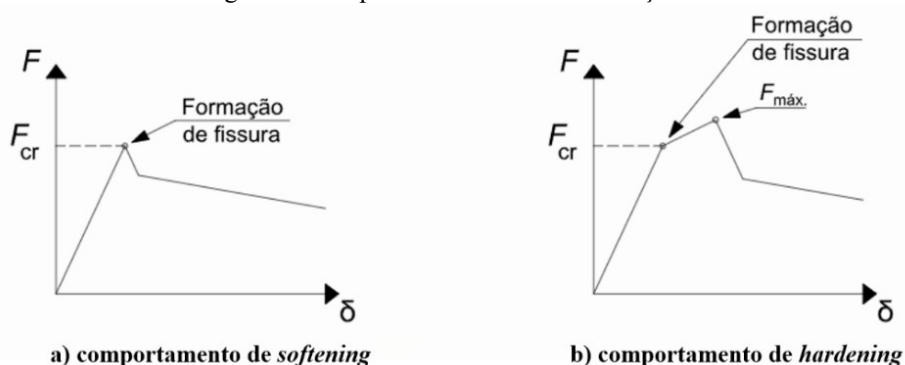
Desde o ano de 2021 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vem publicando normas referentes ao uso do CRF, entre as principais normas vigentes destacam-se:

- NBR 16935- Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras- Procedimento (2021);
- NBR 16938- Concreto reforçado com fibras- Controle da qualidade (2021);

- NBR 16939- Concreto reforçado com fibras- Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento- Método de ensaio (2021)
- NBR 16940- Concreto Reforçado com fibras- Determinação da resistência á tração na flexão- Método de ensaio (2021);
- NBR 16942- Fibras poliméricas para concreto- Requisitos e métodos de ensaio (2021);
- NBR 14931- Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras- Requisitos (2023).

De acordo com a ABNT NBR 16935 (2021) o comportamento mecânico do CRF pós-fissuração quando submetido à tração direta pode ser caracterizado por dois regimes: “*softening*” (amolecimento) e “*hardening*” (endurecimento), como é observado na Figura 3. No comportamento *softening*, nota-se uma redução progressiva da capacidade resistente após o início da fissuração da matriz do concreto, ou seja, a força pós-fissuração é inferior a força de início de fissuração ( $F_{cr}$ ). Por outro lado, no comportamento *hardening* percebe-se que há um aumento da resistência do concreto após o início da fissuração, ocorrendo múltiplas fissuras e a absorção da significativa da energia, assim sendo a força máxima pós-fissuração ( $F_{máx}$ ) maior que a força de início de fissuração ( $F_{cr}$ ).

Figura 3- Comportamento mecânico a tração do CRF



Fonte: ABNT NBR 16935, 2021.

Apesar de todo o desenvolvimento referente ao CRF, é perceptível que uma das maiores dificuldades do uso desse material reside na etapa de dosagem das fibras. Apesar dos fabricantes recomendarem uma quantidade ideal por  $m^3$ , nota-se que há ainda a possibilidade de otimização do comportamento do concreto por meio da variação do percentual adotado, isto é, o uso da quantidade de fibras com proporções pode contribuir para o aprimoramento das propriedades. Em consequência disto, tem-se a necessidade da ampliação de estudos para

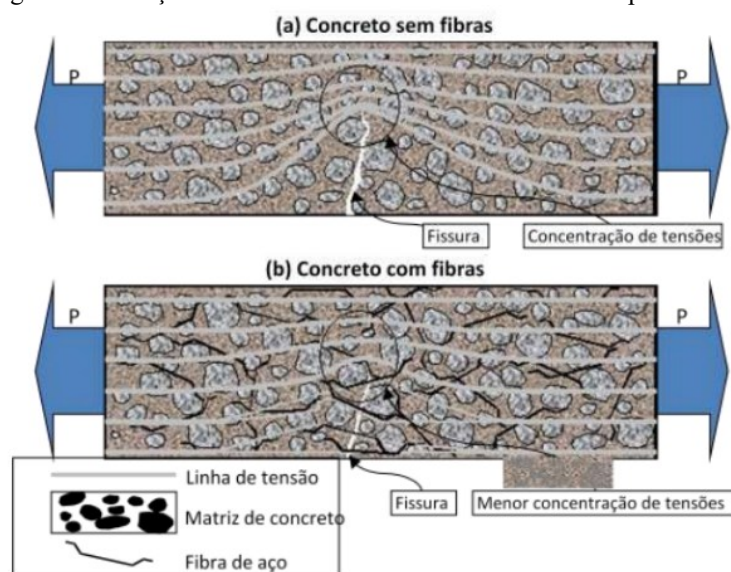
a obtenção da “quantidade ótima de fibras”, de forma a propiciar o melhor desempenho do material.

#### 2.4.1 Influência da inserção de fibras no CRF

Em estruturas compostas por concreto convencional, quando estas são expostas a esforços solicitantes consideráveis, inicialmente tem-se o fissuramento da estrutura, nota-se uma redução na sua capacidade de resistência à tração, que é ocasionado pela concentração de tensões nas extremidades das fissuras, e como consequência tem-se a possibilidade ruptura frágil. Por outro lado, nas estruturas produzidas por CRF haverá uma maior capacidade de redistribuição das tensões após o início da fissuração, devido ao uso das fibras que estão distribuídas nas faces das fissuras, o que contribui para o retardamento de sua propagação e no aumento da ductilidade (Figueiredo, 2011).

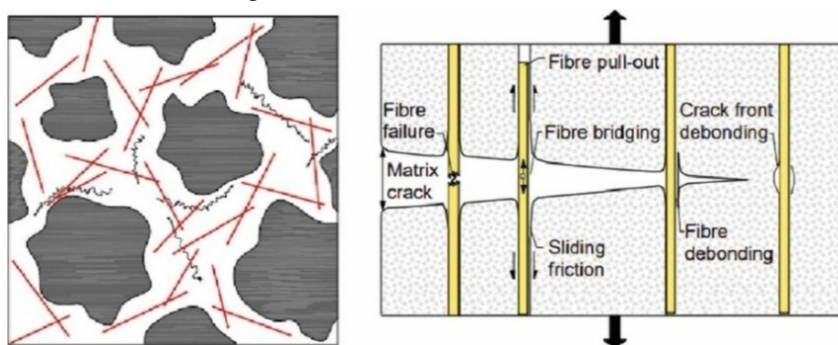
Para Pham (2025), esta condição de interação entre fibra e matriz do concreto, dependerá significativamente do mecanismo de ponte, o qual é essencial para o desempenho seguro e resiliente das estruturas compostas por CRF. Nesse mecanismo, as fibras atuam como ponte sobre as fissuras que irão ocorrer na matriz cimentícia, contribuindo para o aprimoramento das propriedades de tração e flexão, em consequência disso, traz-se ganhos quanto a tenacidade, ductilidade e o desempenho pós-fissuração. Apesar disso, tanto a matriz como as fibras poderão estar sujeito a falhas, tais como: a fissuração da matriz, ruptura das fibras, arrancamento parcial ou total, deslizamento com atrito e o próprio ponteamto. Nas Figuras 4 e 5 são observados a representação da interação fibra-matriz e tipos de rupturas.

Figura 4- Interação fibra-matriz do concreto sem fibras comparado ao CRF



Fonte: Figueiredo, 2011.

Figura 5- Fibras na matriz do concreto



Fonte: Pham, 2025.

A capacidade de reforço que as fibras possuem no CRF irá depender do teor de fibras utilizado no traço de concreto dosado, sendo necessário considerar que quanto maior é esse teor, maior é o número de fibras que atuarão na interação como mecanismo de ponte para a transferência de tensão nas fissuras, fazendo assim que haja um reforço na estrutura. O uso do CRF é mais recomendado em estruturas nas quais observa-se a aplicação de tensões variáveis, como por exemplo pavimentos, porém para elementos estruturais os quais tem-se esforços localizados, tais como vigas e pilares, pode não ser tão eficiente o seu uso isolado, sendo recomendado a sua combinação com as armaduras convencionais (Figueiredo, 2011).

De acordo com Hu *et al.* (2021), o aprimoramento excessivo das propriedades mecânicas do concreto por meio do aumento do teor de fibras pode ser altamente prejudicial para a trabalhabilidade em seu estado fresco, fazendo com que haja um aumento da quantidade de poros e o aparecimento de defeitos na matriz. A trabalhabilidade do CRF pode ser influenciada também pelas características geométricas da fibra  $l/d$  (relação comprimento e diâmetro) e pelo teor de fibras.

Ainda assim, Cunha, Sampaio e Martinelli (2021) destacam que quanto maior for o volume de fibras presentes no traço, menor será a trabalhabilidade, com isso pode-se haver uma certa dificuldade na alocação do material. Os autores também ressaltam que quanto maior a trabalhabilidade, melhor será o alinhamento das fibras na direção do comprimento do corpo de prova, aumentando a resistência à flexão.

A incorporação das fibras ao concreto, por meio do aumento do seu teor volumétrico, pode contribuir para a melhoria da tenacidade e da resistência ao impacto do compósito. Apesar dessas adições promoverem ganhos na resistência mecânica, sua principal contribuição está principalmente associada a elevação da tenacidade, ou seja, na capacidade do material de absorver energia após a fissuração. Já quanto a resistência à flexão, as fibras não possuem a função de substituir as armaduras de aço, mas podem atuar de forma

complementar, proporcionando melhorias tanto na resistência quanto na ductilidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

De acordo com Leite e Castro (2020), as fibras que apresentam um alto módulo de elasticidade e resistência à tração superior à da matriz podem atuar como um reforço primário do concreto, de forma a propiciar a capacidade resistente depois da fissuração que ocorre na matriz. Por outro lado, quando as fibras têm um baixo módulo de elasticidade e resistência à tração, são usadas para o controle das fissuras devido a retração plástica do concreto

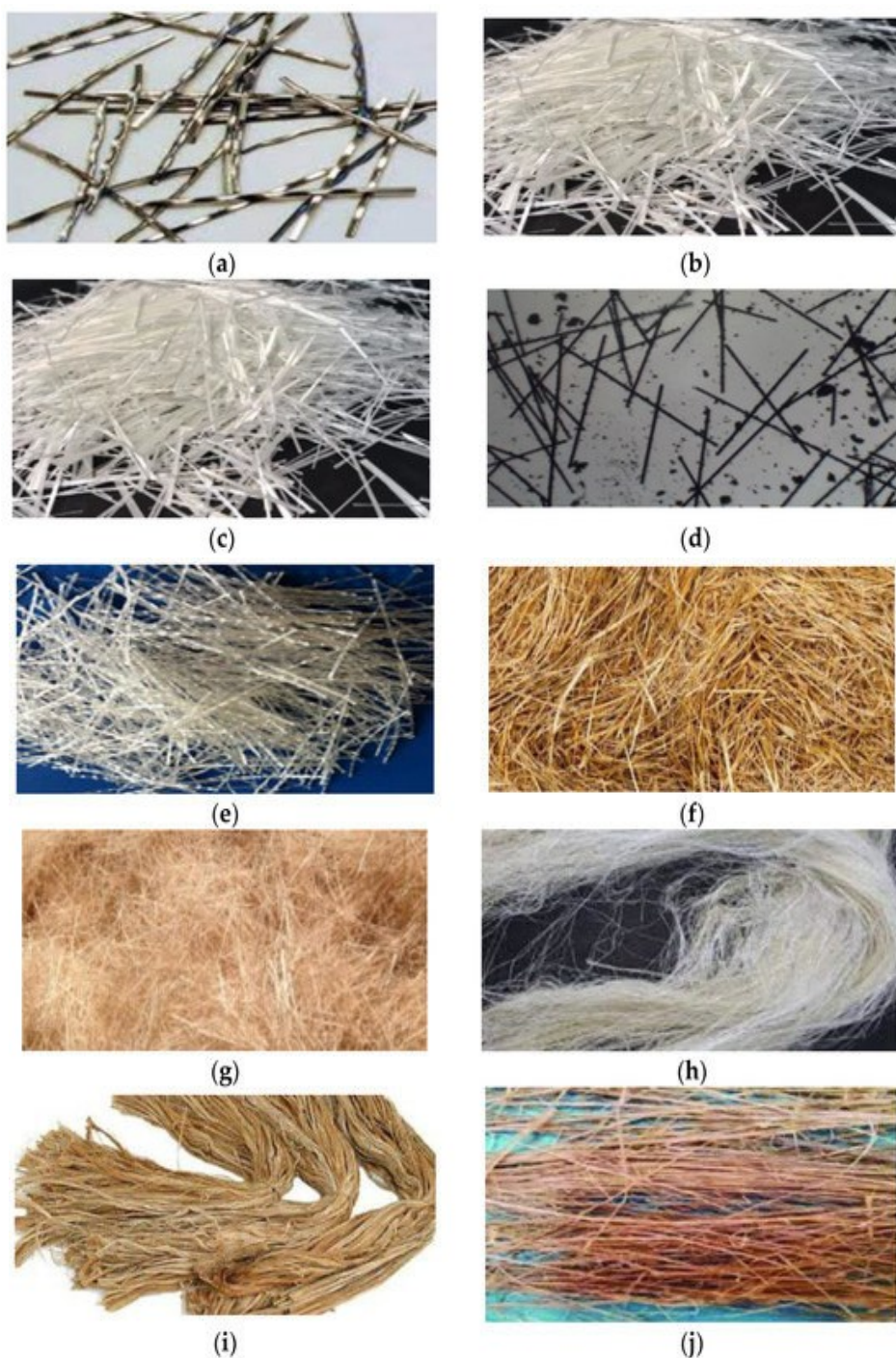
#### **2.4.2 Tipos de Fibras**

Segundo Anas *et al.* (2022), no setor da construção civil podem ser utilizadas diferentes tipos de fibras no concreto para que se tenha o controle de fissuras e a sua propagação devido a retração plástica do material, estas por sua vez, são categorizadas em fibras sintéticas e naturais. As fibras sintéticas e naturais irão se diferenciar não apenas por suas propriedades mecânicas, mas também por meio de sua origem, as sintéticas são produzidas por meio de processos industriais e as naturais a partir da extração vegetal.

Ademais, Babu *et al.* (2025) ressalta que na construção civil as fibras sintéticas apresentam vantagens quanto durabilidade, resistência a umidade e alta estabilidade térmica, o que contribui para diminuição de fissuras devido a retração, e em consequência disto, aumenta-se a resistência ao impacto, resistência à abrasão e a tenacidade do CRF. Por outro lado, as fibras naturais possuem benefícios ambientais por contribuir para o desenvolvimento da construção civil sustentável, apresentam um bom isolamento térmico, assim como resistência ao fogo e a prevenção do surgimento de fissuras, garantindo uma maior durabilidade e segurança nas edificações.

As fibras a depender de sua geometria podem ser classificadas em dois tipos: microfibras e macrofibras. As microfibras irão apresentar um diâmetro inferior a 0,30 mm e comprimento máximo de cerca de 18 mm, sendo amplamente utilizadas para o controle do fissuramento decorrente das retrações na fase plástica e endurecida do concreto. Já as macrofibras tem um diâmetro maior que 0,30 mm e comprimento mínimo de 40 mm, cuja função é auxiliar na resistência residual pós fissuração, atuando como uma ponte de transferência no CRF (Birol; Avcialp, 2025, Grupo Construquímica, 2013). Na Figura 6, são apresentados os principais tipos de fibras sintéticas e naturais disponíveis no setor da construção civil.

Figura 6- Principais tipos de fibras sintéticas e naturais: (a) Fibras de aço; (b) Fibras de vidro; (c) Fibras de polipropileno; (d) Fibras de carbono; (e). Fibras plásticas; (f) Palha de trigo; (g) Fibras de cana-de-açúcar; (h) Fibras de sisal; (i) Fibra de juta; e (j) Fibras de bambu.



Fonte: Anas *et al.*, 2022.

Entre as categorias de fibras mencionadas anteriormente, observa-se que, atualmente, as fibras sintéticas são as mais usadas no reforço de materiais cimentícios, devido a sua boa estabilidade dimensional e ao desempenho mecânico de suas propriedades. Tendo em vista isso, na Tabela 2 estão representados os diferentes tipos de fibras sintéticas disponíveis no mercado da construção civil, bem como suas propriedades características.

Tabela 2- Propriedades mecânicas das fibras

| <b>Tipo de Fibra</b> | <b>Diâmetro (mm)</b> | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Módulo de elasticidade (GPa)</b> | <b>Resistência à tração (GPa)</b> | <b>Alongamento último (%)</b> |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Acrílica             | 20 - 350             | 1,16 - 1,18                         | 14 - 19                             | 0,20 - 1,0                        | 10 - 50                       |
| Carbon (PAN)         | 8 - 9                | 1,60 - 1,70                         | 230 - 380                           | 2,50 - 4,0                        | 0,50 - 1,50                   |
| Carbon (Pich)        | 9 - 18               | 1,60 - 1,21                         | 30 - 480                            | 0,50 - 3,1                        | 0,50 - 2,40                   |
| Nylon                | 23 - 400             | 1,14                                | 4,10 - 5,20                         | 0,75 - 1,0                        | 16 - 20                       |
| Poliéster            | 10 - 200             | 1,34 - 1,39                         | 10 - 18                             | 0,23 - 1,2                        | 10 - 50                       |
| Polietileno          | 25 - 1000            | 0,92 - 0,96                         | 5                                   | 0,08 - 0,60                       | 3,00 - 100                    |
| Poliolefina          | 150 - 635            | 0,91                                | 2,70                                | 275                               | 15                            |
| Polipropileno        | 20 - 400             | 0,90 - 0,95                         | 3,50 - 10                           | 0,45 - 0,76                       | 15 - 25                       |
| PVA                  | 14 - 650             | 1,30                                | 29 - 36                             | 0,80 - 1,50                       | 5,70                          |
| Aço                  | 100 - 1000           | 7,84                                | 210                                 | 0,50 - 2,60                       | 0,50 - 3,50                   |

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess, 2007.

### 2.4.3 Fibra de Polipropileno

Nas últimas décadas, o polipropileno tornou-se um polímero termoplástico popular, devido a sua boa capacidade de ser aquecido e moldado sem sofrer alterações permanentes, mas também por causa de suas excelentes características mecânicas, bem como a facilidade de processamento e a viabilidade econômica. Por apresentar essas vantagens, houve-se então um desenvolvimento considerável em sua aplicação em diferentes setores da sociedade, na construção civil a sua inserção ocorreu por meio de estudos realizados nos quais foi possível obter as fibras sintéticas de polipropileno (Shrestha *et al.*, 2024).

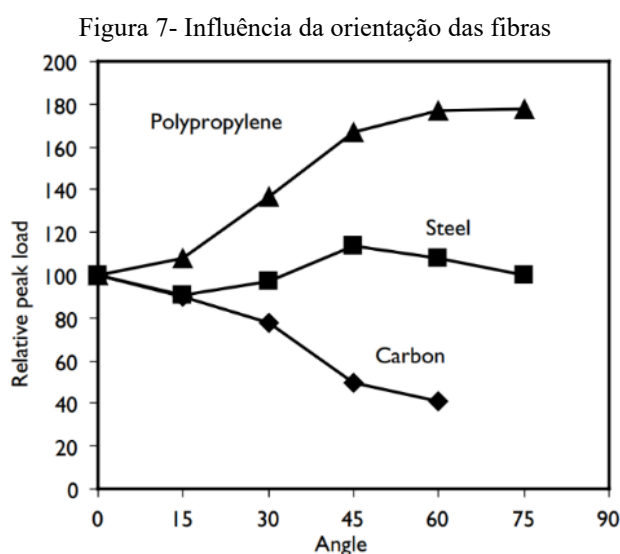
As fibras de polipropileno são obtidas por meio do processo de fabricação com resinas de polipropileno cujas moléculas apresentam um elevado peso molecular, sendo estas fibras compostas por cadeias poliméricas lineares obtidas a partir da polimerização das moléculas de propileno. Estas fibras apresentam inúmeras vantagens, tais como: menor densidade, boa resistência química, maior cristalinidade, resistência mecânica adequada, boa tenacidade e resistência à corrosão (Bentur; Mindess, 2007, Shrestha *et al.*, 2024).

Todavia, é necessário ressaltar que as fibras de polipropileno podem contribuir também para o aumento da ductilidade, da resistência a ciclos de congelamento e degelo e da tenacidade do concreto, reduzindo, conseqüentemente, a retração, a abertura de fissuras e a ocorrência do fenômeno de *spalling* (lascamento) em altas temperaturas. Outra vantagem em

relação as outras fibras são a sua facilidade de manuseio, em razão do baixo peso específico, além da capacidade de absorver de forma eficiente a energia proveniente dos esforços solicitantes e a resistência pós-fissuramento (Birol; Avci, 2025; Gudugurmath *et al.*, 2022).

Ainda assim, Birol e Avci (2025) destacam que as fibras de polipropileno são amplamente utilizadas em materiais à base de cimento não apenas por sua elevada resistência a agentes químicos, mas também em razão de sua natureza hidrofóbica inerte, estabilidade térmica, alto ponto de fusão e a facilidade de produção. Contudo, por apresentarem módulo de elasticidade inferior ao de outras fibras, tornam-se necessárias maiores dosagens para alcançar desempenho mecânico equivalente.

Na Figura 7 mostra-se que as fibras dúcteis, como as de polipropileno e aço, apresentam uma maior resistência ao arrancamento quando dispostas em ângulos mais elevados de orientação, contribuindo para a dissipação de energia por meio do esforço de flexão, da deformação plástica e do atrito gerado durante a sua retirada da matriz. Em contrapartida, as fibras frágeis, como as de carbono, podem reduzir a resistência do concreto quando estão inclinadas, em razão de sua elevada rigidez e a fragilidade frente às deformações (Bentur; Mindess, 2007).



Fonte: Bentur e Mindess, 2007.

Deste modo, a disposição das fibras, ou seja, sua orientação, afeta diretamente as propriedades mecânicas do CRF, especialmente, a resistência à flexão, à tração e a ductilidade. Em alguns testes que foram realizados observa-se que a melhoria das propriedades mecânicas do material irá ocorrer quando as fibras estiverem orientadas a um ângulo de 30° a 45° em relação à direção de alongamento, condição em que se obtêm maiores forças de tração e um aumento do número de fibras ativas, o que potencializa o efeito de ponte (Dziomdziora; Smarzewski, 2025)

Conforme Medeghini *et al.* (2025), a orientação das fibras pode exercer um papel fundamental em projetos estruturais, razão pela qual os modelos de análise devem incorporar fatores de orientação, que irão se relacionar tanto com a disposição das fibras quanto com o desenvolvimento das fissuras no elemento real. Nesse contexto, após a fissuração, tende-se a observar que as fibras posicionadas perpendicularmente às fissuras apresentam desempenho estrutural mais eficiente do que aquelas que estão orientadas paralelamente.

#### 2.4.3.1 LM-Twist

A LM-*Twist* (Figura 8) é considerada uma macrofibra sintética de poliolefinas usada na produção de concreto reforçado com fibras, esta por sua vez, atende às diretrizes das normas NBR 16938:2021, NBR 16942:2021 e NBR 16935:2021. No setor da construção civil, observa-se que as suas principais aplicações envolvem: a confecção de pavimentos, elementos estruturais pré-moldados, tanques de armazenamento, pisos industriais, estacionamentos e garagens (Lahuman Fiber, 2024).

Figura 8- Fibra de polipropileno LM-Twist



Fonte: Autoria própria, 2025.

A dosagem das fibras LM-*Twist* deve ser especificada pelo projetista/calculista de acordo com o local de aplicação e as especificações de projeto, o recomendado é em torno de 3 a 6 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Entretanto, é preciso destacar que a sua preparação deve ocorrer de forma cuidadosa e adequada, sendo as fibras adicionadas apenas depois dos agregados e cimento. Uma alternativa é colocá-las aos poucos, tendo como finalidade que ocorra a mistura de forma homogênea, sendo recomendado após a sua adição o tempo de mistura de 5 a 7 minutos, visando que a fibra incorpore por completo ao traço preparado (Lahuman Fiber, 2024).

Na Tabela 3 estão dispostas as especificações da macrofibra LM-*Twist*, entre as principais características que serão utilizadas para a dosagem do concreto e a modelagem

numérica, tem-se a densidade, o módulo de elasticidade, o comprimento e o diâmetro equivalente.

Tabela 3- Propriedades e Características

| <b>Propriedades e Características</b> |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Fibra                                 | LM- <i>Twist</i>         |
| Classificação                         | Classe II-NBR 16942:2021 |
| Composição                            | Poliiolefinas            |
| Tipo                                  | Macrofibra <i>Twist</i>  |
| Comprimento (mm)                      | 56 ± 5                   |
| Diâmetro equivalente (mm)             | 0,51± 0,02               |
| Temperatura de fusão (°C)             | 160                      |
| Densidade (g/cm³)                     | 0,91                     |
| Nº Fibras/kg                          | 95.500                   |
| Resistência à tração (MPa)            | 500-550                  |
| Módulo de elasticidade (GPa)          | 4-6                      |
| Alongamento (%)                       | 16%                      |
| Fator de forma                        | 110                      |

Fonte: Adaptado de Lahuman Fiber, 2024.

## 2.5 Comportamento quase-frágil do concreto

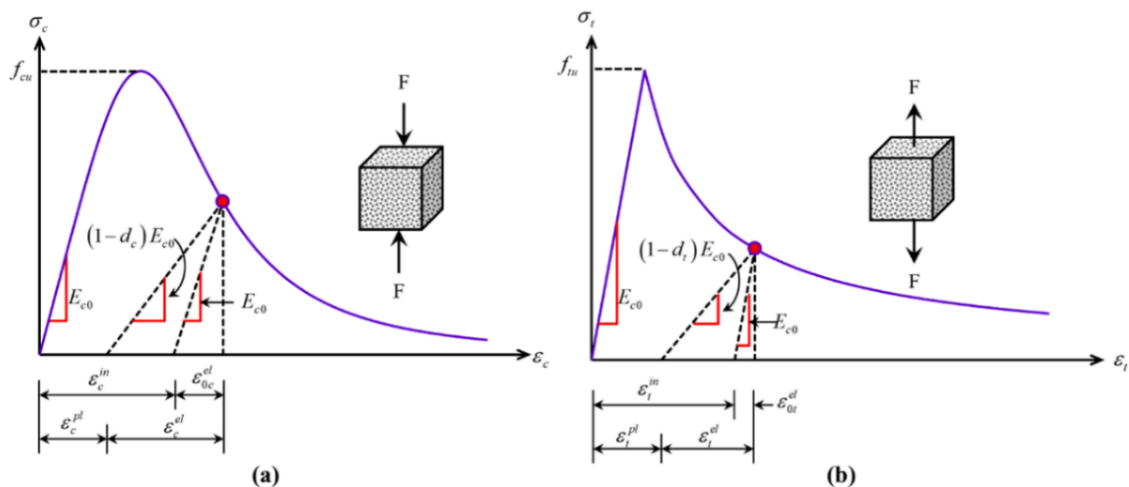
Apesar do concreto possuir inúmeras aplicações no setor da construção civil, nota-se que este material apresenta um comportamento quase-frágil, o que faz com que sua ruptura não ocorra em decorrência de grandes deformações associadas às cargas aplicadas. Em razão disto, tende a apresentar um comportamento constitutivo não linear, resultante da iniciação, acumulação, coalescência e propagação de microfissuras em sua estrutura interna. Esse processo de fissuração conduz à degradação progressiva das propriedades do concreto e, como consequência, à redução de sua resistência e rigidez (Santos; Vieira, 2022).

Nesse regime quase-frágil, o concreto pode ser descrito conforme os danos apresentados à medida que é submetido aos esforços de compressão e tração, ocorrendo a ruptura destes por meio do esmagamento (compressão) e por fissuramento (tração) (Egídio, 2025). O comportamento caracteristicamente não linear do concreto, irá impossibilitar a sua representação por meio da Lei de *Hooke*, uma vez que a relação entre a tensão e deformação não ocorrerá de forma linear. (Batista *et al.*, 2018).

Em virtude disto, Silva (2023) ressalta que a representação do comportamento físico não linear do concreto mostra-se uma tarefa bastante complexa e árdua, especialmente, por causa da dificuldade que há na obtenção dos parâmetros que norteiam este fenômeno, bem como a necessidade de ter-se um modelo confiável. Nas últimas décadas, foram propostos um considerável acervo de modelos contínuos e discretos, tendo como finalidade a descrição representativa do comportamento do concreto após o regime elástico linear.

Na área de engenharia estrutural, torna-se fundamental a devida compreensão do conceito de dano, dado que ele está intrinsicamente relacionado à perda da rigidez do concreto decorrente das fissuras manifestadas em sua seção, havendo tanto o dano no regime de compressão quanto no de tração (Batista, 2017). Nesse contexto, a Figura 9 mostra as curvas de tensão-deformação para representação do comportamento característico do concreto, sob os esforços de compressão e tração, em conformidade ao modelo CDP. Sendo as curvas caracterizadas por um modelo matemático constituído por duas fases fundamentais denominadas: *hardening* e *softening*.

Figura 9- Curva tensão-deformação do concreto no CDP: (a) curva referente ao esforço de compressão; e (b) curva referente ao esforço de tração



Fonte: Qasem et al., 2025.

A partir da Figura 9-a, é observada a curva para o esforço de compressão, esta por sua vez, é composta inicialmente por um trecho elástico ascendente, seguido por um trecho inelástico que irá alcançar a tensão de pico e posteriormente um trecho descendente que compõe a tensão pós-pico. Na Figura 9-b, tem-se representado a curva para o concreto submetido à tração, cujo comportamento demonstra ser mais abrupto quando comparado com o de compressão. Na curva (b), inicia-se com um trecho elástico ascendente até que seja atingido a tensão máxima de tração, após esse limite será formado abruptamente um trecho final com fase descendente (Borges, 2022; Santana, 2017; Batista, 2017).

Os danos do concreto à compressão e à tração podem ser calculados a partir dos valores obtidos para as tensões resistentes e suas respectivas deformações plásticas. A Equação (1) pode ser utilizada para o cálculo do dano devido ao esforço de compressão do concreto ( $d_c$ ) e a Equação (2) para calcular o valor do dano ocasionado pela tração ( $d_t$ ) (Jankwoiak; Lodygowski, 2005; Medeiros, 2018).

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (1)$$

Onde:

$d_c$  = dano do concreto à compressão

$\sigma_c$  = tensão do concreto à compressão;

$f_c$  = resistência média do concreto à compressão.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (2)$$

Onde:

$d_c$  = dano do concreto à tração;

$\sigma_c$  = tensão do concreto à tração;

$f_c$  = resistência média do concreto à tração.

Ainda assim, é preciso calcular as deformações elásticas ( $\varepsilon_e$ ) e inelásticas ( $\varepsilon_{inel}$ ) que irão caracterizar o comportamento do concreto à medida que ocorre a aplicação do carregamento, sendo estas calculadas, respectivamente, através das Equações (3) e (4). Todavia, é importante, enaltecer que estes valores para deformações inelásticas devem ser sempre crescentes e positivos (Bezerra, 2024; Santana, 2017).

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_0} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão axial do concreto;

$E_0$  = Módulo de deformação inicial.

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon - \varepsilon_{el} \quad (4)$$

Onde:

$\varepsilon$  = deformação do concreto.

De acordo com Egídio (2025) e Ferreira (2019) uma propriedade que pode influenciar diretamente os danos do concreto é a energia da fratura. Este parâmetro está associado ao comportamento de pós-fissuração que o material irá apresentar, sendo responsável por representar a quantidade de energia necessária para que ocorra a propagação de uma fissura em uma dada unidade de área. Nos modelos numéricos, a energia de fratura constitui-se como um parâmetro fundamental para a realização da análise dos mecanismos de falha decorrentes em estruturas de concreto, desde o processo de abertura, propagação e coalescência das fissuras.

## **2.6 Mecânica do dano**

A Mecânica do Dano Contínuo (MDC) é considerada uma ferramenta fundamental para a análise da deterioração que ocorre nos materiais sólidos quando estes são submetidos as ações de natureza térmica e/ou mecânica. Ainda assim, pode-se definir a MDC como um método para a quantificação da perda da capacidade de carga dos materiais tensionados à medida que tem-se um acúmulo da deformação na estrutura analisada (Farani; Consoni, 2022).

O uso do MDC permite compreender o comportamento macroscópico das propriedades de resistência e rigidez dos materiais a partir da evolução das microfissuras distribuídas em sua estrutura interna. Esse comportamento é representado pela utilização de variáveis de dano, que atuam na penalização progressiva das propriedades mecânicas, em função do nível de degradação estimado (Nascimento Filho, 2022).

Segundo Farani e Consoni (2022), a MDC estabeleceu-se como um dos ramos de pesquisa mais relevantes no campo da mecânica dos sólidos. O principal conceito que norteia esta teoria está diretamente associado à inserção da variável interna de dano, a qual contribui para a degradação do desempenho mecânico da estrutura, devido a seus defeitos e imperfeições presentes em microescala no meio contínuo. Ademais, observa-se nessa teoria uma evolução contínua das perdas, desde um estado inicial, no qual o material se encontra íntegro, até um estado final, caracterizado por sua ruptura.

## **2.7 Teoria da plasticidade**

A teoria da plasticidade, por sua vez, dedica-se ao estudo das deformações apresentadas por materiais amplamente empregados na engenharia (concreto e aço), analisando como estes irão responder às solicitações mecânicas às quais são submetidos. Ao avaliar o comportamento mecânico de um material sob carregamento, observa-se que ele irá sofrer tanto a influência de deformações elásticas, quanto plásticas. As deformações plásticas,

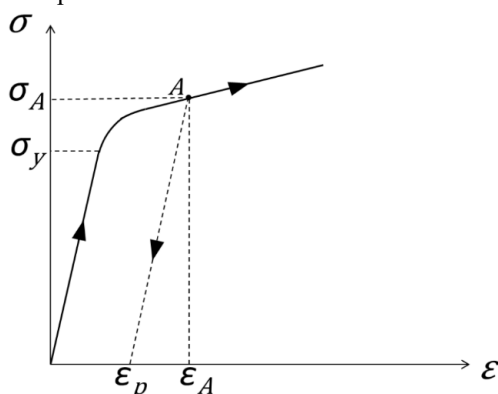
em particular, são caracterizadas por seu caráter permanente, uma vez que, mesmo após a retirada da carga que as originou, uma parcela dessas deformações permanecerá no material (Vettori, 2025; Nonato, 2024).

Em virtude disso, as deformações plásticas apresentadas pelos materiais quando submetidos a solicitações externas tornam-se, em certa medida, imprevisíveis, o que reforça a necessidade de ferramentas capazes de mensurá-las e representá-las adequadamente. Nesse sentido, conforme Neto (2024) e Cunha *et al.* (2023), a teoria da plasticidade configura-se como um método fundamental para a avaliação dos fenômenos não lineares, tais como as deformações permanentes e o encruamento, sendo este último associado a capacidade que um material possui em ganhar resistência devido a ocorrência das deformações plásticas. Ambos os fenômenos irão se manifestar após atingir-se o limite plástico nos materiais dúcteis.

O estudo da teoria da plasticidade mostra-se essencial, tendo em vista que há situações de projetos nas quais admite-se que os materiais de engenharia podem atingir os mais elevados níveis de deformação, sem comprometer a sua funcionalidade, o que contribui para aumento da capacidade de carga dos sistemas (Nonato, 2024). Complementarmente, Cunha *et al.* (2023) destaca que a aplicação dessa teoria pode possibilitar o alcance de resultados satisfatórios na modelagem do colapso plástico, sobretudo em análises formuladas em meios contínuos, nas quais não se recomenda modificações do contorno da estrutura no momento de realização das análises.

Partindo desse pressuposto, na Figura 10, representa-se o diagrama tensão-deformação para um material genérico elastoplástico submetido a uma tensão uniaxial. A partir da análise desse gráfico, pode-se perceber que o regime plástico se caracteriza pela presença de deformações irreversíveis, as quais irão se manifestar quando as tensões aplicadas no material ultrapassam um limite máximo, denominado limite de escoamento, e consequentemente, representado pela tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ) (Araújo, 2017).

Figura 10- Comportamento de materiais submetidos a tensão uniaxial



Fonte: Araújo, 2017.

Ainda assim, a partir da Figura 10, nota-se que, enquanto as tensões aplicadas permanecerem inferiores à tensão de escoamento, o material apresenta um comportamento típico do regime elástico linear. Esse domínio, apresenta uma relação entre tensão e deformação proporcional e a ausência da formação de deformações residuais, uma vez que, ao retirar a carregamento, o material tende a retornar à sua configuração original (Vettori, 2025; Araújo, 2017). A Equação (5) representa esse comportamento elástico linear do gráfico.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde:

$E$  = Módulo de elasticidade;

$\sigma$  = Tensão;

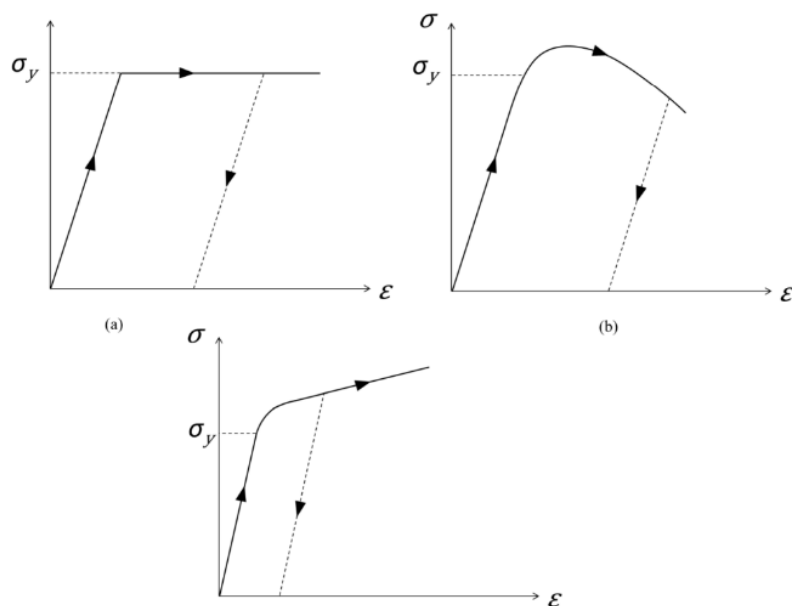
$\varepsilon$  = Deformação específica.

Ademais, é importante ressaltar que, no regime plástico, o descarregamento não ocorre pelo mesmo caminho percorrido durante o carregamento, mas segue uma trajetória paralela ao regime elástico, conforme ilustrado no ponto A da Figura 10. Quando a tensão aplicada ultrapassa o limite de escoamento  $\sigma_a > \sigma_y$ , considera-se que o material apresenta uma deformação residual ao finalizar o processo de descarregamento, denominada deformação plástica. Assim, obtém-se a Equação (6), a qual estabelece que a deformação total ( $\varepsilon_A$ ) decorrente da tensão ( $\sigma_a$ ), é constituída por duas parcelas: uma elástica ( $\varepsilon_e$ ), recuperável, e outra plástica ( $\varepsilon_p$ ), irreversível (Vettori, 2025; Araújo, 2017).

$$\varepsilon_A = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (6)$$

De acordo com Araújo (2017), os materiais que possuem o comportamento elastoplástico perfeito, como o ilustrado na Figura 11-a, irão apresentar um patamar de escoamento bem definido, no qual a tensão tende a permanecer praticamente constante, enquanto a deformação irá crescer continuamente. Todavia, outros tipos de materiais podem apresentar, após determinado nível de tensão, um comportamento denominado *softening* (amolecimento), mostrado na Figura 11-b, caracterizado pela ocorrência de acréscimos de deformação acompanhados de reduções nos níveis de tensão. Por fim, existem materiais que manifestam o fenômeno de *hardening* (endurecimento), representado na Figura 11-c, no qual, após atingir o ponto de plastificação, percebe-se um aumento progressivo dos níveis de tensão juntamente com os acréscimos de deformação.

Figura 11- Diagramas de tensão-deformação característicos de materiais: (a) comportamento elastoplástico perfeito; (b) comportamento de *softening*; e (c) comportamento de *hardening*



Fonte: Araújo, 2017.

Segundo Vettori (2025), quando um material é submetido a deformações plásticas, os mecanismos físicos responsáveis pelas mudanças em sua estrutura irão depender exclusivamente de suas propriedades, constituindo-se como um comportamento particular de cada material. Deste modo, evidencia-se que o estudo da plasticidade demanda uma quantidade diversificada de modelos e teorias, as quais sejam capazes de representar adequadamente o comportamento para cada tipo de material. Entre as variáveis que podem afetar na análise desse comportamento, destaca-se a velocidade de carregamento, cuja elevação pode alterar os parâmetros do módulo de elasticidade e dos níveis de tensão.

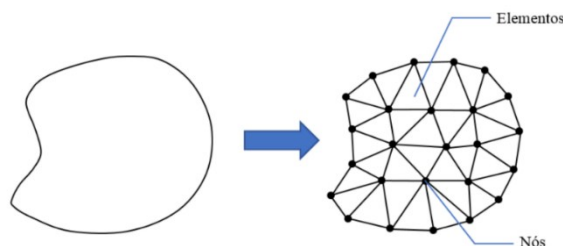
## 2.8 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente aplicado na resolução de problemas de engenharia, especialmente, na modelagem de estruturas que apresentam caracteristicamente geometrias complexas, isso deve-se principalmente a sua capacidade de realizar análises precisas e detalhadas. É um método regido por equações integrais e diferenciais que permite a obtenção de soluções aproximadas, a partir de análises adequadas das tensões e deformações de modelos estruturais complexos, levando-se em consideração as diferentes geometrias, os materiais, as condições de contornos e a distribuição não uniforme das cargas (Paiva, 2025; Souza *et al.*, 2025).

Além disso, Paiva (2025) e Monteiro (2021) ressaltam que o MEF parte da premissa que a análise de estruturas complexas pode-se realizar a divisão de seu domínio contínuo em regiões menores e discretas, as quais são conhecidas como elementos finitos. Esses elementos

são ligados por pontos chamados de nós, que quando em conjunto irão formar uma malha computacional, estas por sua vez, podem assumir diferentes formatos, os quais devem aproximar-se do comportamento das variáveis de interesse dentro do elemento. Na Figura 12, observa-se a representação dos elementos finitos, nós e malhas.

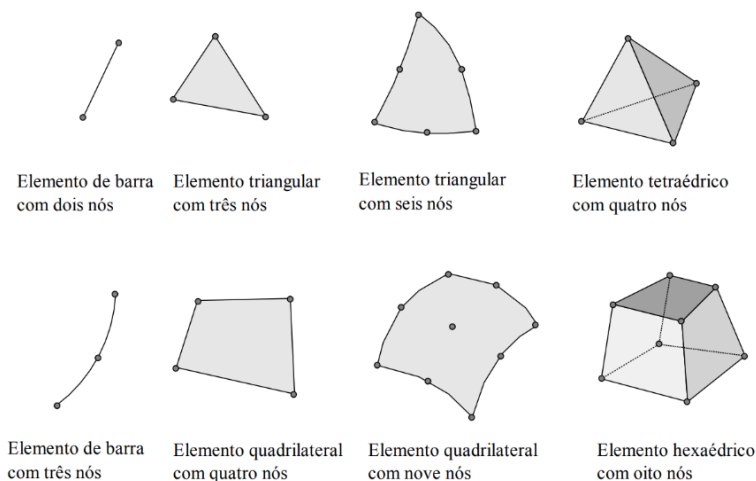
Figura 12- Constituintes do MEF



Fonte: Rodrigues; Filho, 2019.

Para a realização destas análises numéricas existem diversos tipos de elementos finitos desenvolvidos, os quais podem ser aplicados de acordo com as características do modelo a ser analisado. Os principais tipos de elementos são mostrados na Figura 13, pode-se notar que existem uma variedade de formas geométricas (triangular, quadrilateral e tetraédrico) que irão estar em conformidade em função do tipo e da dimensão do problema (unidimensional, bidimensional e tridimensional) (Souza, 2003).

Figura 13- Tipos de elementos finitos

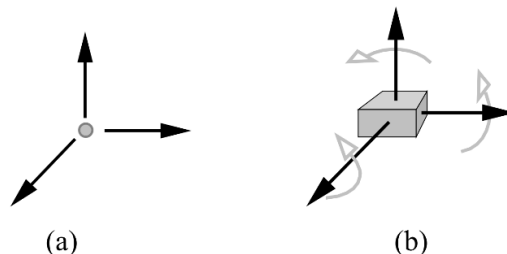


Fonte: Souza, 2003.

Outro conceito essencial para o MEF, diz respeito ao grau de liberdade, o qual está associado a movimentação que os elementos podem ter quando submetidos a carregamentos. No caso de um elemento do tipo ponto, é considerado que este possui três graus de liberdade, e como consequência, três possíveis formas de movimentação por translação. Por outro lado, para um corpo rígido tridimensional são estimados seis graus de liberdades, nos quais três

caracterizam-se como movimento do tipo translação e três como movimento de rotação (Melconian, 2014; Souza, 2003). A Figura 14 representa estes dois casos supracitados.

Figura 14- Representação dos graus de liberdade: (a) elemento tipo ponto; e (b) corpo rígido tridimensional



Fonte: Souza, 2003.

A aplicação do MEF organiza-se em três fases principais: o pré-processamento, processamento e pós processamento. Na etapa de pré-processamento são definidas a geometria, a discretização da malha e são atribuídas as propriedades dos materiais, carregamentos e condições de contorno. Já na fase do processamento, tem-se a aplicação do sistema de equações lineares ou não lineares que serão resolvidos para a obter os deslocamentos e tensões nodais do modelo. Por fim, nos pós processamento, os resultados são mostrados a partir de visualizações gráficas que irá facilitar na análise do comportamento estrutural (Bezerra, 2024; Melconian, 2014; Alves Filho, 2003).

Entre as principais vantagens que este método oferece para análises de engenharia, tem-se a precisão, o detalhamento, a flexibilidade durante a modelagem e a capacidade de realizar análise paramétricas. Na engenharia estrutural, este método pode ser usado para a otimização topológica de estruturas, na qual pretende-se encontrar a melhor distribuição do material em um espaço delimitado (Amaral; Shauer; Oliveira, 2025)

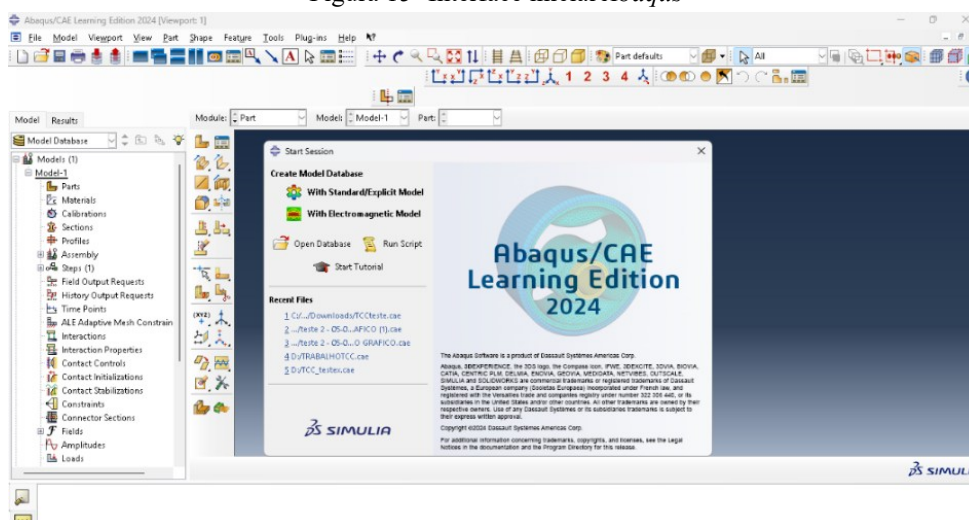
Outra vantagem significativa, de acordo com Paiva (2025), está associada ao fato de que o MEF permite a simplificação do processo de obtenção de soluções numéricas, uma vez que suas formulações são programadas de forma genérica. Em consequência disto, possibilita-se aplicá-las em diferentes tipos de problemas estruturais.

Contudo, a precisão dos resultados irá depender primordialmente do refinamento realizado na malha utilizada, bem como das hipóteses adotadas para a modelagem. Em situações nas quais as malhas são mais detalhadas e compostas por elementos menores, tem-se uma tendência de obter respostas numéricas mais próximas da representação do comportamento real da estrutura analisada, porém isso irá acarretar num maior custo de processamento (Paiva, 2025).

## 2.9 Software *Abaqus*

O *Simulia Abaqus* (Figura 15) é um *software* vastamente aplicado na engenharia estrutural, especialmente em situações nas quais tem-se como finalidade a modelagem e a avaliação numérica de modelos estruturais. Com o seu uso, permite-se a realização de simulações baseadas no método dos elementos finitos, como resultado, tem-se a obtenção de análises precisas e eficientes para a compreensão do comportamento mecânico dos componentes estruturais (vigas, lajes e pilares), à medida que estes são submetidos a diferentes condições de carregamento (Souza *et al.*, 2025).

Figura 15- Interface inicial *Abaqus*



Fonte: Autoria própria, 2025.

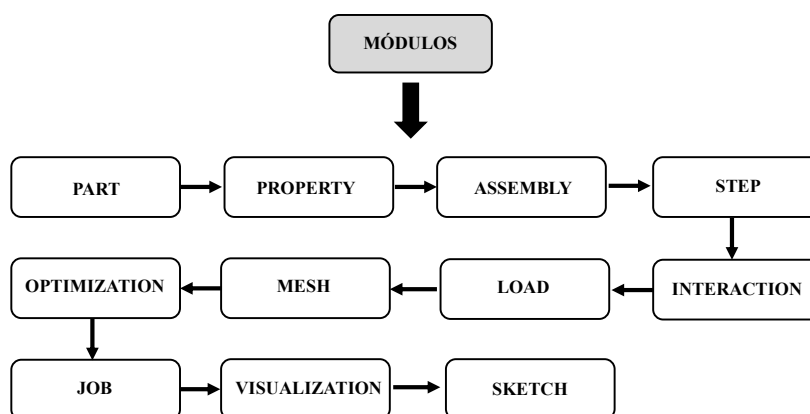
A utilização do *Abaqus* envolve etapas de processamento e pós-processamento, cuja execução possibilita análises numéricas através de critérios de não linearidade física e geométrica das peças. Em virtude disso, o software permite a criação, edição, monitoramento e diagnóstico de diferentes problemas de engenharia, abrangendo desde modelos lineares simples até sistemas complexos que possuem comportamento não linear (Amaral; Shauer; Oliveira, 2025; Barrios, 2022).

Os resultados alcançados pelos modelos confeccionados no *Abaqus* dependem diretamente das condições de contorno, bem como das características mecânicas e geométricas adotadas pelo usuário. A partir da variação dos parâmetros de entrada, pode-se realizar a calibração do modelo numérico e, consequentemente, a comparação dos valores obtidos de tensões, deformações e deslocamentos. Todavia, no *software*, estes resultados são dispostos em forma de tabelas, gráficos e mapas de calor, que por sua vez, irão permitir análises, ajustes e validações dos modelos propostos, garantindo-se a segurança e a eficiência dos sistemas estruturais (Amaral; Shauer; Oliveira, 2025; Maciel *et al.*, 2022).

Dentre os principais diferenciais do *Abaqus*, destaca-se o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), o qual é reconhecido por sua capacidade de representar o comportamento do concreto satisfatoriamente. Ademais, nota-se que outra vantagem do *Abaqus* está relacionada a sua interface estruturada e intuitiva, esta por sua vez, organiza as etapas de construção do modelo numérico de forma sequencial, contribuindo para a definição dos parâmetros de projeto e o desenvolvimento ágil das simulações.

Assim, o software *Abaqus/CAE* estrutura-se em onze módulos integrados, cada qual é responsável por uma etapa específica da modelagem numérica. A sequência destes módulos é mostrada na Figura 16, porém é imprescindível destacar que cada um destes desempenha uma função na construção e na análise dos modelos numéricos.

Figura 16- Módulos do *Abaqus*



Fonte: Autoria Própria, 2025.

De acordo com Egídio (2025) e Bezerra (2024), os onze módulos podem ser caracterizados da seguinte maneira:

- a) *Part*: responsável pela criação das geometrias que compõem o modelo, permitindo definir elementos bidimensionais ou tridimensionais, bem como a extrusão e rotação;
- b) *Property*: módulo que se atribui as propriedades mecânicas, físicas e constitutivas dos materiais das seções de cada elemento previamente criado;
- c) *Assembly*: permite reunir e posicionar todas as partes do modelo confeccionado, formando a configuração da estrutural final que será submetida a análise, possibilita também que seja feita a rotação e translação dos elementos;
- d) *Step*: define o período da simulação, estabelecendo-se o tipo de procedimento (linear, não linear, estático, dinâmico), além dos parâmetros de incremento que serão necessários para o controle da estabilidade numérica;
- e) *Interaction*: especifica os comportamentos associados aos contatos e as interações que irão ocorrer entre as partes do modelo, incluindo atrito, acoplamentos, vínculos, restrições e

demais relações físicas que possam ocorrer entre os elementos. Entre as principais interações, destacam-se *coupling* (acoplamento), *rigidy body* (corpo rígido), *tie* (aderência) e *Embedded region* (elemento embutido);

f) *Load*: destina-se a definição das movimentações que irão ocorrer no modelo, envolve a aplicação das ações externas (cargas concentradas, distribuídas, pressões) e das condições de contorno (apoios, deslocamentos prescritos, simetrias);

g) *Mesh*: módulo no qual são determinados os tipos de malhas, o tamanho dos elementos e sua formulação (sólidos C, casca S, treliça T), permitindo o refinamento necessário para garantir precisão sem comprometer o desempenho computacional;

h) *Optimization*: permite a implementação de algoritmos e técnicas de otimização estrutural, orientadas à melhoria do desempenho do modelo conforme critérios os quais são estabelecidos a partir da experiência do usuário;

i) *Job*: é responsável pela realização da análise numérica (ensaio numérico), sendo usado para definir a configuração e a forma como irá ocorrer a submissão da simulação, permitindo que seja definido a memória, os processadores utilizados, mas também o acompanhamento da análise, monitorando a convergência, os incrementos e o tempo de processamento;

j) *Visualization*: mostra os resultados obtidos pelo modelo numérico quanto as tensões, deformações, deslocamentos e demais outputs. Para isso, será feito o uso de gráficos, tabelas e mapas de contorno, possibilitando análises, validações e ajustes do modelo;

k) *Sketch*: utilizado para desenvolver esboços bidimensionais que servirão como base para extrusão, revolução ou varredura, dando origem às peças tridimensionais.

## 2.10 Concrete Damaged Plasticity (CDP)

Para representar o comportamento não linear e quase frágil do concreto na elaboração modelos numéricos pode-se utilizar o modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) disponível no software ABAQUS (Borges, 2022). O modelo CDP foi proposto por Lubliner et al. (1989) e modificado por Lee e Fenves (1998), sendo este baseado na plasticidade e na mecânica do dano para análise da perda de rigidez ocorrida em materiais.

O CDP considera que o comportamento não linear do concreto surge devido a microfissuras, que irão ocasionar a perda da rigidez e a plastificação do material, sendo a deformação total composta por meio da soma da deformação elástica (recuperável) e a deformação plástica (irreversível). Neste modelo, o material apresenta um critério de dano, o qual é definido por uma superfície de plastificação, e como consequência, a evolução da

deterioração do material é determinada através dos parâmetros da mecânica do dano (Santos, 2022; Borges, 2022).

Ademais, Brackmann *et al.* (2021) ressalta que o resultado obtido no modelo numérico irá depender primordialmente das propriedades mecânicas adotadas para os materiais, estas por sua vez, podem ser obtidas por meio de ensaios experimentais ou então por equações, juntamente com o auxílio dos parâmetros próprios do CDP. Estes parâmetros devem ser ajustados em conformidade ao modelo analisado, tendo como propósito calibrá-lo para a obtenção da resposta numérica mais adequada.

Desta forma, no software *Abaqus* deve-se inserir os parâmetros para ajuste do critério de falha do modelo proposto, sendo estes: ângulo de dilatância ( $\psi$ ), excentricidade ( $\epsilon$ ), *Fator de forma K*, razão entre tensões de ensaio uniaxial e biaxial ( $f_{b0}/f_{c0}$ ) e viscosidade ( $\mu$ ). De acordo com Leal *et al.* (2022), Bezerra (2024) e Rodrigues, Pozo e Trautwein (2024), estes parâmetros que compõe o CDP podem ser definidos da seguinte forma:

- a) *Ângulo de dilatância ( $\psi$ )*: está associado a mudança volumétrica que irá ocorrer no material durante a deformação plástica e a inclinação da superfície de falha do elemento. Assim, esse ângulo determina qual a capacidade do concreto expandir quando exposto a deformações plásticas, adota-se valores entre  $25^\circ$  a  $50^\circ$ .
- b) *Parâmetro de excentricidade ( $\epsilon$ )*: descreve a taxa de aproximação da hipérbole do potencial plástico à sua assíntota. No modelo CDP do *Abaqus* assume-se o valor de 0,1, em conformidade a hipótese proposta *Drucker-Prager*.
- c) *Razão entre tensões de ensaio uniaxial e biaxial ( $f_{b0}/f_{c0}$ )*: esse parâmetro é a relação entre as resistências biaxial ( $f_{b0}$ ) e uniaxial à compressão do concreto ( $f_{c0}$ ), para o concreto sugere-se o valor de 1,16.
- d) *Fator de forma K*: é a razão entre as distâncias medidas no plano desviador, do eixo hidrostático aos meridianos de tração e de compressão, sendo recomendado para o concreto o valor de  $2/3$ .
- e) *Parâmetro de viscosidade ( $\mu$ )*: parâmetro que diz respeito ao índice de viscosidade do material, estando relacionado ao seu tempo de relaxação durante a aplicação do carregamento.

### 2.10.1 Modelo de compressão Carreira e Chu (1985)

O modelo constitutivo analítico proposto por Carreira & Chu (1985) foi desenvolvido para representar o comportamento de tensão e deformação do concreto, especificamente, quando este é submetido a esforços de compressão axial simples. A utilização desta

formulação polinomial baseia-se em variáveis físicas fundamentais, tais como os limites de tensão e deformação que são característicos do material analisado.

Além disso, é preciso ressaltar que os ramos ascendente e descendente da curva tensão-deformação são definidos por meio de dados experimentais, isto permite que haja a reprodução de um modelo analítico próximo do comportamento real do concreto sob compressão.

Para o modelo de Carreira & Chu (1985), considera-se três parâmetros primordiais: tensão máxima à compressão ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), a deformação do material devido à tensão máxima ( $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ) e a constante  $\beta$ , a qual depende das características do material e da forma da curva tensão-deformação (Endo; Vanderlei, 2024). Sendo a expressão matemática que representa o modelo mostrado na Equação (7):

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\beta(\varepsilon/\varepsilon'_c)}{\beta - 1 + (\varepsilon/\varepsilon'_c)^\beta} \quad (7)$$

Onde:

$f_c$  = tensão de compressão do concreto, correspondente ao ponto da curva;

$f'_c$  = Resistência à compressão do concreto;

$\varepsilon'_c$  = Deformação de pico da curva;

$\varepsilon$  = Deformação correspondente ao ponto considerado da curva;

$\beta$  = parâmetro adimensional dependente da forma da curva.

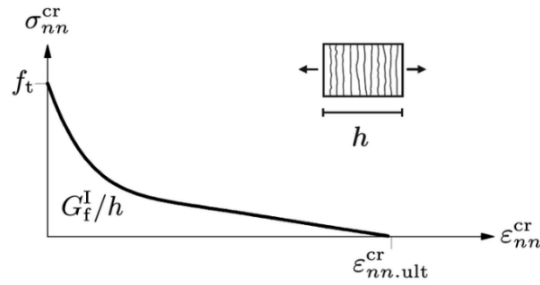
O parâmetro  $\beta$ , por sua vez, é calculado a partir da Equação (8), para  $\beta \geq 1,0$  e  $\varepsilon \leq \varepsilon_u$ , sendo  $\varepsilon_u$  considerado a deformação última e  $E_0$  o módulo de elasticidade do concreto.

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\varepsilon'_c \cdot E_0}} \quad (8)$$

### 2.10.2 Modelo de tração Hordijk (1991)

Para representar o comportamento à tração do concreto pode-se utilizar o modelo constitutivo proposto por Hordijk (1991), este por sua vez, apresenta caracteristicamente a curva de amolecimento mostrada na Figura 17. Nesta curva, é representada a relação entre a resistência à tração do concreto ( $f_t$ ) e a deformação normal à fissura ( $\varepsilon_{nn.ult}$ ), a qual se desenvolve por meio da energia de fratura à tração ( $G_f$ ) que o material pode apresentar à medida que tem-se a abertura das fissuras.

Figura 17- Teoria de amolecimento proposta por Hordijk

Fonte: Nova *et al.*, 2017.

Assim, a curva proposta por Hordijk (1991) fornece um modelo descritivo do processo de redução gradual da resistência à tração do concreto, à medida que ocorre a abertura de fissuras sob um carregamento aplicado. Esse comportamento, é expresso matematicamente pelas Equações (9) e (10), que utilizam como parâmetros as constantes  $c_1$  e  $c_2$ .

$$\sigma_t(w) = f_{tm} \cdot \left\{ \left[ 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \cdot e^{-c_2 \cdot \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} \cdot (1 + c_1^3) \cdot e^{-c_2} \right\} \quad (9)$$

$$w_c = 5,14 \cdot \frac{G_f}{f_{tm}} \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_t(w)$  = Tensão de tração resistente após a fissura;

$f_{tm}$  = resistência à tração média do concreto;

$c_1 = 3$ ;

$c_2 = 6,93$ ;

$G_f$  = energia de fratura;

$w$  = abertura de fissuras;

$w_c$  = abertura crítica de fissuras.

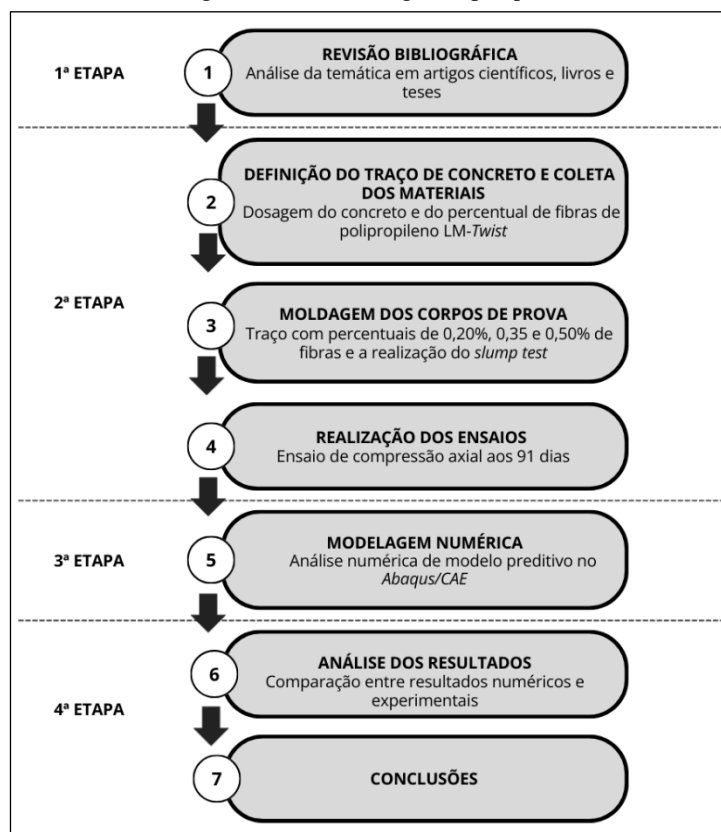
### 3 METODOLOGIA

Este trabalho é caracterizado como uma pesquisa de natureza quali-quantitativa, com caráter experimental e numérico, uma vez que buscar investigar o comportamento mecânico do CRF por meio da utilização de análises numéricas com auxílio do MEF, e em resultados experimentais, sendo para isso considerando a variação dos percentuais de fibras. No Fluxograma (Figura 18) são apresentadas as quatro etapas primordiais que se sucederam para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Na primeira etapa foi feita uma revisão bibliográfica, tendo como finalidade fazer uma análise preliminar de artigos científicos, livros e teses acerca da temática. Na segunda etapa, definiu-se o traço de concreto e o percentual de fibras, em sequência foi realizado a moldagem dos corpos de prova e o *slump test*. Por fim, realizou-se o ensaio de compressão axial do concreto após a cura de 91 dias, em conformidade com a tolerância da última idade de ensaio recomendada pela ABNT NBR 5739 (2018).

A terceira etapa consistiu na modelagem numérica usando o *software Abaqus/CAE*, versão 2024 estudante, tendo como finalidade obter um modelo numérico representativo dos resultados experimentais. Na quarta etapa, realizou-se uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais, tendo em vista a aproximação do modelo obtido no *Abaqus*.

Figura 18- Metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.1 Procedimento Experimental

#### 3.1.1 Definição do traço de concreto e coleta dos materiais

A priori, para a realização do procedimento experimental foi definido o traço de concreto a ser utilizado na moldagem dos corpos de prova (CP). Optou-se por utilizar a dosagem de concreto proposta em Costa (2023), tendo em vista os resultados satisfatórios obtidos em seu trabalho. O traço em questão possui resistência à compressão de 20 MPa, cuja dosagem é detalhada a seguir.

$$\begin{aligned} \text{Cimento : Areia : Brita 1 : Água} \\ 1 : 1,9 : 2,5 : 0,55 \end{aligned}$$

Os materiais empregados nesta pesquisa são caracterizados conforme as informações disponíveis no laboratório e nos resultados de Silva (2023). Assim, abaixo são descritas as principais características para a areia utilizada, bem como para a Brita 1.

- Areia: possui massa específica ( $\gamma$ ) de 2600 kg/m<sup>3</sup> e massa unitária ( $\delta$ ) de 1520 kg/m<sup>3</sup>, quando peneirada tem-se um Módulo de Finura (MF) de 2,63.
- Brita 1: com massa específica ( $\gamma$ ) de 2660 kg/m<sup>3</sup> e massa unitária ( $\delta$ ) de 1490 kg/m<sup>3</sup>.

Para a obtenção do quantitativo dos materiais usados na moldagem dos CP, considerou-se o consumo de cimento, areia, brita 1 e água para 1 m<sup>3</sup>, respectivamente, 386,79 kg/m<sup>3</sup>, 742,09 kg/m<sup>3</sup>; 980,73 kg/m<sup>3</sup> e 212,8 kg/m<sup>3</sup> (Costa, 2023). A partir disso, foi calculado o volume para o preenchimento de 6 moldes cilíndricos (Tabela 4), que foram usados na moldagem, com dimensões padrão de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura). Para obter o volume total foi necessário também adotar um percentual de perdas de 20%, tendo em vista, possíveis desperdícios que viesse a ocorrer durante a moldagem.

Tabela 4- Volume total necessário por traço

| Moldes       | Percentual de perdas (%) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Cilíndricos  | -                        | 0,009425                 |
| Volume total | 20                       | 0,01131                  |

Fonte: Autoria própria, 2025.

Após isso, realizou-se o cálculo da quantidade de materiais necessários para a moldagem dos CP, esta por sua vez, foi calculada por meio da multiplicação do consumo por m<sup>3</sup> de cada material pelo volume total necessário. Sendo o quantitativo obtido disposto na Tabela 5.

Tabela 5- Quantidade de cada material para o traço

| Material | Traço  | Consumo (Kg/m <sup>3</sup> ) | Quantidade (Kg) |
|----------|--------|------------------------------|-----------------|
| Cimento  | 386,79 | 1                            | 4,37            |
| Areia    | 742,09 | 1,9                          | 8,39            |
| Brita    | 980,73 | 2,5                          | 11,09           |
| Água     | 212,80 | 0,55                         | 2,41            |

Fonte: Autoria própria, 2025.

Para esta pesquisa foi utilizada a macrofibra de polipropileno *LM-Twist*, que conforme o fabricante Lahuman Fiber (2024), sua adição deve ser calculada por meio da densidade de 0,91 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, é preciso ressaltar que para ter uma quantidade diversificada de amostras experimentais, optou-se por estudar a influência da quantidade deste tipo de fibra para um mesmo traço, considerando-se assim o percentual de 0,20%; 0,35% e 0,50%, sendo na Tabela 6 apresentadas as quantidades para cada teor escolhido.

Tabela 6- Quantidade de fibras de polipropileno utilizadas

| Tipo de Fibra       | Dosagem (g/m <sup>3</sup> ) | Percentual (%) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Qtd (g) |
|---------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|---------|
| Fibra de            | 1800                        | 0,20           | 29,83                     | 27,14   |
| polipropileno       | 3200                        | 0,35           | 53,03                     | 48,26   |
| (LM- <i>Twist</i> ) | 5000                        | 0,50           | 82,86                     | 75,40   |

Fonte: Autoria própria, 2025.

Com o traço e os quantitativos calculados, foi realizada a coleta dos materiais, como agregados miúdo e gráudo, foram utilizadas a areia média e a brita número 1. O aglomerante, por sua vez, foi o cimento CP II-F-32-RS, dada a sua vasta aplicação em obras civis e disponibilidade na região. Já as macrofibras de Polipropileno do tipo LM-*Twist* foram obtidas por meio do fornecedor *Lahuman Fiber* em Sumaré/SP.

### 3.1.2 Moldagem dos corpos de prova

Na etapa de confecção dos corpos de prova inicialmente foi feito a pesagem dos materiais coletados (Figura 19) seguindo o quantitativo dosado para o traço representado na Tabela 5. Em seguida, fez-se a separação dos moldes cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm (Figura 20), conforme recomenda a ABNT NBR 5738 (2015). Nos moldes, foi aplicado o desmoldante nas paredes internadas, visando contribuir para um melhor acabamento superficial no processo de desforma dos CP.

Figura 19- Materiais pesados e separados



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 20- Moldes cilíndricos de plástico



Fonte: Autoria própria, 2025.

Com os materiais e moldes já previamente separados, deu-se então início a preparação do traço, sendo utilizado o processo de mistura de forma mecânica, com o auxílio de uma betoneira, cuja capacidade é de 150 L (Figura 21). Após ligar o equipamento foi feito a remoção de resíduos e o umedecimento das paredes internas para evitar a perda de água do amassamento durante o processo de mistura do concreto.

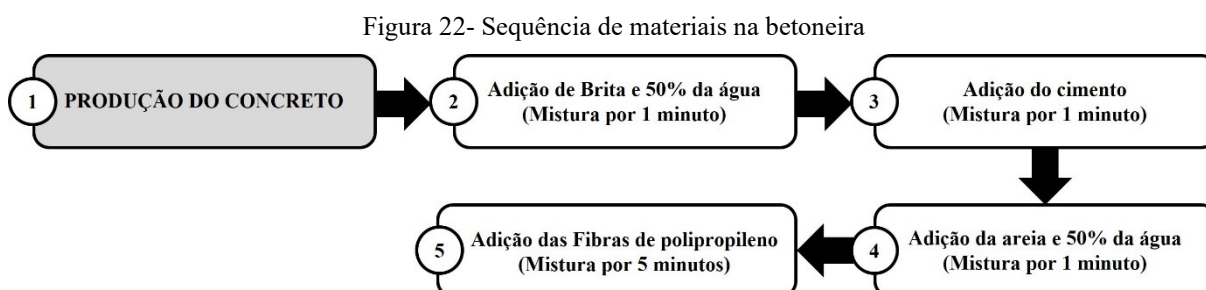
Figura 21- Betoneira para preparação do concreto



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os materiais foram então adicionados e misturados na betoneira conforme a sequência proposta por Costa (2023), primeiramente adicionou-se a brita 1 e cerca de 50% da água de amassamento, em seguida colocou-se o cimento, depois a areia e os 50% restantes da água. Por último, introduziu-se na mistura a quantidade de fibras estimadas na Tabela 6.

Para adicionar os materiais na betoneira foi considerado o intervalo de tempo entre a adição de cada insumo de 1 minuto, exceto para a adição das fibras a qual considerou-se o tempo de mistura recomendada pelo fabricante de 5 minutos. Assim, para a preparação do traço com fibras foi necessário um tempo total de mistura de 8 minutos, tendo como finalidade garantir a homogeneidade do concreto produzido, sendo a ordem dos materiais mostradas na Figura 22.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Nesta pesquisa foram confeccionados quatro traços de concreto, sendo estes, o traço Referência (REF), e os traços com adição de fibras de polipropileno LM-*Twist*, estes por sua vez, são distribuídos em traço A (0,20%), traço B (0,35%) e traço C (0,50%), produzindo 6 corpos de prova por traço, para então submeter-los ao ensaio de compressão axial.

Após a preparação do concreto com auxílio da betoneira, realizou-se então o ensaio de *slump test* para cada um dos traços, tendo como objetivo analisar a consistência do concreto, isto é, a sua fluidez, bem como a trabalhabilidade. Para a realização deste ensaio foram considerados os procedimentos da ABNT NBR 16889 (2020), mostrados na Figura 23.

Figura 23- Ensaio de *Slump Test*: a) equipamento preparado para o ensaio; b) lançamento e adensamento do concreto; e c) medição da consistência



Fonte: Autoria própria, 2025.

Assim, a partir da consistência mensurada, seguiu-se com a moldagem dos corpos de prova conforme as especificações da ABNT NBR 5738 (2015). Com isso alocou-se o concreto fresco em duas camadas proporcionais, sendo aplicado em cada camada manualmente com auxílio de uma haste de aço, 12 golpes, para o adensamento do concreto. Por fim, nivelou-se a borda do molde, de forma a garantir uma certa planicidade, estando desta maneira as amostras finalizadas para o processo de cura, como visto na Figura 24.

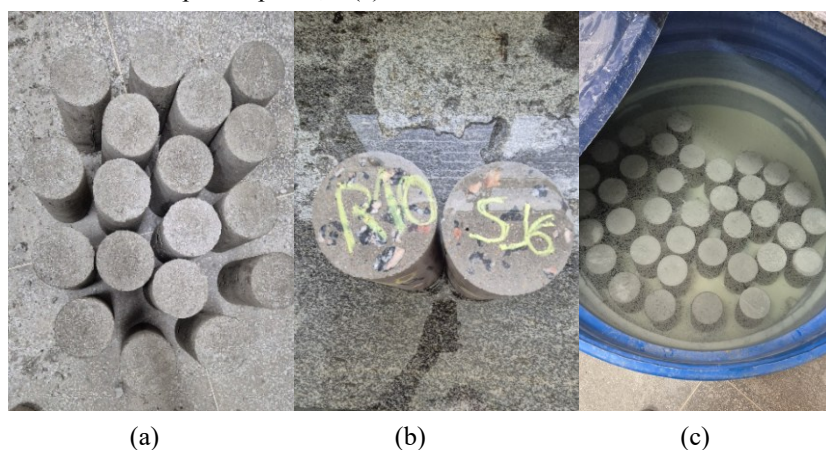
Figura 24- Moldagem dos corpos de prova: a) adensamento manual do concreto; e b) corpos de prova moldados



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a moldagem dos corpos de prova, foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 5738 (2015) para alocação e cura dos CP. Para isso, eles foram dispostos em uma superfície plana livre de perturbações e cobertos com uma manta plástica para evitar a perda de umidade por 24h. Transcorrido esse período, foram desmoldados e armazenados em cura úmida com solução saturada de hidróxido de cálcio em temperatura ambiente por 91 dias. As etapas supracitadas, desde a desmoldagem até a etapa de cura, são apresentadas na Figura 25.

Figura 25- Desmoldagem e cura submersa dos CP: (a) corpos de prova após desmolde; (b) identificação dos corpos de prova; e (c) cura com hidróxido de cálcio



Fonte: Autoria própria, 2025.

Os corpos de prova foram retirados da cura submersa aos 91 dias para a realização do ensaio de compressão axial, conforme a orientação da ABNT NBR 5739 (2018). Antes da realização do ensaio, foi feita a retificação mecânica dos CP, utilizando uma retifica de eixo vertical (Figura 26), garantindo a planicidade e o melhor acabamento da superfície.

Figura 26- Retificação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria, 2025.

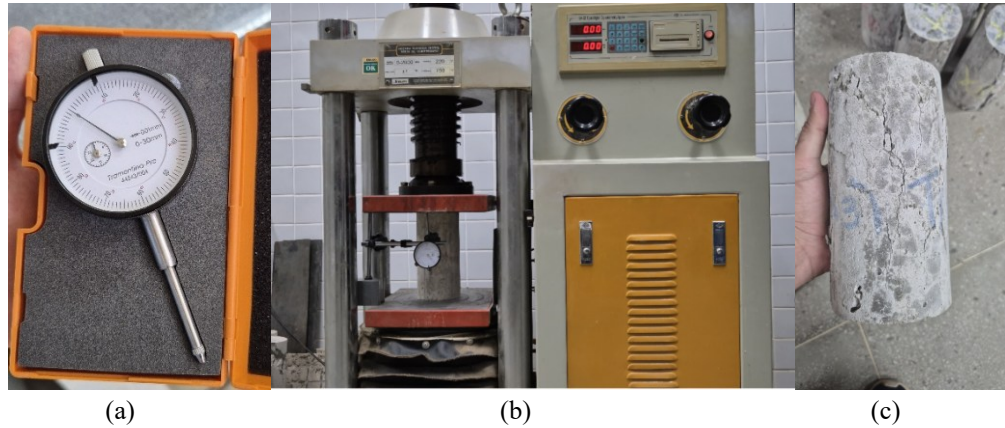
### 3.1.3 Realização do ensaio

Em seguida, com os corpos de prova já retificados, procedeu-se com a realização do ensaio de compressão axial em uma prensa elétrica hidráulica, cuja capacidade de carga máxima é de até 2000 kN. O ensaio foi conduzido através de uma velocidade de carregamento inicial constante de 5 kN/s, almejando-se uma padronização.

Inicialmente, posicionou-se cada corpo de prova de forma que seu eixo longitudinal coincidissem com o eixo da máquina, para garantir que houvesse uma distribuição mais uniforme da carga aplicada. Em sequência, foi colocado um relógio comparador acoplado a um suporte magnético, com o propósito de monitorar o deslocamento do corpo de prova desde o início da aplicação do carregamento até a sua ruptura. Para garantir uma maior precisão na aferição dos dados de deslocamento, realizou-se a gravação em vídeo do ensaio de cada um dos CP.

No término do ensaio dos CP foi possível obter a carga de ruptura em kN, esta por sua vez, foi anotada e utilizada para encontrar a resistência à compressão axial para cada amostra. Sendo as etapas do ensaio de compressão axial, anteriormente descritas, ilustradas na Figura 27 a seguir.

Figura 27- Ensaio de compressão axial do concreto: a) relógio comparador utilizado, b) posicionamento do corpo de prova e do relógio na prensa; e c) ruptura do CP



Fonte: Autoria própria, 2025.

A partir da carga de ruptura obtida no ensaio, pode-se então calcular a resistência à compressão axial usando a Equação (11) a seguir.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (11)$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

Já a resistência média à tração direta dos corpos de prova foi estimada por meio da Equação (12), disposta na NBR 6118 (2023), indicada para o grupo de concreto classificado com  $f_{ck} \leq 50$  MPa. Esta equação é recomendada para o cálculo de tração apenas nos casos em que não é possível se determinar experimentalmente a resistência à tração indireta por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) ou a resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ).

$$f_{ct,m} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (12)$$

Onde:

$f_{ct,m}$  = Resistência média à tração direta (MPa);

$f_{ck}$  = Resistência característica à compressão axial (MPa).

### 3.2 Procedimento Numérico

A partir dos dados obtidos nos procedimentos experimentais, procedeu-se à modelagem numérica, com o intuito de desenvolver um modelo numérico representativo dos

corpos de prova cilíndricos. Para isso, foi considerando as variações dos teores de fibras de polipropileno empregadas na análise das propriedades mecânicas do concreto, tendo como finalidade a compreensão da influência dos percentuais adotados no CRF. A análise numérica realizou-se a partir do *Abaqus/CAE*, em razão de sua ampla aplicação em pesquisas voltadas à modelagem de estruturas de concreto.

Nesse sentido, a modelagem numérica ocorreu em duas partes principais, a primeira foi a criação do modelo numérico e a segunda foi tanto a calibração quanto o refinamento do modelo, de forma a validá-lo em conformidade ao modelo experimental real. Na etapa de calibração tem-se como propósito demonstrar que a representação numérica do *Abaqus* possui resultados aproximados dos obtidos nos ensaios reais. Nos subtópicos a seguir são descritas as etapas para a obtenção do modelo numérico dos corpos de prova cilíndricos.

### 3.2.1 Confeção do modelo numérico

Para confeccionar o modelo numérico foi desenvolvido um código em *python*, apresentado parcialmente na Figura 28. Com o uso deste código, possibilitou-se a modelagem do corpo de prova cilíndrico com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, assim como obteve-se as macrofibras de polipropileno LM-*Twist* levando em consideração as mesmas dimensões comercialmente utilizadas, isto é, comprimento de 50 mm e raio de 0,50 mm.

Figura 28- Código *Python* para obtenção do CP e das fibras

```
# coding=UTF-8
from abaqusConstants import *
from caeModules import *
import numpy as np
import math

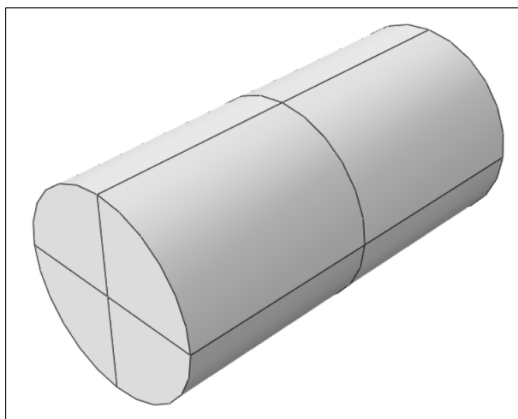
# Parâmetros corpo de prova cilíndrico (raio 50 mm, comprimento 200 mm)
radius = 50.0 # mm
height = 200.0 # mm
fiberlength = 50 # mm (fibra polipropileno curta)
fibernumber = 60 # ajuste conforme dosagem desejada
```

Fonte: Autoria própria, 2025.

O código foi inserido no software por meio da função *run script*, sendo esse procedimento executado para todas as análises numéricas realizadas, variando-se apenas o teor de fibras adotado. Com a geometria obtida do CP, precisou-se utilizar o módulo *Part* do *Abaqus* para realizar a partição da estrutura em oito partes, tendo como propósito fazer uma análise mais precisa da geometria e do seu comportamento mecânico, melhorando assim a definição da malha de elementos finitos, de forma a otimizar a qualidade da análise numérica desenvolvida.

Ainda assim, a partir da utilização do módulo partição permite-se que haja uma representação mais fidedigna das condições de contorno e da aplicação do deslocamento, contribuindo para a eficiência e estabilidade da análise, sendo na Figura 29 observada a estrutura modelada.

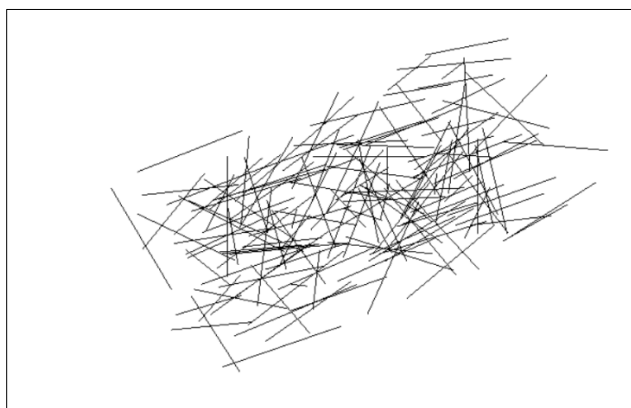
Figura 29- Corpo de prova cilíndrico particionado



Fonte: Autoria própria, 2025.

Já na Figura 30, tem-se a representação das fibras modeladas com diferentes angulações, tendo em vista que estas quando dispostas fisicamente no concreto irão tender a se posicionar de forma aleatória.

Figura 30- Fibras Confeccionadas



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.2.2 Propriedades dos materiais

Na etapa seguinte, foram inseridas as propriedades do concreto no modelo, sendo necessário, para isso, o uso do modelo constitutivo disponível no *Abaqus*, denominado *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). A definição do comportamento à compressão foi realizada por meio do método numérico de Carreira e Chu (1985), enquanto, para o regime de tração, aplicou-se a metodologia proposta por Hordijk (1991). Por outro lado, as propriedades mecânicas das fibras de polipropileno foram definidas com base nos dados fornecidos pela

empresa Yuanyu Technology Studio (2025), especializada em modelagem e simulações numéricas envolvendo materiais reforçados com fibras.

Entretanto, antes de realizar cálculos para a encontrar os dados de entrada do modelo CDP, foi preciso determinar previamente as propriedades de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, ambos atuantes no regime elástico. Esses parâmetros para o concreto foram estabelecidos em conformidade com a ABNT NBR 6118 (2023), a qual apresenta, para concretos com  $f_{ck} \leq 50$  MPa, a Equação (13) para calcular o módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ), a Equação (14) para o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a Equação (15) para obter-se o  $\alpha_i$ .

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (14)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (15)$$

Ainda de acordo com a ABNT NBR 6118 (2023), adotou-se o coeficiente  $\alpha_e$  igual a 1, sendo este valor correspondente aos agregados de granito e gnaiss, o valor do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,2 e a massa específica ( $p_{concreto}$ ) de 2400 kg/m<sup>3</sup>. A energia de fratura foi estimada a partir da Equação (16), recomendada pela *Fédération Internationale du Béton* (2010).

$$G_f = 73 \cdot f_{ck}^{0,18} \quad (16)$$

Além disso, tem-se algumas características plásticas que são imprescindíveis para análise do comportamento quase-frágil do concreto, destacam-se o ângulo de dilatação ou ângulo de atrito interno do concreto ( $\psi$ ), a excentricidade ( $\epsilon$ ), a relação entre as tensões no estado biaxial para estado uniaxial ( $\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$ ), o parâmetro  $K_c$  e a viscosidade ( $\mu$ ). Para essas variáveis foram considerados os valores recomendados nas pesquisas realizadas por Bezerra (2024), Denardi e Rougier (2023) e Egidio (2025), sendo estes mostrados na Tabela 7.

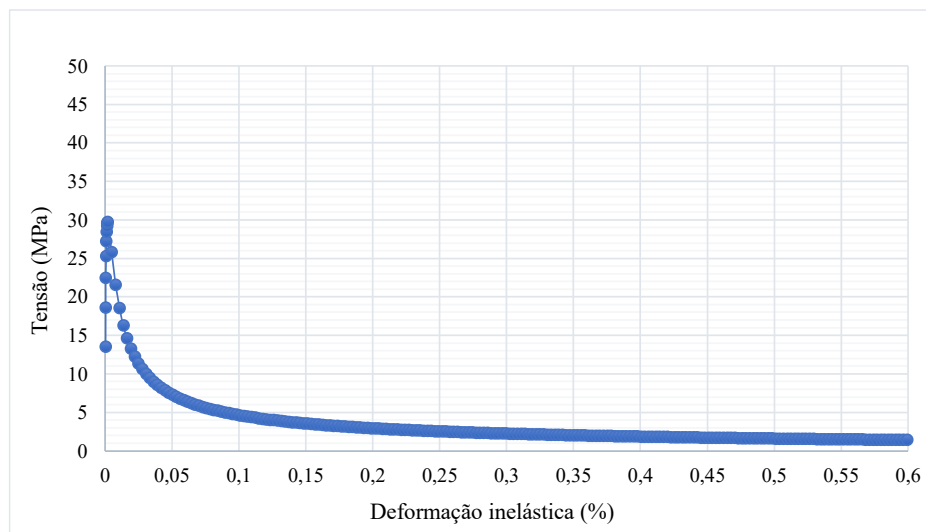
Tabela 7- Parâmetros Plásticos para o CDP

| $\psi$ | $\epsilon$ | $\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$ | $K_c$  | $\mu$ |
|--------|------------|-------------------------|--------|-------|
| 38°    | 0,1        | 1,16                    | 0,6667 | 0,001 |

Fonte: Autoria própria, 2025.

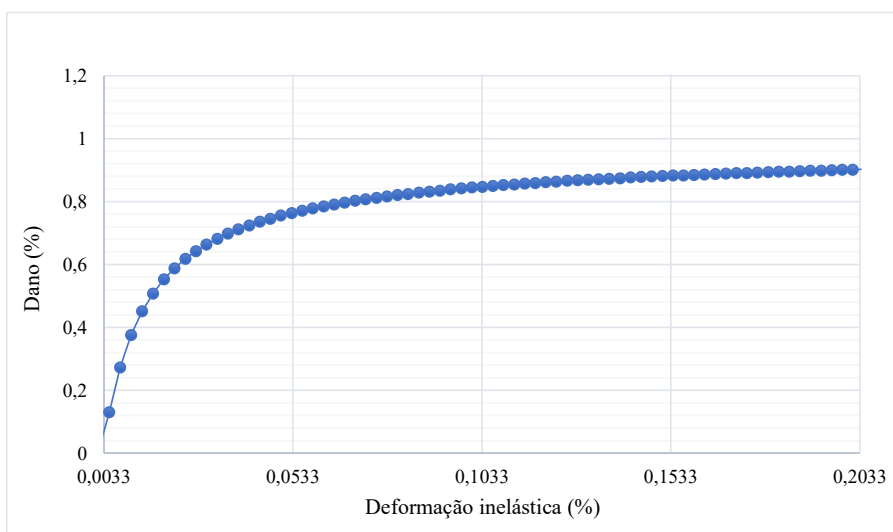
A partir dos parâmetros calculados pelas equações da ABNT NBR 6118 (2023) e *fib Model Code* (2010), juntamente com o método numérico descrito por Carreira e Chu (1985) e, as Equações (1) e (2) para danos, foram obtidas as curvas dos dados de tensões em função de deformações inelásticas, assim como a curva para danos à compressão em relação às deformações inelásticas. Essas curvas foram obtidas caracteristicamente para representar o comportamento não linear dos 4 traços produzidos nesta pesquisa, sendo observado nas Figuras 31 e 32, como exemplo as curvas para o traço com 0,50% de fibras.

Figura 31- Curva de Tensão em função da deformação inelástica



Fonte: Autoria própria, 2025.

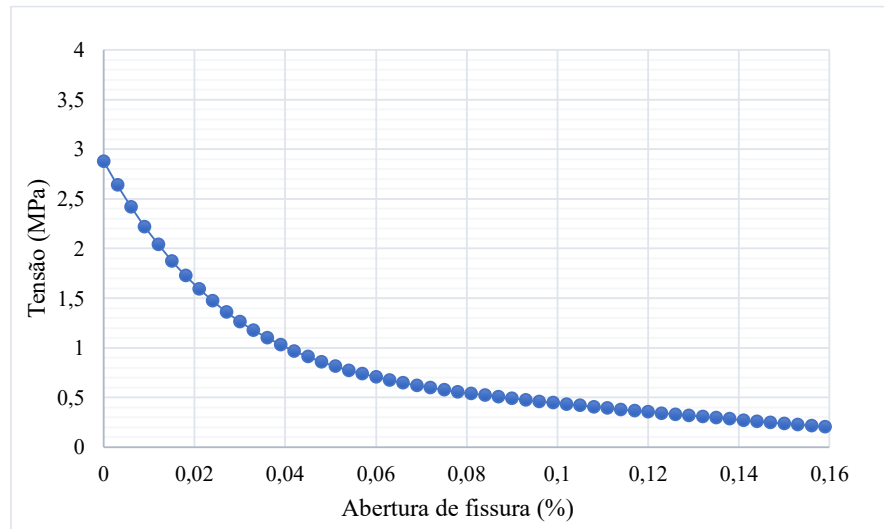
Figura 32- Curva de dano em relação a deformação inelástica



Fonte: Autoria própria, 2025.

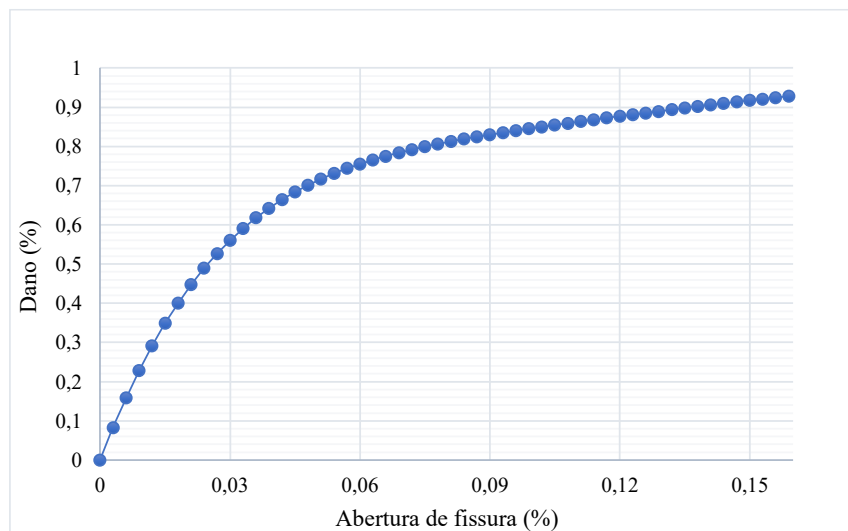
O mesmo procedimento foi aplicado com a metodologia de Hordijk (1991), tendo como finalidade obter o modelo constitutivo CDP para a tração, com a curva de tensão em função da abertura de fissura e a curva de dano à tração em relação a abertura de fissura, as quais são visualizadas respectivamente nas Figuras 33 e 34.

Figura 33- Curva de tensão em função da abertura de fissura



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 34- Curva de dano à tração em relação a abertura de fissura



Fonte: Autoria própria, 2025.

No caso das fibras de polipropileno, para ajustar o modelo CDP, utilizou-se o módulo de elasticidade ( $E$ ) de 5 GPa e a massa específica ( $p_{fibra}$ ) de 0,91 kg/m<sup>3</sup>, fornecidos pelo fabricante Lahuman Fiber (2024). Já o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) usou-se 0,2 como referência a pesquisa de Malek *et al.* (2021).

Os valores para as propriedades plásticas das fibras de polipropileno foram colocados de acordo com os dados de tensão e deformação inelástica fornecidos pela empresa Yuanyu Technology Studio (2025), que é especializada em modelagens numéricas com CRF. Estes dados são mostrados na Tabela 8 e foram adotados de forma idêntica para os modelos numéricos com adição de 0,20%, 0,35% e 0,50% de fibras.

Tabela 8- Propriedades plásticas de tensão e deformação fibras

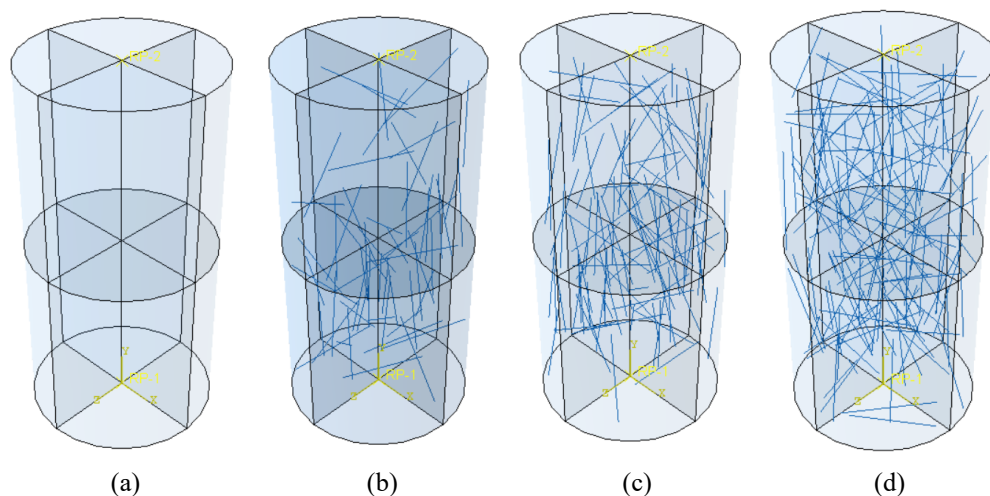
| Tensão (MPa) | Deformação plástica |
|--------------|---------------------|
| 235          | 0                   |
| 260          | 0,001               |
| 339          | 0,039               |
| 410          | 0,113               |
| 390          | 0,171               |

Fonte: Adaptado de Yuanyu Technology Studio, 2025.

### 3.2.3 Interações entre as partes

Após a definição das propriedades dos materiais, realizou-se, por meio do módulo *assembly*, a união das fibras LM-Twist ao corpo de prova de concreto, com o objetivo de representar a solidarização entre os constituintes do CRF no modelo numérico. Em seguida, posicionou-se o CP em relação ao eixo y, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35- União das fibras ao concreto: (a) Traço REF; (b) Traço A (0,20%); (c) Traço B (0,35 %) e; Traço C (0,50%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na etapa subsequente, estabeleceram-se as interações da estrutura modelada utilizando o módulo *interaction* do *Abaqus*. Esse procedimento foi fundamental para a garantir a

convergência do modelo proposto, especificamente na representação do comportamento mecânico da interface fibra-concreto, bem como a interação do carregamento diante o ponto de aplicação da carga. A Tabela 9 apresenta os tipos de interações adotadas no modelo para obtenção de sua representatividade

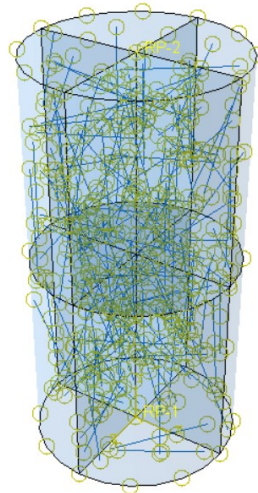
Tabela 9- Interações utilizadas no modelo *Abaqus*

| Interações dos elementos |                 |
|--------------------------|-----------------|
| Fibras - Corpo de prova  | Embedded Region |
| Face superior – RP2      | Rigid body      |
| Face inferior – RP1      | Rigid body      |

Fonte: Autoria própria, 2025.

A primeira interação aplicada, representada na Figura 36, foi destinada a reproduzir o contato entre as fibras e a matriz do concreto, mediante o uso da função *constraint* do tipo *embedded region*. Esse tipo de interação assegura que os nós das fibras se movem rigidamente junto com os nós do concreto, simulando adequadamente o comportamento do concreto composto do CRF.

Figura 36- Interação do tipo *embedded region*



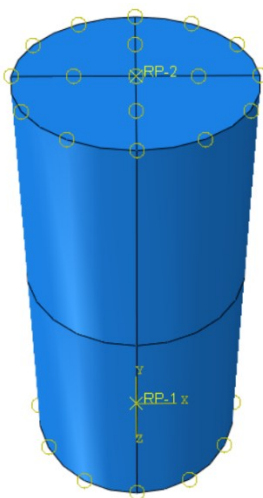
Fonte: Autoria própria, 2025.

Todavia, para a definição das demais interações, foram adicionados pontos de referências (*Referencial Points- RF*), a fim de permitir posteriormente a aplicação do carregamento de maneira consistente e representativa do experimental. Com isso, definiu-se o ponto RP1 no centro do eixo da face inferior do corpo de prova e o ponto RP2 no centro do

eixo da face superior. Posteriormente, aplicou-se a interação *Rigid body* entre a face inferior e o RP1, bem como entre a face superior e o RP2.

A adoção do *rigidy body* garante que a força aplicada seja transferida uniformemente a todo o corpo de prova, distribuindo-se de forma homogênea na superfície de contato e evitando concentrações indesejadas de tensões. Além disso, o posicionamento do RP2 no centro geométrico da face superior possibilita a aplicação precisa do carregamento axial, na Figura 37 são apresentadas as restrições aplicadas nas faces do modelo numérico.

Figura 37- Interação do tipo *rigid body*



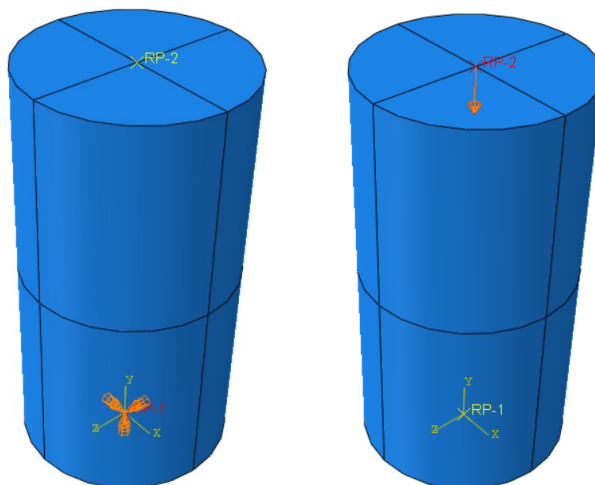
Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.2.4 Condições de contorno e carregamento

Para reproduzir de forma fidedigna as condições do ensaio de compressão axial, considera-se que o corpo de prova permanece confinado entre duas bases metálicas da prensa. Assim, para o modelo numérico adotou-se como condições de contorno que a face inferior da base metálica apresenta restrição total dos deslocamentos translacionais ( $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ ) e das rotações ( $UR_1$ ,  $UR_2$  e  $UR_3$ ) nas direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , visto que essa superfície permanece integralmente apoiada e sem qualquer possibilidade de movimento.

Na face superior, por sua vez, admitiu-se que a base metálica da prensa aplica um carregamento distribuído, o qual atua sobre toda a superfície do topo do corpo de prova e cuja resultante está centrada no eixo do elemento. Dessa forma, para reproduzir adequadamente as condições de carregamento impostas no ensaio experimental, assumiu-se que a força é transmitida verticalmente e centrada no eixo  $y$ , sendo está aplicada em forma de deslocamento de 0 a 2 mm. A Figura 38 ilustra as restrições consideradas na modelagem, em relação a RP1 e RP2.

Figura 38- Condições de contorno na face inferior e superior do CP



Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.2.5 Definição das Malhas

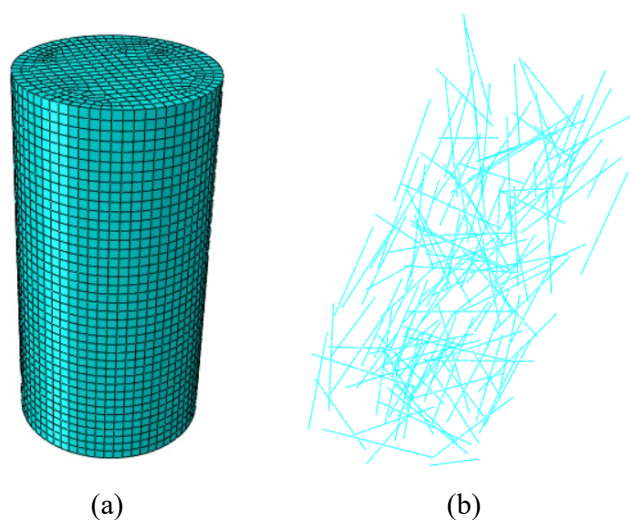
Para a construção das malhas do concreto foi usado o elemento de malha do tipo C3D8R, recomendado por Martins *et al.* (2020), Zheng *et al.* (2025) e Bezerra (2024), que é caracterizado como sendo um componente hexaédrico linear de oito nós por elemento, com três graus de liberdade (deslocamentos nas direções x, y e z) e integração reduzida.

A malha aplicada para o concreto utilizou elementos com aresta média de 5 mm, tendo em vista a necessidade de ter uma melhor representatividade do comportamento mecânico do modelo confeccionado. Contudo, o uso de malhas menores como esta, implica um maior esforço computacional, como consequência, tem-se um maior tempo de processamento.

No caso das fibras empregou-se o elemento de malha do tipo T3D2 (*truss*), o qual é recomendado nas pesquisas de Zheng *et al.* (2025) e Paunović, Šutanovac e Blagojević (2022). Esse tipo de elemento é amplamente utilizado em análises numéricas cujas aplicações envolvem elementos de aço e fibras, nos quais predomina-se análise de esforços axiais, é caracterizado como uma treliça linear tridimensional de dois nós e com três graus de liberdade translacionais nas direções dos nós (x, y e z).

A utilização do elemento T3D2 permite que as fibras estejam embutidas na matriz do concreto sem aumentar o número de graus de liberdade do modelo, contribuindo para que haja uma maior convergência. Para as macrofibras *LM- Twist* adotou-se uma malha com elementos de 3 mm, em virtude de ser um elemento que apresenta dimensões pequenas, o que reflete a necessidade de elementos menores para obtenção de uma melhor representatividade da análise numérica. Na Figura 39 tem-se o concreto e as fibras com as suas respectivas malhas aplicadas e na Tabela 10 são mostrados a quantidade de elementos finitos usados no concreto e para as fibras com percentuais de 0,20%, 0,35% e 0,50%.

Figura 39- Malhas geradas: (a) concreto e; (b) fibras



Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 10- Descrição das malhas dos componentes

| Componentes  | Tipo de elemento | Quantidade de elementos finitos |
|--------------|------------------|---------------------------------|
| Concreto     | C3D8R            | 15480                           |
| Fibras 0,20% | T3D2             | 1020                            |
| Fibras 0,35% | T3D2             | 1785                            |
| Fibras 0,50% | T3D2             | 2550                            |

Fonte: Autoria própria, 2025.

O modelo numérico foi calibrado por meio de ajustes das propriedades do CDP do concreto, sendo usado curvas aproximadas as mostradas nas Figuras 31, 32, 33 e 34, avaliando-se assim a quantidade ideal de pontos necessários à convergência do modelo. Esse procedimento possibilitou uma melhor distribuição dos pontos e a obtenção do comportamento mais adequado das curvas constitutivas. Com os modelos finalizados para cada traço, estes foram então submetidos ao módulo *job* para a execução da análise numérica proposta nesta pesquisa.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análise Experimental

#### 4.1.1 Ensaio de *Slump Test*

Na Tabela 11 estão dispostos os resultados alcançados por meio do ensaio de *slump test*, levando-se em consideração o abatimento obtido para o concreto produzido no traço Referência (REF) sem adição de fibras e nos traços A (0,20%), B (0,35%) e C (0,50%) com adição de fibras.

Tabela 11- Resultados do Ensaio de *Slump Test*

| Traço            | Percentual (%) | Abatimento (cm) |
|------------------|----------------|-----------------|
| Referência (REF) | 0              | 3,8             |
| A (LM- Twist)    | 0,20           | 3,0             |
| B (LM- Twist)    | 0,35           | 2,0             |
| C (LM- Twist)    | 0,50           | 1,4             |

Fonte: Autoria própria, 2025.

Com os resultados obtidos no ensaio (Tabela 11), observa-se que a inserção de fibras de polipropileno na matriz do concreto contribui para uma diminuição da fluidez do material, de forma a afetar a sua trabalhabilidade. Durante o processo de moldagem dos corpos de prova, notou-se uma certa dificuldade na realização do adensamento, sendo esse comportamento mais evidente à medida que foi aumentado o teor de fibras.

Esse efeito pode ter sido ocasionado pela distribuição aleatória das macrofibras LM-*Twist*, que tende a formar agrupamentos e, conseqüentemente, dificultar a propagação da energia de compactação. Na moldagem do traço com teor de fibras de 0,70% essas limitações foram mais evidentes e por isso foi necessário desconsiderá-lo na realização deste estudo, como é visto na Figura 40.

Figura 40- Traço de 0,70% com formação de agrupamentos de fibras



Fonte: Autoria própria, 2025.

De acordo com Chen *et al.* (2024) e Ahmad *et al.* (2021), o CRF tende a apresentar uma diminuição em sua consistência à proporção que se aumenta as macrofibras de polipropileno, porém essa variação não é tão significativa comparada a outros tipos de fibras, tais como as fibras de aço. Os autores ressaltam que esse comportamento é ocasionado pela menor resistência ao fluxo que o concreto com fibras de polipropileno tende a apresentar em comparação com as fibras de aço, especialmente, devido à superfície mais lisa que irá reduzir o atrito superficial no escoamento da mistura.

A partir da adição de fibras, tem-se o aumento da área superficial, o que pode afetar na trabalhabilidade da mistura, visto que a pasta de cimento além de revestir o agregado gráudo tem que exercer a mesma função para a superfície externa das fibras. Em virtude disso, percebe-se a necessidade de uma quantidade de pasta de cimento adicional que seja suficiente para revestir a superfície das fibras de polipropileno, mas também para a diminuição do atrito interno (Ahmad *et al.*, 2021; Gellen *et al.*, 2025; Mehta; Monteiro, 2014).

Apesar dos traços dosados apresentarem um baixo abatimento, como é visto na Tabela 11, entre 1,4 e 3,8 cm, optou-se por realizar esta análise sem aditivos ou alteração da relação a/c para avaliar como o quantitativo de fibras pode afetar a consistência do concreto produzido. No entanto, é recomendável que dependendo da aplicabilidade seja adicionado uma quantidade de água a mais a mistura ou então o uso de um aditivo plastificante/superplastificante de forma a compensar a perda de trabalhabilidade, assim como o aumento da área superficial.

Nas pesquisas realizadas por Costa (2023) e Hasan, Maroof e Ibrahim (2019), observaram-se resultados bastante semelhantes quanto ao índice de consistência do CRF, com valores variando entre 0 e 2 cm. A obtenção desses valores evidencia a tendência de que, quanto maior a quantidade de fibras em uma mistura com relação a/c constante, menor será a sua consistência.

#### **4.1.2 Ensaio de Resistência à compressão axial**

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial, estão representados na Tabela 12, que reúne os valores médios das amostras ensaiadas para força de ruptura,  $f_c$ ,  $f_{ck}$ , bem como os respectivos desvios padrão e os coeficientes de variação, referentes ao traço de referência e aos traços contendo a adição de fibras de 0,20%, 0,35% e 0,50%.

Tabela 12- Resultados do ensaio de compressão axial para os traços analisados

| Traço      | Quantidade de amostras | Força de ruptura (kN) | $f_c$ (MPa) | $f_{ck}$ (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
|------------|------------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|------------------------------|
| REF        | 6                      | 236,80                | 30,15       | 26,15          | 2,46                | 8,16                         |
| A- (0,20%) | 6                      | 218,34                | 27,80       | 23,80          | 2,52                | 9,06                         |
| B- (0,35%) | 6                      | 227,78                | 29,00       | 25,00          | 2,28                | 7,86                         |
| C- (0,50%) | 6                      | 228,61                | 29,11       | 25,11          | 1,52                | 5,21                         |

Fonte: Autoria própria, 2025.

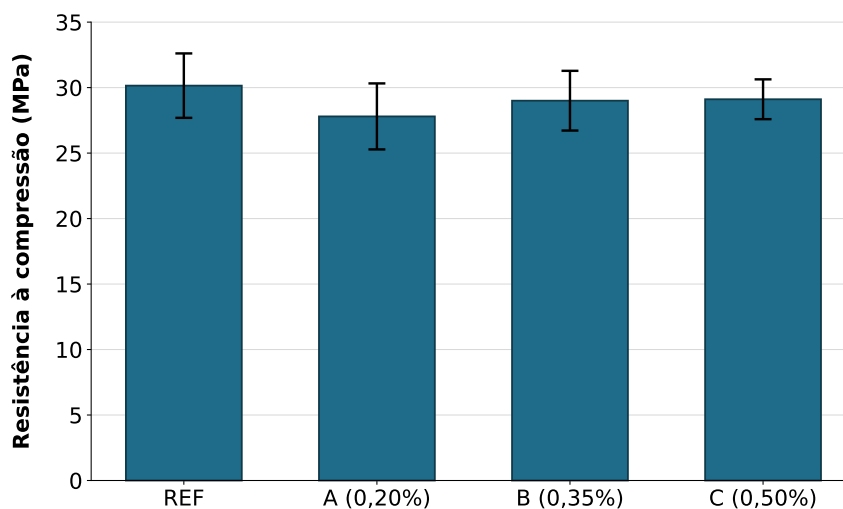
A partir da leitura e interpretação dos dados da Tabela 12, verifica-se que os traços atenderam satisfatoriamente à classe de concreto (C20) para a qual foram dimensionados, considerando-se o desvio padrão da dosagem ( $S_d$ ) de 4 MPa prescrito na ABNT NBR 12655 (2015). O referencial (RF), destaca-se por ter um melhor desempenho mecânico comparado ao concreto com adição de fibras de 0,20%, 0,35% e 0,50%, com resistência à compressão média ( $f_c$ ) igual a 30,15 MPa e coeficiente de variação (CV) de 8,16%. À Proporção que foi adicionada as fibras, especificamente, no traço A com teor de 0,20%, resultou-se em uma redução moderada da resistência à compressão, com  $f_c$  de 27,80 MPa e CV de 9,06%.

Por outro lado, nos traços B (0,35%) e C (0,50%) percebeu-se que houve uma recuperação parcial das propriedades mecânicas, com valores de  $f_c$  de 29,00 MPa e 29,11 MPa e coeficientes de variação de 7,86% e 5,21%, respectivamente. Embora a  $f_c$  tenha aumentado de forma proporcional ao teor de fibras incorporadas ao CRF, nota-se que a resistência obtida ainda permaneceu inferior à do traço de referência. Entretanto, os resultados indicam que, para teores acima de 0,35%, o comportamento tende a ser mais estável, apresentando uma menor influência das variações decorrentes do processo de moldagem.

Conforme Liao *et al.* (2025) e Salehi *et al.* (2025), um teor insuficiente de fibras pode não fornecer a melhoria na resistência desejada, enquanto um teor em quantidade excessiva pode afetar negativamente a trabalhabilidade. Ainda assim, é necessário ressaltar que um teor de fibras alto pode ocasionar a formação de vazios e, como consequência, a redução da resistência à compressão.

Na Figura 41 são apresentadas comparativamente as resistências à compressão axial obtidas na análise experimental. Pode-se observar que o aumento de fibras resultou em um aumento gradual da resistência, aproximando-se do desempenho do traço de referência.

Figura 41- Resistência à compressão axial por traço



Fonte: Autoria própria, 2025.

Nas pesquisas realizadas por Abeer *et al.* (2024), Costa e Cecconello (2025) e Silva *et al.* (2024) foram obtidos resultados semelhantes, nos quais os autores indicaram que os teores fibras de Polipropileno próximos de 0,50% de fibras/m<sup>3</sup> tendem a proporcionar um equilíbrio entre ganho de desempenho e manutenção da trabalhabilidade. No entanto, acima desse limite, os trabalhos apontaram para uma maior perda de fluidez do concreto produzido e à formação de aglomerados de fibras, mas também na diminuição da resistência mecânica.

Durante a realização do ensaio, percebeu-se que a utilização das macrofibras LM-*Twist* propiciaram uma melhor transição entre o comportamento frágil para dúctil do concreto. Esse efeito é decorrente da capacidade de ancoragem das fibras no CRF, contribuindo para uma interação mais eficiente entre matriz cimentícia, agregados e fibras. Em consequência disso, torna-se possível uma melhoria na aderência das fibras à matriz, de forma a possibilitar o desenvolvimento do mecanismo de ponte, o qual é responsável por transferir os esforços, bem como retardar a formação e propagação de fissuras.

Segundo Akbulut *et al.* (2024), embora uma maior quantidade de fibras de polipropileno possa levar a formação de vazios e à diminuição da resistência à compressão, uma possível solução seria o uso de forma híbrida de microfibras e macrofibras de polipropileno, visando assim mitigar esse efeito, assim como melhor o desempenho mecânico do CRF.

Com a finalização do ensaio de resistência à compressão, após os corpos de prova atingirem a sua capacidade máxima de carga, possibilitou-se também analisar os tipos e formatos de ruptura conforme estabelecido na ABNT NBR 5739 (2018), representados na Figura 2. A identificação adequada destes modo de ruptura contribuem de forma significativa

para a compreensão dos mecanismos de falha e fratura do concreto, permitindo, ainda, avaliar a influência das macrofibras LM-*Twist* no comportamento da matriz cimentícia.

Nos corpos de prova do traço de referência foi percebido a ocorrência de rupturas do tipo cônica e cisalhada (Tipo D), bem como rupturas predominantemente cisalhadas (Tipo E), conforme apresentado na Figura 42. Em contrapartida, nos CP com adição de fibras, traço A (0,20%), B (0,35%) e C (0,50%), verificou-se uma maior predominância do modo de ruptura por cisalhamento (Tipo E), sendo os resultados ilustrados, respectivamente, na Figura 43, 44 e 45.

Figura 42- Tipos de ruptura dos CP do traço REF



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 43- Tipos de ruptura dos CP do traço A (0,20%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 44- Tipos de ruptura dos CP do traço B (0,35%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 45- Tipos de ruptura dos CP do traço C (0,50%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para Costa (2023), essa tendência de ruptura no plano diagonal constitui um aspecto positivo, uma vez que o cisalhamento ocorre tipicamente nos planos inclinados em relação à direção de aplicação da carga. Em consequência, evidencia-se que o uso das fibras *LM-Twist* contribui não apenas para o aumento da tenacidade, mas também a mitigação de rupturas bruscas e imediatas após o surgimento das primeiras fissuras, favorecendo o retardamento do colapso estrutural total.

#### 4.1.3 Resistência média à tração direta

A resistência média à tração direta ( $f_{ct,m}$ ) dos corpos de prova foi obtida por meio da Equação (12), sendo os resultados apresentados na Tabela 13 e comparados na Figura 46. A partir desses valores, pode-se verificar que os traços que apresentam maiores desempenhos

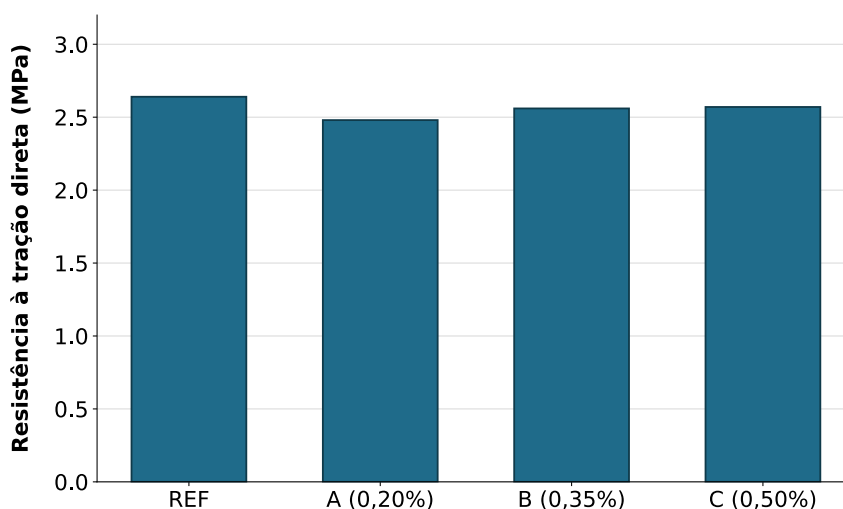
em tração são o de referência e o com adição de 0,50% de fibras, cujos resultados se mostraram bastante próximos aos encontrados por Costa (2023).

Tabela 13- Resistência média à tração direta dos CP

| Resistência à tração direta (fct,m) |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Traço                               | Tensão (MPa) |
| Referência (REF)                    | 2,64         |
| A (0,20%)                           | 2,48         |
| B (0,35%)                           | 2,56         |
| C (0,50%)                           | 2,57         |

Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 46- Resistência à tração comparada entre os CP



Fonte: Autoria própria, 2025.

## 4.2 Análise Numérica

Nas subseções seguintes, são mostrados os resultados obtidos para cada traço analisado, com o propósito de verificar a capacidade do modelo numérico em representar adequadamente o comportamento experimental. Para isso, comparam-se os valores de resistência à compressão axial experimental e numérico, bem como os deslocamentos verticais e a capacidade de previsão do fissuramento no CP. Na Tabela 14 tem-se os parâmetros  $E_{ci}$ ,  $E_{cs}$  e  $G_f$  obtidos para cada um dos traços, através das Equações (13), (14) e (16).

Tabela 14- Propriedades mecânicas para o concreto

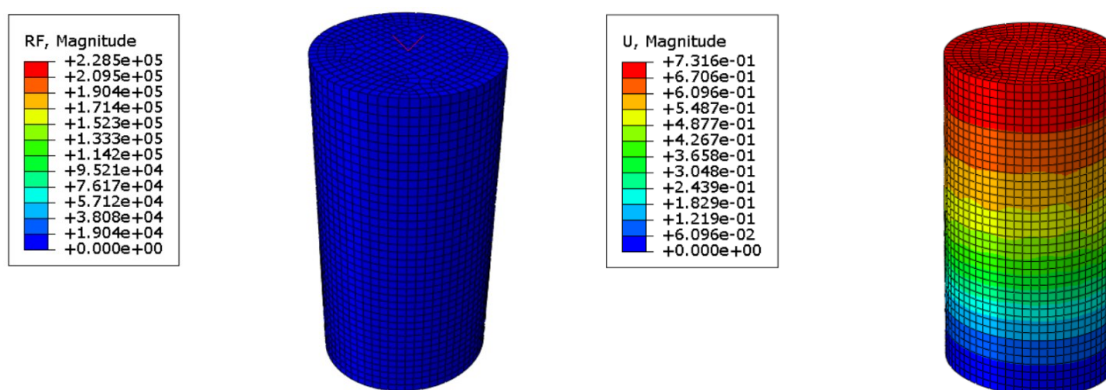
| Características elásticas e plásticas do CRF |                |                     |                   |                   |                 |
|----------------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Traço                                        | $f_c$<br>(MPa) | $f_{ct,m}$<br>(MPa) | $E_{ci}$<br>(MPa) | $E_{cs}$<br>(MPa) | $G_f$<br>(N/mm) |
| REF                                          | 30,15          | 2,64                | 30749,05          | 26916,95          | 0,1348          |
| A (0,20%)                                    | 27,80          | 2,48                | 29526,39          | 25673,20          | 0,1328          |
| B (0,35%)                                    | 29,00          | 2,56                | 30156,92          | 26311,91          | 0,1338          |
| C (0,50%)                                    | 29,11          | 2,57                | 30214,06          | 26370,08          | 0,1339          |

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.2.1 Traço de Referência (REF)

Como resultado, para o traço REF sem adição de fibras, observa-se na Figura 47 o maior valor de força axial suportado pelo corpo de prova antes de sua ruptura total foi de 228,50 kN. Além disso, na Figura 47 apresenta-se também a distribuição dos deslocamentos correspondente ao CP no instante de aplicação dessa força máxima, sendo possível identificar que o maior valor de deslocamento ocorreu na região superior do CP, atingindo 0,73 mm.

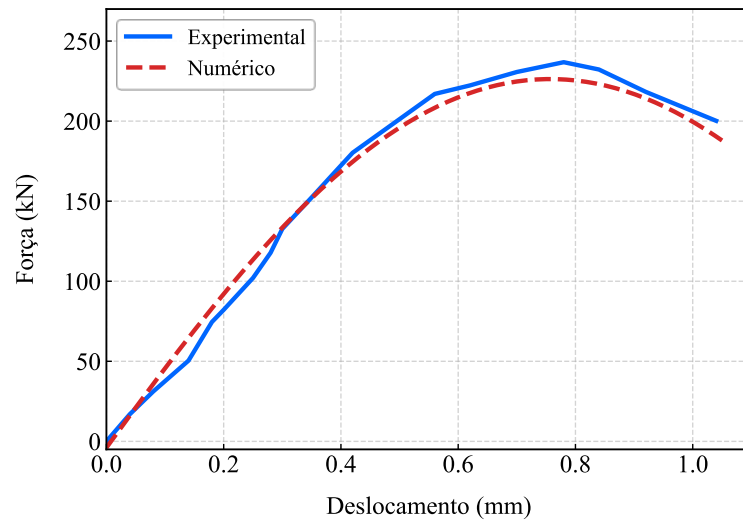
Figura 47- Carga máxima e deslocamento máximo para carga aplicada no traço REF



Fonte: Autoria própria, 2025.

Ademais, na Figura 48 é representado a curva força-deslocamento, na qual experimentalmente obteve-se uma força de 236,80 kN e numericamente uma força de 228,50 kN. Nesses respectivos pontos de maior carregamento, tem-se deslocamentos de 0,73 mm (numérico) e 0,77 mm (experimental). Esses resultados mostram-se bastante satisfatórios, uma vez que evidenciam a proximidade entre os valores obtidos pelos dois métodos, resultando em um erro aproximado de 3,50%.

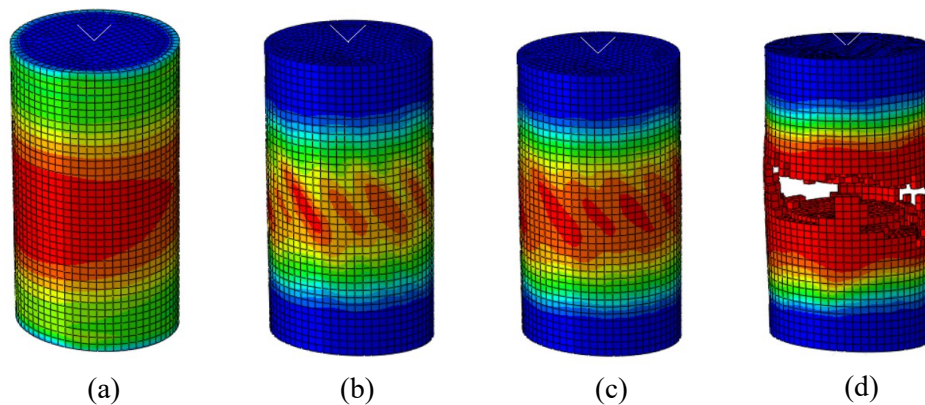
Figura 48- Curva da Força em relação ao deslocamento para o traço de Referência (REF)



Fonte: Autoria própria, 2025.

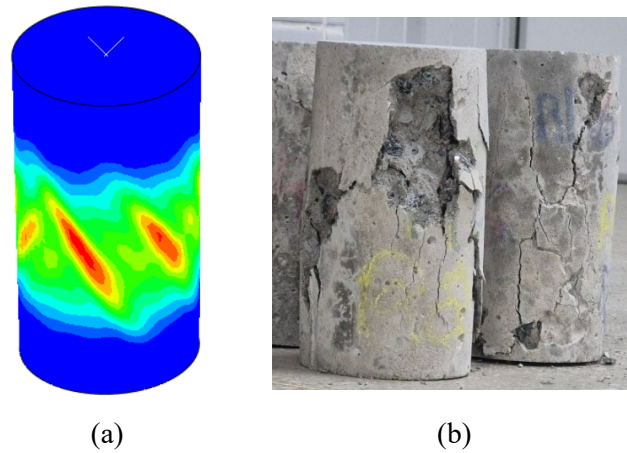
A Figura 49 apresenta a forma como ocorre a evolução do dano no concreto convencional sem adição de fibras, percebe-se inicialmente a distribuição da carga, seguida pela formação de fissuras e por último a ruptura do corpo de prova. Na Figura 50 tem-se uma comparação dos tipos de ruptura do CP experimental e numérico, nota-se o predomínio do tipo de ruptura ocorreu por cisalhamento.

Figura 49- Evolução do dano no traço RF: (a) distribuição da carga; (b) formação das primeiras fissuras; (c) propagação das fissuras e; (d) ruptura do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 50- Análise do tipo de ruptura do traço REF: (a) ruptura do CP numérico e; (b) ruptura do CP experimental



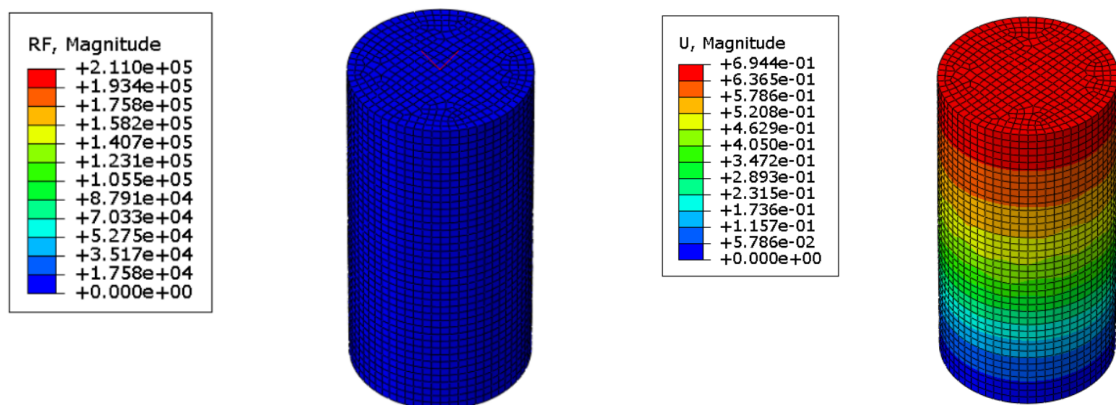
Fonte: Autoria própria, 2025.

## 4.2.2 Traços com adições de Fibras

### 4.2.2.1 Traço A (0,20%)

Para o traço A, com adição de fibras de 0,20%, percebe-se conforme a Figura 51 que o maior valor de carga axial obtido numericamente foi de 211,06 kN. Já em relação ao deslocamento, a Figura 51 também evidencia que, em decorrência dessa força máxima, ocorre um deslocamento maior na região superior do CP, atingindo cerca de 0,69 mm.

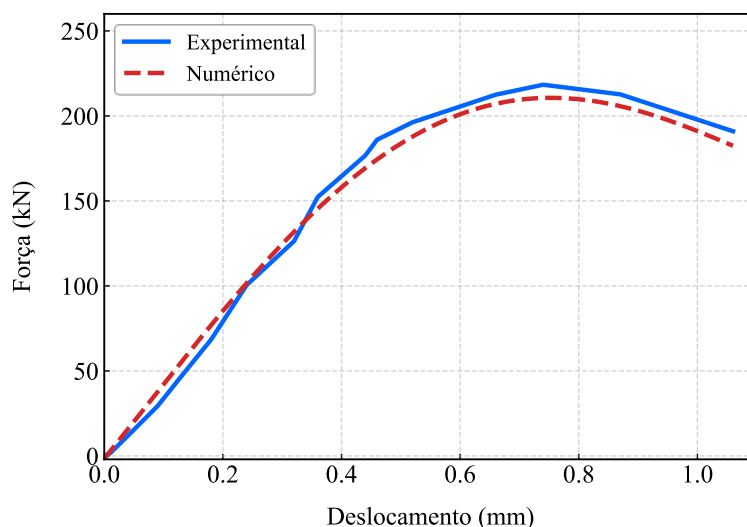
Figura 51- Carga máxima e deslocamento máximo na carga aplicada ao traço A (0,20%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

A relação entre força e deslocamento é mostrada na Figura 52, verifica-se que a força obtida numericamente foi de 211,26 kN, enquanto experimentalmente alcançou-se uma força de 218,34 kN. No caso do deslocamento vertical do CP, no ponto que está aplicado a maior força, observa-se numericamente 0,69 mm e experimentalmente um deslocamento de 0,74 mm.

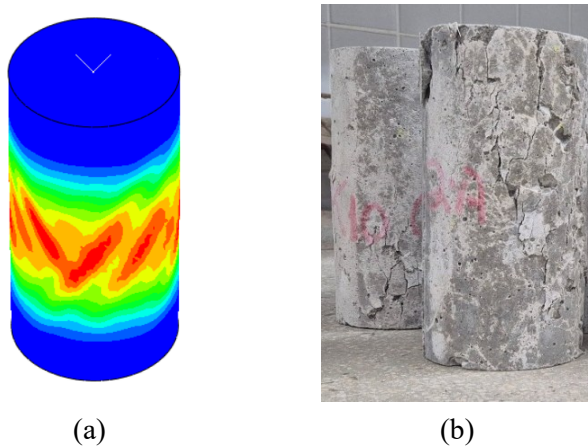
Figura 52- Curva da Força em função do deslocamento para o traço A



Fonte: Autoria própria, 2025.

Através da Figura 53 é possível comparar os modos de falha e fissuração do CP experimental e do modelo numérico, pode-se observar que, em ambas as metodologias, houve um predomínio de ruptura por cisalhamento. Esse resultado evidencia a coerência entre o comportamento reproduzido numericamente e aquele observado no ensaio laboratorial. No entanto, apesar do resultado satisfatório houve uma pequena divergência dos valores entre as forças máximas obtidas, acarretando um erro de cerca de 3,24%.

Figura 53- Análise do tipo de ruptura traço A: (a) ruptura do CP numérico e; (b) ruptura do CP experimental



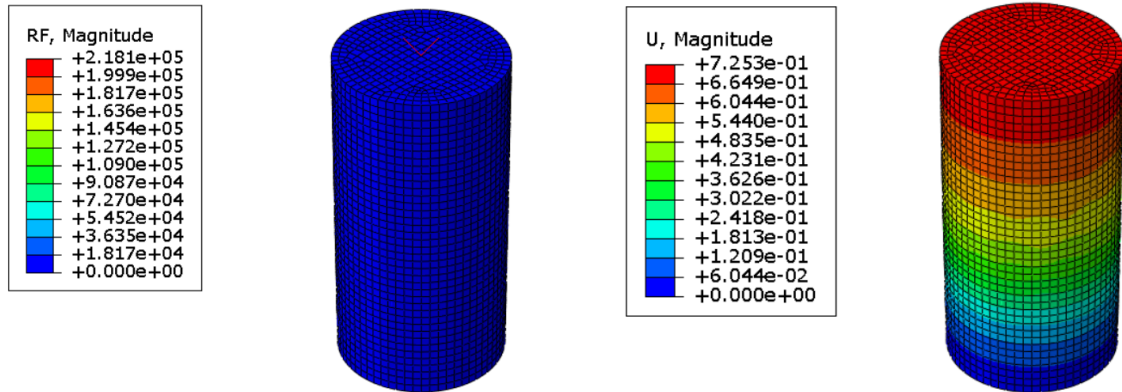
Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.2.2.2 Traço B (0,35%)

De acordo com a Figura 54, do traço B, com adição 0,35% de fibras, apresentou uma carga axial máxima numérica de 218,16 kN. Quanto ao deslocamento vertical, nota-se na

Figura 54 que devido a essa força máxima aplicada, ocorreu um maior deslocamento na região superior do CP, atingindo em torno de 0,72 mm.

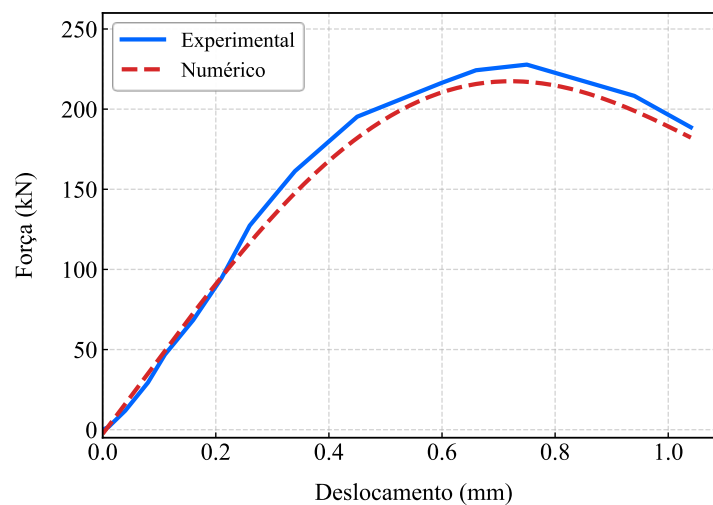
Figura 54- Carga máxima e deslocamento máximo aplicado ao traço B (0,35%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

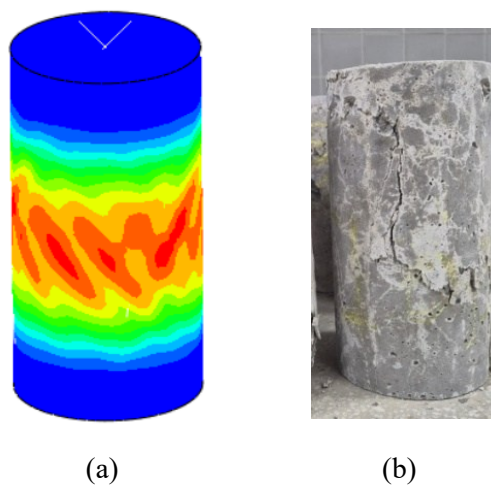
A Figura 55, por sua vez, mostra a relação existente entre força e deslocamento para o traço B, pode-se verificar que a força máxima obtida numericamente foi de 218,16 kN, enquanto experimentalmente o corpo de prova suportou 227,78 kN. No que se refere ao deslocamento vertical, no ponto correspondente à aplicação da força máxima, observa-se que o valor numérico foi de 0,72 mm, ao passo que o deslocamento experimental atingiu 0,75 mm. Conforme ilustrado na Figura 56, o modo de ruptura predominante em ambas as abordagens, numérica e experimental, foi o cisalhamento, evidenciando a coerência entre os resultados obtidos, com erro de cerca de 4,22%.

Figura 55- Curva da Força em relação ao deslocamento para o traço B



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 56- Análise do tipo de ruptura traço B: (a) ruptura do CP numérico e; (b) ruptura do CP experimental

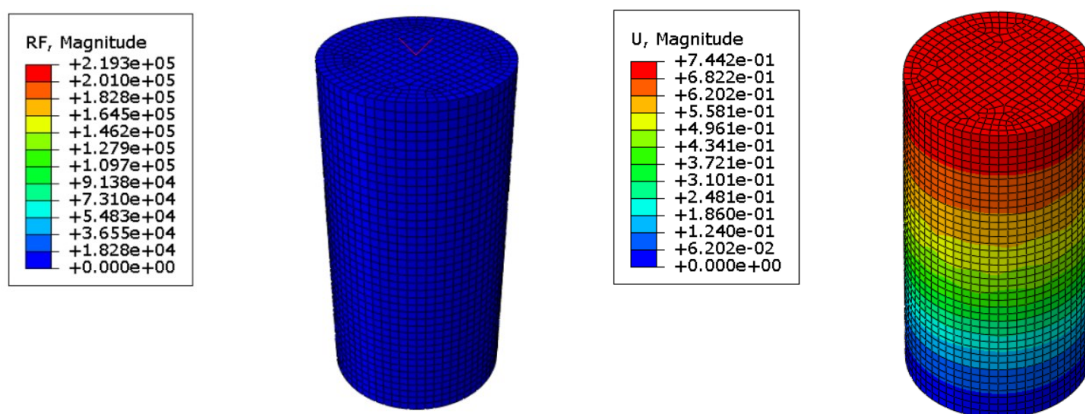


Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.2.2.3 Traço C (0,5%)

O modelo numérico do traço com adição de 0,50% de fibras, conforme demonstra a Figura 57 apresentou uma força axial máxima de 219,30 kN. Na Figura 57, nota-se também que no momento que é aplicado esta força ocorre um deslocamento maior na parte superior do corpo de prova, em torno de 0,74 mm, isso ocorre por causa que este local está diretamente em contato com a carga.

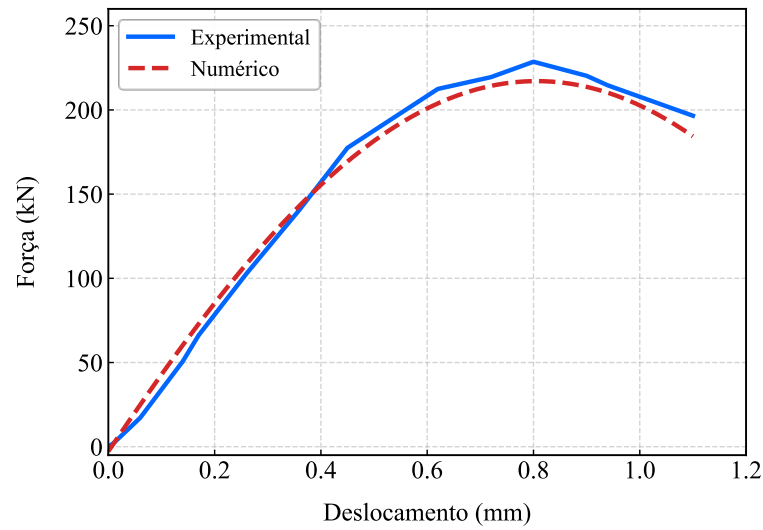
Figura 57- Carga máxima e deslocamento máximo aplicado ao traço C (0,50%)



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 58 tem-se a representação da relação entre força e deslocamento para o traço C, pode-se perceber que a força máxima que o CP suportou experimentalmente foi de 228,61 kN e numericamente de 219,30 kN. Por outro lado, os deslocamentos nessa carga máxima foram de aproximadamente 0,80 mm (experimental) e 0,74 mm (numérico), sendo resultados satisfatórios e com erro de cerca de 4,07%.

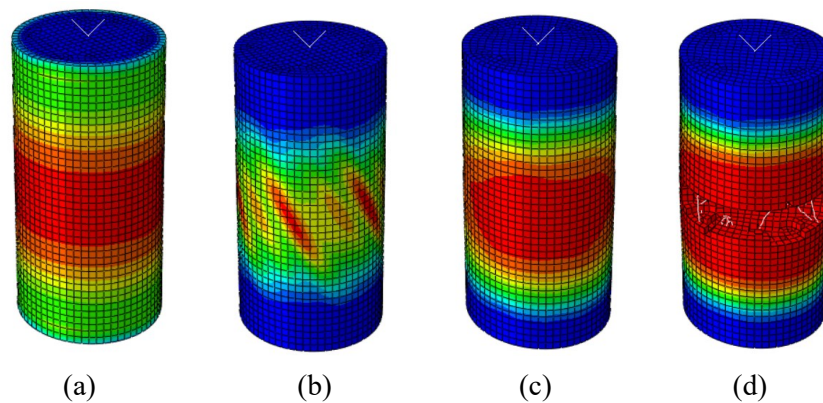
Figura 58- Curva Força em função do deslocamento do traço C



Fonte: Autoria própria, 2025.

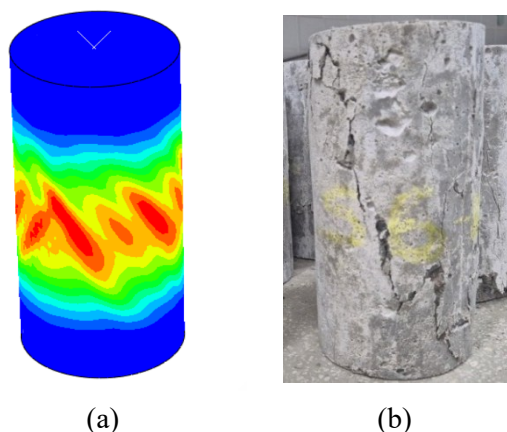
Ainda assim, é imprescindível entender a evolução do dano no concreto com adição de fibras, esta por sua vez, é mostrada na Figura 59, sendo observado desde o processo de distribuição da carga no elemento até a sua ruptura final. Ademais, tem-se representado na Figura 60 o modo de ruptura predominante em ambas as abordagens, numérica e experimental, sendo evidenciado para esse traço principalmente a ruptura por cisalhamento.

Figura 59- Evolução do dano no traço C: (a) distribuição da carga; (b) formação das primeiras fissuras; (c) propagação das fissuras e; (d) ruptura do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 60- Análise da ruptura do traço C: (a) ruptura do CP numérico e; (b) ruptura do CP experimental

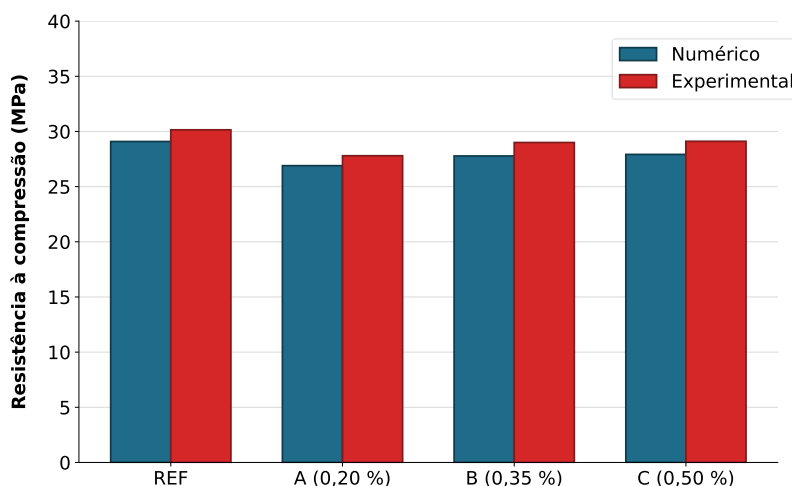


Fonte: Autoria própria, 2025.

### 4.3 Comparação entre os resultados numéricos e experimentais

Na Figura 61, observa-se que houve uma proximidade entre os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente e numericamente. Todavia, o Traço A (0,20%) foi o que teve uma maior proximidade da força obtida, com valor experimental de 218,34 kN e numérico de 211,26 kN, como consequência, obteve-se um  $f_c$  de 26,90 MPa por meio do modelo numérico e 27,80 MPa através do ensaio laboratorial.

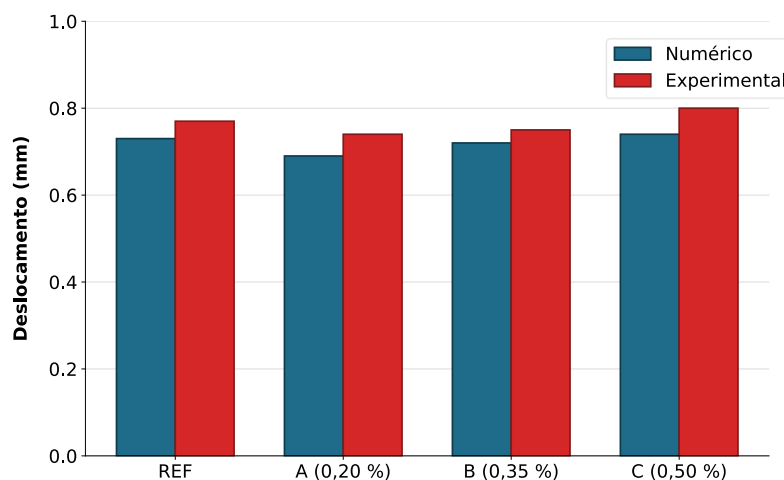
Figura 61- Análise comparativa  $f_c$  experimental e numérico



Fonte: Autoria própria, 2025.

Por outro lado, na Figura 62 são mostrados os valores para os deslocamentos alcançados tanto experimentalmente quanto numericamente, considerando-se a tensão máxima obtida para cada um dos traços. É perceptível que entre os resultados obtidos para deslocamento, o traço que apresentou uma maior proximidade dos valores foi o B (0,35%) com deslocamento numérico de 0,72 mm e experimental de 0,75 mm.

Figura 62- Análise comparativa deslocamento numérico e experimental



Fonte: Autoria própria, 2025.

Ainda de acordo com a Figura 61, verifica-se que os teores de fibras avaliados não apresentaram um ganho tão significativo de resistência à compressão em relação ao traço de referência. Entretanto, à medida que foi aumentado o percentual de fibras, especificamente, no traço C (0,50%), notou-se uma maior proximidade da  $f_c$  em relação aos valores alcançados no traço REF. A adoção das macrofibras de polipropileno LM-*Twist* também proporcionou um controle mais eficiente de fissuração, decorrente do mecanismo de ponte exercido pelas fibras, favorecendo uma menor abertura de fissuras, maior tenacidade e a mitigação de danos associados à retração e à propagação de fissuras.

Em virtude disso, pode-se perceber que o uso do MEF no *Abaqus* auxilia na obtenção de resultados satisfatórios e bastante próximos dos valores experimentais. Esse comportamento também foi constatado nos estudos numéricos de Egídio (2025), Bezerra (2024) e Zheng *et al.* (2025), que evidenciaram como a calibração adequada do modelo constitutivo é determinante no alcance de respostas compatíveis aos ensaios físicos. No presente estudo, a aplicação desta metodologia possibilitou uma adequada representatividade dos valores de força e deslocamento, mas também na análise do padrão de fissuração dos corpos de prova, demonstrando a viabilidade de usar o MEF como uma ferramenta de previsão do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de polipropileno.

É preciso destacar que o emprego do modelo numérico contribuiu significativamente para a redução de custos e de tempo, quando comparado à realização da análise apenas por ensaios experimentais. Neste estudo, notou-se que o uso de análises numéricas demonstra ser uma alternativa viável para a condução de análises paramétricas do teor de fibras ótimo, sobretudo porque para um estudo mais amplo deste percentual de fibras requer-se a necessidade da confecção de uma grande quantidade de corpos de prova.

## 5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, objetivou-se analisar o comportamento mecânico do concreto reforçado com macrofibras de polipropileno, do tipo LM-*Twist*, para isso foi realizado ensaios de compressão axial, assim como o desenvolvimento de um modelo numérico preditivo, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) juntamente com o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), disponível no *software Abaqus*.

A utilização dessa abordagem permitiu a obtenção de um modelo numérico representativo dos resultados laboratoriais de compressão axial. Além disso, permitiu-se não apenas avaliar a carga máxima suportada pelos corpos de prova constituídos por concreto convencional e o concreto com adição de fibras, mas também analisar a sua rigidez, padrão de ruptura e a evolução do dano.

Na realização da etapa experimental, verificou-se que o traço de referência (REF) foi o que apresentou um maior desempenho mecânico, enquanto o traço A (0,20%) resultou em uma redução moderada da resistência à compressão. Esse comportamento pode estar associado a fatores como a perda de trabalhabilidade, dificuldades de adensamento e a formação de aglomerados de fibras na matriz do concreto, mas também a formação de vazios. Entretanto, os traços B (0,35%) e C (0,50%) demonstraram uma tendência de recuperação da resistência à compressão, estima-se que isso pode estar associado a estabilidade do material que tende a melhorar à medida que o volume de fibras aumenta, até um limite adequado.

A predominância da ruptura por cisalhamento ocorreu em praticamente todos os traços, é preciso destacar que no CRF as macrofibras contribuíram para uma melhor transição do comportamento frágil para um comportamento mais dúctil, retardando o colapso e promovendo ganhos de tenacidade, efeito tal qual é observado na literatura em concretos com fibras de polipropileno. Na modelagem numérica, por sua vez, o CDP mostrou-se eficaz na representação do comportamento não linear do concreto, ainda que exigindo calibração cuidadosa dos parâmetros elásticos e plásticos.

É necessário destacar que o uso dos métodos numéricos de Carreira e Chu (1985) para compressão e Hordijk (1991) para tração permitiram uma aproximação do comportamento mecânico não linear da resposta experimental, de forma a assegurar uma convergência satisfatória do modelo. Nesta pesquisa, notou-se que a diferença entre as forças máximas numéricas e experimentais permaneceram entre 3,24% e 4,22%, isso demonstra não apenas a consistência do modelo, mas também a sua capacidade em reproduzir de maneira confiável o comportamento estrutural do concreto.

Através da análise das tensões internas, da evolução do dano e da forma de ruptura percebe-se uma grande coerência entre o modelo numérico e os resultados laboratoriais. A reprodução do modo de falha por cisalhamento e a distribuição dos deslocamentos reforçam a fidelidade do MEF para simular CRF, mesmo diante da complexidade existente na interação fibra–matriz.

Desta forma, a modelagem numérica mostrou-se uma ferramenta eficaz para complementar e, em alguns cenários, substituir ensaios experimentais que demandam maior custo, tempo e infraestrutura. Em virtude disto, pode-se evidenciar que a eficácia da utilização de macrofibras de polipropileno depende diretamente dos objetivos de desempenho desejados. Embora a adição de fibras não tenha proporcionado um aumento significativo da resistência à compressão, ela contribuiu notoriamente para o aumento da ductilidade e da capacidade de deformação dos corpos de prova.

Para futuras pesquisas, deixa-se algumas sugestões:

- Avaliar modelos híbridos de fibras, tendo como finalidade mitigar as perdas de resistência e melhorar a ductilidade do CRF;
- Aplicar algoritmos genéticos para previsão das propriedades do CRF a partir de parâmetros da mistura;
- Desenvolver uma interface paramétrica em *Python* para automatizar o processo de modelagem com fibras.
- Realizar análises tridimensionais refinadas a partir modelos que considerem a variação da orientação real das fibras.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABEER, S. Z. *et al.* **Improving the mechanical behavior of pervious concrete using polypropylene and waste rope fibers.** Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, v. 17, n. 1, p. 38–46, 2024.
- ABEDI, Mohammad *et al.* **Shrinkage properties of steel fiber reinforced concrete- A review.** Applications in Engineering Science, v. 23, p. 100244–100244, 25 jun. 2025.
- AHMAD, Jawad *et al.* **Mechanical performance of concrete reinforced with polypropylene fibers (PPFs).** Journal of Engineered Fibers and Fabrics, v. 16, p. 155892502110603, 2021.
- AHMAD, J. *et al.* **Mechanical and Durability Performance of Coconut Fiber Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Review.** Materials, v. 15, n. 10, p. 3601, 2022.
- AKBULUT, Zehra Funda *et al.* **Synergistic Effects of Polypropylene Fibers and Silica Fume on Structural Lightweight Concrete: Analysis of Workability, Thermal Conductivity, and Strength Properties.** Materials, v. 17, n. 20, p. 5042–5042, 2024.
- ALMEIDA, R. L. J. DE; PARSEKIAN, G.; CARNIO, M. A. **Concreto reforçado com fibras: projeto de fibras no ELU.** CONCRETO & Construções, v. XLIX, n. 105, p. 90–97, 2022.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2003.
- AMARAL, M. G.; SHAUER, N.; OLIVEIRA, H. L. **Utilização do método de elementos finitos para otimização topológica de estruturas.** XXXIII Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, p. 1-5, 2025.
- AMARAL JÚNIOR, J. C. DO; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017.
- ANAS, Muhammad. *et al.* **Fiber Reinforced Concrete: A Review.** Engineering Proceedings, v. 22, n. 1, p. 3, 2022.
- ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A.; **Materiais de Construção.** Rio de Janeiro, Editora Universidade Rural, 2000.
- ARAÚJO, Isadora Nogueira de. **Modelagem elastoplástica de colunas de concreto confinadas por polímeros reforçados com fibra.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto armado – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 3 p, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16938: Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

BABU, S. Suresh *et al.* **Study on the Usage of Synthetic and Natural Fibres in Construction: A Systematic Review**. Journal of Environmental Nanotechnology, v. 14, n. 2, p. 486–493, 2025.

BATISTA, Raquel Dantas. **Simulação numérica de vigas T em concreto armado reforçado ao cisalhamento com composto de fibra de carbono (CFRP) utilizando o modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2017.

BATISTA, Raquel Dantas *et al.* **Simulação numérica de vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (CFRP) utilizando o modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP)**. In: X CBPE, 2018, Rio de Janeiro. Anais do X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2018.

BARRIOS, S. K. M. **Guía práctica de uso: Abaqus CAE**. Foz do Iguaçu: EDUNILA, 2022.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Estruturas de concreto I - fundamentos do concreto armado**. Bauru, 2023.

BAUER, L. A. F. **Materiais De Construção-Novos Materiais Para Contrução Civil - Vol. 1**. 6 ed, Ltc-Livros Tecnicos e Cientificos Editora Lda, 2022.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom:

Elsevier, 2007.

BEZERRA, Francisca Gizele. **Modelo numérico para análise do comportamento mecânico do concreto**. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas-RN, 2024.

BIROL, T.; AVCIALP, A. **Impact of Macro-Polypropylene Fiber on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete**. *Polymers*, v. 17, n. 9, p. 1232, 2025.

BORGES, Lucca Rosa Parreira. **Simulação numérica de corpos de prova confinados constituídos de concreto de agregado reciclado**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia-GO, 2022.

BRAUN, K. de S.; SCHULZE, L. A. **Confecção e estudo via ensaio de compressão de um traço de 40 MPa**. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Federal dos Vales do Jequetinhonha e Mucuri. Teófilo Otoni, 2018.

BRACKMANN, G. D. *et al.* **Calibração dos parâmetros do modelo de plasticidade do dano no programa ABAQUS para análise em elementos finitos de lajes lisas protendidas**. XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, [s. l.], p. 1-10, 2021.

CARREIRA, D. J.; CHU, K.-H. **Stress-strain relationship for plain concrete in compression**. *ACI Journal Proceedings*, v. 82, n. 6, p. 797–804, 1985.

CHEN, Yaqin. *et al.* **Durability Properties of Macro-Polypropylene Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete**. *Materials*, v. 17, n. 2, 2024.

COSTA, M. H. S.; CECCONELLO, V. **Evaluation of shrinkage in concrete with different polypropylene fiber contents**. *Interdisciplinary Journal of Applied Science (Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada - RICA)*, v. 9, p. 1-6, 2025.

COSTA, Luan Douglas Mendes. **Análise da Utilização de Fibras poliméricas em estruturas De Concreto**. 2023. 79 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas - RN, 2023.

COUTINHO, Grasielle Da Silva, *et al.* **Desempenho de argamassa e concreto utilizando ensaios de laboratório**. *Brazilian Journal of Development*, vol. 11, n. 1, 2025.

CUNHA; F. G; SAMPAIO, M.; MARTINELLI, A. E. **Fiber-reinforced lightweight concrete formulated using multiple residues**. *Construction and Building Materials*, v. 308, p. 125035–125035, 2021.

CUNHA, Rafael Nunes *et al.* **Aplicação de fratura coesiva para análise de estruturas de concreto**. *Mecânica Computacional*, v. 40, p. 699-707, 2023.

DENARDI, M. C.; ROUGIER, V. C. **Vigas de gran altura de hormigón reforzado con fibras: estudio numérico**. *Mecánica Computacional*, v. XL, p. 121–130, 2023.

DOĞAN, C.; DEMİR, İ. **Polimer lifler ve beton özelliklerine etkileri**. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, p. 438-451, 2021.

DZIOMDZIORA, P.; SMARZEWSKI, P. **Effect of Hybrid Fiber Compositions on Mechanical Properties and Durability of Ultra-high-Performance Concrete: A Comprehensive Review**. *Materials*, v. 18, n. 11, p. 2426, 2025.

EGÍDIO, Karina Estrela. **Avaliação do comportamento de ligações viga-pilar em concreto pré-moldado com o auxílio de redes neurais artificiais**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil — Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

ENDO, G. N.; VANDERLEI, R. D. **Comparação dos parâmetros de modelos constitutivos modificados de carreira e Chu para UHPC através de regressão não linear**. *REVISTA TECNOLÓGICA (UEM)*, v. 33, p. 62-69, 2024.

FARANI, A.; CONSONI, L. **Análise inelástica de vigas considerando a mecânica do dano contínuo**. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 7, p. 49641–49660, 2022.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Structural connections for precast concrete buildings: guide to good practice**. International Federation for Structural Concrete: Lausanne, 2010. (FIB Bulletin, n. 65).

FERREIRA, L. E. T. **Elementos de Mecânica da Fratura Aplicada à Engenharia Estrutural: aspectos analíticos, computacionais e experimentais**. 2ed. Lavras: Editora UFLA, 2019.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto Reforçado com Fibras**. 248 p. Tese (Pós-Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GILSON COMPANY. **Concrete Slump Test, a guide to the test procedure**. Disponível em: <https://www.globalgilson.com/blog/concrete-slump-guide>. Acesso em: 26 jul. 2025.

GELLEN, Ana Luísa Bido *et al.* **Otimização de argamassas com vidro moído: impacto da água e fibra de polipropileno na performance**. *Caderno Pedagógico*, v. 22, n. 1, p. e13287–e13287, 2025.

GRUPO CONSTRUQUÍMICA. **Fibras para concreto e argamassa**. São Paulo: Grupo Construquímica, out. 2013. 15 p. Disponível em: <https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/10165/24863/construquimica-fibras.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GUDUGURMATH, B. *et al.* **Flexible concrete for structural applications using polypropylene fiber**. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 10, n. 11, 2022.

HASAN, A.; MAROOF, N.; IBRAHIM, Y. **Effects of Polypropylene Fiber Content on Strength and Workability Properties of Concrete**. *Polytechnic Journal*, v. 9, n. 1, p. 7–12, 2019.

HORDIJK, D. A. **Local approach to fatigue of concrete**. Thesis (Ph.D.) – Technische Universiteit Delft, Delft, 1991.

HU, Cheng-feng *et al.* **Effect of fiber factor on the workability and mechanical properties of polyethylene fiber-reinforced high toughness geopolymers.** *Ceramics International*, v. 48, n. 8, p. 10458–10471, 2021.

JANKWOIAK, T.; LODYGOWSKI, T. **Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model.** *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, Poznan, v. 6, p.53-69, 2005.

LAHUMAN FIBER. [S. l.], **Catálogo - Tecnologia em fibras sintéticas.** Novembro. 2024 Disponível em: <https://lahumanfiber.com/pdf/macrofibra-twist.pdf>. Acesso em: 8 set. 2025.

LEAL, Cleber Eduardo Fernandes *et al.* **Influência do tipo de agregado na resistência e deformabilidade de blocos estruturais produzidos com concreto seco: estudo numérico, experimental e estatístico.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 3, 2022.

LEE, J.; FENVES, G. L. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures.** *Journal of engineering mechanics*, [s. l.], v. 124, n. 8, p. 892–900, 1998

LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. **Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete.** *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, v. 13, p. 543-562, 2020.

LIAO, Gaoyu *et al.* **The Effect of Steel Fiber Content on the Workability and Mechanical Properties of Slag-Based/Fly Ash-Based UHPC.** *Buildings*, v. 15, n. 13, p. 2350–2350, 4 jul. 2025.

LUBLINER, J. *et al.* **A plastic-damage model for concrete.** *International Journal of solids and structures*, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

MACIEL, T. M. *et al.* **Modelagem computacional em Abaqus: aplicações educacionais para Engenharia Civil e Mecânica.** Ponta Grossa: Atena, 2022.

MALEK, Marcin *et al.* **Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fibre-Reinforced Cement–Glass Composite.** *Materials*, v. 14, n. 3, p. 637, 2021.

MARTINS, Maurício Prado *et al.* **Modelling of tension stiffening effect in reinforced recycled concrete.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 6, 2020.

MEDEGHINI, F *et al.* **Fiber orientation and orientation factors in steel fiber-reinforced concrete beams with hybrid fibers: a critical review.** *Structural Concrete*, v. 26, n. 1, p. 481-500, 2025.

MEDEIROS, W. A. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante.** 2018. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 164p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais – 2ª Ed.** São Paulo: IBRACON, 2014.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, p. 25-64, 2014.

MONTEIRO, Renan Araujo. **Estratégias de Modelagem Numérica de Vigas Mistas Via ABAQUS**. 2021. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental 3 Deca, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

NASCIMENTO FILHO, S. I. **Análise comparativa entre modelos de dano aplicáveis a estruturas de concreto com uso do MEF-Posicional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

NETO, Renério Pereira. **Mecânica do dano concentrado aplicada a pórticos planos de concreto armado para modos de falha por esforços de flexão e cortante com fator de correção da variável de dano**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2024.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2016. 888 p.

NILIMAA, J.; NILFOROUSH, R. **A Direct Tensile Strength Testing Method for concrete from existing structures**. v. 4, n. 1, p. 333–344, 16 mar. 2023.

NONATO, R. B. P. **Capacidade de flexão elástica versus plástica de vigas Timoshenko-Ehrenfest**. V Seven International Multidisciplinary Congress. Itupeva: Seven publicações, 2024.

NOVA, Silvia Juliana Sarmiento *et al.* **Estudo do comportamento de vigas de concreto protendido através de análise numérica não linear**. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE), Florianópolis, 2017.

ODUMADE, A. O. *et al.* **Workability Performance of Concrete with Varying Cement Content**. Sustainable Engineering and Industrial Technology Conference, 6 jul. 2020.

OLIVEIRA, Ana Luiza Alves. **A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto fresco e endurecido**. Trabalho de conclusão de curso- Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais- FATECS. Brasília, 2014.

ONUKEI, M. A. F.; GASPARETTO, P. A. **Comparativo das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido com adição de fibras de aço e de polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2013.

PAUNOVIĆ, S.; ŠUTANOVAC, A.; BLAGOJEVIĆ, P. **An alternative numerical model for fiber reinforced concrete strength evaluation**. Facta Universitatis – Series Architecture and Civil Engineering, Niš, v. 20, n. 3, p. 213-230, 2022.

PAIVA, J. M. **Cálculo estrutural de um viaduto em concreto armado: análise comparativa dos esforços via método computacional**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2025.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. DE F. **Medida de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone automatizado: sua validação e potencialidades**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, 2021.

PEREIRA, J. R *et al.* **Evaluation of the Addition of Polypropylene (PP) Fibers in Self-compacting Concrete (SCC) to Control Cracking and Plastic Shrinkage Between Different Methods.** Materials Research-ibero-american Journal of Materials, v. 26, n. suppl 1, 2023.

PHAM, T. M. **Fibre-reinforced concrete: State-of-the-art-review on bridging mechanism, mechanical properties, durability, and eco-economic analysis.** Case Studies in Construction Materials, v. 22, p. e04574, 2025.

QASEM, Maged *et al.* **Generalised calibration and optimization of concrete damage plasticity model for finite element simulation of cracked reinforced concrete structures.** Results in Engineering, v. 25, p. 103905–103905, 2025.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland** - 4. Ed. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.

RODRIGUES, Claudio Junior; FILHO, Willian Manjud Maluf. **Estudo Matemático dos Elementos Finitos Utilizados em Cálculo Estrutural.** In: IX SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, DIDÁTICA E DE AÇÕES SOCIAIS DA FEI, 2019.

RODRIGUES, D.; POZO, A.; TRAUTWEIN, L. M. **Calibração dos parâmetros de plasticidade danificada do concreto para lajes lisas no Abaqus.** Revista Tecnológica, v. 33, n. 1, p. 141–150, 2024.

SALEHI, Amirmasoud *et al.* **Impact of propylene fibers and industrial wastewater on the properties of self-compacting concrete.** Scientific Reports, v. 15, n. 1, p. 29201–29201, 2025.

SANTANA, Jovynttino Francisco de Araújo. **Avaliação numérica não linear de prismas e pequenas paredes compostas por blocos de concreto.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2017.

SANTOS, W. F. dos; VIEIRA, W. H. **Modelagem computacional do processo de danificação do concreto em mesoescala.** Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 9, n. 1, 2022.

SANTOS, M. de S. **Modelagem numérica de pilares curtos de concreto confinados com PRFC solicitadas por força de atualização concêntrica e excêntrica.** 2022. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2022.

SELEGIN, Carlos Henrique. **Análise Quantitativa E Qualitativa Da Conformidade Do Concreto Estrutural: Um Estudo De Caso Em Obras De Caruaru-Pe.** Monografia – Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

SILVA, Sara Cavalcante. **Análise comparativa dos métodos de dosagem de concreto.** 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2023.

SILVA, R. C. dos S. **Análise tridimensional multifísica da difusão de cloretos em estruturas de concreto armado: uma abordagem pelo método dos elementos finitos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

SILVA, E. R. M. *et al.* **Experimental study on the behavior of polypropylene fiber-reinforced concrete beams**. Caderno Pedagógico, v. 21, n. 9, p. e8020, 2024.

SOUZA, H. R. *et al.* **Estudo do comportamento do reforço estrutural de pilares esbeltos com substituição parcial de concreto**. Revista Mirante, Anápolis, v. 18, n. 1, p. 301-322, 2025.

SOUZA, Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Apostila da Universidade Federal do Pará do Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Civil-Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada a Engenharia. Belém, 2003.

SHRESTHA, S. *et al.* **Study on polypropylene fiber: a review**. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), v. 11, n. 5, 2024.

VALIN JUNIOR, Marcos de Oliveira *et al.* **Influência de diferentes climas urbanos na qualidade do concreto**. Revista Engenharia e Construção Civil, v. 3, p. 40-56, 2016.

VETTORI, Caroline Luize de Moraes. **Formulação para análise não linear via elementos finitos de vigas de concreto com protensão não aderente considerando ligações deslizantes**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2025.

YUANYU TECHNOLOGY STUDIO. **AbyssFishTech: soluções para engenharia computacional**. Disponível em: <https://abyssfishtech.com/data/%E9%92%A2%E7%BA%A4%E7%BB%B4&%E6%B7%B7%E5%87%9D%E5%9C%9F%E6%9D%90%E6%96%99>. Acesso em: 25 Out. 2025.

ZHENG, Yuelong *et al.* **Polyformaldehyde Fiber Shotcrete Bending Fracture Test and Finite Element Simulation Research**. Eng, v. 6, n. 11, p. 322, 2025.