



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PARÁ - CAMPOS BELÉM**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

GEOVANE CARREIRA RODRIGUES CRUZ

**ANÁLISE DE PISO INDUSTRIAL EM MATRIZ DE CONCRETO
PRODUZIDO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO DO MODELO
HOOKED E CRIMPED**

Belém – PA
2024

GEOVANE CARREIRA RODRIGUES CRUZ

**ANÁLISE DE PISO INDUSTRIAL EM MATRIZ DE CONCRETO
PRODUZIDO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO DO MODELO
HOOKED E CRIMPED**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Pará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em Engenharia de
Materiais

Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
PPGEMAT-IFPA
Orientador

Prof. Dr. Roberto Paulo Barbosa Ramos
PPGEMAT-IFPA
Co-orientador

Belém – PA
2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

C955a Cruz, Geovane Carreira Rodrigues.

Análise de piso industrial em matriz de concreto produzido com adição de fibras de aço do modelo hooked e crimped / Geovane Carreira Rodrigues Cruz. – Belém, 2024.

93 p.

Orientador: Alessandro de Castro Corrêa.

Dissertação (Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEMAT) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, 2024.

1. Piso industrial. 2. Fibras de aço. 3. Modelagem por elementos finitos. 4. Propriedades mecânicas. 5. Ligas livres de chumbo. I. Título.

CDD 23. ed: 625.84

Biblioteca/Instituto Federal do Pará - IFPA/Campus Belém – PA
Bibliotecária Cristiane Vieira da Silva – CRB-2/0013270

GEOVANE CARREIRA RODRIGUES CRUZ

**ANÁLISE DE PISO INDUSTRIAL EM MATRIZ DE CONCRETO PRODUZIDO
COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO DO MODELO HOOKED E CRIMPED**

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
PPGEMAT-IFPA
Orientador

Prof. Dr. Roberto Paulo Barbosa Ramos
PPGEMAT-IFPA
Co-orientador

Prof.Dr. Jean da Silva Rodrigues
PPGEMAT-IFPA
Membro - Interno

Prof. Dr. Ritermayer Monteiro Teixeira
Universidade Federal do Pará – UFPA
Membro - Externo

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Universidade Federal do Pará – UFPA
Membro - Externo

Agradecimentos

A Deus, senhor do impossível, que me conduziu até aqui e me deu forças para concluir este trabalho.

Agradeço aos meus conceituados orientador e co-orientador Dr. Alessandro de Castro Corrêa e Dr. Roberto Paulo Barbosa Ramos, pelos ensinamentos e orientação desta pesquisa.

Aos professores Dr. Vitor Hugo Lopes Branco, Dr. Jean França Veloso, Dr. Mauricio Ribeiro, Dr. Jean Rodrigues, Dr. Kleber Matos e Dr. Nilton Cesar Queiroz pelos conhecimentos repassados, disponibilidade e apoio nos ensaios.

Aos alunos do curso técnico de estradas do IFPA.

A minha queria avó Ruth Carreira por todos os conhecimentos repassados e apoio.

Aos meus familiares e especialmente a minha mãe Cora Cruz, madrinha Adriana Carreira, tia Ana Carreira, Tia Andreia Carreira, Tio Nonato Alves, Primos Manuela Alves e Bento Alves por todo apoio e incentivo.

A minha queria namorada Igraine Goldegol pelo amor, credibilidade transmitidos, sugestões valiosas durante a pesquisa.

Aos membros da banca, Dr. Jean Rodrigue, Dr. Ritermaia e Dr. Alisson Silva pela disponibilidade e aceite do convite.

Ao UFPA, pelo apoio nos ensaios.

Ao IFPA, pelo apoio e incentivo à qualificação profissional.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.(São Tomás de Aquino)

RESUMO

O concreto é um material de comportamento frágil, todavia, pode-se adicionar fibras de aço com o propósito de melhorar suas propriedades mecânicas, como a tração e do módulo de elasticidade. No caso de pisos industriais que são sujeitos a frequência de cargas, tanto em termos de compressão quanto de tração, a adição de fibras pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos da adição de fibras de aço do modelo Hooked e Crimped sobre as propriedades de matriz de concreto destinadas a pisos industriais. Esta pesquisa consistiu na adição de duas fibras de geometrias diferentes, as fibras de aço Hooked e as fibras de aço tipo Crimped com teor percentual de 1%, 1,5% e 2,0% e tendo como referência um traço padrão de resistência de 32MPa. O total de 7 traços no decorrer da pesquisa, sendo o primeiro o concreto de referência sem fibra de aço e os demais com percentuais especificados acima. Este trabalho caracterizou as propriedades físicas e mecânicas do concreto com e sem adição de fibras, através de ensaios laboratoriais obedecendo as normas da ABNT e determinou o modelo em matriz de concreto com a adição de diferentes tipos de fibras para obter o melhor modelo para os esforços solicitados no piso industrial. Para o concreto com e sem adição de fibras foram caracterizados todos os materiais para a dosagem do traço de concreto e foram preparados os corpos de prova para serem ensaiados, quanto resistência à compressão axial, ao módulo de elasticidade, a resistência à tração na compressão diametral, a flexão em três pontos e feito o slump test. Foi também feita uma modelagem numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) para todos os ensaios desta pesquisa, e modelada um pavimento rígido industrial conformes as normas ABNT e DNIT, utilizando o modelo com os parâmetros CDP (Damaged Plasticity Model), os resultados apresentam concordância com os resultados experimentais analisado da matriz em concreto com adição das fibras de aço. A incorporação de fibras de aço na matriz de concreto obteve um melhoramento significativo a matriz de concreto sem adição de fibras, obtendo um resultado superior da fibra de aço Hooked com 2%.

Palavras chave: Piso Industrial. Fibras de Aço. Modelagem por Elementos Finitos.

ABSTRACT

Concrete is a brittle material, however, steel fibers can be added to improve its mechanical properties, such as traction and modulus of elasticity. In the case of industrial floors that are subject to frequent loads, both in terms of compression and traction, the addition of fibers can improve the mechanical properties of the concrete. The objective of this work is to analyze the effects of adding Hooked and Crimped steel fibers on the properties of concrete matrix intended for industrial floors. This research consisted of the addition of two fibers with different geometries, Hooked steel fibers and Crimped steel fibers with a percentage content of 1%, 1.5% and 2.0% and taking as a reference a standard resistance trait of 32MPa. The total of 7 mixes during the research, the first being the reference concrete without steel fiber and the others with percentages specified above. This work characterized the physical and mechanical properties of concrete with and without the addition of fibers, through laboratory tests in accordance with ABNT standards and determined the concrete matrix model with the addition of different types of fibers to obtain the best model for the efforts. requested on the industrial floor. For concrete with and without the addition of fibers, all materials for dosing the concrete mix were characterized and the specimens were prepared to be tested for resistance to axial compression, modulus of elasticity, tensile strength in diametral compression, three-point flexion and the slump test. Numerical modeling was also carried out using the finite element method (MEF) for all tests in this research, and an industrial rigid pavement was modeled in accordance with ABNT and DNIT standards, using the model with CDP (Damaged Plasticity Model) parameters, the results show agreement with the experimental results analyzed from the concrete matrix with the addition of steel fibers. The incorporation of steel fibers in the concrete matrix significantly improved the concrete matrix without adding fibers, obtaining a superior result than Hooked steel fiber with 2%.

Keywords: Industrial Floor. Steel Fibers. Finite Element Modeling.

LISTA DE TABELA

Tabela 2.2 - Peneiras e classificação das peneiras utilizadas.	27
Tabela 2.3 - Tabela de Adição de Fibras no Concreto.....	31
Tabela 2.4 - Análise de Flexão do Concreto com Adição de Fibras.	32
Tabela 2.5 - Coletânea de Artigos de Adição de Fibras no Concreto.....	33
Tabela 3.1 - Metodologia de pesquisa.	34
Tabela 3.2 - Características da Fibra do Modelo Crimped.	44
Tabela 3.3 - Dados utilizados no modelo computacional.	52
Tabela 3.4 - Modelos Computacional de Pisos Pré-moldados	55
Tabela 4.1 - Resultados de Caracterização.	56
Tabela 4.2 - Traço do concreto de referência.	58
Tabela 4.3 - Traço do concreto de referência.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Camadas que compõe o piso industrial.....	21
Figura 2.2 - Classificação e Geometria das Fibras de Aço.....	23
Figura 2.3 - Efeito da transferência de tensões com fibras de Aço.	24
Figura 2.4 - Fibras de Aço do Modelo Hooked (A) e Crimped (B).	24
Figura 2.5 - Espessura e Comprimento das Fibras Hooked (A) e Crimped (B)....	Erro!
Indicador não definido.	
Figura 2.6 - Modelos de orientações das fibras.	25
Figura 3.1 - Materiais para o ensaio de Finura do Cimento CP II E 32.	35
Figura 3.2 - Materiais para o ensaio de Massa Especifica do Cimento CP II E 32.....	36
Figura 3.3 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria do agregado graúdo.....	37
Figura 3.4 - Aparato para ensaio de Massa Específica do Agregado Graúdo.	38
Figura 3.5 - Materiais utilizados para o ensaio de Números de Vazios do Agregado Graúdo.	39
Figura 3.6 - Materiais para o ensaio de Granulometria Agregados Miúdo.	40
Figura 3.7 - Materiais para o ensaio de Massa Especifica do Agregado Miúdo.	40
Figura 3.8 - Materiais para o ensaio de Número de Vazios do Agregado Miúdo.	41
Figura 3.9 - Materiais para o ensaio de Equivalente a Argila do Agregado Miúdo.	42
Figura 3.10 - Representação da Fibra de Aço Hooked Marca Dramix.	43
Figura 3.11 - Características Fibras.	43
Figura 3.12 - Fibra de Aço Crimped da Marca Sheikan.	44
Figura 3.13 - Realização do Ensaio de Slump Test.	45
Figura 3.14 - A) Prensa Hidráulica – mod: EMIC e (B) Corpo de prova.....	47
Figura 3.15 - Equipamentos para Verificar o Módulo de elasticidade.	48
Figura 3.16 - Procedimento de Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos.....	49
Figura 3.17 - Procedimento de Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos.....	50
Figura 3.18 - Ilustração do ensaio de compressão diametral.....	51
Figura 3.19 - Fluxograma de métodos de elementos finitos.....	52
Figura 3.20 - Modelo computacional utilizado.....	53
Figura 4.1 - Granulometria do Agregado Graúdo.....	57
Figura 4.2 - Granulometria do Agregado Miúdo.	57
Figura 4.3 - Tanque de cura úmida.	59

Figura 4.4 - Resultados do Ensaio de compressão com 28 dias de cura.	60
Figura 4.5 - Resultados com período de cura de 7,14,21 e 28 dias	61
Figura 4.6 - Deformação de ensaio de compressão diametral.	62
Figura 4.7 - Módulo de elasticidade.	63
Figura 4.8 - Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem padrão. 64	
Figura 4.9 - Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem Crimped 2%.....	64
Figura 4.10 - Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem Hooke 2%.....	64
Figura 4.11- Modelagem no traço Padrão.	65
Figura 4.12 - Modelagem no traço 1% de fibra Crimped.....	66
Figura 4.13 - Modelagem no Traço 1,5% de fibra Crimped.	66
Figura 4.14 - Modelagem no traço 2 % de fibra Crimped.....	67
Figura 4.15 - Modelagem no traço 1% de fibra Hooked.	67
Figura 4.16 - Modelagem na dosagem 1,5% de fibra Hooked.	68
Figura 4.17 - Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.	68
Figura 4.18 - Modelagem no traço Padrão.	69
Figura 4.19 - Modelagem no traço 1% de fibra Crimped.....	70
Figura 4.20 - Modelagem no traço 1,5% de fibra Crimped.....	70
Figura 4.21 - Modelagem no Traço 2% de Fibra Cimped.	71
Figura 4.22 - Modelagem no traço 1% de fibra Hooked.	71
Figura 4.23 - Modelagem no traço 1,5% de fibra Hooked.	72
Figura 4.24 - Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.	72
Figura 4.25 - Modelagem no traço Padrão.	73
Figura 4.26 - Modelagem no traço 2% de fibra Crimped.....	74
Figura 4.27 - Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.	74
Figura 4.28 - Modelo computacional da Tela soldada em aço galvanizado.....	75
Figura 4.29 - Modelo Computacional P1.	76
Figura 4.30 - Modelo Computacional P2.	78
Figura 4.31 - Modelo Computacional P3	79
Figura 4.32 - Modelo Computacional P4.	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

ABCP = Associação de Concreto Portland

ANAPRE = Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

f_{R3k} = Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao **CMOD3**

f_{R1k} = Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao **CMOD1**

f_{IK} = Resistência característica à tração na flexão do CR

f_{R3k} = Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao **CMOD3**

$f_{R,1k}$ = Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao **CMOD1**

f_{IK} = Resistência característica à tração na flexão do CR

f_{Ftuk} = Resistência característica última à tração direta do CRF.

f_{Ftsm} = Resistência média à tração direta do CRF.

f_{ctm} = Resistência média do concreto à tração direta, estimada como sendo $f_t = 0,9f_{ctsp}$; 37 F_{tsm} = Resistência média à tração direta do CRF;

A_{ct} = Parcela da seção transversal do concreto tracionado, considerando a tensão no limite elástico;

σ_s = Tensão máxima no aço no estágio de fissuração, podendo ser considerado igual à tensão de escoamento do aço;

kc = Coeficiente que considera a distribuição da tração na seção transversal um pouco antes da fissuração e da alteração do braço de alavanca interno. Para seções retangulares $kc = 1$;

k = Coeficiente que considera a não uniformidade das tensões internas no concreto reforçado com fibras e armadura convencional. Para vigas com altura de mesa inferior a 300 mm, $k = 1,0$.

F_{Ri} = corresponde a carga no CMOD_i;

L e b = representam o comprimento e a largura da viga entalhada, respectivamente;

h_{sp} = é a altura do final do entalhe à face superior da viga. A tensão referente ao limite de proporcionalidade,

f_L = também é calculada admitindo uma distribuição linear das tensões na seção transversal da viga entalhada, através de equação

f_c = resistência à compressão (Mpa);

V = Velocidade de propagação de ondas (m.s⁻¹);

T = tempo (s);

ρ = densidade do concreto (kg.m⁻³);

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (GPa).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 <i>OBJETIVO GERAL</i>	16
1.3.2 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 CONCRETO	18
2.2 PAVIMENTO RÍGIDO	19
2.3 PAVIMENTO DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO.....	20
2.4 FIBRAS DE AÇO	22
2.4.1 <i>Classificação e Comprimento das Fibras</i>	25
2.5 AGREGADOS MIÚDO E GRAÚDO.....	26
2.6 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS	27
2.7 COLETÂNEA DE ARTIGOS DE PESQUISAS COM FIBRAS APLICADA EM CONCRETO	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.1.1 <i>Cimento</i>	34
3.1.1.1 FINURA DO CIMENTO CP II E 32	35
3.1.1.2 MASSA ESPECIFICA DO CIMENTO CP II E 32	36
3.1.2 <i>Agregados graúdo</i>	37
3.1.2.1 GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO	37
3.1.2.2 MASSA ESPECIFICA DO AGREGADO GRAÚDO	37
3.1.2.3 NÚMERO DE VAZIOS DO AGREGADO GRAÚDO	38
3.1.3 <i>Agregados Miúdo</i>	39
3.1.3.1 GRANULOMETRIA AGREGADOS MIÚDO.....	39
3.1.3.2 MASSA ESPECIFICA DO AGREGADO MIÚDO	40
3.1.3.3 NÚMERO DE VAZIOS DO AGREGADO MIÚDO	41
3.1.3.4 EQUIVALENTE AREIA PARA O AGREGADO MIÚDO	41
3.1.4 <i>Fibras de aço</i>	42

3.1.4.1	FIBRA DE AÇO DRAMIXHOKED	42
3.1.4.2	FIBRA DE AÇO SHEIKANCRIMPED	44
3.2	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	45
3.2.1	<i>Ensaio de caracterização do concreto no estado fresco Slump Test</i>	45
3.2.2	<i>Ensaio de compressão</i>	46
3.2.3	<i>Ensaio de módulo de elasticidade</i>	47
3.2.4	<i>Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos Rilem 162 (TDF, 2002)</i>	48
3.2.5	<i>Compressão diametral</i>	49
3.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS	51
3.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL NÃO LINEAR DO PISO INDUSTRIAL.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	56
4.2	MÉTODO DE DOSAGEM DO CONCRETO	58
4.3	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	59
4.4	COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA	61
4.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE	62
4.6	TRAÇÃO NA FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	63
4.7	MODELAGEM COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS	65
4.7.1	<i>Modelagem abaqus do ensaio de Compressão</i>	65
4.7.2	<i>modelagem computacional do ensaio de compressão diametral</i>	69
4.7.3	<i>Modelagem Computacional Para o Ensaio a Flexão em 3 pontos</i>	73
4.7.4	<i>Modelagem computacional não linear de pavimento rígido</i>	75
5	CONCLUSÕES.....	80
6	SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	82
7	CRONOGRAMA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
REFERÊNCIAS	83	
ANEXOS	88	

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O concreto reforçado com fibras é um material relativamente recente, que tem sido muito estudado nas últimas duas décadas. Já foi comprovado que em diversos aspectos, apresenta características superiores ao concreto simples. O concreto com fibras de aço ou outro tipo de fibra apresenta a maior resistência a fissuração, impacto e desgaste, além de possuir maior ductilidade. Por essas razões o concreto com fibras está sendo cada vez mais utilizado em estrutura como: pavimentos de aeroportos, pavimento de autoestradas, leito de pontes, pisos industriais, estrutura de suporte de máquinas, dormentes e tanques de estocagem (Oliveira, 2000). Pavimentação rígida com a utilização de fibras de aço eventualmente vem sendo utilizadas em pavimentação industrial podendo ser até pré-moldadas ou fabricadas *in-loco*, mais ainda, esses elementos têm formas simples e de fácil e rápida execução, em muitos casos, substituindo parcialmente as ferragens ou havendo apenas uma diminuição. Já em pesquisas mais recentes com ênfase no aprimoramento da utilização de fibras de aço, o autor Santos et al (2020), cita como as fibras de aço apresentam formatos bastante variáveis com o intuito de elevar a sua aderência com a matriz cimentícia.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto é um material de comportamento frágil e mesmo sendo muito utilizado, não atende à todas as necessidades que surgem, como por exemplo: fissuras por retração, fissuração pelo peso próprio, pouco resistente a tração, todavia, pode-se adicionar fibras de aço com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, como a tração e do módulo de elasticidade. No caso de pisos industriais que são sujeitos a variação frequentes de cargas, tanto em termos de compressão quanto de tração, a adição de fibras pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas do concreto. Os sistemas de pavimentação industrial, como um segmento

especializado do setor da construção, têm recebido cada vez mais atenção em virtude dos crescentes requisitos de qualidade e exigências de performance estrutural (PEIXOTO, 2022).

A execução de pisos industriais, na década de 1970, era realizada formando-se quadros de 25 metros quadrados com formatos de tabuleiro de jogo de xadrez. A qualidade final do piso produzido era muito distante das exigências impostas pelos fabricantes de equipamentos de rodagem para a operação de galpões de armazenagem, supermercados, depósitos e pavimentos industriais.

No Brasil, por volta de 1980, surgiram as primeiras empresas especializadas na produção de pisos industriais que adotavam novos processos executivos e equipamentos modernos e específicos para a atividade. Este setor da construção logo se fixou no mercado, tornando-se impossível imaginar a execução de pavimentações de concreto para indústria sem a contratação de uma empresa especializada. O Brasil tornou-se um dos países líderes no dimensionamento de pavimentos industriais com completo domínio das técnicas de projeto e execução. A produção de pisos industriais no mercado brasileiro vem crescendo em grande proporção, apresentando bons resultados tanto do ponto de vista econômico como da sustentabilidade pela utilização de menor quantidade de insumos para a obtenção de resultados satisfatórios (PETRONILHO; SOGOLO, 2011).

As estruturas de concreto são suscetíveis a um inevitável estado de fissuração, devido a sua natureza não homogênea, podendo levar a manifestações de grandes patologias. Em razão de determinada proporção de abertura das fissuras e do ambiente no qual a estrutura se encontra inserida, agentes agressivos podem comprometer a sua durabilidade ou mesmo levar a sua ruína (SANTOS, 2019). Silva et al. (2019) afirmam que a adição de fibras ao concreto pode constituir uma alternativa interessante para o controle das patologias, como demonstram os estudos realizados por Figueiredo (1992), Akasaki (2001), Bentur e Mindess (2007), Battaglin (2007), Chun et al. (2007), Goes et al. (2016), Oliveira (2014), Lucena (2017) e Ehrenbring et al. (2018), Herscovic et al. (2019), tais fatores, observarem a redução do comportamento frágil do concreto com adição de fibras de aço, obtiveram como resultado a redução de trincas e fissuras na matriz de concreto. Além melhoramento no controle de fissuras, o reforço do concreto com fibras de aço (CRFA) pode proporcionar contribuir para o aumento da capacidade de absorção de tenacidade (PEIXOTO, 2022).

Concreto com adição de Fibras começou a ser usado a partir de 1990 no Brasil sendo como alternativa à armadura convencional por fibras de aço ou sintéticas, tendo como objetivo reduzir a mão-de-obra de armação e uma execução mais rápida. A utilização da fibra de aço no projeto deve ser feita seguindo as especificações de acordo com os critérios estabelecidos pela

norma brasileira (NBR 15530), fibras de aço para concreto. A norma define parâmetros de classificação para todos os tipos de fibras de aço, estabelecendo os requisitos mínimos referentes à sua forma geométrica, tolerâncias dimensionais e resistência mecânica.

A fabricação de pisos industriais com adição de fibras de aço no Brasil teve um grande impulso na década de 90 por conta da estabilidade econômica iniciada nessa época e com efeito do maior intercâmbio intelectual com outros países. Uma admirável revolução tecnológica se fez presente neste período em função das exigências do mercado em especial para as grandes redes varejistas que expandiam e ainda hoje ampliam seus entrepostos comerciais, para atender a demanda cada vez mais crescente de consumidores. Dados obtido com o primeiro fabricante de fibras de aço para otimização do concreto no Brasil foi a empresa VulkanGroup, com as fibras Harex (FERNANDES, 2005). A criação de projetos específicos para atender as necessidades da obra é uma solução para o desenvolvimento de especificações responsáveis por atender as exigências operacionais, solicitações e carregamentos do piso em vista do desgaste provocado por ação de agentes químicos e mecânicos (RODRIGUES, 2006).

O trabalho tem o objetivo de analisar os efeitos da adição de fibras de aço e estabelecer os requisitos mínimos referentes à sua forma geométrica, tolerâncias dimensionais e resistência mecânica. Esta pesquisa tem como foco analisar os efeitos da adição 1%, 1,5% e 2% de fibras de aço do modelo Hooked e Crimped na matriz de concreto em pisos industriais, pois estes tipos de fibras de aço têm grande demanda no mercado nacional e apresenta diferentes geometrias e propriedades mecânicas, sendo regulamentado pela norma NBR 15530 (ABNT, 2019).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Analizar os efeitos da adição de fibras de aço do modelo Hooked e Crimped sobre as propriedades de matriz de concreto destinadas a pisos industriais.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar as propriedades mecânicas do concreto com e sem adição de fibras de aço, fazendo uma análise comparativa do estado fresco e endurecido;
- b) Avaliar o comportamento da adição das diferentes porcentagens das fibras de aço na matriz de concreto para aplicação em pisos industriais;
- c) Analisar computacionalmente pelo método de elementos finitos, os resultados dos ensaios com os corpos de prova e a modelagem computacional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO

O material mais utilizado no mundo da construção é o concreto por ter um valor relativamente baixo e alta durabilidade, além de proporcionar boa resistência à compressão. O concreto basicamente é um material constituído por cimento, agregados graúdo e miúdo e água. Mesmo sendo muito utilizado, o concreto pode não atender à todas as exigências tecnológicas já que o mesmo é um material frágil e com baixa resistência à tração. Devido a este motivo surgiu a necessidade de adicionar ao concreto alguns materiais, para melhoria das suas propriedades mecânicas, químicas e físicas, tais como adições minerais, aditivos plastificantes, fibras, entre outros. Tais adições ajudam a melhorar as características básicas do concreto, fazendo com que ele ganhe resistência, ductilidade e trabalhabilidade (MEDEIROS, 2012).

No Brasil, vários tipos de cimento Portland são produzidos e se diferem, principalmente, com relação à sua composição. O cimento Portland (CP) pode ser classificado por suas resistências à compressão: 25 MPa, 32 MPa ou 40 MPa, as quais representam os valores mínimos que devem ser alcançados, aos 28 dias de idade (período de cura).

Os cimentos CP II-E-32, CP II-E-40 e CP III-40 RS se refere a cimentos que têm sua massa composta de escória de alto-forno, com resistência mínima de 32 MPa e 40 MPa para o cimento CP II, e de 40 MPa para o CP III.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o primeiro concreto com fibras empregado como meio estrutural foi em 1971 na produção de painéis que foram utilizados no estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres. Este fator demonstra que o emprego de fibras em concreto influencia positivamente em suas propriedades mecânicas, devido ser utilizado desde antigamente e nota-se que mesmo sem um estudo mais aprofundado, o emprego dessas fibras já acontecia Segundo Tamaki (2011), quando o concreto está no processo de endurecimento poderão surgir fissuras devido à retração, ação térmica, movimentação estrutural, dentre outras. Neste caso, para cada tipo de situação tem-se uma fibra específica, onde deve ser avaliada a necessidade e função esperada para escolher a ideal no momento.

A Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE, 2018) define piso industrial como sendo um elemento estrutural com finalidade de resistir e

distribuir os esforços verticais proveniente dos carregamentos ao subleito. Além de resistir esforços mecânicos, químicos e biológicos, o piso industrial é considerado um elemento de grande importância para logística de operação das empresas, viabilizando a movimentação de cargas e veículos. O concreto utilizado em pisos industriais deve seguir algumas especificações técnicas, de forma a buscar um melhor desempenho e, segundo a Dal-Maso (2008), devem ser avaliadas características como: granulometria do agregado, espessura do piso, o teor de argamassa, sua consistência, a resistência, relação água/cimento (a/c) e o consumo de cimento. Dessa forma, quando os pisos forem dimensionados e executados corretamente, as fibras podem melhorar seu desempenho da matriz cimentícia.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II-E-32 tem as seguintes aplicações na construção civil: Artefatos de cimento e blocos de concreto; Lajes, pisos industriais e calçadas; Fundações; Argamassas de assentamento e revestimento; Estruturas de concreto; Trabalhos de emergência ou reparos de construções, como em bases de máquinas e instalações onde faz-se necessária uma cura mais rápida.

Para o dimensionamento proposto neste trabalho, terá como base todas as orientações prescritas no documento elaborado pela Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT).

2.2 PAVIMENTO RÍGIDO

Seguindo o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), conforme as orientações da norma 066 (DNIT, 2004) de Pavimento rígido e construção com peças pré-moldadas de concreto, as peças deverão atender as exigências da norma NBR 9781(ABNT, 2013) devendo ter formato geométrico regular e as seguintes dimensões mínimas: comprimento de 40 cm, largura de 10 cm e altura de 6 cm. A verificação da resistência das peças poderá ser feita pelo esclerômetro, que elas tenham idade entre 15 e 60 dias, conforme a norma NBR 7584 (ABNT, 2012). O cálculo estrutural é conduzido de acordo com as prescrições da Norma NBR 6118 (ABNT, 2023), considerando-se que a sua resistência seja superior a 25 MPa com o grau de solicitação imposto aos pavimentos (DNIT, 2005).

2.3 PAVIMENTO DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO

Ao incorporar fibras de aço na mistura de concreto, esse tipo de piso é capaz de suportar tráfego intenso e condições climáticas adversas sem fissurar excessivamente. As fibras atuam como reforço dentro da estrutura de concreto, proporcionando maior resistência e flexibilidade. Além disso, com sua aparência elegante e moderna, o pavimento de concreto com adição de fibras de aço certamente aumentará o apelo estético de qualquer edifício ou espaço externo.

Outros autores, como é o caso de João (2014) e de Ribeiro (2016), especificam ainda que a interação entre a laje e os materiais de suporte é fundamental para o funcionamento adequado de todo o pavimento. Camadas essas que, apesar de serem realizadas em momentos distintos, funcionam como um conjunto de mecanismos integrados num único sistema construtivo, como podemos citar o subleito, sub-base, junta com tratamento e a laje.

De modo geral, essa técnica tem se mostrado uma excelente opção para projetos em grandes áreas como pistas de rodagem e estacionamentos comerciais. As fibras de aço trazem muitos benefícios para o projeto final e podem ser consideradas uma escolha inteligente para garantir maior segurança e qualidade aos usuários desses espaços públicos.

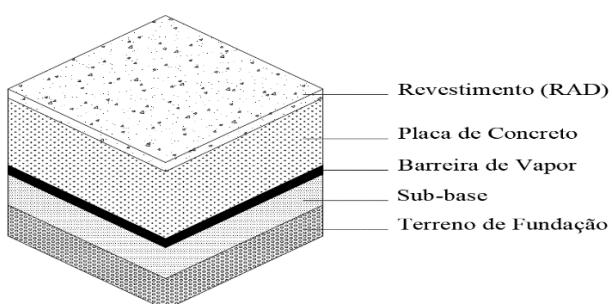
As fibras funcionam aumentando a resistência à tração do concreto, impedindo-o de rachar ou quebrar sob pressão. Isso não apenas significa menos manutenção ao longo do tempo, mas também garante que seu pavimento dure mais e tenha uma aparência melhor nos próximos anos (PEIXOTO, 2022).

Concreto com adição de Fibras começou a ser usado a partir de 1990 no Brasil sendo como alternativa à armadura convencional por fibras de aço ou sintéticas (macrofibras). Tendo como objetivo reduzir a mão-de-obra de armação e uma execução mais rápida. Colocadas na mistura do concreto com o desígnio de alterar a característica mecânica do concreto, passando de um material frágil para um material tenaz e dúctil. Há um atributo econômico no uso das fibras de aço, por não ser necessário cortar e armar as ferragens e podendo lançar o concreto diretamente no local de aplicação por deixar a área de piso livre para o tráfego dos caminhões betoneira. A utilização da fibra de aço no projeto deve ser feita seguindo as especificações de acordo com os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 15530 (ABNT, 2019) – Fibras de Aço para Concreto. A norma define parâmetros de classificação para todos os tipos de fibras de aço, estabelecendo os requisitos mínimos referentes à sua forma geométrica, tolerâncias dimensionais e resistência mecânica.

A Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPE), publicou por meio do seu site a definição de piso industrial como sendo um elemento estrutural no qual a parte produtiva de uma empresa realiza as suas atividades (ANAPE, 2009). Então, como um elemento estrutural, esse sistema tem a função de resistir e transferir os esforços verticais advindos dos carregamentos para o subleito. Assim, para que uma rede de funcionários realize as suas atividades sobre o piso, este necessita resistir à movimentação de carga, de deslocamento de maquinários e de equipamentos, atendendo a todos os requisitos de segurança e qualidade. Entretanto, além da função estrutural, é necessário garantir a funcionalidade operacional da empresa em seu dia a dia, tornando o piso industrial um dos componentes mais importantes do processo produtivo de um galpão industrial.

As funções do piso industrial é resistir aos esforços mecânicos, como flexão, compressão ao impacto e a abrasão, as agressões químicas e biológicas como ácidos e bactérias, e a facilidade na limpeza da superfície para evitar o desgaste e componentes indesejados. Assim, há uma estrutura básica a ser executada para o apoio do piso industrial, em que consiste no subleito, como sendo a fundação do pavimento, podendo ser acrescentada de duas camadas, regularização e reforço; a sub-base, que tem por finalidade realizar um nivelamento da camada inferior e possuir um índice de resistência maior; a barreira de vapor, constituído por uma lona, que tem por finalidade conter e suprimir a umidade entre a sub-base e o piso; a placa de concreto, que adere as finalidades próprias de base e acaba sendo o próprio pavimento industrial; e por fim o Revestimento de Alto Desempenho (RAD), que quando for necessário o seu emprego, tem por finalidade adicionar propriedades específicas do pavimento, como resistência química, resistência ao desgaste superficial, impermeabilização, entre outras. (CHODOUNSKY & VIECILI, 2007). Na Figura 2.1, mostra detalhadamente as etapas construtivas do sistema de piso industrial.

Figura 2.1 - Camadas que compõe o piso industrial.



Fonte: Autor (2024).

Inúmeras patologias podem ser encontradas em pisos industriais, onde podemos ressaltar as fissurações, que podem ser observadas quando a retração, que é caracterizada pela redução de volume do concreto, quando incide no estado fresco pode acontecer por assentamento plástico e por retração plástica. (STORCH, 2023) , quando ocorre no estado endurecido é conhecida por retração por secagem (REBMANN, 2011) , a retração autógena advém da saída da água dos poros em consequência da hidratação do cimento ainda não hidratado, ocorre após a pega (STORCH, 2023). Esse efeito é mais elevado em concretagem com altas temperaturas, elevado consumo de cimento, utilizando-se cimento mais fino, e utilizando-se cimento com elevados teores de C3A e C4AF (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Apesar do sistema de piso de concerto reforçado com fibras apresentar inúmeras vantagens, o controle tecnológico do concerto deve ser bastante cuidadoso. É fundamental observar critérios quanto a distribuição homogênea das fibras nas placas de concreto, assegurando comportamento previsto em projeto e evitando formação de "ouriços" (bolas formadas pela aglomeração de fibras) que comprometem o desempenho do material e prejudicam os processos de concretagem, com prováveis entupimentos dos dutos de lançamento. Este processo pode ser controlado a partir de estudos das empresas responsáveis pelo fornecimento do concreto (CRISTELI, 2010)

2.4 FIBRAS DE AÇO

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o primeiro concreto com fibras empregado como meio estrutural foi em 1971 na produção de painéis que foram utilizados no estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres. Este fator demonstra que o emprego de fibras em concreto influencia positivamente em suas propriedades mecânicas, devido ser utilizado a um período de tempo longo, nota-se que mesmo sem um estudo mais aprofundado, o emprego dessas fibras já acontecia.

Segundo Tamaki (2011), quando o concreto está no processo de endurecimento poderão surgir fissuras devido a retração, ação térmica, movimentação estrutural, dentre outras. Neste caso, para cada tipo de situação tem-se uma fibra específica, onde deve ser avaliada a necessidade e função esperada para escolher a ideal no momento. As fibras naturais têm a função de minimizar aquelas fissuras derivadas da retração plástica do concreto, já as estruturais

são utilizadas quando são submetidos a cargas maiores, devido a característica desta fibra de resistência residual pós-fissuração no concreto, podendo ser de aço ou macrofibras poliméricas. Se empregado com sabedoria, os produtos obtidos serão de elevado controle de qualidade (ONUKI; GASPARETTO, 2013).

O concreto utilizado em pisos industriais deve seguir algumas especificações técnicas, de forma a buscar um melhor desempenho e, segundo a Dal-Maso (2008), devem ser avaliadas características como: granulometria do agregado, espessura do piso, o teor de argamassa, sua consistência, a resistência axial, relação água/cimento (a/c) e o consumo de cimento.

As especificações da NBR 15530 (ABNT, 2019), norma brasileira de fibras de aço, classifica as fibras de aço e as especifica quanto as exigências, podemos ver na Figura 2.2, a classificação e geometria.

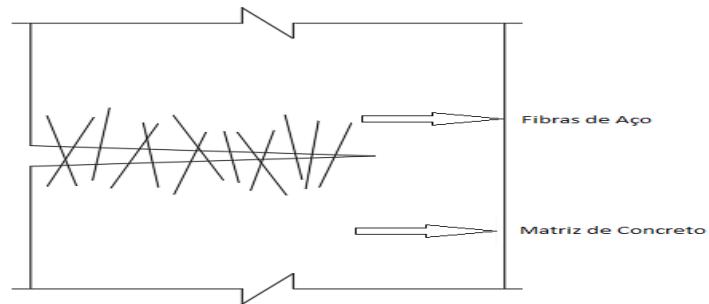
Figura 2.2 - Classificação e Geometria das Fibras de Aço.

GEOMETRIA	TIPO GEOMETRIA	CLASSE DE FIBRA
	A	I
		II
	C	I
		II
	R	III
		I
		II

Fonte: ABNT NBR 15530 (2019).

Segundo Figueiredo (2000), quando se insere fibras no concreto a sua composição deixa de ter características frágeis. Pelo motivo de servir como ponte de transferência de tensões para as fissuras, diminuindo assim a concentração de tensões nas regiões das extremidades, conforme a Figura 2.3, por este motivo é possível adquirir uma grande redução na velocidade de propagação das fissuras no concreto passando assim ter um comportamento pseudo-ductil, esse comportamento é a capacidade cortante pós-fissuração.

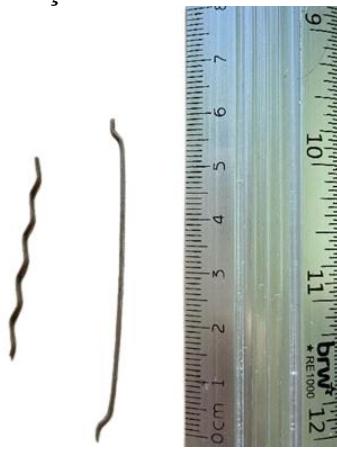
Figura 2.3 - Efeito da transferência de tensões com fibras de Aço.



Fonte: Autor (2024).

As fibras de aço dos modelos do tipo Hooked e Crimped têm a função de reforçar estruturas de concreto, devido a sua geometria e textura que aumentam durabilidade e a resistência do concreto quando adequadamente dosado. A ancoragem mecânica nas fibras de aço é usualmente imposta por meio de inserção de ganchos nas extremidades por um processo de corrugação ao longo do comprimento da fibra (ALMEIDA, 2023). Na Figura 2.4, podemos notar a diferença da geometria das fibras de aço e seu comprimento em comparação entre as mesmas.

Figura 2.4 - Fibras de Aço do Modelo Hookeed (A) e Crimped (B).



Fonte: Autor (2024).

O modelo Hooked apresenta extremidades em forma de gancho que proporcionam um efeito de interligação entre a fibra e a matriz de concreto, aumentando a sua ancoragem, este é o tipo mais comum no mercado brasileiro. Enquanto o modelo Crimped possui ondulações ao longo de seu comprimento que melhoram a aderência com o material introduzido. Ambos os

modelos podem suportar altos níveis de carga e condições extremas, tornando-os ideais para uso em aplicações industriais pesadas, como aeroportos ou pontes. As fibras de aço são, sem dúvida, um dos avanços mais significativos na moderna tecnologia de construção.

O Brasil conta com uma norma de especificação para as fibras de aço, a NBR 15530 (ABNT, 2019). Esta norma apresenta avanços no ramo das fibras de aço, visto que contribui com a definição de uma tipologia e classificação das fibras, permitindo o estabelecimento de requisitos e tolerâncias específicas dos materiais utilizados em que antes era apenas para normas internacionais.

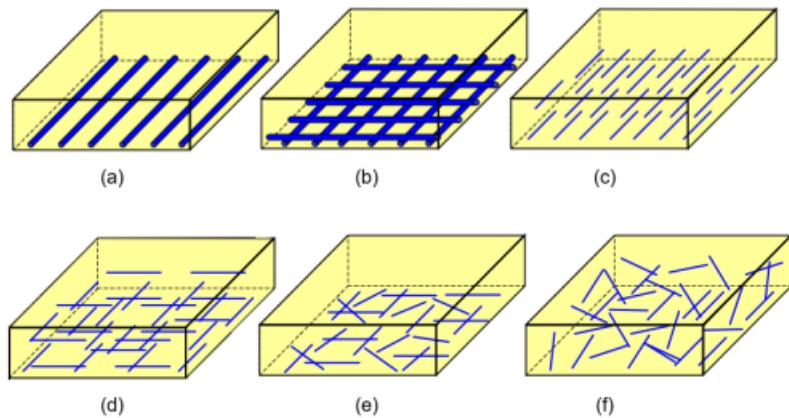
As propriedades mais expressivas da fibra se dão pelo módulo de elasticidade e a resistência mecânica. As fibras de aço são conhecidas pelo alto módulo de elasticidade, pois apresentam módulo de elasticidade maior que a matriz de concreto.

2.4.1 Classificação e Comprimento das Fibras

Segundo os parâmetros das NBR 15530 (ABNT, 2019), a classificação das fibras utilizadas nesta pesquisa é do modelo Hooked AI e do modelo Crimped CII. Em relação ao diâmetro e o comprimento destas fibras de aço Hooked (diâmetro 0,75mm e comprimento 60mm) e Crimped (diâmetro de 1mm e comprimento 50mm) que foram medidos através de um paquímetro.

As fibras podem se apresentar na massa de concreto com diferentes configurações dependendo da tecnologia utilizada no desenvolvimento do compósito, por outro lado, as fibras podem possuir uma orientação randômica na matriz, em que fibras curtas são inseridas aleatoriamente na mistura (ALMEIDA, 2023). Para esta pesquisa foi utilizada a configuração f, distribuição aleatória fibras de aço, conforme Figura 2.5.

Figura 2.5 - Modelos de orientações das fibras.



Fonte: LÖFGREN (2005).

A influência da orientação da fibra sobre o comportamento mecânico do CRF é usualmente avaliada por meio do fator de eficiência da fibra, que expressa a relação entre uma fibra orientada em um ângulo ϕ e uma fibra alinhada na direção do esforço (BENTUR; MINDES2007; SALVADOR, 2013).

A NBR 16935 (ABNT, 2021) utiliza como parâmetro de dimensionamento as resistências residuais causadas pelas fibras de aço e A NBR 16935(ABNT, 2021) recomenda que para a substituição total ou parcial da armadura convencional nas peças de concreto dimensionadas no estado-limite último com CRF possa ser feita, as seguintes relações devem ser atendidas:

$$f_{R1K}/f_{IK} \geq 0,40 \quad (1) \text{ ou } f_{R3K}/f_{R1K} \geq 0,50 \quad (2)$$

sendo,

f_{R3K} = Resistência residual característica à tração na flexão do CRFA

f_{R1K} = Resistência residual característica à tração na flexão do CRFA

f_{IK} = Resistência característica à tração na flexão do CRFA

2.5 AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS

Com base a orientações para os agregados a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), no qual constitui o método de ensaio para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdo e graúdo para argamassa e concreto de cimento Portland.

A Tabela 2.1 mostra as peneiras e sua classificação quanto a normal e intermediária, este ensaio serve para verificar a massa retida em cada peneira, tendo como base duas amostras e não podendo ultrapassar 4% de diferença de uma amostra em relação outra em cada massa retida.

Tabela 2.1 - Peneiras e classificação das peneiras utilizadas.

Peneiras	Série
75 mm	Normal
63 mm	Intermediária
50 mm	Intermediária
37,5 mm	Normal
31,5 mm	Intermediária
25 mm	Intermediária
19 mm	Normal
12,5 mm	Intermediária
9,5 mm	Normal
6,3 mm	Intermediária
4,75 mm	Normal
2,36 mm	Normal
1,18 mm	Normal
0,6 mm	Normal
0,3 mm	Normal
Fundo	

Fonte: ABNT NBR17054 (2022).

2.6 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

Este tópico descreve as etapas de geração do modelo em 3D dos corpos de prova pelo métodos elementos finitos utilizados nesta pesquisa que se basearam nos resultados dos ensaios experimentais para obter mais detalhes das propriedades mecânicas deste material tais como:

início de deformações, propagação e formação de fissuras e o comportamento interfacial que podem ser analisados pelo métodos dos elementos finitos em detalhes(OYEBANJI et tal, 2023).

O software Abaqus é amplamente utilizado para a análise pelo método dos elementos finitos dentro de projetos de engenharia estrutural e de projeto mecânico (COSTA, 2022), e é solução numérica para simular o comportamento de compósitos com grande aproximação dos dados experimentais (PORFIRIO et tal, 2023).

Para esta pesquisa, foram seguidas as seguintes etapas para a modelagem dos corpos de prova pelo método dos elementos finitos pelo programa Abaqus:

1. Criação dos elementos;
2. Adição de material;
3. Adição de malha;
4. Adição de apoios;
5. Adição de carregamentos;
6. Montagem de elementos;
7. Geração dos modelos e resultados.

2.6.1 Modelo Concrete Damage Plasticity Model (CDP)

Para esta pesquisa utilizou-se o modelo Concrete Damaged Plasticity Model (CDP), utilizando-se dois mecanismos, ruptura por tração e esmagamento por compressão no programa ABAQUS, inserindo os dados seguindo a ordem:

Concreto densidade = 2.4e-009;
 Modulo = 26630 poisson = 0.2;
 Dilatação = 38;
 Excentricidade = 0.1;
 Relacao fb0/fc0 = 1.16, k = 0.667;
 Viscosidade = 0.002 ;
 Neoprene modulo = 1.5;
 Poisson = 0.25, aço densidade 7.85e-009;
 Modulo = 243830;
 Poisson = 0.3;

Yield = 573;

Strain = 0.

2.6.2 Parâmetros do Modelo

As deformações plásticas equivalentes de tração e de compressão são definidas por ε^{pl}_T e ε^{pl}_C . Para compressão e tração uniaxiais, a relação constitutiva do concreto conforme Costa (2018):

$$\text{Eq. } \sigma_c = (1-1) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon^{pl}_c).$$

$$\text{Eq. } \sigma_T = (1-4) E_0 (\varepsilon_T, -\varepsilon^{pl}_T).$$

Para carregamentos cíclicos uniaxiais, assume-se a variável d para um dano efetivo que denota a degradação do módulo de elasticidade inicial E , a partir de

$$\text{Eq. } E = (1-d) E_0.$$

onde E é o módulo tangente reduzido. O dano efetivo é dado por

$$\text{Eq. } 1-d = (1-s_1 d_1)(1-s_c d_c).$$

onde d , s_1 e s_c são os danos na compressão e na tração, respectivamente. O dano efetivo d se diferencia do dano D do Modelo de Lee e Fenves (1998) devido aos coeficientes adimensionais s , que se relacionam com o estado de tensões e recuperação de rigidez. Eles são dados por

$$\text{Eq. } s_c = 1 - h_c (1 - r^* (\sigma_{11})).$$

$$\text{Eq. } s_t = 1 - h_t r^* (\sigma_{11}).$$

onde é a primeira tensão principal (positiva para tração); r é o parâmetro de estado de tensão; e h_c e h_t , são fatores peso que variam entre 0 e 1. O fator k se relaciona com o fechamento de fissuras após a carga passar de tração para compressão, enquanto que o fator h_t , representa a recuperação no esmagamento após a carga passar de compressão para tração. Em outras palavras, se $h_c = 0.90$ representa que 90% das fissuras se fecham após o carregamento reverso. Generalizando para o caso multiaxial, tem-se que $\sigma = (1-4)E: (\varepsilon - \varepsilon_0)$. A função de escoamento F (JANKOWIAK, LODYGOWSKI, 2005; ALFARAH et al., 2017) é dada por

$$\text{Eq. } F = \frac{1}{1-\alpha} (q - 3\alpha p + \beta \langle \sigma_{max} \rangle - \gamma \langle -\sigma_{max} \rangle) - \sigma_c$$

$$\text{Eq. } \alpha = \frac{(f_{b0}/f_{c0}) - 1}{2(f_{b0}/f_{c0}) - 1}, \beta = \frac{(\sigma_c)}{(\sigma_c)} (1 - \alpha) - (1 + \alpha), \gamma = \frac{3(1 - k_c) - 1}{2k_c - 1}.$$

onde p a tensão de pressão hidrostática; q é a tensão desviadora: f_{b0} e f_{c0} infty são as resistências à compressão de escoamento bi e uniaxial, respectivamente, obtidas experimentalmente; σ_{max} é a máxima tensão principal efetiva; e k_c é a razão entre os segundos invariantes de tensão na tração e compressão. O modelo de plasticidade considera um potencial de fluxo não associativo como sendo a seguinte função hiperbólica de Drucker-Prager

$$\text{Eq. } G = \sqrt{(\epsilon \theta_{r0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi$$

Onde θ_{r0} é a tensão de tração uniaxial nescoamento; ϵ é a excentricidade da superficie de escoamento; e ψ é o ângulo de dilatância medido no plano desviador ($p-q$) em altas tensões de confinamento. (Costa, 2018)

2.7 COLETÂNEA DE ARTIGOS DE PESQUISAS COM FIBRAS APLICADA EM CONCRETO

O concreto é um material frágil e suas estruturas e componentes para pisos industriais estarão sujeitos sofrer cargas de impacto e solicitações de cargas repetidas durante sua vida funcional. (ABID et tal, 2020). Os engenheiros e pesquisadores têm se deparado com problemas cada vez mais complexos em decorrência dos crescentes esforços nas estruturas de concreto para pisos industriais (CÔRREA, 2020). Nas primeiras aplicações das fibras de aço utilizou-se fios planos e fios torcidos com faces planas e após fibras anulares, com diferentes tamanhos e diâmetros com o objetivo de melhorar a resistência à fissuração do concreto para pisos industriais (ASACHI, 2006).

Atualmente a utilização das fibras de aço incorporadas ao concreto abrange diversas aplicações, não apenas para pavimentação, incluindo lajes industriais, trilhas, rodovias e pisos industriais (SHI FEN et tal, 2023).

Alguns trabalhos de pesquisa do concreto com adição de fibras de aço e sintéticas foram feitos utilizando porcentagens de fibras variando de 0,25 % a 2,6 % como pode ser observado na tabela Tabela 2.2.

Tabela 2.2 -Tabela de Adição de Fibras no Concreto do estudo do Wendland

Traço	Características	ð g	%*	(mm)	ã g	9%	(mm)
TO1	Referência	0	0,00%	100	19,20	0,13%	150
TO2	Fibra de aço (0,60%)	19,20	0,13%	105	45,05	0,30%	145
TO3	Fibra de aço (0,80%)	19,20	0,13%	40	76,50	0,50%	175
TO4	Fibra Sintética (0,60%)	19,20	0,13%	80	45,11	0,30%	150
TO5	Fibra Sintética (0,80%)	19,2	0,13%	10	61,00	0,40%	130
TO6	<u>Sintética (25% de 0,80%)</u> <u>Aço (75% de 0,80%)</u>	19,20	0,13%	45	7235	047%	135
TO7	<u>Sintética (50% de 0,80%)</u> <u>Aço (50% de 0,80%)</u>	19,20	0,13%	10	71,85	0,47%	145
TO8	<u>Sintética (75% de 0,80%)</u> <u>Aço (25% de 0,80%)</u>	19,20	0,13%	100	39,45	0,26%	140

*Refere-se à quantidade de aditivo redutor de água tipo II em relação a massa de cimento utilizada.

Fonte: Wendland, 2022.

Em pesquisas com concreto com adição de fibras sintéticas e fibras de aço os resultados experimentais são comparados com a modelagem computacional pelo métodos dos elementos finitos (BARROS, 2020) como mostra a tabela 2.4 .

Tabela 2.3-Análise de Flexão do Concreto com Adição de Fibras do estudo do Shi Fen et tal.

Amostra		Resistência (MPa)	Flexão 3 mm Força Residual (MPa)	Dureza(J)	Taxa de resistência à flexão equivalente (Re.3)
Concreto Simples	1	3.66	0	6.724	8.2
30 kg Fibra de Aço	2	4.13	0	10.670	11.5
	1	4.97	2.16	60.267	53.9
	2	4.92	1.98	73.310	66.2
6 kg Fibra Polipropileno	3	4.82	2.32	75.728	69.8
	1	4.17	1.85	62.145	66.1
	2	4.55	2.01	57.631	56.3
	3	4.52	2.86	76.263	74.9

Fonte: Shi Fen et tal (2023).

Pode-se constatar que a incorporação de fibras em alguns trabalhos promoveu uma redução no abatimento do concreto, sendo essa redução maior em traços com maiores teores de fibras, com isso, conclui-se que a incorporação de fibras em concreto para pisos industriais promoveu melhorias significativas na resistência à tração na flexão o que determina um melhor desempenho a solicitação de cargas estáticas e dinâmicas nos pisos industriais, além de melhorar a ductilidade do compósito (WENDLAND, 2022). Deve-se ressaltar que os resultados dos valores apresentados na pesquisa para as fibras de aço proporcionaram melhorias na resistência nas cargas de impacto do concreto (SABA et al, 2021).

A inclusão de fibras de aço melhora drasticamente as propriedades mecânicas segundo alguns pesquisadores (KESAVAMOORTHIN et tal, 2023)que mostraram que as fibras promovem a capacidade de absorver energia de deformação após o estágio de fissuração do compósito, assim demonstrando um comportamento dúctil (WENDLAND, 2022)

Segundo os autores da Tabela 2.4, a utilização de teores de fibras abaixo de 1% tem ampla aplicação no mercado e uma grande quantidades de pesquisas que mostram a sua viabilidade no concreto, já acima de 1%, têm sido feitos pesquisas com aumento constante em seu teor para verificar as vantagens e desvantagens desta adição com maior porcentagens de fibras na matriz de concreto, alguns autores verificaram que há uma diminuição da resistência a compressão mais acompanhada de uma aumento de resistência a tração da matriz de concreto, no entanto as pesquisas continuam avaliando a aplicação das fibras com maior porcentagem e variando os materiais e a geometria das fibras.

Tabela 2.4-Coletânea de Artigos de Adição de Fibras no Concreto.

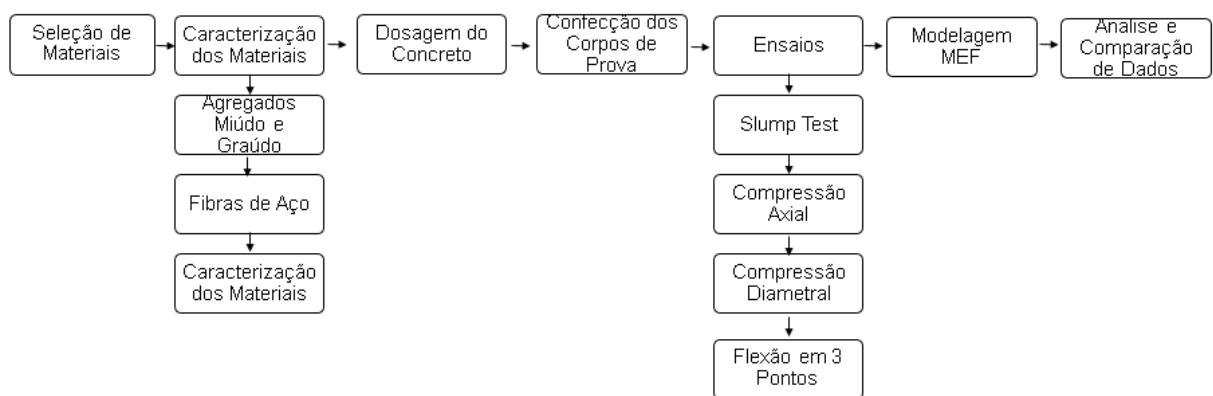
Nº	AUTORIA	ANO	FIBRAS	MODELO DAS FIBRAS	% DE FIBRAS	APLICAÇÕES
1	ASACHI	2006	AÇO / ACRÍLICO / NYLON / ARAMID / POLIPROPILENO / RESÍDUO DE CARPETO	NÃO INFORMADO	0,5	ZONA PORTUÁRIA / INDUSTRIAL
2	ABID et al	2020	AÇO	HOOKED E CRIMPED	0,5 / 0,75 / 1,0	RESISTÊNCIA AO IMPACTO
3	ABRAMYAN	2019	AÇO	NÃO INFORMADO	1,0	PAVIMENTOS DE CONCRETO
4	BARROSO et tal	2020	AÇO	HOOKED	0,25 / 0,5 / 0,75 / 1,0	PISO INDUSTRIAL
5	SABA et al	2021	AÇO	NÃO INFORMADO	0,25 / 0,5 / 0,75 / 1,0	DESEMPENHOS MECÂNICOS
6	PRABAKARAN et tal	2022	AÇO	HOOKED	2,6	EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO P/ PISOS INDUSTRIAL
7	WENDLAND	2022	MACROFIBRAS E FIBRAS DE AÇO	HOOKED (AÇO) / MONOFILAMENTO (MACROFIBRAS)	0,6 / 0,8	RESISTÊNCIA DO CONCRETO
8	BAYRAKTAR et al	2023	AÇO	HOOKED	0,25 / 0,45 / 0,64 / 0,83	DESEMPENHOS MECÂNICOS
9	KESAVAMOORTHIN et tal	2023	AÇO	HOOKED E CRIMPED	0,5 / 0,75 / 1,0	RESISTÊNCIA AO IMPACTO
10	SHI FEN et tal	2023	FIBRAS DE AÇO, MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO E MALHA DE AÇO	HOOKED (AÇO) / MONOFILAMENTO (MACROFIBRAS)	0,25 / 0,5	ANALISE COMPARATIVA DE LAJES E VIGAS

Fonte: Autor (2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de caracterização foram realizados para os materiais utilizados na dosagem do concreto sem e com adição de fibras de aço do tipo Hooked e Crimped em pisos industriais e obedeceram às seguintes etapas conforme o fluxograma da Tabela 3.2.

Tabela 3.1- Fluxograma de ensaios e modelagem do concreto com adição de fibras.



Fonte: Autor (2024).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento

As propriedades e características do cimento Portland estão diretamente ligadas à sua composição. O cimento é composto por clínquer, principal componente presente em todos os tipos de cimento Portland, e de adições, que variam de cimento para cimento e que são as responsáveis por definir seu tipo.

O Cimento CP II-E 32 consiste de uma mistura de calcário, argila e outros materiais que são aquecidos a altas temperaturas em fornos, visto que contém adição de escória, onde é

composto de 56% a 94% de clínquer e gesso e 6% a 34% de escória. De acordo com as exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018) consiste em Resíduo na peneira Nº 200 (%) $\leq 6,0$.

3.1.2 Finura do Cimento CP II E 32

A finura do cimento é caracterizada pelo índice de finura, que é o material retido na peneira de Nº 200. O ensaio consiste em medir o percentual da massa de cimento que fica retida através de peneiramento a seco, conforme NBR 11579 (ABNT, 2012).

O Cimento Portland tem variações de finura que é caracterizada pelo índice de finura, que é o material retido na peneira de $75 \mu\text{m}$ ou Nº 200, expresso em porcentagem de massa, conforme a norma NBR11579 (ABNT, 2012). Pode-se ver na Figura 3.1 o ensaio sendo realizado na peneira Nº 200.

Figura 3.1 - Materiais para o ensaio de Finura do Cimento CP II E 32.



Fonte: Autor (2024).

3.1.3 Massa Especifica do Cimento CP II E 32

A massa específica do cimento é uma propriedade física que se refere à densidade do material. Nesta pesquisa foi utilizado o cimento CP II E 32, um tipo específico de cimento Portland composto (CP II) com adição de escória (E) e resistência característica à compressão aos 28 dias de 32 MPa. A massa específica do cimento é uma característica importante, pois pode afetar a dosagem do concreto, a resistência e outras propriedades do material. Além disso, a massa específica do cimento também é relevante em cálculos relacionados ao transporte, armazenamento e manuseio do material durante a construção. Nesta pesquisa foi seguida a NBR NM23(ABNT, 2000). A Figura 3.2 - Materiais para o ensaio de Massa Específica do Cimento CP II E 32. mostra detalhe de preparo para o ensaio de massa específica do cimento CP II E 32.

Figura 3.2 - Materiais para o ensaio de Massa Específica do Cimento CP II E 32.



Fonte: Autor (2024).

3.1.4 Agregados Graúdo

3.1.4.1 Granulometria do Agregado Graúdo

A granulometria refere-se à distribuição dos tamanhos do agregado em duas amostras de material, e é uma propriedade importante para avaliar a qualidade e adequação do agregado para uso do concreto em piso industrial. Neste trabalho, agregado graúdo utilizado foi a brita 01, sendo realizado o ensaio da composição granulométrica para a amostra disponível conforme ABNT NBR 17054 (ABNT, 2022). As amostras foram submetidas a uma série de peneiramento para separar as partículas em diferentes faixas de tamanho, após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas, sendo possível construir a curva granulométrica, que mostra a distribuição das partículas ao longo das diferentes faixas de tamanho, como mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria do agregado graúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.4.2 Massa Específica do Agregado Graúdo

A NBR 16917 (ABNT, 2021) define o método para determinação da densidade na condição seca, na condição saturada com a superfície seca e também da absorção de água de agregado graúdo destinado ao uso em concreto. A Figura 3.4 mostra parte do aparato de ensaio para medir a massa específica do agregado graúdo.

Figura 3.4- Aparato para ensaio de Massa Específica do Agregado Graúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.4.3 Número de Vazios do Agregado Graúdo

Define-se como massa unitária de um agregado a relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando-se também os vazios entre os grãos. É utilizada para transformar massa em volume e vice-versa. Já a massa unitária compactada é a relação entre sua massa e seu volume compactado segundo um determinado processo, considerando-se também os vazios entre os grãos. Em todos os casos, esta propriedade pode ser feita com um único agregado ou com uma composição destes, sendo utilizada na transformação de massa para volume com vazios entre os grãos de agregados. É um parâmetro importante no concreto dosado em volume e para controle de recebimento e estocagem de agregados em volumes. A massa unitária também serve como parâmetro para classificação do agregado quanto à densidade.

A norma NBR16972 (ABNT, 2021) apresenta o método para a determinação da massa unitária e do índice de vazios do agregado graúdo. O levantamento desse parâmetro é fundamental para a dosagem do concreto e controle de suas características tecnológicas. Este ensaio está ilustrado conforme a Figura 3.5 - Materiais utilizados para o ensaio de Números de Vazios do Agregado Graúdo..

Figura 3.5 - Materiais utilizados para o ensaio de Números de Vazios do Agregado Graúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.5 Agregados Miúdo

3.1.5.1 *Granulometria Agregados Miúdo*

A composição granulométrica foi realizada seguindo as orientações prescritas na NBR NM 248 (ABNT, 2003) “Agregados–Determinação da Composição Granulométrica”, as amostras de três diferentes tipos de areia, denominadas como A-01, A-02 e A-03. Após a determinação da granulometria destas areias, foi determinado a composição ideal para cada areia, com o intuito de que a granulometria final ficasse o mais próximo possível dos limites superior e inferior das zonas ótimas ou utilizáveis como mostra a .

Figura 3.6 - Materiais para o ensaio de Granulometria Agregados Miúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.5.2 Massa Específica do Agregado Miúdo

Foi realizado o teste para a determinação da massa específica da areia conforme NBR 16916 (ABNT, 2021), onde utilizou-se o frasco de Chapman com 3 medições distintas, e assim determinou-se a massa específica de $2,73 \text{ g/cm}^3$, observadas na Figura 3.7 - Materiais para o ensaio de Massa Específica do Agregado Miúdo.abaixo.

Figura 3.7 - Materiais para o ensaio de Massa Específica do Agregado Miúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.5.3 Número de Vazios do Agregado Miúdo

A norma NBR16972 (ABNT, 2021) nos mostra o método para a determinação da massa unitária e do índice de vazios de agregados graúdo, conforme mostra a Figura 3.8-Materiais para o ensaio de Número de Vazios do Agregado Miúdo.

Figura 3.8-Materiais para o ensaio de Número de Vazios do Agregado Miúdo.



Fonte : Autor (2024).

3.1.5.4 Equivalente Areia para o Agregado Miúdo

O Ensaio de Equivalente de Areia determina a relação entre o volume de argila ou pó e o volume total de agregados miúdos com tamanhos de partículas menores do que 4,8 mm medida em volume numa cápsula padrão.

O ensaio é realizado em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e mantida em repouso por 10 minutos com amostra no seu interior, em seguida o recipiente é agitado com 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos. Limpa-se as

arestas do recipiente com a solução e deixa-se repousar por 20 minutos, após este período mensura-se a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argiloso.

O objetivo do ensaio é verificar a presença de impurezas em materiais de agregados. Existem diferentes métodos para realizar o ensaio, mas esta pesquisa irá utilizar o procedimento da norma NBR7218 de 01/2010, conforme mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Materiais para o ensaio de Equivalente a Argila do Agregado Miúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.1.6 Fibras de aço

Segundo AWOYERA et al. (2022), o diâmetro das fibras com seção transversal que varia entre 0,25 mm e 0,75 mm e para as fibras com seção retangular, tem-se para a largura (w) e espessura (e) as seguintes variações: $0,25 \text{ mm} \leq w \leq 0,9 \text{ mm}$ e $0,25 \text{ mm} \leq e \leq 0,75 \text{ mm}$. Quanto ao mecanismo de ancoragem, as fibras com ganchos na extremidade (Hooked) e onduladas (Crimped) foram selecionadas para a pesquisa. As fibras Hooked são mais eficazes em aperfeiçoar o desempenho à tração na flexão (LEE et al., 2019), a resistência à tração direta (WANG et al., 2019).

3.1.6.1 Fibra de Aço Dramix Hookeed

Para a presente pesquisa, utilizou-se a fibra de aço Dramix 3D 80/60 BG, que é uma referência em reforço para concreto estrutural no Brasil e na Europa. Esse tipo de fibra possui alto desempenho, durabilidade e facilidade de uso, proporcionando uma solução econômica e otimiza o tempo de produção para a maioria das aplicações. A Dramix 3D apresenta ancoragem eficaz e alta resistência à tração, conforme Figura 3.10.

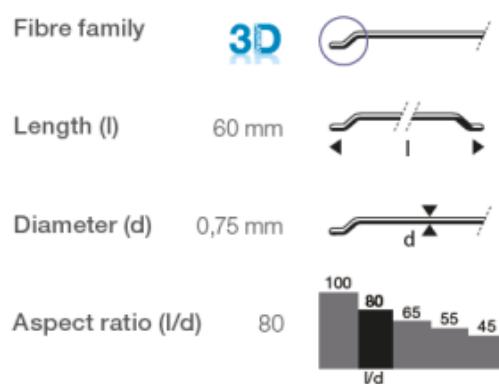
Figura 3.10 - Fibra de Aço Hooked Marca Dramix.



Fonte: Autor (2024).

As fibras com resistência ao escoamento nominal de 1225 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa, com deformação na resistência última de 0,8%. As fibras de aço possuem um comprimento (l) igual a 60 mm, um diâmetro (d) igual a 0,75 mm e uma razão de aspecto (l/d) igual a 80. De acordo com a norma EN 14889-1:2006, a dosagem mínima de fibras de aço Dramix 3D 80/60 BG a ser utilizada é de 10 kg/m³.

Figura 3.11- Características Fibras.



Fonte: Catalogo Dramix (2023).

3.1.6.2 Fibra de Aço Sheikan Crimped

Outra fibra utilizada na pesquisa foi a fibra Crimped como mostra a figura 3.12 que trata-se de uma fibra de aço ondulada que apresenta vantagens de custo-benefício, devido a pouca necessidade de manutenção e o preço acessível para investimento, além de fácil aplicação e instalação, tempo de montagem e proporciona maior rapidez na construção conforme o catalogo (SHEIKAN, 2023).

Figura 3.12- Fibra de Aço Crimped da Marca Sheikan.



Fonte: Autor (2024).

Com embalagens de 25 kg, paletes de 1100 kg e container de 22 toneladas, com as características morfológicas e mecânicas das fibras Crimped apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características da Fibra do Modelo Crimped.

COMPRIMENTO	50MM
DIAMÊTRO	1 MM
TRAÇÃO (FORÇA)	1200 Mpa

MATERIAIS	FIO DE AÇO DE BAIXO CARBONO
FORMA	ONDULADA

Fonte: Catalogo Sheikan (2023).

3.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 Ensaio de caracterização do concreto no estado fresco Slump Test

Foram analisadas a influência da incorporação de fibras no estado fresco do concreto, por meio da consistência pelo abatimento do tronco de cone, regulamentado pela NBR 16889 (ABNT, 2020) como mostra a figura 3.13.

Figura 3.13 - Realização do Ensaio de Slump Test.



Fonte: Autor (2024).

3.2.2 Ensaio de compressão axial do concreto

O ensaio de compressão axial do concreto, também chamado de ensaio de resistência à compressão, é um teste realizado para descobrir a resistência do concreto. O ensaio normalmente é feito para verificar se o concreto alcança a resistência mínima exigida no projeto estrutural e no projeto de fundação.

Apesar do ensaio de compressão ser o mesmo independentemente da origem do corpo de prova, os critérios para coleta, preparo e armazenamento das amostras variam de acordo com o estado do concreto. A NBR 16886 (ABNT, 2020) e NBR 5739 (ABNT, 2018) define como devem ser retiradas as amostras do concreto fresco durante a concretagem, e a NBR 7680-1 (ABNT, 2015) define como as amostras de estruturas executadas devem ser extraídas (testemunha). O ensaio de compressão é feito em corpo-de-prova cilíndrico que deve ser posicionado de modo que seu eixo coincida com o da máquina de ensaio e que a resultante das forças passe pelo centro.

O ensaio de compressão se inicia na dosagem do concreto, após o preparo é realizado a fabricação dos corpos de prova cilíndricos que são moldados a partir de uma amostra representativa do concreto utilizado na pesquisa. Esses corpos de prova são preparados de acordo com as especificações e normas aplicáveis, como a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018).

Com a adição habitual de fibra ($V_f < 1,0\%$) não se altera significativamente a resistência à compressão e o comportamento antes do limite de proporcionalidade tensão e deformação, NZAMBI et al. (2021).

Na confecção dos moldes de corpos-de-prova verificou-se antes o abatimento do concreto por slump test que ficou na faixa de 8 ± 1 mm que corresponde a um grau de trabalhabilidade normal. Suas propriedades mecânicas foram obtidas experimentalmente a partir de 12 corpos-de-prova cilíndricos de (100 x 200) mm, os quais foram submetidos os ensaios seguindo a norma ABNT NBR 5739 de 05/2018. Foram ensaiados os corpos de prova com 7, 14, 21 e 28 dias a partir do seu preparo. Os resultados do ensaio são registrados em um módulo de aquisição de dados da prensa, incluindo a carga máxima suportada pelo corpo de prova no caso a resistência à compressão e o padrão de ruptura observado. Esses dados são

geralmente apresentados em um gráfico de carga versus deformação. A Figura 3.14 mostra o módulo de aquisição de dados e a prensa EMIC para o ensaio de compressão axial.

Figura 3.14 - A) Prensa Hidráulica – mod: EMIC e (B) Corpo de prova.



Fonte: Autor (2024).

3.2.3 Ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade é utilizado para determinar a capacidade do concreto de deformar elasticamente sob ação de uma carga aplicada, seguindo a NBR 8522-1(ABNT, 2021). O módulo de elasticidade, também chamado de módulo de deformação longitudinal, é uma propriedade importante para o projeto estrutural e a análise de tensões e deformações em estruturas de concreto.

Os corpos de prova de concreto cilíndricos da pesquisa foram moldados e curados de acordo com as especificações e procedimento aplicáveis da norma vigente e submetidos ao ensaio para determinação do módulo de elasticidade através da prensa EMIC para 100 toneladas com módulo de aquisição de dados, como pode ser visto na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Equipamentos para Verificar o Módulo de elasticidade.



Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos Rilem 162 (TDF, 2002)

O ensaio de tração na flexão em três pontos é um método utilizado para avaliar as propriedades mecânicas do material. O ensaio envolve a aplicação de uma carga em um corpo de prova que é colocado sobre dois suportes de apoio. A produção dos corpos de prova segue o modelo por Rilem 162 (TDF, 2002), com dimensões de (150x150x550) mm. Onde no meio do vão é realizado um corte de 5 mm de largura e 25 mm de profundidade, com finalidade de induzir a falha em uma seção definida.

A partir desses dados são determinados as tensões residuais e o limite de proporcionalidade do material. Essas informações são utilizadas em recomendações normativas RILEM TC 162 (TDF, 2002), EHE-08 (TDF, 2010), CEB-FIP (TDF, 2010) e a NBR 16935 (ABNT, 2021)

As tensões residuais são dadas pela equação 1.

$$\text{Eq. } f_{Ri} = \frac{3.F_{Ri}L}{2.b.h_{sp}^2} \quad (I=1,\dots,4) \quad (1)$$

F_{Ri} corresponde a carga no CMODi;
 L e b representam o comprimento e a largura da viga entalhada, respectivamente;
 h_{sp} é a altura do final do entalhe à face superior da viga. A tensão referente ao limite de proporcionalidade;
 f_L , também é calculada admitindo uma distribuição linear das tensões na seção transversal da viga entalhada, através de equação 2.

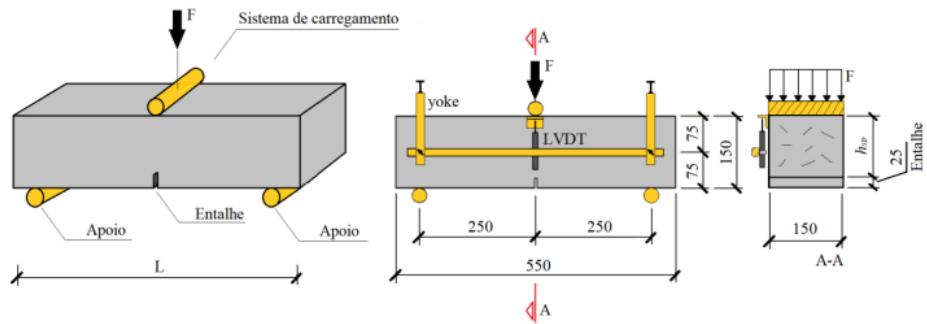
O limite de proporcionalidade do material é dado pela equação 2

$$\text{Eq. } f_{Ri} = \frac{3.F_L L}{2.b.h_{sp}^2} \quad (2)$$

F_L representa a carga máxima registrada na relação Carga-CMOD, para $\text{CMOD} \leq 0,05$ mm;

Na Figura 3.16, mostra a ilustração da montagem para um procedimento de ensaio de tração na flexão em 3 pontos.

Figura 3.16 - Procedimento de Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos.



Fonte: Castro (2022).

3.2.5 Compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão como mostra a figura 3.17 foi realizado de acordo com a especificação da NBR 5739 (ABNT, 2018), em que os corpos de prova cilíndricos são fabricados e colocados na prensa de forma horizontal, exercendo uma força diametral aplicada gradualmente até que provoque a ruptura do material. Os valores das resistências obtidas pelo módulo de aquisição acoplado a prensa são apresentados com a unidade de medida em tonelada força (tf), sendo realizada a conversão da unidade medida para MPa, conforme as especificações da norma.

Figura 3.17 - Procedimento de Ensaio de tração na flexão em 3 Pontos.



Fonte: Autor (2024).

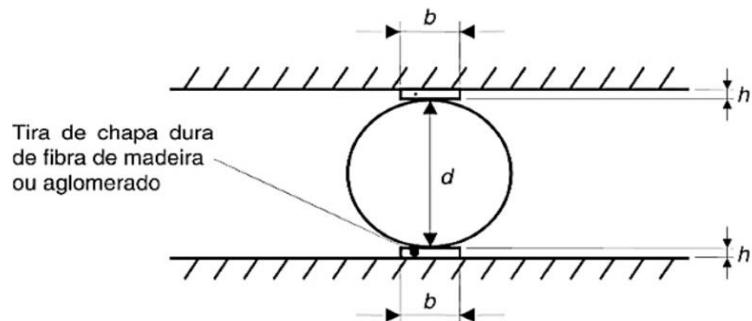
A resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}), que é obtida através do resultado obtido na compressão axial (f_c) e considerando-se o desvio padrão e a amostragem necessária. Para concretos de classe de resistência até 50 Mpa (SANTOS, 2017).

$$\text{Eq. } f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \dots (1)$$

O teste de tensão indireta por compressão diametral de cilindros é o mais utilizado entre os três métodos experimentais de caracterização (SANTOS, 2017), por ser de execução mais simples em relação à tração axial e por fornecer um valor mais confiável do que o ensaio à flexão, assim como afirma a NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual estabelece que a resistência à

tração do concreto pode ser considerada equivalente à 90% e 70% dos resultados obtidos no ensaio brasileiro e no ensaio de tração na flexão, respectivamente.

Figura 3.18 - Ilustração do ensaio de compressão diametral.



Fonte: NBR 7222 (ABNT, 2011)

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada em software de engenharia para determinar comportamentos de materiais e análise estrutural, sendo comumente aplicado em vários problemas da engenharia para obtenção de soluções aproximadas de equações diferenciais ordinárias e parciais (CARNEIRO et al, 2020). Esse método possibilita uma descrição simplificada da geometria da estrutura e viabiliza modelos mecânicos mais abrangentes, permitindo determinar numericamente soluções aproximadas de equações diferenciais parciais para cada um dos elementos finitos em que o corpo é dividido (PORFIRIO et al, 2023). O método dos elementos finitos obedece às etapas do fluxograma dado pela Figura 3.19.

Figura 3.19 - Fluxograma de métodos de elementos finitos



Fonte: Autor (2024).

O ABAQUS é um programa não linear utilizado para analisar o comportamento do concreto estrutural quando sujeitos a diferentes esforços ou deslocamentos sob uma aplicação progressiva cargas até a sua ruptura (PORFIRIO et al, 2023).

Nesta pesquisa se estudou o comportamento plástico do concreto e se fez uma simulação do modelo computacional baseado no método dos elementos finitos e se utilizou os modelos experimentais como referência para modelagem como pode ser observado na Tabela 3.3.

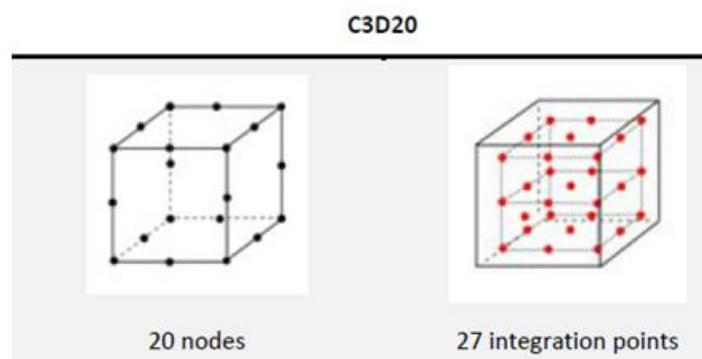
Tabela 3.3 - Dados utilizados no modelo computacional.

Ângulo de Dilatação	Excentricidade	F _{b0} /f _{c0}	K	Parâmetro de viscosidade
38	0.1	1.16	0.6667	0.0001

Fonte: Autor (2024).

Além disso, para a representação do comportamento do concreto nos estados de compressão axial, utilizou-se a equação do Model Code 90 (1991) MC90, a qual é de larga utilização e aceitação no meio científico (Branco, 2022). Na Figura 3.20 mostra o tipo de elemento hexaédrico utilizado no programa ABAQUS.

Figura 3.20 - Modelo computacional utilizado



Fonte: Branco (2022).

3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL NÃO LINEAR DO PISO INDUSTRIAL

No pavimento rígido do piso industrial foi feita uma modelagem pelo método dos elementos finitos para quatro situações do comportamento do concreto nesta pesquisa: placa de concreto simples, placa de concreto com armadura, placa de concreto com adição de fibras Hooked e placa de concreto com adição de fibras Crimped. Para isto, utilizou-se as condições de contorno no programa Abaqus, tais como uma restrição de região incorporada que atribuiu uma interação entre a armadura e o concreto simulando uma perfeita aderência entre o aço e o concreto.

Para interação entre as fibras de aço e o concreto foi modelado uma condição de restrição de amarração. Assim, a possibilidade de deslocamento entre a interface desconsiderada, a aderência perfeita com a barra de aço e o concreto. As placas de aço foram assumidas com comportamento elástico linear. Os pontos de referência (RPs) foram criados para aplicar as

cargas e as restrições nos apoios que foram vinculados nas superfícies das placas utilizando as restrições de acoplamento. (BRANCO, 2024)

O método computacional permitiu simular o comportamento dos CPs, considerando as condições de carregamento, geometria e propriedades dos materiais, contribuindo para uma análise mais precisa e eficiente do desempenho estrutural. Os corpos de provas simulados por MEF, obtiveram resultados próximos dos resultados experimentais e desta forma pode-se estimar uma boa convergência entre os resultados experimentais e simulados.

Para as condições de contorno estabelecidas na execução de todos os ensaios computacionais, utilizou-se como padrão a vinculação dos corpos de prova do tipo *rigid body*, para simular a ação dos elementos responsáveis pela transferência de carga para os corpos de prova durante os ensaios. Quanto ao dimensionamento do tipo de malha, o tipo de elemento utilizado na abordagem computacional foi o modelo linear com integração reduzida C3D20, tal modelo permite que os corpos de prova não se comportem com elevada rigidez aos esforços de compressão, tensão e flexão, além de acarretar uma distribuição de tensões mais precisas nos pontos de integração. Quanto ao carregamento a curva de amplitude utilizada foi a do tipo *ramp*, a qual propicia ao modelo computacional um comportamento linear em função do carregamento imprimido ao corpo de prova.

Esta análise é uma investigação computacional não linear realizada através do software ABAQUS/CAE 6.14, com base no Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM) e Dano do Concreto (Concrete Damage Plasticity - CDP), o qual foi desenvolvido por Lubliner et al. (1989) e ampliado por Lee e Fenves (1998) para a modelagem de estruturas de concreto armado. O modelo combinado FEM-CDP permite visualizar cargas, tensões, deformações, deslocamentos e fissuração com aproximação satisfatória. O ABAQUS é um programa não linear para análise de elementos de concreto armado sujeitos arbitrariamente a combinações de esforços e/ou deslocamento aplicados de maneira progressiva até a ruptura, foi modelado um piso industrial que tem as seguintes dimensões 6,00 m de comprimento, 3,50 m largura e 0,20 m de espessura. E se utilizou uma tela soldada em aço e vergalhões de aço de 10,00mm a cada 0,20 m no qual foi simulado o carregamento do veículo pesado com as suas cargas de trabalho, seguindo as normas do DNIT. Na Tabela 3.4 tem-se a descrição dos tipos de placas de pisos industriais simulados

Tabela 3.4 - Modelos Computacional de Pisos Pré-moldados

Modelo	Base	Adição
Mod 1	Concreto	-
Mod 2	Concreto	Fibra Crimped
Mod 3	Concreto	Fibra Hooked
		Barra de Aço
Mod 4	Concreto	Convencional

Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A caracterização do concreto consiste na descrição quantitativa das propriedades dos materiais que irão compor o traço de concreto após dosagem do mesmo e desta forma obter um controle tecnológico de suas propriedades ótimas exigidas pelas normas vigentes o que possibilita atingir a resistência determinada na pesquisa ou projeto.

A realização da caracterização e de ensaios no concreto é essencial para atestar que o material está em conformidade com as especificações normativas. Sem esse controle, a qualidade do concreto não pode ser garantida e a integridade estrutural da edificação ou de qualquer peça fica comprometida.

O conhecimento da curva granulométrica do agregado, tanto graúdo quanto miúdo, é de fundamental importância para o estabelecimento da dosagem dos concretos e influencia na quantidade de água a ser adicionada e se relaciona com a resistência e trabalhabilidade do concreto fator responsável pelo bom desempenho. A Tabela 4.1 mostra os resultados dos ensaios de caracterização do material utilizado.

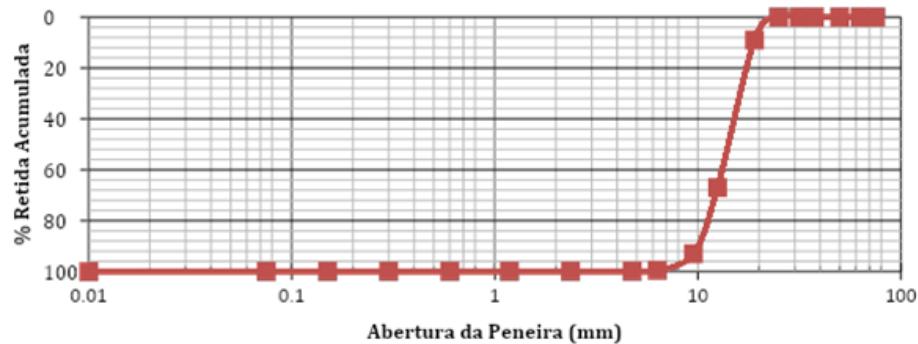
Tabela 4.1 - Resultados de Caracterização.

MATERIAL	ENSAIO	UNIDADE	VALOR
CIMENTO	FINURA		
	MASSA ESPECIFICA	g /cm ³	3,16
AGR. MIÚDO	MASSA ESPECIFICA	g /cm ³	2,62
	NUM. DE VAZIOS	%	99,93
	EQ. A AREIA	%	95,05
	MASSA UNITÁRIA	g /cm ³	1,62
AGR. GRAÚDO	MASSA ESPECIFICA	g /cm ³	2,51
	MASSA UNITÁRIA	g /cm ³	1,39
	NUM. DE VAZIOS	%	99,88

Fonte: Autor (2024).

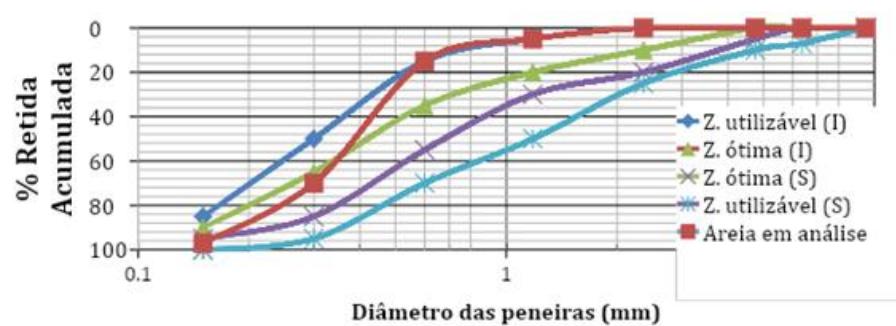
Os resultados do ensaio de granulometria do agregado graúdo e miúdo estão respectivamente mostrados na Figura 4.1 e na Figura 3.21 e estão dentro da zona utilizável recomendada da norma ABNT NBR 17054 (ABNT, 2022).

Figura 4.1- Granulometria do Agregado Graúdo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.2 - Granulometria do Agregado Miúdo.



Fonte: Autor (2024).

4.2 MÉTODO DE DOSAGEM DO CONCRETO

Foi realizado um traço padrão sem adição de fibras baseado na ABCP e outros seis traços com as fibras de aço Crimped e Hooked, com as variações de porcentagens de 1,0%, 1,5% e 2%, conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Traço do concreto de referência.

TRAÇO	ADIÇÃO	PORCENTAGEM
TP	TRAÇO PADRÃO	-
TC1	FIBRA CRIMPED	1,00%
TC1,5	FIBRA CRIMPED	1,50%
TC2	FIBRA CRIMPED	2,00%
TH1	FIBRA HOOKED	1,00%
TH1,5	FIBRA HOOKED	1,50%
TH2	FIBRA HOOKED	2,00%

Fonte: Autor (2024).

A dosagem do concreto foi feita utilizando o método ABCP e que teve como referência o traço para resistência de 32 MPa.

Tabela 4.3 - Traço do concreto de referência.

RESISTÊNCIA DO CONCRETO	MPA	32
CIMENTO	KG	1
AGREGADO MIÚDO	KG	1,62
AGREGADO GRAÚDO	KG	2,96
ÁGUA	L	0,5

Fonte: Autor (2024).

Os materiais foram pesados individualmente e acrescentados à betoneira na seguinte ordem: agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água e as fibras de aço. Após a mistura e homogeneização dos materiais foi realizado o Slump Test.

Após os ensaios do concreto no estado fresco Slump Test, moldou-se os corpos de prova que foram colocados em cura úmida com o objetivo de diminuir a evaporação da água dos CP's, assim mantendo-o mais rígidos, conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3 - Tanque de cura úmida.



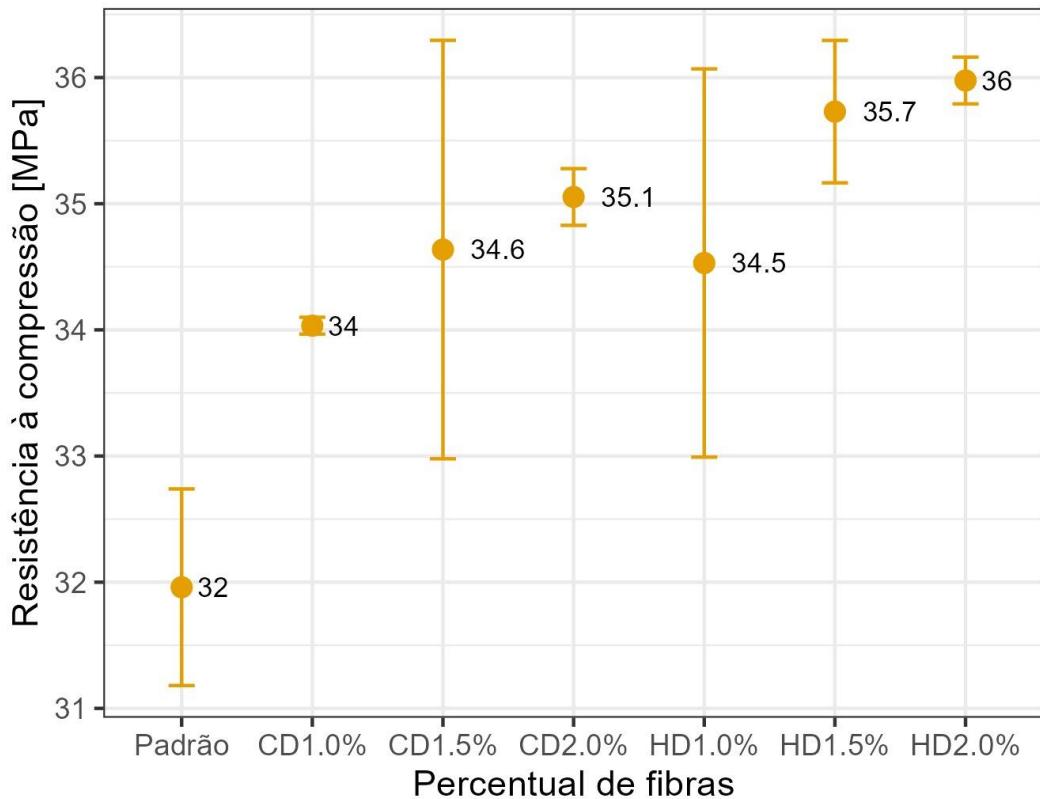
Fonte: Autor (2024).

4.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os resultados da resistência a compressão dos ensaios nos corpos de prova em matriz de concreto com 7 dias de cura NBR 739 (ABNT, 2018) obtiveram resistência maior de 21MPa que corresponde a 65,62% do traço de referência que é de 32MPa o que está de acordo com a norma que recomenda 65% do traço utilizado. Os resultados do ensaio de compressão mostrados na Figura 3.4 abaixo nos apresentam os resultados de 28 dias de cura.

Observou-se que, comparando o comportamento da resistência a compressão do concreto com e sem fibras, que a presença de fibras no concreto proporciona, um aumento da resistência com aumento percentual das fibras, como pode ser mostrado na Figura 3.4 que verificou-se um aumento em suas médias progressivo da resistência para ambas as fibras tendo tido o melhor desempenho da fibra Hooked para a adição de 2% superior a Crimped atingindo uma melhoria de acima de 12% quando comparado ao concreto sem fibras.

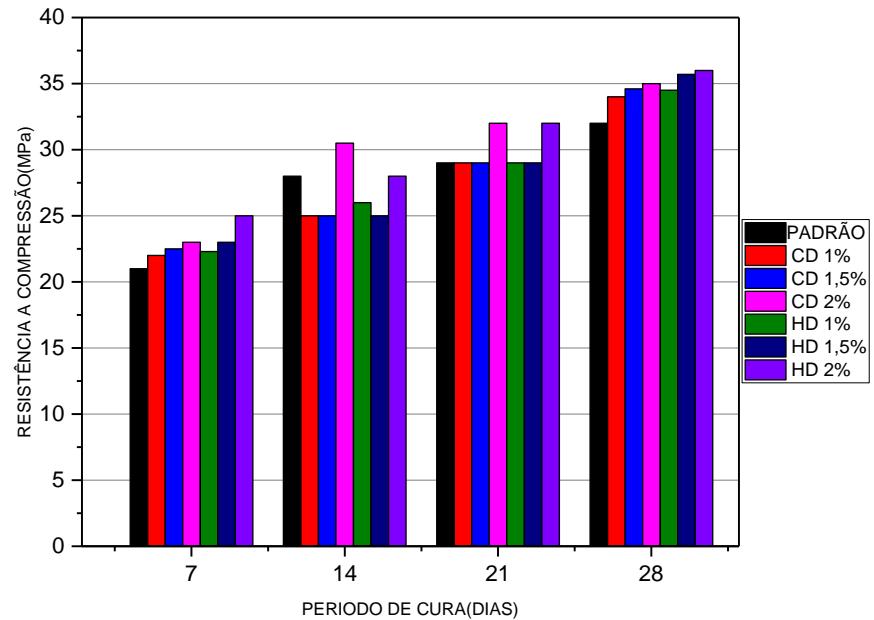
Figura 4.4 - Resultados do Ensaio de compressão com 28 dias de cura.



Fonte: Autor (2024).

Para o ensaio de compressão, foi também realizado a análise de dados de rompimento dos corpos de prova para o período de cura de 7, 14, 21 e 28 dias, como mostra a Figura 3.5. e comparado o ganho de resistência do concreto sem fibras e com fibras, percebe-se que a resistência a compressão de em 7 dias e 28 dias para o concreto com fibras é superior ao concreto sem fibras.

Figura 4.5 - Resultados com período de cura de 7,14,21 e 28 dias.

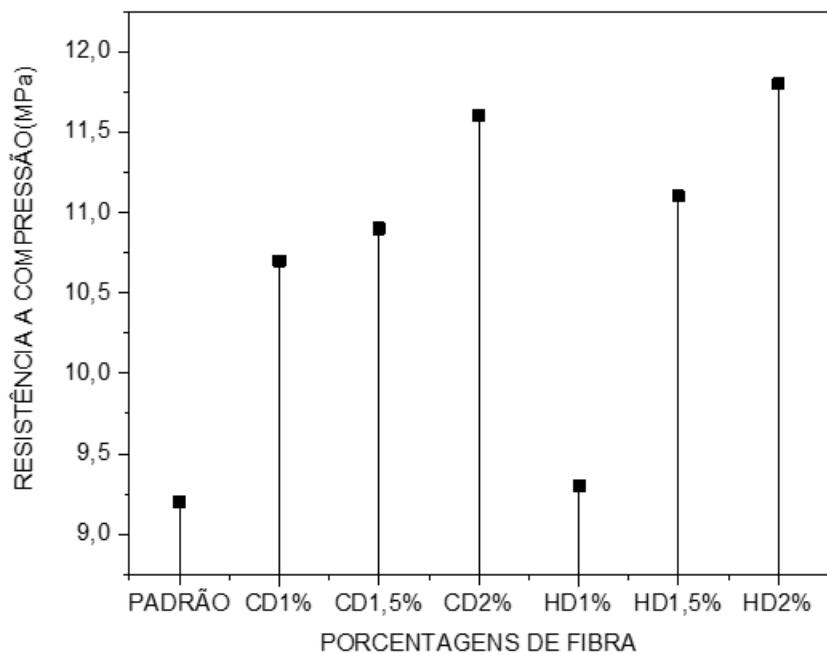


Fonte: Autor (2024).

4.4 COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA

Os resultados do ensaio de compressão diametral do concreto com e sem adição de fibras utilizados nesta pesquisa foram realizados conforme as normas NBR 5739 (ABNT, 2018), no qual, o ponto central do cilindro é sujeito à tensão de tração máxima, onde corresponde a deformação máxima. Para os dados apresentados abaixo, foram medidos em MPa, onde verificou o melhor desempenho para o concreto com adição de fibras Hooked de 2% com de resistência aproximadamente de 33%.

Figura 4.6 - Deformação de ensaio de compressão diametral.



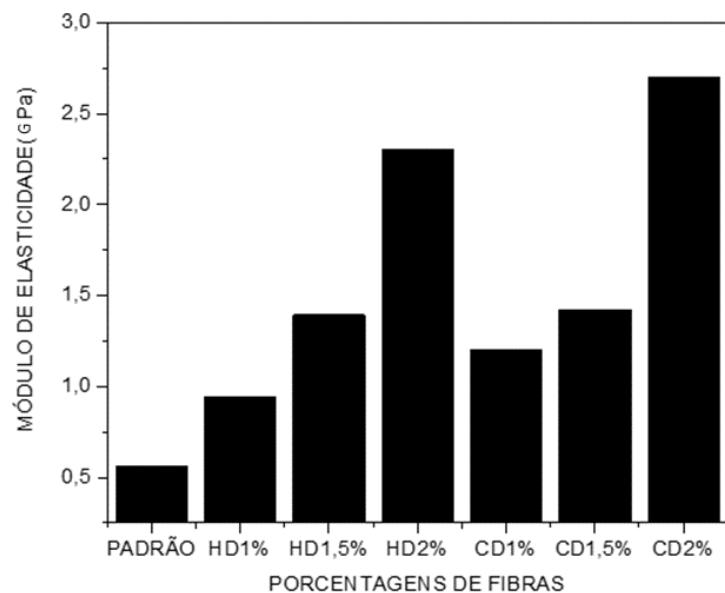
Fonte: Autor (2024).

4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade do concreto com e sem adição de fibras utilizados nesta pesquisa obedeceram as normas NBR 8522-1(ABNT, 2021). O módulo de elasticidade, também chamado de módulo de deformação longitudinal.

Nesta pesquisa o módulo de elasticidade que apresentou melhor desempenho foi para o concreto com adição de fibras de aço Hooked na ordem de 2% de acordo com a Figura 4.7. Acreditasse que o gancho nas extremidades da fibra de aço do modelo Hooked tenha proporcionado essa superioridade em relação ao modelo Crimped.

Figura 4.7 - Módulo de elasticidade.



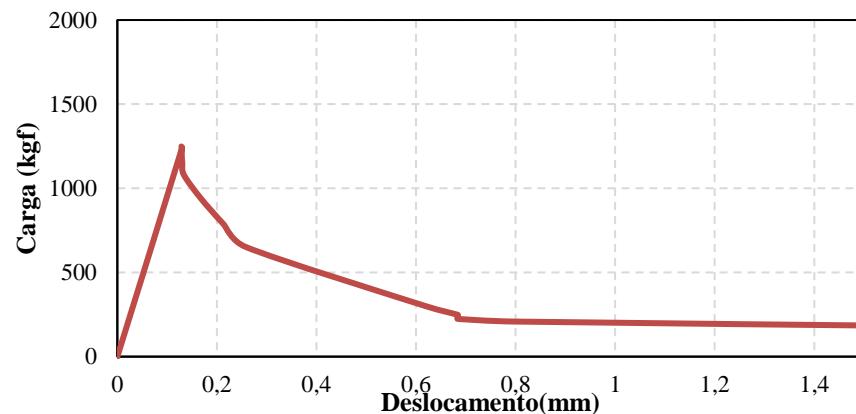
Fonte: Autor (2024).

4.6 TRAÇÃO NA FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

No ensaio de tração na flexão em três pontos se observou o seguinte comportamento, após o ensaio de flexão para corpos de prova prismáticos ensaiados descritos na Figura 3.8, que mostrou que a matriz em concreto para o modelo sem fibras apresenta menor deformação antes do rompimento, isto pode ser explicado, devido ausência de fibras que absorvam e transmitam as tensões do concreto.

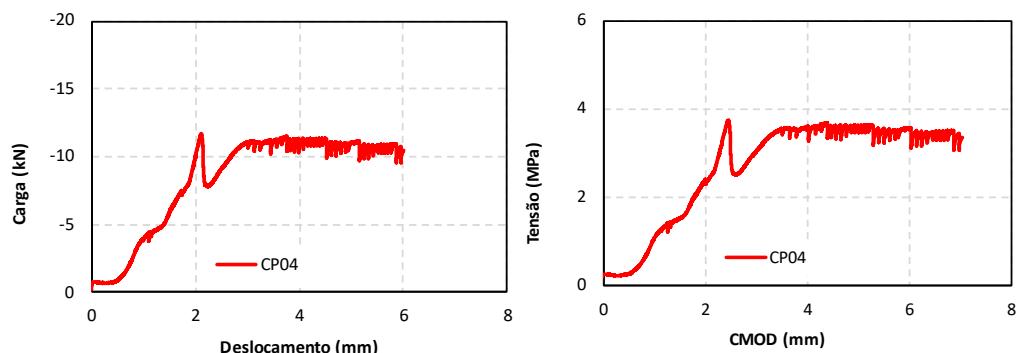
Podemos notar o grande aumento nos resultados das figuras de tensão e carga dos modelos com a inclusão de fibra de aço com a porcentagem de 2 %, tanto para o modelo Crimped e também para o modelo Hokeed.

Figura 4.8 -Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem padrão.



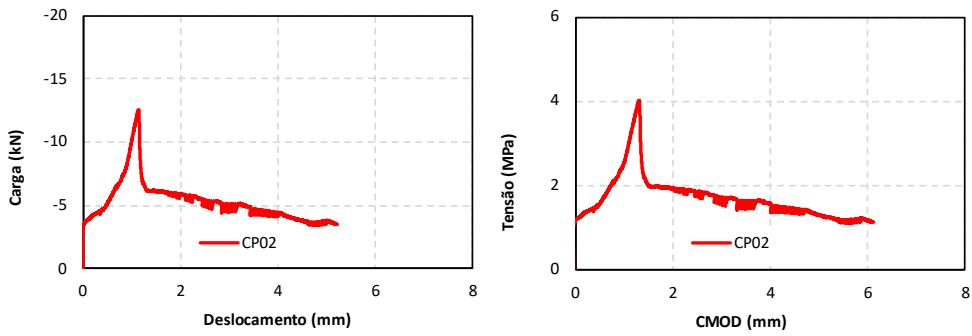
Fonte: Autor (2023).

Figura 4.9 -Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem Crimped 2%.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.10 -Resultados do Ensaio a flexão para a dosagem Hooked 2%.



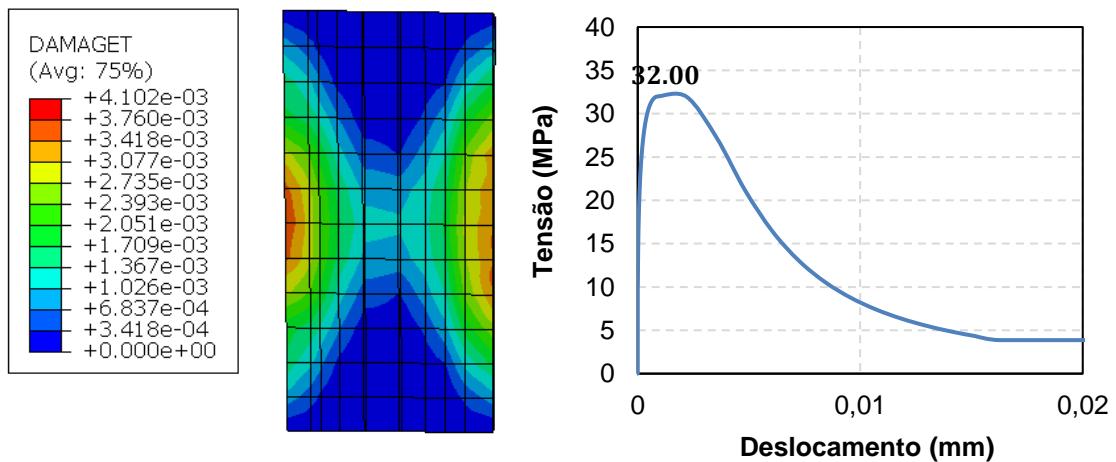
Fonte: Autor (2024).

4.7 MODELAGEM COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

4.7.1 Modelagem Abaqus do ensaio de Compressão

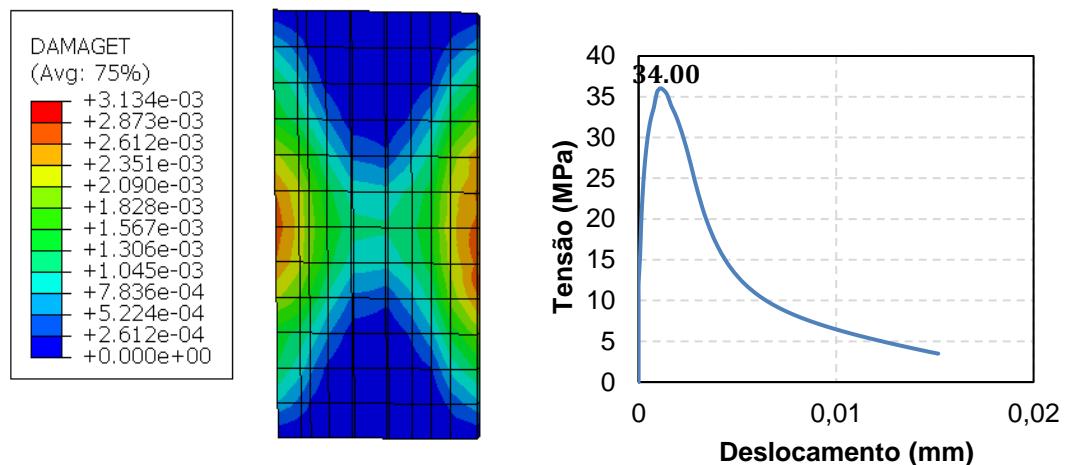
Os resultados obtidos nas modelagens computacionais, em geral, mantiveram-se próximos aos valores de referência dos ensaios experimentais dos corpos de prova padrão e dos corpos de prova com adição de fibras de 1%, 1,5% e 2%, de acordo com os parâmetros presentes nas figuras de 4.11 a 4.17, mostra a tensão em função do Deslocamento.

Figura 4.11- Modelagem no traço Padrão.



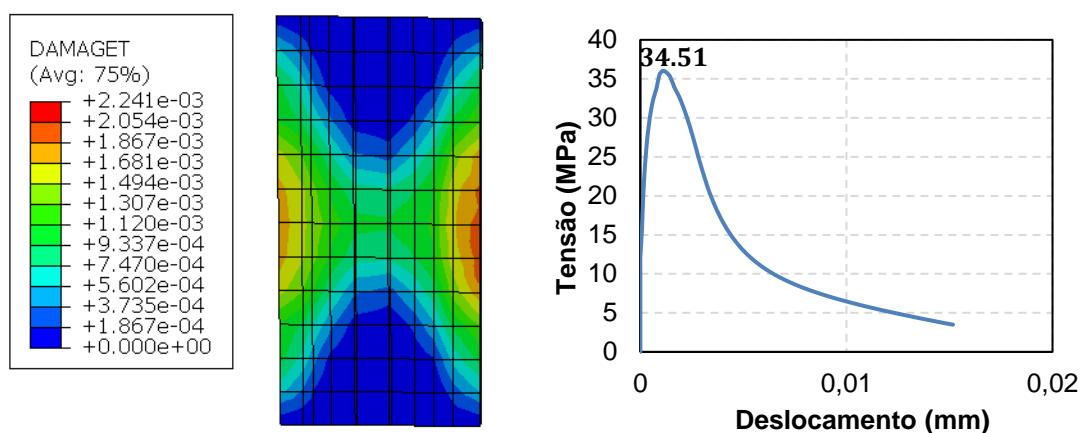
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.12 - Modelagem no traço 1% de fibra Crimped.



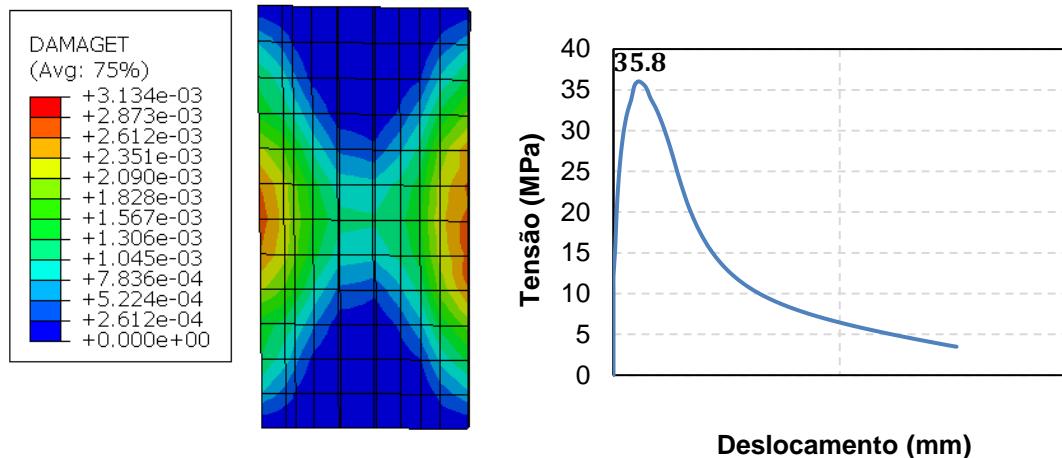
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.13 - Modelagem no Traço 1,5% de fibra Crimped.



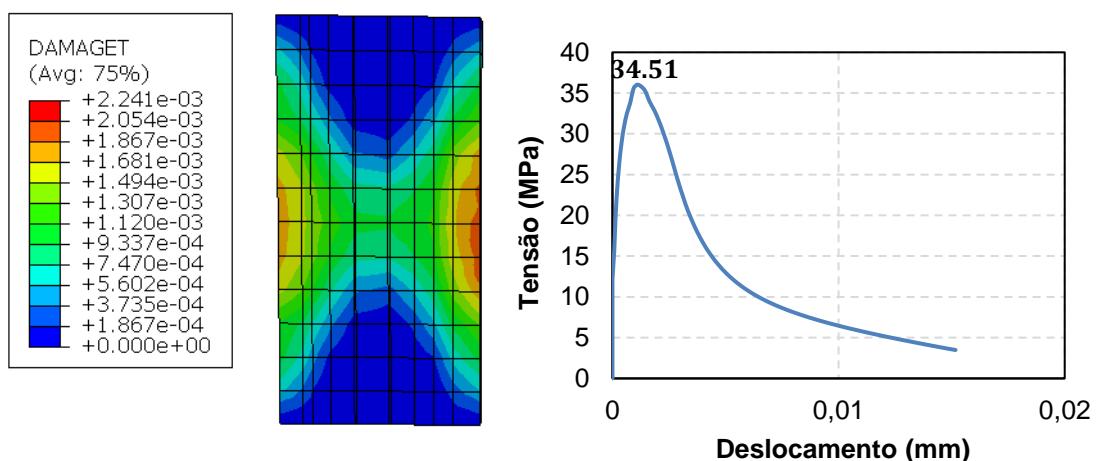
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.14 - Modelagem no traço 2 % de fibra Crimped.



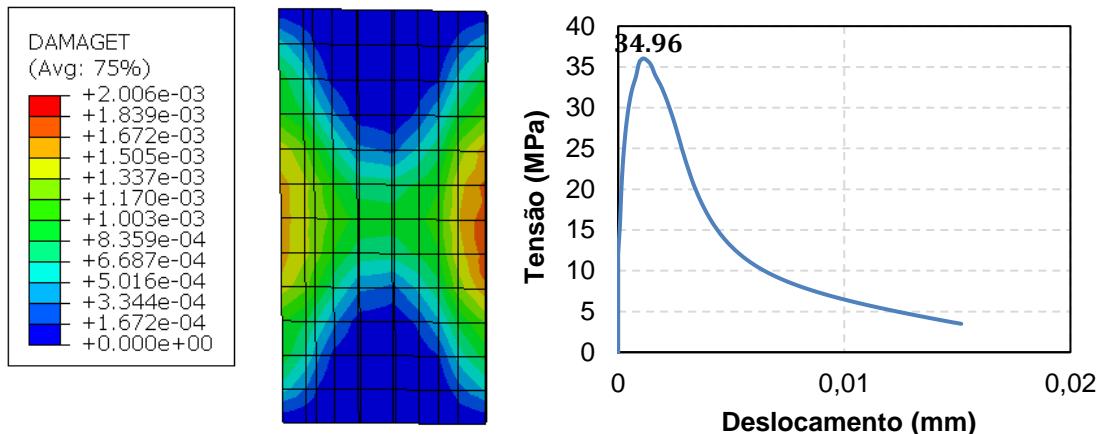
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.15 - Modelagem no traço 1% de fibra Hooked.



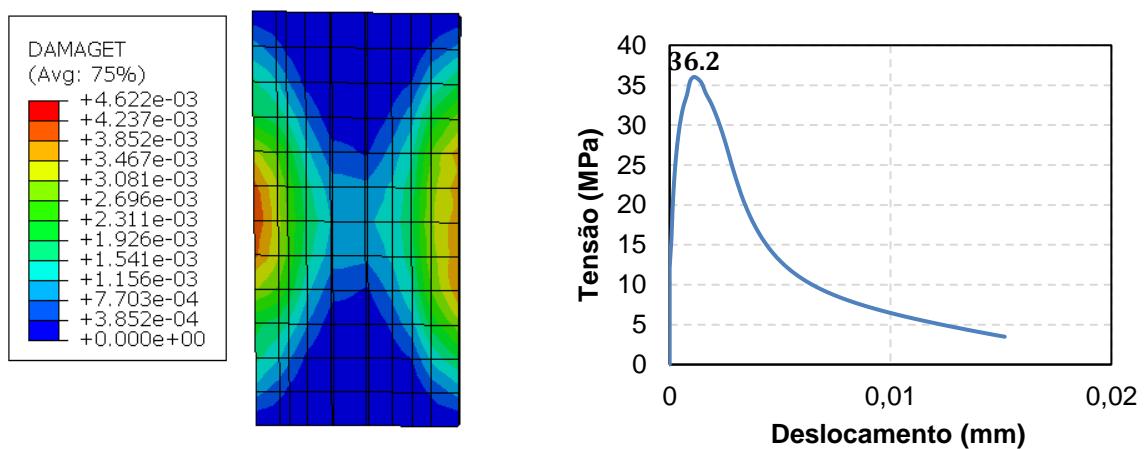
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.16 - Modelagem na dosagem 1,5% de fibra Hooked.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.17- Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.

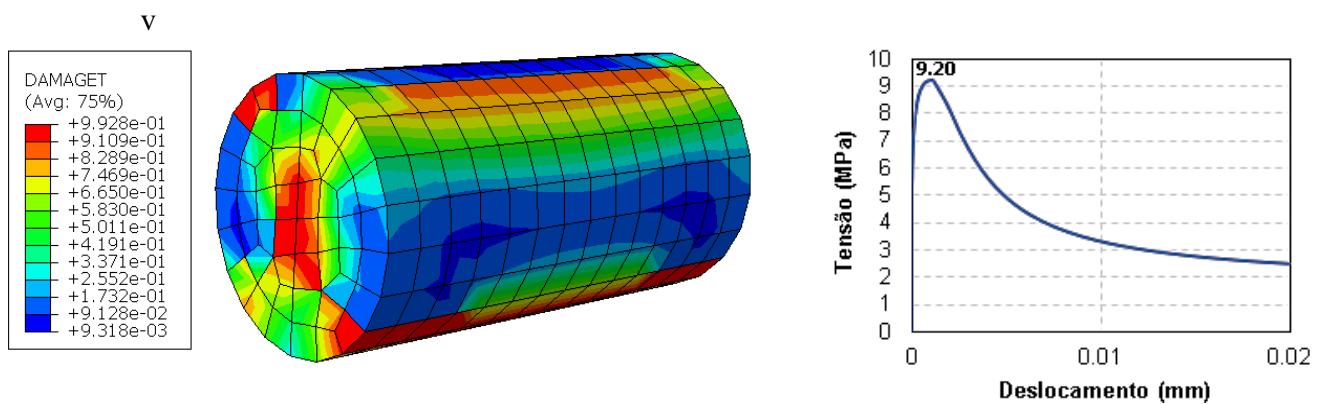


Fonte: Autor (2024)

4.7.2 modelagem computacional do ensaio de compressão diametral

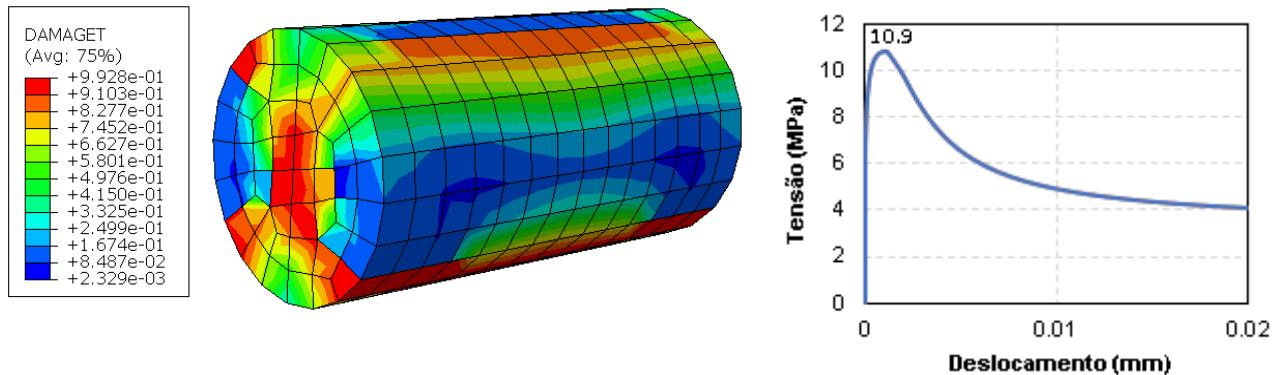
Nas figuras de 4.18 a 4.24, verificou-se que a resistência dos corpos de prova a compressão diametral no que se refere a comparação entre os dados experimentais e a modelagem computacional por elementos finitos apresentaram uma boa concordância de resultados de resistência a compressão a diametral refletindo que modelo computacional descreve o comportamento do concreto com e sem adição de fibras de forma coerente.

Figura 4.18 - Modelagem no traço Padrão.



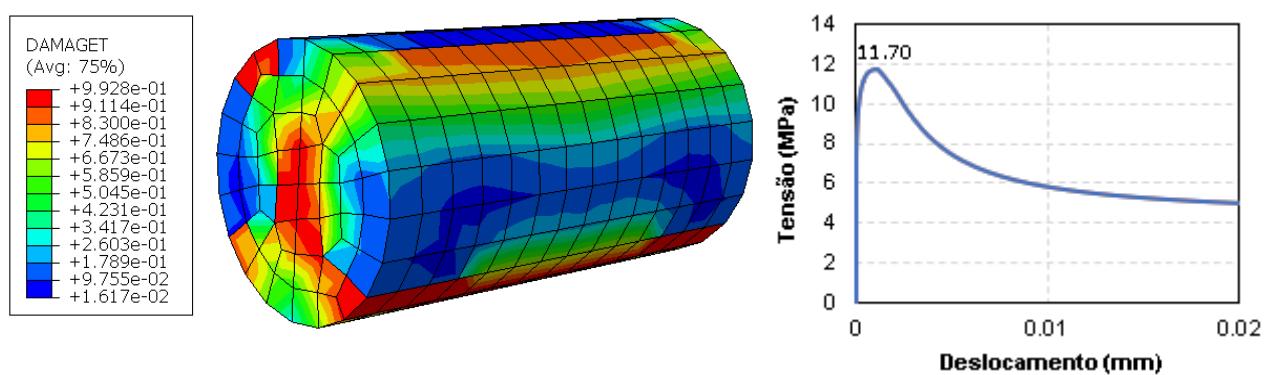
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.19 - Modelagem no traço 1% de fibra Crimped.



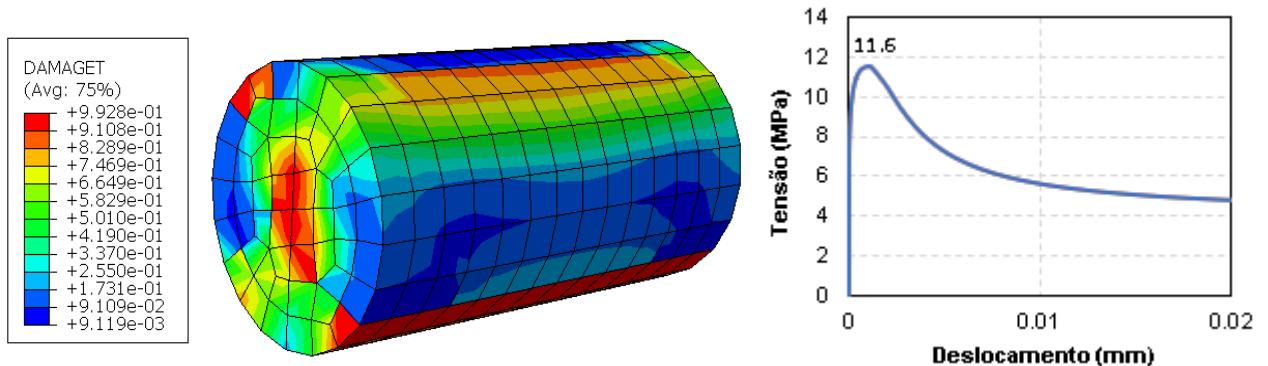
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.20 - Modelagem no traço 1,5% de fibra Crimped.



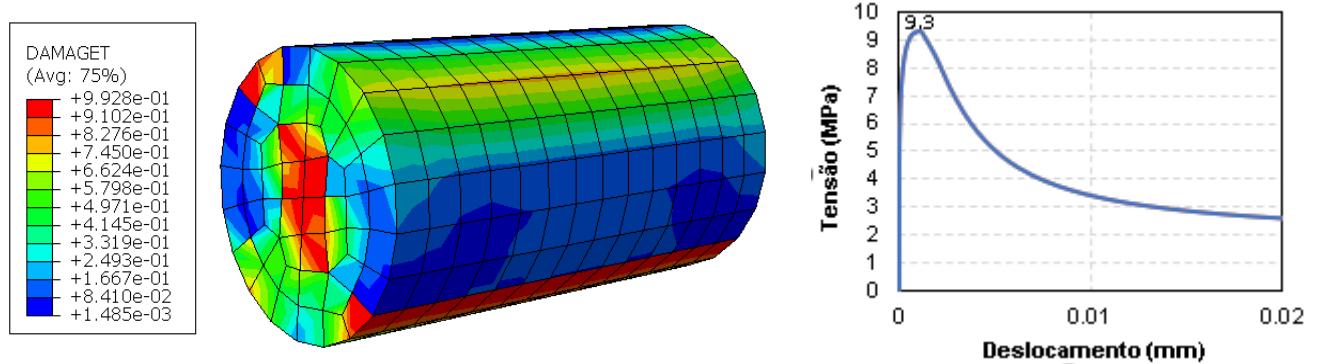
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.21 - Modelagem no Traço 2% de Fibra Cimped.



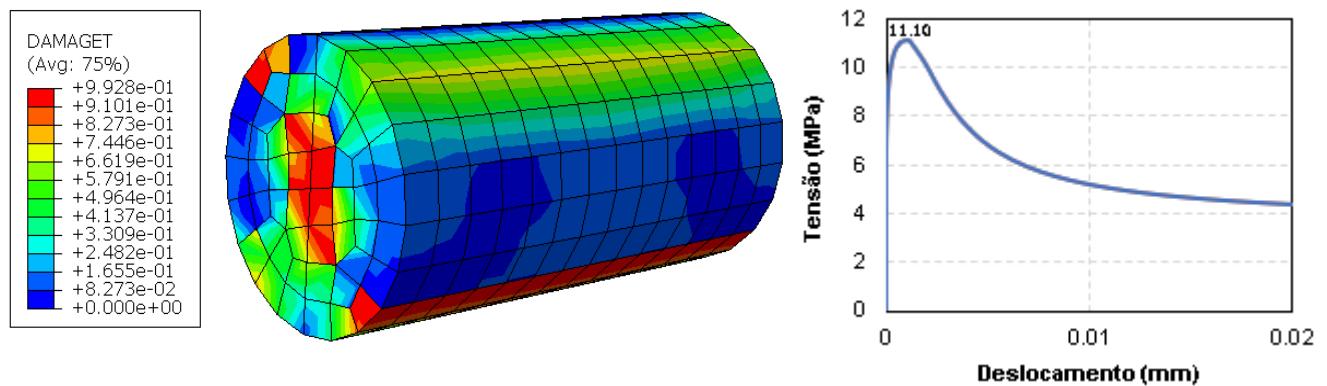
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.22 - Modelagem no traço 1% de fibra Hooked.



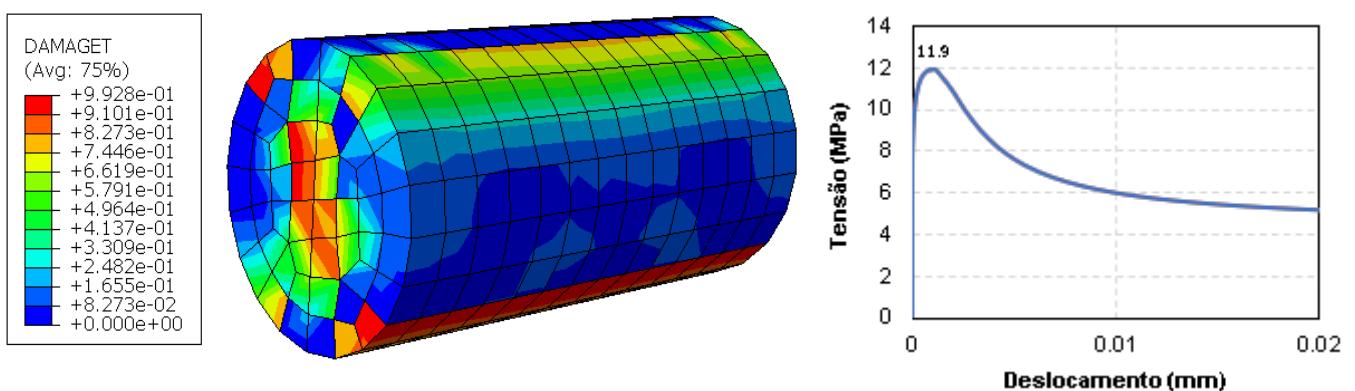
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.23 - Modelagem no traço 1,5% de fibra Hooked.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.24 - Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.



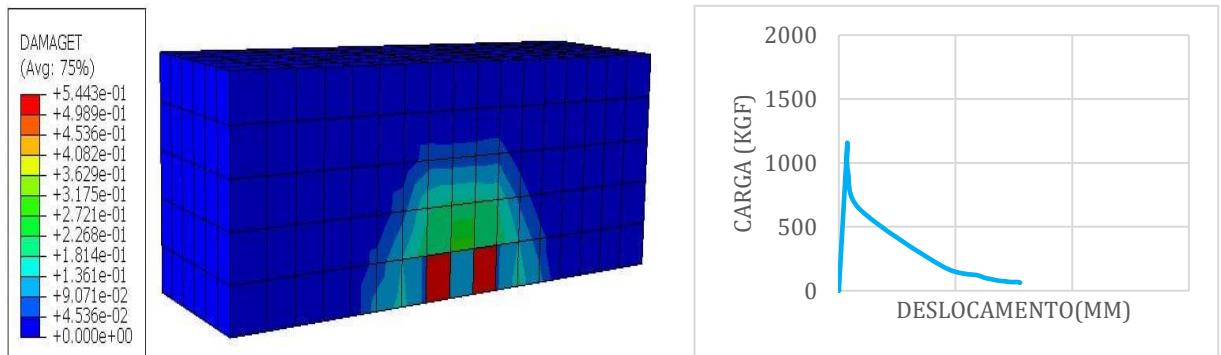
Fonte: Autor (2024).

4.7.3 Modelagem Computacional Para o Ensaio a Flexão em 3 pontos.

As figuras 4.25 a 4.27, representam a modelagem dos corpos de provas prismático de dimensões(15x15x50cm) de concreto com e sem fibras que foram submetidos aos ensaios de flexão em três pontos e a partir dos resultados experimentais foi feita uma modelagem por elementos finitos utilizando o programa Abaqus. A inserção das propriedades dos materiais foram adquiridas partir do ensaio de flexão em 3 pontos e a definição do modelo escolhido para simulação do elemento foi o C3D20 do banco de dados do programa Abaqus, devido a geometria do elemento ser mais adequada ao problema.

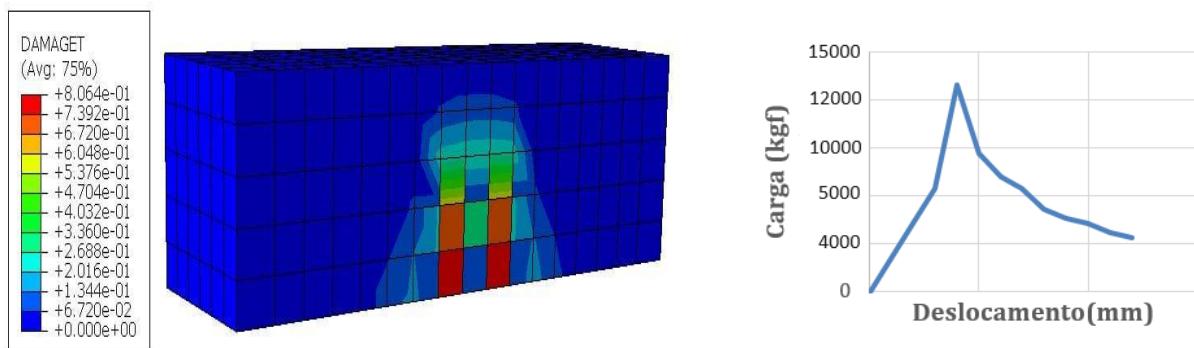
De acordo com as figuras 4.25 a 4.27 que mostra a modelagem dos corpos de provas prismáticos sem adição e com 2% de adição fibras de geometrias diferentes, onde se verifica que a presença de fibras oferece uma maior ancoragem ao concreto oferecendo uma maior distribuição das tensões no concreto com fibras do que sem fibras, isto pode ser explicado pela transferência de parte das tensões para fibras que no modelo computacional reflete a realidade experimental com uma boa concordância de resultados.

Figura 4.25 - Modelagem no traço Padrão.



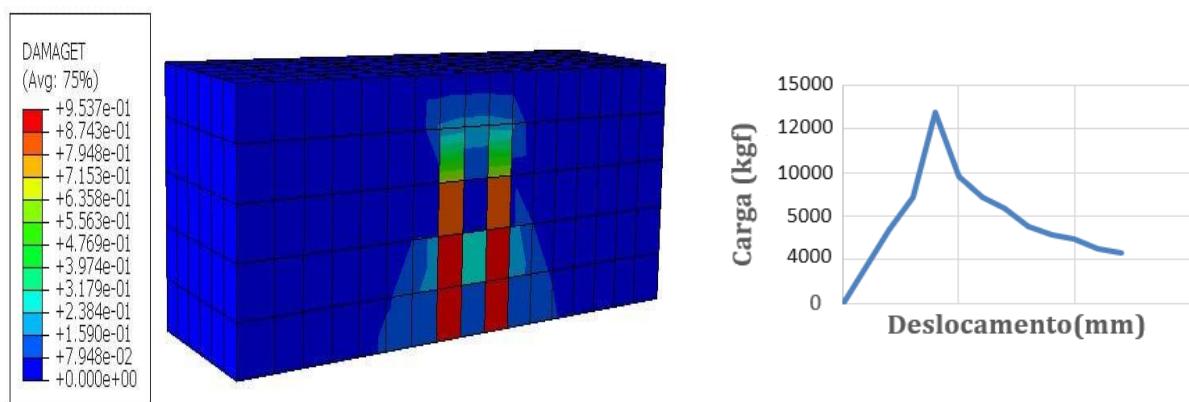
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.26 - Modelagem no traço 2% de fibra Crimped.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.27 - Modelagem no traço 2% de fibra Hooked.



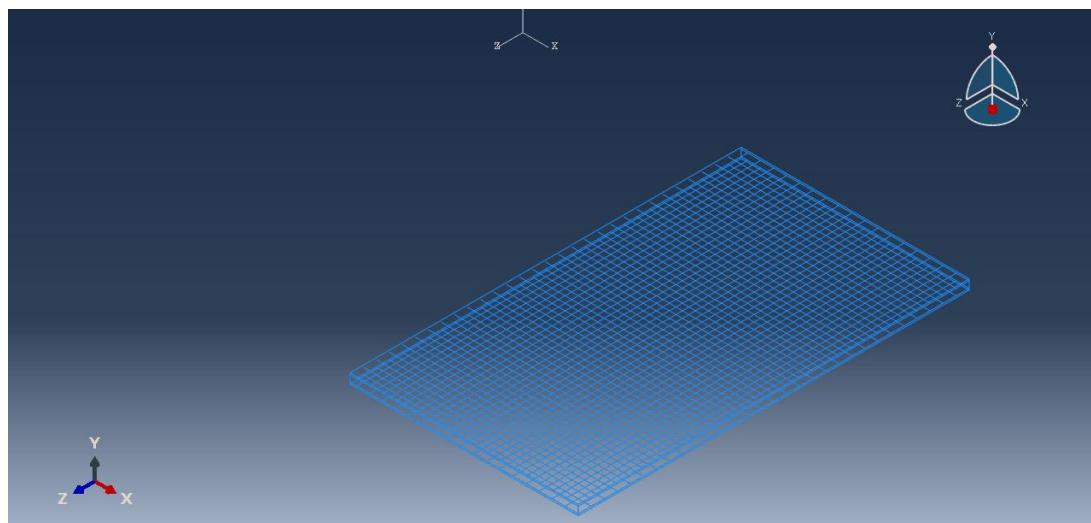
Fonte: Autor (2024).

4.7.4 Modelagem computacional não linear do pavimento rígido

Os modelos mostrados nas figuras 4.28 a 4.32, mostram a modelagem computacional por MET no Abaqus de placas de concreto para pisos industriais para quatro condições: placa com concreto simples, placa com concreto com armadura, placa com concreto com adição de 2% de fibras tipo Hooked e placa com concreto com adição de 2% de fibras tipo Crimped.

Baseado na modelagem por elemento finito das placas de pisos industriais para as quatro situações como mostra as figuras 4.28 a 4.32, observou-se que placa com concreto simples foi a que apresentou a menor resistência a flexão, devido a ausência de fibras e armadura de aço quando comparado com os pisos industriais com adição de fibras de 2% e os pisos industriais de concreto com armadura, desta forma atribui-se a presença de fibras de aço e da armadura a maior resistência a flexão e a capacidade absorver tensões como pode ser visto na modelagem por elementos finitos no programa Abaqus.

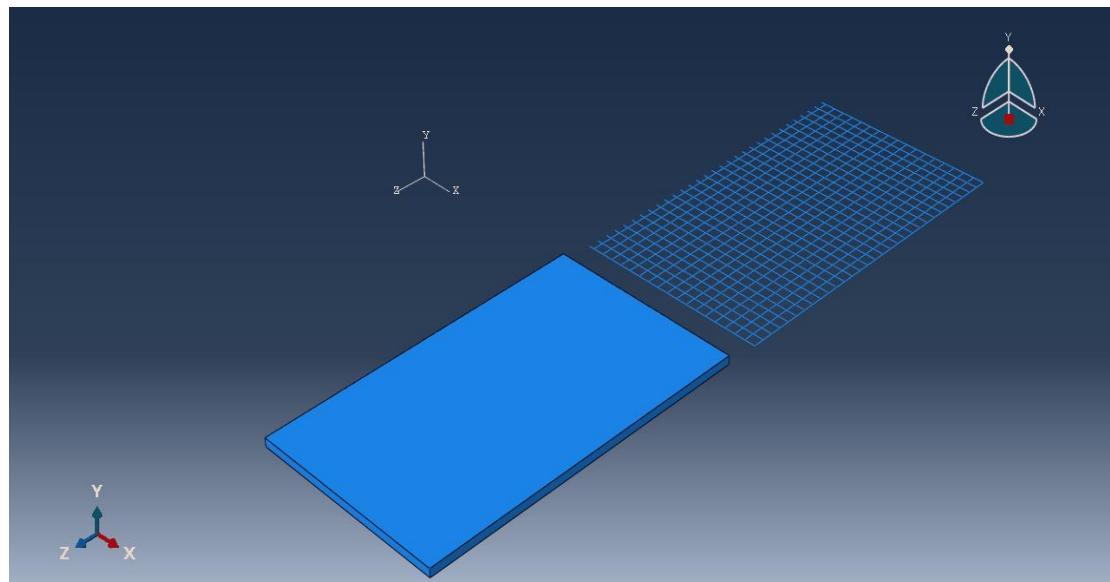
Figura 4.28-Modelo computacional da Tela soldada em aço galvanizado.



Fonte: Autor (2024).

Para a Figura 4.29, mostrou-se a matriz concreto com inserção de tela de aço para a simulação por elementos finitos de uma situação real experimental.

Figura 4.29 - Modelo Computacional Mod 1.

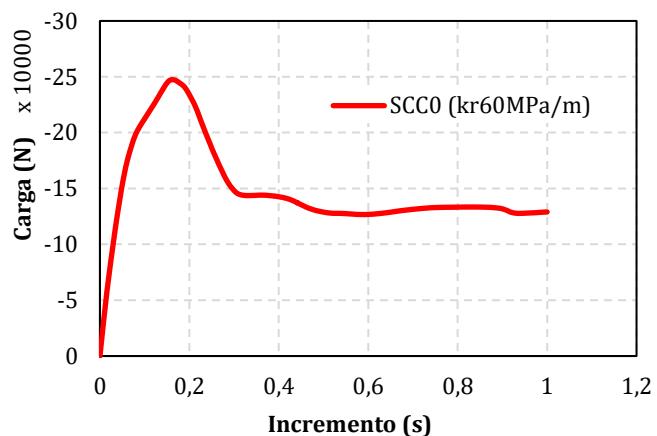


Fonte: Autor (2024).

4.7.5 GRÁFICOS DE HISTÓRICOS DE CARREGAMENTO

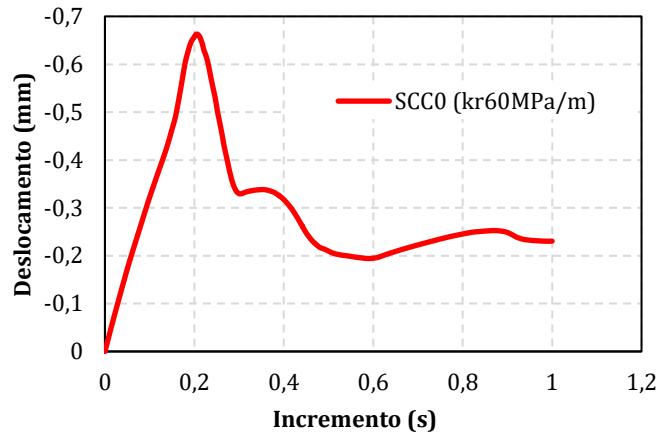
A interpretação dos gráficos abaixo revelou ser promissora, de acordo com as Figuras 4.30 a 4.33, o modelo padrão, prevê-se um aumento com a inclusão de fibras de aço do modelo Crimped e Hooked com a porcentagem de 2%.

Figura 4.30 - Histórico de carregamento total na placa - SCC0



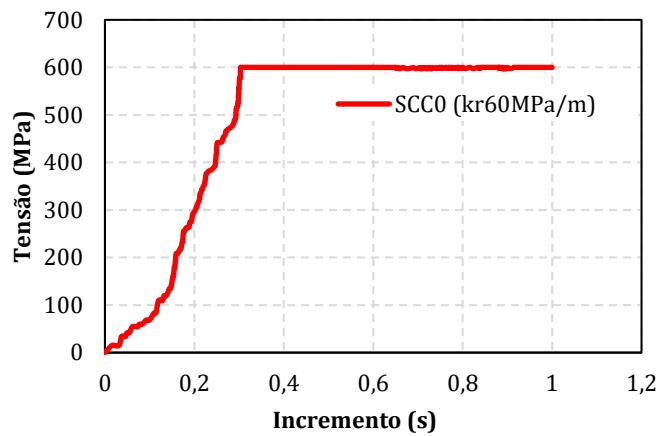
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.31 - Histórico de deslocamento vertical no centro da placa - SCC0



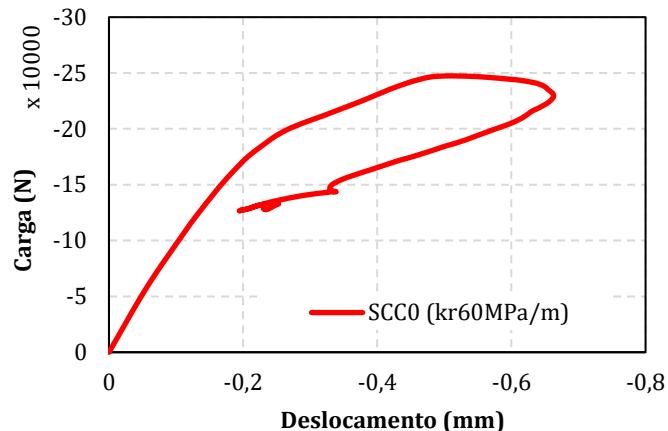
Fonte: Autor (2024).

Figura 4.32 - Histórico de tensão na barra de aço inferior principal - SCC0



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.33 - Gráfico carga \times deslocamento do modelo de pavimento SCC0

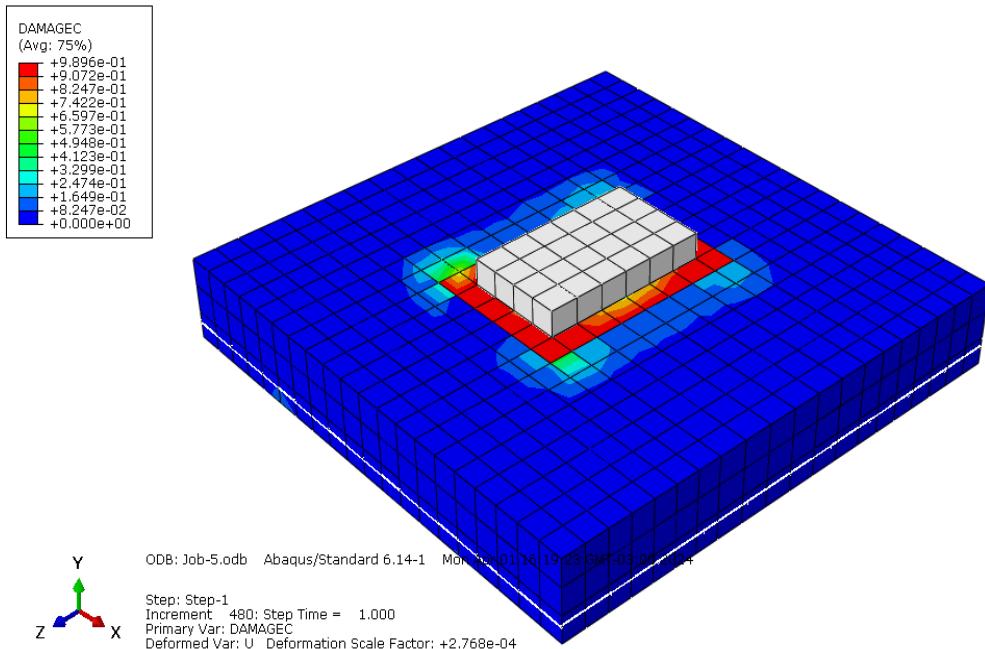


Fonte: Autor (2024).

4.7.6 Distribuição de danos

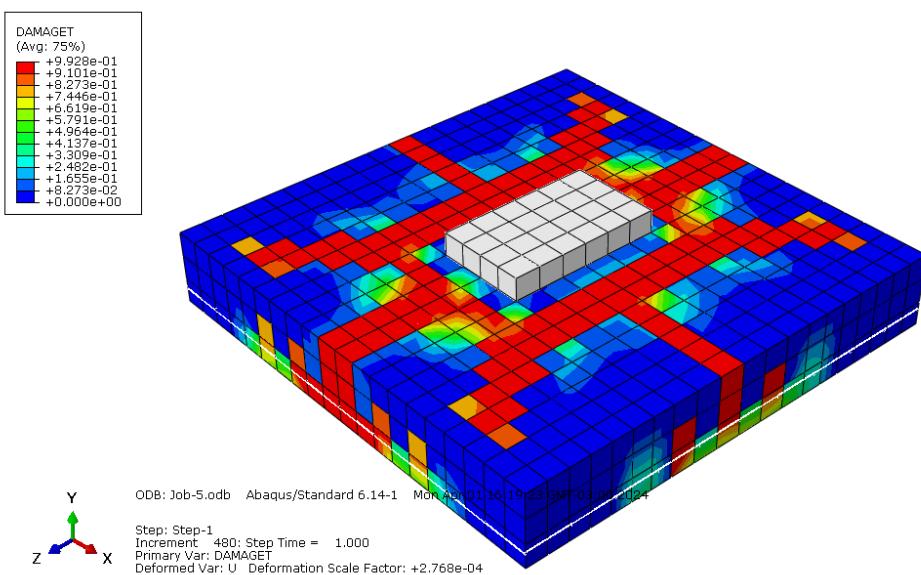
Para os modelos computacionais utilizou-se o modelo padrão (Mod 1), sem fibra de aço, esperasse que com adição das fibras, o dano de compressão e dano a tração as forças se distribuem sobre o piso industrial. Através desses modelos, o podemos identificar e caracterizar padrões de uniformidade dentro da **dessemelhança** observada, em um conjunto de elementos, observando o comportamento do impacto das fibras.

Figura 4.34- Dano de compressão – Mod 1



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.35- Dano de tração - Mod 1



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que no ensaio de Slump Test a maior quantidade de fibras de aço incorporadas no concreto diminui a sua trabalhabilidade e dificulta no adensamento formando ninhos de concretagem.

Verificou-se nos ensaios mecânicos realizados com adição de fibras de aço tipo Hooked e Crimped houve um longo período de deformação nos corpos de prova antes do colapso, o que não ocorreu com o corpo de prova sem adição de fibras, pois o mesmo sofreu uma ruptura brusca, isto pode ser explicado pela maior aderência das fibras na matriz de concreto e maior ancoragem no mesmo. Observeu-se que a fibra do modelo Hooked com os ganchos nas extremidades, se mostrou um ganho maior a fibra Crimped.

Para a resistência à tração por compressão diametral houve variação com a adições de fibras de aço que proporcionou um ganho de resistência a tração.

Para o ensaio de módulo de elasticidade a incorporação de fibras de aço nos corpos de provas de concreto determinou um aumento significativo do módulo elasticidade para a adição de fibras de 2% sendo o destaque para fibras tipo Crimped.

Para o modelo computacional desenvolvido neste trabalho pelo método dos elementos finitos no programa Abaqus, verificou-se uma boa concordância entre os dados experimentais e a modelagem computacional refletindo os ensaios realizados em laboratório e mostrando o detalhamento da distribuição de tensões nos corpos de prova e nos pisos industriais.

Os resultados obtidos nas modelagens computacionais, em geral, mantiveram-se próximos aos valores de referência dos ensaios experimentais dos corpos de prova padrão e dos corpos de prova com adição de fibras de 1%, 1,5% e 2%, de acordo com a simulação por elementos finitos. É válido ressaltar que os modelos computacionais representaram de maneira significativa os resultados que foram obtidos durante a execução dos ensaios de compressão diametral, axial e tração na flexão nos corpos de prova em laboratório, obtendo assim, modelos representativos de fissuração dos corpos de prova no estado de tensão máxima e refletindo o aumento da resistência a compressão axial dos corpos de prova que variam de 32MPa até 36,2MPa com o aumento da adição de fibras o que mostra um ganho de resistência a compressão de mais de 10%. Dessa forma, conclui-se que a incorporação de fibras em concreto para utilização em pisos industriais se mostrou vantajosa em relação ao concreto sem fibras e

apresentou melhorias significativas com a maior adição fibras da ordem de 2% tanto da fibra tipo Hooked como Crimped, sendo melhor desempenho da fibra Hooked.

6 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar a adição de maiores porcentagens de fibras de aço nos pisos industriais para verificar seu efeito.
- Realizar estudos sobre tenacidade e resistência a impacto estático e dinâmico nos pisos industriais.
- Fazer modelagem por elementos finitos para condições de cargas dinâmicas para pisos industriais.
- Fazer estudo da substituição parcial das armaduras por fibras de aço em pisos industriais.
- Realizar o modelo computacional não linear das lajes de concreto armado com adição de fibras de aço

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. Determinação Da Resistência À Tração Por Compressão Diametral De Corpos-De-Prova Cilíndricos. Rio De Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480. Barras E Fios De Aço Destinados A Armaduras Para Concreto Armado – Especificação. Rio De Janeiro, 1996.

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CR 001-2011 – EXECUÇÃO DE PISO DE CONCRETO QUE RECEBERÁ UM REVESTIMENTO DE ALTO DESEMPENHO (RAD)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - NM 45: Agregados – Determinação da massa. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Fibras de aço para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio De Compressão De Corpos-De-Prova Cilíndricos – Método De Ensaio. Rio De Janeiro, 2018. 14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto De Estruturas De Concreto. Rio De Janeiro, 2014. 196 15

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: Materiais Metálicos. Determinação Das Propriedades Mecânicas À Tração. Métodos De Ensaio. 1992. 16

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. Determinação Da Resistência À Tração Por Compressão Diametral De Corpos-De-Prova Cilíndricos. Rio De Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CF 003/2011 – MACROFIBRAS SINTÉTICAS PARA PISOS INDUSTRIAIS – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CP 001/2018 – ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS DE CONCRETO PARA PISOS INDUSTRIAS

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CR 002-2011 – SELEÇÃO DE REVESTIMENTOS

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CR 003-2011 – CONTROLE DE CAMPO

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE CR 004-2012 PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE DE PISO DE CONCRETO

ASSOSSIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. ANAPRE-CR 009-2018 – GUIA DE PATOLOGIAS CAUSAS E CONSEQUENCIAS

AKASAKI, J.L.; FIORITI, C.F.; NIRCHL, G.C. (2001) . **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BORRACHA VULCANIZADA.** In:43º Congresso Brasileiro do Concreto. 2001.

ALMEIDA R. L. J. (2023). **COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS,** Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos São Carlos-SP

AL-OSTA M. ; SHARIF A. M. ; AHMAD S. ;**Efeito da hibridização de aço reto e em forma de gancho. Efeito da hibridização de aço reto e em forma de ganchofibras e métodos de cura na chave mecânica propriedades do UHPC;**Journal Of Materials Rearch And Technology (jmr&t); Dhahran, Saudi Arabia; 2021.

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE MACROFIBRAS ESTRUTURAS SINTÉTICAS E MICROFIBRAS DE VIDRO ANTI-CRACK AR E PISOS. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 12, n. 1, (2016).

ATEA R. S. ;ESTUDO DE CASO SOBRE CONCRETO COLUNA FORÇA MELHORIA COM DIFERENTE FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO; Jounal Of Materials Rearch And Technology (jmr&t) ; 2019

AWOYERA, P.O.; EFFIONG, J.U.; OLALUSI, O.B.; ARUNACHALAM, K.P.; AZEVEDO, A.R.G.; MARTINELLI, F.R.B.; MONTEIRO, S.N. (2022). Experimental Findings and Validation on Torsional Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete Beams: A Review. Polymers, v. 14, 1-30. DOI:10.3390/polym14061171 <https://doi.org/10.3390/polym14061171>

CRISTELLI, R. PAVIMENTOS INDUSTRIAS DE CONCRETO – ANÁLISE DO SISTEMA CONSTRUTIVO. Belo horizonte, 2010.

BATTAGIN, I.L.S. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO: COMO ANALISAR E ESPECIFICAR. Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados da ABNT. São Paulo, SP. (2007).

BENTUR, A.; MINDESS, S. FIBRE REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007. 625 p

Brackmann D. G.; RODRIGUEZ R. Q.; LIMA R. C. A.; NETO A. B. S.; CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE PLASTICIDADE DO DANO NO PROGRAMA ABAQUS PARA ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE LAJES LISAS PROTENDIDAS; Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas 2021.

CARNEIRO, Raylson & Carneiro, Rogerio & Silva, Kattia. (2020). **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA A ANÁLISE DE ESTRUTURAS: COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÃO EXATA E SOLUÇÕES APROXIMADAS PELO MÉTODO DE GALERKIN.** REVISTA SERGIPANA DE MATEMÁTICA E EDUCAÇÃO MATEMÁTICA. Doi: 5. 407-428. 10.34179/revisem.v5i2.13482.

CHUN, Y.; CLAISSE, P.; NAIK, T.R.; GANJIAN, E. **SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES.** p. 87 -1^a Edição, Taylor & Francis. Milton Park, Osfordsshire, Reino Unido. (2007).

COSTA M. H. A.; JÚNIOR M. S.; JÚNIOR E. P.; **ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO DANO E PLASTICIDADE;** Simpósio de Mecânica Computacional (SIMMECT; 2018)

COUTO, T., A., **CERTIFICADO DE ENSAIOS DE CIMENTO – CPV – ARI MAX**, Sete Lagoas, Maio de 2016.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; MEDEIROS, U. C. Q. **ANÁLISE COMPARATIVA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DE CONCRETOS COM FIBRAS NOVAS E RECICLADAS DE POLIÉSTER. AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 18, n. 3, p. 195-209, 2018.

FIGUEIREDO, A.D. **CONCRETO PROJETADO: FATORES INTERVENIENTES NO CONTROLE DA QUALIDADE DO PROCESSO.** Dissertação de mestrado -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP. 1992.

GOES, C. M. W.; FONTANI, P. S. P.; PIMENTEL, L. L.; AVILA, A. E. P. G.

HERSCOVICI, H. L.; ROEHL, D.; SÁNCHEZ FILHO, E. de S. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS CURTAS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO SUJEITAS À FLEXÃO.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 2, p. 288-307, 2019.

HRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; MEDEIROS, U. C. Q. **ANÁLISE COMPARATIVA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DE CONCRETOS COM FIBRAS NOVAS E RECICLADAS DE POLIÉSTER. AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 18, n. 3, p. 195-209, 2018.

JUNIOR, P. S. M. ; CARDOSO, F. M. N. ; BRANCO, V. H. L. ; PICANCO, M. S. ; OLIVEIRA, D. R. C. . **ANALYTICAL AND COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE FLEXURAL BEHAVIOR OF UHPFRC BEAMS.** LATIN AMERICAN JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES , v. 21, p. 1-18, 2024.

KHABAZ, AMJAD. **DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT BETWEEN STRAIGHT STEEL FIBER AND THE CONCRETE FRI (SSF.C).** Advances in Materials. Vol. 4, pp. 2029. 2015.

LEE, S.; YOO, D.; MOON, D. (2019). **EFFECTS OF HOOKED-END STEEL FIBER GEOMETRY AND VOLUME FRACTION ON THE FLEXURAL BEHAVIOR OF CONCRETE PEDESTRIAN DECKS.** Appl Sci, v. 9(6), p. 1-21.

LÖFGREN, I.; STANG, H.; OLESEN, J. F. **FRACTURE PROPERTIES OF FRC DETERMINED THROUGH INVERSE ANALYSIS OF WEDGE SPLITTING AND THREE-POINT BENDING TESTS.** *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 3, n. 3, p. 423–434, 2005.

LUCENA, J.C.T. (2017). **CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO: ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO EM PAINEL ALVEOLAR DE PAREDE FINA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de 18Persp. Online: exatas & eng., Campos dos Goytacazes, 25(09) 01 -19 - 2019seer.perspectivasonline.com.br Estruturas) –Universidade de São Paulo USP – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP. 2017.

NZAMBI, A.K.L.L.; NTUKU, J.B.; OLIVEIRA, D.R.C. (2021). **EMPIRICAL EQUATIONS FOR FLEXURAL RESIDUALSTRENGTHS IN CONCRETE WITH LOW VOLUMETRIC FRACTIONS OF HOOK-END STEEL FIBER.** *Engineering Reports*, v. e12490. DOI:10.1002/eng2.12490.

NZAMBI, A.K.L.L.; OLIVEIRA, D.R.C.; MONTEIRO, M.V.S.; SILVA, L.F.A. (2021). **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS IN SHEAR.** *IBRACON ESTRUT MATER.*, v. 15(3). DOI:10.1590/S1983-41952022000300001.

OLIVEIRA, N.P. **CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E DE POLIPROPILENO.** Curso de Engenharia Civil –Centro Universitário de Formiga UNIFOR. Formiga, MG, 2014.

PEDROSO, F.L. (2009). **CONCRETO: AS ORIGENS E A EVOLUÇÃO DO MATERIAL CONSTRUTIVO MAIS USADO PELO HOMEM.** *REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES, REVISTA OFICIAL DO IBRACON*, Ano XXXVII, no

PEIXOTO, F. P. A. **DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS INDUSTRIAIS COM RECURSO À INCORPORAÇÃO DE FIBRAS RECICLADAS;** 2022.

PORFIRIO M. D. ET AL. **ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL NÃO LINEAR DA ADERÊNCIA DE LAMINADOS DE POLÍMEROS DE FIBRA DE CARBONO AO CONCRETO.** IBRACON 2023.

RODRIGUES, J. D. ; LIMA, M. F. R. ; PORFIRIO, D. M. ; SANTOS, R. S. ; KUBOTA, T. K. ; RIBEIRO, R. J. C. ; COSTA, N. C. S. ; GOMES, L. G. . **ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL NÃO LINEAR DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO SOB ENSAIOS DE COMPRESSÃO E TRAÇÃO.** In: 28º Encontro Regional IBRACON Pa, 2023, Belém. Anais Do XXVIII Encontro Regional IBRACON - Pará. Belém: DPPI/IFPA, 2023. V. 1. P. 1-139.

SABA A. M.; KHAN A. H.; AKHTAR M. N. et al. **RESISTÊNCIA E COMPORTAMENTO FLEXURAL DE FIBRA DE AÇO E SÍLICA ATIVA INCORPORADA EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL.** *Jounal Of Materials Rearch And Technology (jmr&t)*; 2021.

SALVADOR, R. P. ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.

[s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

SANTOS, L. C. D. et al. INVERSE ANALYSIS OF CONSTITUTIVE MODELS APPLIED TO STEEL FIBER 302 REINFORCED CONCRETE. CILAMCE 2020. Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC., p. 16–19, 2020.

SHAFIGHFARD T.; BAGHERZADEH F. ; RIZI A. R.; YOO D. Y.; PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO BASEADA EM DADOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO (CRFA) SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS USANDO MÁQUINA EMPILHADA ALGORITMOS DE APRENDIZAGEM; Jounal Of Materials Rearch And Technology (jmr&t); 2022.

SILVA R. R. C; BOMFIM L. H. S. (2019). ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS DE ADIÇÃO DE FIBRAS ATRAVÉS DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRASSOM. Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia (2019)

WANG, X.; ZHANG, S.; WANG, C.; CAO, K.; WEI, P.; WANG, J. (2019). EFFECT OF STEEL FIBERS ON THE COMPRESSIVE AND SPLITTING-TENSILE BEHAVIORS OF CELLULAR CONCRETE WITH MILLIMETER SIZE PORES. CONSTR BUILD MATER, v. 221, p 60-73.

XU J.; CHANG F. ; BAI J. ; LIU C. ; Análise estatística do comportamento de fratura de agregado reciclado reforçado com fibra de aço embrorrachado concreto baseado em emissão acústica; Jounal Of Materials Rearch And Technology (jmr&t); School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2023.

ANEXOS

Dados da Modelagem

TENSAO x DEFORMACAO INELASTICA CONCRETO - COMPRESSÃO
(BRANCO, 2024).

11.62471 0.00000

20.00505 25.33322

27.78652 28.00000

27.52879 24.71166

19.47564 14.00000

7.73687 5.40597

4.01632 3.11274

2.48873 2.03817

1.70145 1.44278

1.23954 1.07681

0.94441 0.83519

0.74401 0.00025

0.00055 0.00096

0.00115 0.00147

0.00207 0.00277

0.00335 0.00421

0.00480 0.00535

0.00588 0.00641

0.00692 0.00744

0.00795 0.00845

0.00896 0.00946

0.00997 0.01047

TENSAO x ABERTURA FISSURA CONCRETO - TRACAO (BRANCO, 2024).

1.746 0.0000

1.380 0.0100

1.096 0.0200

0.881 0.0300

0.721 0.0400

0.601 0.0500

0.513 0.0600

0.447 0.0700

0.396 0.0800

0.357 0.0900

0.325 0.1000

0.298 0.1100

0.273 0.1200

0.251 0.1300

0.230 0.1400

0.209 0.1500

0.189 0.1600

0.170 0.1700

0.152 0.1800

0.134 0.1900

0.117 0.2000

0.100 0.2100

0.085 0.2200

0.070 0.2300

0.057 0.2400

0.045 0.2500

0.033 0.2600

0.022 0.2700

0.013 0.2800

0.004 0.2900

DANO CONCRETO x DEFORMACAO INELASTICA CONCRETO –
COMPRESSAO (BRANCO, 2024).

0.00000 0.00000

0.09037 0.14751

0.21570 0.24682

0.29850 0.40115

0.53177 0.65667

0.81297 0.87638

0.91409 0.93789

0.95363 0.96446

0.97216 0.97778

0.98198 0.98518

0.98766 0.98962

0.99119 0.00025

0.00055 0.00096

0.00115 0.00147

0.00207 0.00277

0.00335 0.00421

0.00480 0.00535

0.00588 0.00641

0.00692 0.00744

0.00795 0.00845

0.00896 0.00946

0.00997 0.01047

215 216

DANO x ABERTURA FISSURA CONCRETO – TRACAO (BRANCO, 2024).

0.000000 0.0000
0.209863 0.0100
0.372108 0.0200
0.495215 0.0300
0.587345 0.0400
0.655718 0.0500
0.706385 0.0600
0.744205 0.0700
0.772953 0.0800
0.795467 0.0900
0.813815 0.1000
0.829458 0.1100
0.843387 0.1200
0.856246 0.1300
0.868425 0.1400
0.880140 0.1500
0.891491 0.1600
0.902500 0.1700
0.913152 0.1800
0.923407 0.1900
0.933220 0.2000
0.942549 0.2100
0.951361 0.2200
0.959632 0.2300
0.967350 0.2400
0.974515 0.2500
0.981135 0.2600
0.987226 0.2700
0.992811 0.2800
0.997918 0.2900

CONCRETO DENSIDADE 2.4E-009 (BRANCO, 2024).

MODULO 26630 POISSON 0.2

DILATACAO 38

EXCENTRICIDADE 0.1

RELACAO FB0/FC0 1.16 K 0.667

VISCOSIDADE 0.002

NEOPRENE MODULO 1.5

POISSON 0.25

AÇO DENSIDADE 7.85E-009

MODULO 243830

POISSON 0.3

YIELD 573

STRAIN 0

CBR do subleito 4%;

Sub-base de solo melhorado com cimento, com 10 cm de espessura;

Concreto armado com tela soldada de aço CA-60, fck = 25 MPa e E = 30000 MPa;

Comprimento original da placa = 15 m (adotado na modelagem 1,00 × 1,00 m);

Coeficiente de atrito placa / sub-base = 1,7;

Carga máxima em eixo simples = 170 kN;

Pressão de enchimento dos pneus = 0,7 MPa;

Coeficiente de recalque kr = 60 MPa/m;

Espessura da placa = 16 cm;

Armadura inferior = Tela Q 246;

Armadura superior = Tela Q 138;