

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DANIELLI DUÓ**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO  
DIAMETRAL SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES**

**Alegrete  
2021**

**DANIELLI DUÓ**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO  
DIAMETRAL SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia (PPEng) da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Luis Eduardo Kostaschi

**Alegrete  
2021**

**DANIELLI DUÓ**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DECOMPRESSÃO  
DIAMETRAL SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia (PPEng) da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

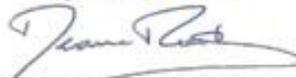
Dissertação defendida e aprovada em: 20 de Julho de 2021.

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Luís Eduardo Kostaschi  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof.ª Dr.ª Déane de Mesquita Roehl  
Examinadora  
PUC



---

Prof. Ph.D Jorge Daniel Riera  
Examinador  
UFRGS



---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Examinador  
UNIPAMPA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

D928a DUÓ, DANIELLI  
ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO  
DIAMETRAL SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES / DANIELLI DUÓ.  
130 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2021.  
"Orientação: LUÍS EDUARDO KOSTESKI".

1. ENSAIO BRASILEIRO DE TRAÇÃO. 2. DISTRIBUIDORES DE CARGA.  
3. ANÁLISE MECÂNICA. 4. COMPRESSÃO DIAMETRAL. I. Título.

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram em meio as dificuldades que obtive no caminho, em especial a minha família, amigos e professores.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus pela proteção ao longo desta jornada, por me dar forças durante vários momentos que pensei que não conseguiria concluir esta etapa, por ser minha força e luz.

A minha família, pelo incentivo, carinho, paciência e apoio. Em especial a minha mãe Maria Aparecida, a qual é meu maior exemplo de mulher e determinação, tenho certeza que não teria alcançado nenhum dos meus objetivos sem a base e educação que me deste.

Ao professor Luís Eduardo Kostascki pela orientação, profissionalismo, paciência e incentivo para que permanecesse no mestrado. Ao professor Ederli Marangon pela colaboração e incentivo nas diversas etapas do mestrado e da pesquisa.

A todos os colegas e amigos que fiz no mestrado pela parceria, ajuda em laboratório e apoio mútuo, em especial ao Matthews Vargas, Nadine Ficher, Camila Vargas, Kevin Rebolledo, Raquel Zydeck, Pedro Jucá e Gustavo Laionel.

As amigas Larissa Prado, Amanda Maia e Jéssica Gomes pelas palavras de apoio e incentivo, vocês foram muito importantes na conclusão dessa conquista pessoal.

Ao meu namorado Dioni que sempre dedicou palavras de incentivo, carinho e atenção, foi muito importante cada momento que dedicou e esteve do meu lado nessa caminhada.

A minha psicóloga Fabiana que me auxiliou muito na minha evolução pessoal e mental, desde o início do processo, me ajudando a lidar com a ansiedade e crises que tive na caminhada, sou grata demais.

Por fim, aos demais professores que estiveram a frente dos ensinamentos que adquiri ao longo desta jornada, rumo ao processo de construção profissional.

A todos meu muito obrigado!

“O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem”.

Guimarães Rosa

## RESUMO

A resistência à tração é uma propriedade mecânica fundamental na análise de materiais frágeis, principalmente pela suscetibilidade de falha quando submetidos a cargas críticas. Existem três métodos experimentais que determinam os efeitos de tração, sendo os ensaios de: tração direta, tração por compressão diametral e tração por flexão. Dentre eles, o mais empregado é o segundo, que consiste na aplicação de carregamento uniaxial de compressão sob amostras cilíndricas, produzindo tensões de tração transversal, uniforme ao longo do diâmetro vertical do espécime. Apesar disso, o ensaio possui parâmetros que influenciam o resultado final de resistência dos materiais, como a largura da tira de distribuição de carregamento e a velocidade de ensaio, dependendo da solução adotada pode-se alterar propriedades elásticas dos materiais. Desta forma, o presente trabalho visa analisar o mecanismo de falha gerado no ensaio de compressão diametral quando modificadas as seções e materiais das taliscas de distribuição de carga. Para isso desenvolveu-se um programa experimental com 45 espécimes de concreto sob traço com resistência de 45MPa. Desses, utilizaram-se 10 espécimes por configuração de talisca, sendo elas: talisca de madeira (CMD), talisca metálica de 10 mm (CMT10), talisca metálica de 15 mm (CMT15) e talisca metálica de 20 mm (CMT20) e os demais ensaiados à compressão axial. Dentre os resultados experimentais, pode-se destacar que as configurações CMD e CMT20 não demonstraram diferença entre seus resultados. Os valores obtidos pela configuração CMD coincide diretamente com os valores propostos pela norma 6118 (ABNT, 2014). O formato de ruptura dos espécimes apresentou grande variação na forma e grau de dano, o que não possibilitou determinar um padrão de falha representativo. O local de início das fissuras na face não coincide com o centro do corpo de prova em inúmeros ensaios, o que diverge com a teoria que embasa o experimento. Também foram desenvolvidas análises numéricas sob sistema bidimensional (2D) e tridimensional (3D) através da associação do método dos elementos discretos compostos por barras (LDEM), junto ao método dos elementos finitos (MEF). Dentre as respostas numéricas tem-se que: as curvas tensão-deformação e os formatos de ruptura são similares ao comportamento experimental, a falha com tiras metálicas ocorre sempre próximo da borda de contato e com taliscas de madeira próximo a largura efetiva, no modelo 3D a fissura propaga das faces para o centro do corpo como nas simulações 2D, e também no comprimento as mesmas se alastram das bordas para o centro do espécime.

Palavras-Chave: Ensaio brasileiro de tração, tiras de carregamento, LDEM associado ao MEF.

## ABSTRACT

Tensile strength is a fundamental mechanical property in the analysis of fragile materials, mainly due to the susceptibility to failure when subjected to critical loads. There are three experimental methods that determine the effects of traction, being the tests of: direct traction, traction by diametrical compression and traction by flexion. Among them, the most used is the second, which consists in the application of uniaxial compression loading on cylindrical samples, producing transversal tensile stresses, uniform along the vertical diameter of the specimen. Despite this, the test has parameters that influence the final result of resistance of the materials, such as the width of the load distribution strip and the test speed, depending on the adopted solution, elastic properties of the materials can be changed. Thus, the present work aims to analyze the failure mechanism generated in the tensile test by diametrical compression when the sections and materials of load distribution flights are modified. For this, an experimental program was developed with 45 specimens of concrete under draft with a strength of 45 MPa. Of these, 10 specimens were used per flight configuration, namely: wooden flight (CMD), metallic flight 10 mm (CMT10), metallic flight 15 mm (CMT15) and metallic flight 20 mm (CMT20) and the others tested to axial compression. Among the experimental results, it can be highlighted that the CMD and CMT20 configurations showed no difference between their results. The values obtained by the CMD configuration directly coincide with the values proposed by the 6118 standard (ABNT, 2014). The rupture shape of the specimens showed great variation in the shape and degree of damage, which did not allow to determine a representative failure pattern. The starting point of the cracks on the face does not coincide with the exact center of the specimen in numerous tests, which diverges from the theory that supports the experiment. Numerical analyzes were also carried out under two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) systems through the association of the method of discrete elements composed of bars (LDEM), together with the finite element method (MEF). Among the numerical responses, the stress-strain curves and the rupture shapes are similar to the experimental behavior, the failure with metallic strips always occurs close to the contact edge and with wooden slivers close to the effective width, in the 3D model the crack propagates from the faces to the center of the body as in 2D simulations, and also in length they spread from the edges to the center of the specimen.

Keywords: Brazilian tensile test, loading strips, DEM associated with MEF.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de compressão diametral: a) procedimento experimental; b) tensões de tração ao longo do diâmetro; c) ruptura típica dos materiais frágeis .....	6
Figura 2 - Arranjo do ensaio de compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011) .....	6
Figura 3 – a) Igreja de São Pedro do Clérigos; b) Fernando Luiz Lobo Carneiro, preparando o ensaio de compressão diametral .....	8
Figura 4 – (a) Método sugerido pela ISRM (1978); (b) Método normatizado pela D3967 (ASTM, 2016) .....	9
Figura 5 – (a) Friso metálico da ME 138 (DNER, 1994); (b) Aparato metálico da D6931 (ASTM, 2012) .....	10
Figura 6 – Padrões de carregamento do teste brasileiro de tração indireta.....	11
Figura 7 – a) modelo de carga linear; b) comportamento da tensão; c) comportamento da deformação.....	12
Figura 8 – Distribuição de tensões sob configuração de carregamento linear.....	13
Figura 9 – a) modelo de carga distribuída em arco; b) comportamento da tensão; c) comportamento da deformação .....	14
Figura 10 – Carga distribuída em arco e ângulo resultante.....	16
Figura 11 – a) modelo representativo; b) compactação de uma amostra cilíndrica feita de material homogêneo, isotrópico e elástico entre duas mandíbulas elásticas.....	17
Figura 12 – a) distribuição das tensões; b) diferença entre largura da tira, largura efetiva de contato e ângulo central.....	18
Figura 13 – Variação da relação entre o valor de tensão de tração real e o valor obtido com a aplicação da Equação 1.....	19
Figura 14 – Resultados da análise numérica de elementos finitos e comparação com os resultados obtidos com a aplicação da Equação 8 .....	20
Figura 15 – Resultados obtidos para diferentes larguras efetivas de contato .....	20
Figura 16 – Resultados obtidos para diferentes dimensões de corpos de prova .....	21
Figura 17 – (a) Tensões e deformações na região mediana; (b) Na extremidade .....	23
Figura 18 – Distribuição das tensões principais no eixo vertical no meio e na extremidade do cilindro comprimido .....	23
Figura 19 – Subconjunto de identificação de deslocamento relativo: a) padrão estocástico sobre o material; b) antes da deformação; c) após a deformação .....	25

Figura 20 – a) Modelo simulado; b) início do processo de carregamento do espécime; e c) término do carregamento ao atingir a máxima tensão .....	26
Figura 21 – Evolução da fissuração e fratura; a) 2,1 ms; b) 2,16 ms; c) 2,25 ms e d) 3,6 ms .....	27
Figura 22 – Ruptura Típica do modelo sob os diferentes casos; a) Caso A; b) Caso B; c) Caso C e d) Caso D .....	28
Figura 23 – Casos modelados por Santos et al. (2017); a) 0,15; b) 0,25 e c) 0,30.....	28
Figura 24 – Fissuras obtidas pelos diferentes métodos; a) 0,15; b) 0,25 e c) 0,30 .....	29
Figura 25 – Distribuição de tensões sobre o espécime modelado por Zhoa et al (2018) .....	30
Figura 26 – a) modelo numérico; b) iniciação das trincas; c) início da ruptura; d) padrão de ruptura numérica; e e) padrão de ruptura experimental .....	31
Figura 27 – Organograma das etapas efetuadas experimentalmente .....	32
Figura 28 – Agregados utilizados na pesquisa: a) gráudo; b) miúdo.....	33
Figura 29 – Curvas das composições granulométricas dos agregados gráudo e miúdo .....	34
Figura 30 – Cimento Portland utilizado: a) Cimento tipo CPV ARI e b) Curva de composição granulométrica .....	35
Figura 31 – Produção do concreto e verificação da consistência .....	37
Figura 32 – Espécimes: a) formas metálicas para produção; b) concreto moldado e c) pós desforma, aplicação da pintura e demarcação para realização dos ensaios mecânicos .....	38
Figura 33 – Taliscas a serem utilizadas a) face Frontal; b) face Superior .....	39
Figura 34 – Equipamento para os ensaios mecânicos e aquisição dos dados .....	40
Figura 35 – Compressão axial, posicionamento dos equipamentos a) frontal e b) lateral .....	41
Figura 36 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação características do concreto .....	42
Figura 37 – Detalhamento do conjunto para ensaio de compressão diametral a) espécime sob vista frontal, b) gabarito de centralização das taliscas e c) vista posterior .....	43
Figura 38 – Detalhamento do conjunto para ensaio de compressão diametral .....	43
Figura 39 – Detalhamento das diferentes configurações a serem efetuadas no ensaio .....	44
Figura 40 – a) superfície projetada para o espécime contendo o padrão estocástico; b) fixação dos equipamentos para filmagem dos ensaios .....	45
Figura 41 – Representação do corpo prismático e modelo cúbico simplificado do DEM .....	46
Figura 42 – Modelo constitutivo Bilinear .....	48
Figura 43 – Cubo do LDEM e suas diferentes seções modeladas no ambiente <i>Abaqus/Explicit</i> .....	50

Figura 44 – Modelo gerado com o DEM e suas massas nodais indicativas .....	51
Figura 45 – Modelo tensão pós falha <i>versus</i> deslocamento utilizado no <i>Abaqus/Explicit</i> interligado à energia de fratura do DEM .....	52
Figura 46 – Esquema representativo da incorporação de aleatoriedade no DEM através da utilização do Modelo de Hillerborg e considerando $G_f$ como campo de aleatoriedade sob $\varepsilon_p$ .....	53
Figura 47 – Organograma de atividades a serem implementadas numericamente .....	54
Figura 48 – Malha LDEM cilindro de 10 módulos .....	56
Figura 49 – Condições de contorno implantado no sistema plano .....	58
Figura 50 – Comportamento força <i>versus</i> deslocamento sobre as velocidades estudadas .....	59
Figura 51 – Comportamento força máxima <i>versus</i> velocidade de ensaio .....	60
Figura 52 – Balanços energéticos e respectivas rupturas: a) velocidade 0,050 m/s e b) velocidade 0,001m/s .....	61
Figura 53 – Comparativo entre tensão <i>versus</i> deslocamento entre as malhas estudadas .....	62
Figura 54 – Comparativo entre tensão <i>versus</i> número de módulos entre as malhas estudadas .....	66
Figura 55 – Resultados comparativos entre ensaio resistência à tração calculada pela NBR 6118 (abnt, 2014) e proporção b/d .....	71
Figura 56 – Comparativo força <i>versus</i> deslocamento vertical das amostras para as diferentes condições em estudo .....	73
Figura 57 – Comparativo força <i>versus</i> deformação horizontal das amostras para as diferentes condições estudadas .....	75
Figura 58 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas de madeira .....	77
Figura 59 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 10mm – CMT10 .....	78
Figura 60 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 15mm – CMT15 .....	79
Figura 61 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 20mm – CMT20 .....	20
Figura 62 – Distribuição espacial de propriedades sob modelo bidimensional .....	85
Figura 63 – Comportamento tensão <i>versus</i> deslocamento vertical dos conjuntos em análise .....	86

Figura 64 – Comportamento tensão <i>versus</i> deformação vertical dos conjuntos em análise .....	87
Figura 65 – Composições tridimensionais: a) CMD M; b) CMD MM; c) CMT10; d) CMT15 e e) CMT20 .....	94
Figura 66 – Distribuição espacial de propriedades sob modelo tridimensional .....	95
Figura 67 – Comportamento tensão <i>versus</i> deformação vertical configurações 3D em estudo .....	96
Figura 68 – Comparativos entre os conjuntos experimentais e numéricos em estudo .....	99
Figura 69 – Comparativos entre os resultados obtidos no estudo e bibliografia .....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio e normativas utilizadas na caracterização física dos agregados .....	33
Tabela 2 – Propriedades de caracterização física dos agregados .....	34
Tabela 3 – Composição dos materiais para produção do concreto .....	36
Tabela 4 – Descrição das taliscas utilizadas para distribuição do carregamento .....	39
Tabela 5 – Quantitativo de Corpos de Prova (CP's) por ensaio mecânico .....	40
Tabela 6 – Dados gerais de resistência à compressão axial .....	42
Tabela 7 – Propriedades das taliscas utilizadas nas simulações .....	55
Tabela 8 – Parâmetros do material utilizados na simulação .....	57
Tabela 9 – Correlação de erros sobre velocidades de ensaio .....	61
Tabela 10 – Erros de significância e ruptura das diferentes malhas .....	63
Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio brasileiro de tração .....	67
Tabela 12 – Resultados análise de variância .....	69
Tabela 13 – Resultados da significância entre os conjuntos pelo método de Fisher .....	70
Tabela 14 – Comportamento frente a inclinação da curva força-deslocamento .....	74
Tabela 15 – Propriedades das taliscas utilizadas nas simulações .....	82
Tabela 16 – Modelos simulados sob diferentes taliscas de distribuição de carga .....	83
Tabela 17 – Média de resistência dos conjuntos 2D com desvio padrão e CV.....	88
Tabela 18 – Resultados análise de variância modelos bidimensionais .....	89
Tabela 19 – Resultados da significância entre os conjuntos pelo método de Fisher .....	89
Tabela 20 – Formato de ruptura dos conjuntos em análise bidimensional .....	90
Tabela 21 – Formato de ruptura na face dos espécimes e respectivas resistências .....	97
Tabela 22 – Formato de ruptura longitudinal das configurações no sistema 3D .....	98
Tabela 23 – Comparativo entre rupturas da face sob modelo numérico 2D e experimental .....	101

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_d$  – Área dos elementos diagonais

$A_i$  – Área de seção transversal do elemento

$A_i^f$  – Área de fratura equivalente

$A_l$  – Área da seção transversal do elemento longitudinal

$C_A$  – Parâmetro de escala

$C_p$  – Velocidade de propagação da onda longitudinal

$G_f$  – Energia específica de fratura

$K_r$  – Coeficiente que relaciona  $\varepsilon_p$  com  $\varepsilon_r$

$L_{crit}$  – Comprimento crítico do elemento

$R_f$  – Fator de falha

$S^A$  – Elementos das arestas

$S^C$  – Elementos das faces

$S^D$  – Elementos Diagonais

$S^I$  – Elementos internos

$\ddot{x}$  – Vetor aceleração nodal

$\dot{x}$  – Vetor velocidade nodal

$\varepsilon_p$  – Deformação crítica de falha

$\varepsilon_r$  – Deformação limite

$\tau_{DEM}$  – Energia dissipada pelo módulo do LDEM de dimensões  $L^3$  com quebra em duas partes

$\Delta t$  – Incremento de tempo

$A$  – Área de fratura atual

$a$  – Defeito intrínseco de tamanho

$C$  – Matriz de amortecimento

$E$  – Módulo de elasticidade do material

$F(t)$  – Vetor que contém as forças internas que atuam sobre as massas nodais

fct, f – Resistência à tração na flexão

fct, inf – Resistência à tração direta característica inferior

fct, m – Resistência à tração direta característica média

fct, sp – Resistência à tração indireta

fct, sup – Resistência à tração direta característica superior

$L$  – Comprimento do módulo cúbico do LDEM

$M$  – Matriz de massa

$P(t)$  – Vetor que contém as forças externas que atuam sobre as massas nodais

$Y$  – Parâmetro adimensional dependente da amostra e geometria da fissura

$F(G_f)$  – Densidade de probabilidade

$\nu$  – Coeficiente de Poisson do sólido

$x$  – Vetor deslocamento nodal

$\beta$  – Representa o parâmetro de escala

$\gamma$  – Representa o parâmetro de forma

$\delta$  – Coeficiente representativo do sólido isotrópico

$\rho$  – Massa específica do material

$\tau$  – Energia dissipada pela fratura da amostra contínua devido a ruptura paralela a uma de suas faces

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – Associação Americana de Testes e Materiais
- CMD – Configuração Talisca de Madeira
- CMT10 – Configuração Talisca Metálica de 10mm
- CMT15 – Configuração Talisca Metálica de 15mm
- CMT20 – Configuração Talisca Metálica de 20mm
- CP – Corpo de Prova
- CP's – Corpos de Prova
- DEF – Método dos Elementos Finitos
- DEM – Método dos Elementos Discretos
- DIC – Correlação de Imagem Digital
- DNER – Departamento Nacional de Estrada e Rodagem
- ISRM – Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
- NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
- RCE – Relação Constitutiva Elementar
- LVDT – Transformador Diferencial de Variação Linear

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização do Tema e Problema de Pesquisa .....	5
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo geral .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Justificativa .....	4
1.4 Estrutura da Pesquisa .....	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 O Ensaio de Compressão Diametral .....	5
2.1.1 Histórico .....	7
2.1.2 Demais aplicações do ensaio .....	8
2.2 Comportamento Tensão <i>versus</i> Deformação no Ensaio de Compressão Diametral. ....	10
2.2.1 Configuração sob carga linear .....	11
2.2.2 Configuração sob carga radial uniformemente distribuída em faixa .....	13
2.2.3 Configuração sob carga com distribuição não uniforme em área variável .....	16
2.3 Parâmetros de Influência do Ensaio de Compressão Diametral .....	17
2.3.1 Largura efetiva de contato .....	18
2.3.2 Local de formação das fissuras .....	22
2.4 Correlação Digital por Imagem .....	24
2.5 Trabalhos Relacionados a Pesquisa e o uso de Simulações Numéricas .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
3.1 Estudo Experimental .....	32
3.1.1 Caracterização dos materiais .....	33
3.1.1.1 Agregados .....	33
3.1.1.2 Cimento Portland .....	35

3.1.1.3 Superplastificante .....	36
3.1.1.4 Água .....	36
3.1.2 Produção do concreto .....	36
3.1.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova .....	37
3.1.2.2 Tiras de distribuição do carregamento .....	38
3.1.3 Ensaio de caracterização mecânica .....	40
3.1.3.1 Ensaio de compressão axial .....	41
3.1.3.2 Ensaio de compressão diametral .....	43
3.1.4 Procedimento para correlação digital por imagem .....	45
3.2 Análise Numérica .....	46
3.2.1 Método dos elementos discretos formados por barras .....	46
3.2.2 Lei Bilinear ou modelo de Hillerbog.....	48
3.2.3 Método dos Elementos Discretos Formado por Barras (LDEM) associado ao Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	50
3.2.3.1 Modelagem treliça espacial .....	50
3.2.3.2 Determinação das massas .....	51
3.2.3.3 Modelo constitutivo inserido no ambiente <i>Abaqus</i> .....	52
3.2.3.4 Inclusão de aleatoriedade no ambiente <i>Abaqus</i> .....	53
3.2.4 Parâmetro das Simulações .....	54
3.2.4.1 Caracterização e propriedades do modelo numérico em estudo .....	55
3.2.4.2 Determinação da velocidade de aplicação de carregamento .....	58
3.2.4.3 Análise do tamanho da malha .....	62
4 RESULTADOS E DISCUSÕES.....	67
4.1 Resultados Análise Experimental .....	67
4.1.1 Resistência à tração pelo método de compressão diametral .....	67
4.1.2 Análise força <i>versus</i> deslocamento vertical .....	72
4.1.3 Análise força <i>versus</i> deformação horizontal .....	75
4.1.4 Análise de falha dos espécimes sob diferentes configurações .....	76
4.2 Resultados Análise Numérica - Diferentes Distribuidores de Carregamento .....	81

<b>4.2.1 Modelos bidimensionais (2D) .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.1.1 Resultados dos modelos bidimensionais .....</b>	<b>85</b>
<b>4.2.2 Resultado modelo tridimensional (3D) .....</b>	<b>93</b>
<b>4.2.2.1 Curva tensão <i>versus</i> deformação vertical .....</b>	<b>95</b>
<b>4.3 Análise Comparativa dos Resultados .....</b>	<b>99</b>
<b>4.3.1 Resistência à tração pelo método de compressão diametral .....</b>	<b>99</b>
<b>4.4.2 Ruptura final dos modelos .....</b>	<b>100</b>
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do Tema e Problema de Pesquisa

A resistência à tração é uma das propriedades fundamentais para o estudo de materiais frágeis e quase-frágeis, devido aos mesmos serem suscetíveis à falha quando submetidos a esforços de tração. Segundo Shu et al. (2019) e Bharani et al. (2018), tais materiais podem chegar a experimentar o processo de ruptura ou colapso quando submetidos a cargas críticas, tornando indispensável o estudo de seu comportamento frente a esses esforços. Para a análise dessa propriedade, existem três tipos de ensaios mecânicos: tração direta, tração por compressão diametral e tração por flexão.

Conforme Yin et al. (2015) e Zhang e Zhao (2013b), o método de tração direta é considerado o modelo ideal para a determinação da resistência à tração em materiais frágeis, por levar em consideração apenas a força axial aplicada ao longo da área central da amostra. No entanto, esse método apresenta difícil execução, não possuindo norma brasileira que especifique o ensaio ou padronize as dimensões dos espécimes. Além disso, de acordo com Mehta e Monteiro (2008) e Li et al. (2011), o ensaio detém baixa reprodutividade, pois o dispositivo de ancoragem produz campos de tensão sobre o corpo de prova, podendo gerar a ruptura localizada na extremidade do material, resultando em falha com tensão abaixo da força de tração máxima. A partir desse fato, o experimento torna-se raramente utilizado.

Mellor e Hawkes (1971) e Coviello et al. (2005), destacam os métodos de determinação de tração indireta como uma alternativa para a determinação dessa propriedade, apresentando vantagens por serem ensaios mais simplificados de análise e possuírem normativas específicas no país.

O modelo de ensaio de tração indireta na flexão, baseia-se na NBR 12142 (ABNT, 2010) e utiliza amostras prismáticas com aplicação de duas cargas pontuais localizadas a dois terços da viga simplesmente apoiada. Seu trecho de análise é solicitado apenas pelo momento fletor positivo, responsável pela ruptura por tração na parte inferior do elemento frágil. Para validar os resultados do modelo, a ruptura deve ocorrer à 5% do comprimento total da amostra (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Sua equivalência frente ao ensaio de tração direta, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) é de 70%, enquanto o método indireto de determinação de tração pelo ensaio de compressão diametral atinge cerca de 90%, um dos principais motivos para a ampla utilização do último ensaio.

O ensaio de compressão diametral consiste na aplicação de carregamento uniaxial de compressão sob corpos de prova cilíndricos, o qual produz uma tensão de tração transversal e uniforme ao longo do diâmetro vertical. Esse experimento é o modelo mais popular entre os métodos de caracterização descritos, por fornecer valores mais confiáveis que o ensaio de tração na flexão, além da execução mais simplificada que o método de tração direta, conforme descrevem Santos et al. (2017) e Mehta e Monteiro (2008).

O método de tração indireta por compressão, foi desenvolvido pelo engenheiro brasileiro Fernando Luiz Lobo Carneiro, o qual difundiu o método internacionalmente, tornando-o reconhecido como ensaio brasileiro, “*Brazilian Test*” em inglês. O método é amplamente aplicado para análise de materiais frágeis, como o concreto, argamassa, misturas asfálticas, cerâmicas e amostras de solos, seguindo as diretrizes da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Em 1971, Mellor & Hawkes (1971) investigaram a fundo a validade desse método para amostras rochosas. Com base em suas conclusões, a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas ISRM (1978), recomendou o uso para a determinação de resistência à tração desses materiais e posteriormente passou a ser normatizada pela D6931 (2012) da Sociedade Americana de Testes e Materiais.

Esse método de caracterização, não passou por grandes modificações desde seu desenvolvimento, mas possui deficiências, como a utilização de um modelo analítico teórico para determinar o valor máximo da tensão gerada sobre a amostra. E sua representatividade é questionada pelos pesquisadores Rocco et al. (1999a) e Rocco et al. (1999b), devido aos materiais e métodos utilizados levarem a diferentes valores de resistência à tração dos espécimes.

Os ensaios de ruptura em materiais frágeis são estudados há anos. Porém, segundo Chou e Chen (2008), Zhu e Tang (2006), Xu et al. (2006), Markides e Koukoulis (2011; 2012), Miguel, Iturrioz e Riera (2014) e Markides et al. (2016), ainda apresentam muitos parâmetros que interferem na resposta obtida pela amostra, sendo os principais: o fator de escala e a heterogeneidade das amostras; a largura e rigidez dos uniformizadores de carga, os quais podem apresentar diferentes composições de sua seção; bem como a velocidade de realização do ensaio.

Uma grande frente de análise minuciosa desses parâmetros de influência, é a aplicação de modelos de implementação numérica, os quais simulam as condições do estudo experimental. Pesquisadores como Zhu e Tang (2006), Mahabadi et al. (2009), Riera et al. (2014), Duan e Kwok (2015), Soares e Iturrioz (2015), Zhou et al. (2016), Dokhani et al.

(2016), Zeng e Wel (2017), Santos et al. (2017), Abdulah et al. (2018), Zhao et al. (2018) e Nezhad et al. (2018), desenvolveram diversos modelos de análise sob diferentes configurações de ensaio, para diferentes materiais frágeis. No entanto, boa parte das pesquisas desenvolvidas, necessitam ainda serem validadas, através da aplicação do ensaio em escala real ou métodos numéricos de maior representatividade.

Sendo assim, o presente estudo, busca avaliar o ensaio de compressão diametral, sob diferentes configurações das tiras de distribuição de carregamento, através da realização de ensaios experimentais em conjunto com a aplicação de modelos numéricos representativos, modelados através da associação do Método dos Elementos Discretos compostos por barras (LDEM), junto ao Método dos Elementos Finitos (MEF). Propõem-se com isso, verificar a real influência gerada sob a resistência à tração dos espécimes, assim como o padrão de ruptura das amostras.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o mecanismo de falha que ocorre no ensaio de compressão diametral, quando modificadas as taliscas responsáveis pela distribuição do carregamento no corpo de prova.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos.

- Verificar a influência das taliscas metálicas com a face de contato curvada na forma de ruptura dos espécimes, quando modificada a largura das mesmas.
- Estimar a variação da resistência de tração pelo método de compressão diametral nos diferentes conjuntos estudados.
- Analisar a influência das diferentes configurações do ensaio de tração indireta, através de simulações numéricas pelo LDEM no ambiente Abaqus.
- Avaliar as deformações verticais e horizontais de forma experimental e numérica.
- Correlacionar as resistências e modos de ruptura através dos dados obtidos experimentalmente e numericamente.

### **1.3 Justificativa**

O ensaio de compressão diametral, é um método difundido internacionalmente para análise de resistência à tração em materiais frágeis. Sendo esse, o ensaio de realização simplificada e de resultados mais próximos ao modelo idealizado. O mesmo não passou por modificações desde sua criação, no entanto, apresenta deficiências que levam à variações nos resultados obtidos. As principais influências nos resultados são interligadas às modificações do carregamento gerado pelas tiras de distribuição e a velocidade de execução dos ensaios. Além disso, a possibilidade de retratar experimentos de forma fiel é uma questão de extrema relevância, a qual pode ser explorada, através da utilização de métodos numéricos, que possibilitam otimizar os resultados, a partir da avaliação minuciosa dos parâmetros envolvidos no estudo.

### **1.4 Estrutura da Pesquisa**

O presente trabalho está dividido em cinco tópicos. O primeiro capítulo, apresenta uma breve introdução sobre o problema abordado, os objetivos geral e específicos e a justificativa, na qual a pesquisa tem como alicerce. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica e aborda os conceitos gerais envolvidos ao longo do estudo. No terceiro capítulo, são descritos os procedimentos metodológicos, desde os materiais utilizados no decorrer da investigação, até os procedimentos experimentais e numéricos, os quais serão efetuados ao longo da análise. O quarto capítulo, apresenta os resultados e discussões a cerca das respostas obtidas pelos diferentes conjuntos estudados. E por fim, o quinto e último capítulo, que apresenta as conclusões frente à pesquisa e sugestões para a realização de trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

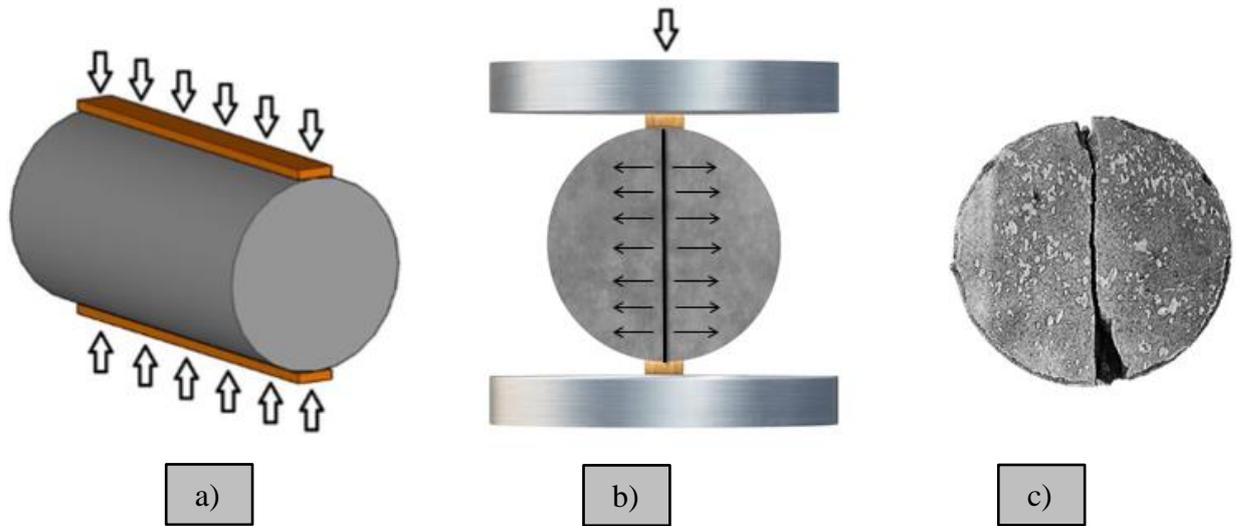
Para que se tenha um maior embasamento acerca das condições envolvidas no ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração do concreto, o qual a pesquisa tem como foco, é importante detalhar informações pertinentes que direcionem uma melhor análise dos fatores envolvidos no sistema de estudo. Neste sentido, são descritos através do estudo da arte, alguns conceitos correlacionados ao ensaio de compressão diametral, sua história, as aplicações desse método experimental para diferentes materiais, os modelos utilizados para a base teórica e a revisão dos estudos presentes na literatura, os quais investigam a coerência dos modelos existentes e os principais parâmetros de influência presentes no experimento. Além disso, serão apresentados os principais trabalhos desenvolvidos atualmente nesta frente de pesquisa em conjunto com o uso de simulações numéricas.

### **2.1 O Ensaio de Compressão Diametral**

O ensaio de compressão diametral é um método indireto, que determina o valor da resistência à tração de materiais frágeis, amplamente utilizado para concreto, argamassa, cerâmica, rocha, entre outros. No Brasil o ensaio é regido pela norma NBR 7222 (ABNT, 2011) e a seção dos espécimes é ditada pela NBR 5738 (ABNT, 2007), a qual prescreve a utilização de corpos de prova cilíndricos. Em seu experimento, os corpos de prova são submetidos a esforços de compressão, onde a face de contato e a superfície de aplicação de carregamento geram duas linhas geratrizes, opostas diametralmente ao longo do comprimento da amostra, formando um plano diametral de ruptura, como observado na Figura 1.

A ruptura típica e separação do espécime em duas seções, ocorre ao longo do plano formado pelas geratrizes de contato, causada pela tensão de tração perpendicular à aplicação do carregamento, regida pela teoria da elasticidade, resultando em uma fissura resultante da tensão máxima, teoricamente uniforme, a qual propaga para as extremidades de contato, como descreve Santos et al. (2017) e Mehta e Monteiro (2008).

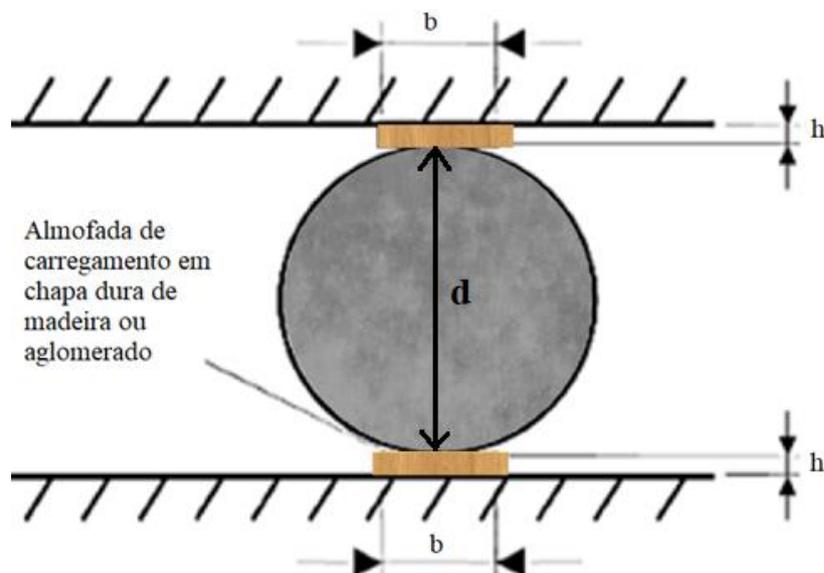
Figura 1 – Ensaio de compressão diametral: a) procedimento experimental; b) tensões de tração ao longo do diâmetro; c) ruptura típica dos materiais frágeis



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2017, p. 3)

A NBR 7222 (ABNT, 2011) dita os principais parâmetros que norteiam a execução adequada do teste. Os elementos utilizados devem ser ripas de madeira de lei ou aglomerados, denominados "taliscas", sem defeitos e de igual comprimento ou superior à geratriz de contato, sendo suas dimensões seccionais de: largura ( $b$ ) igual à  $15 \pm 1\%$  em relação ao diâmetro ( $d$ ) do espécime e espessura  $h$  de  $3,5 \pm 0,5$  milímetros, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Arranjo do ensaio de compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011)



Fonte: Adaptado NBR 7222 (ABNT, 2011, p. 3)

Após alinhar a talisca sobre o espécime, ajusta-se a posição dos pratos da máquina de ensaio, aplicando a força levemente sobre o conjunto, para que sua disposição não seja alterada. Posteriormente, é iniciada a aplicação de carga de forma contínua e sem impacto, apresentando aumento constante da tensão de tração, a uma velocidade de ensaio de  $0,05 \pm 0,002$  MPa/s até a ruptura do material. A resistência à tração indireta por compressão diametral é calculada com a utilização da Equação 1.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \dots (1)$$

Onde:  $f_{ct,sp}$  é a resistência à tração pelo método de compressão diametral, expressa em megapascal (MPa);  $P$  a força máxima obtida no ensaio, expressa em newton (N);  $d$  o diâmetro do espécime, expresso em milímetros (mm) e  $l$  - comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Este ensaio é aceito internacionalmente e também é padronizado pela norma americana C496 (ASTM, 2011), que adota um método semelhante à norma brasileira, mas com algumas alterações quanto à velocidade de aplicação de carga (0,7 à 1,4 MPa/min) e com a utilização de uma largura das taliscas de 25 mm, fornecendo uma proporção semelhante à norma brasileira (aproximadamente 16%) quando utilizados corpos de prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento.

### 2.1.1 Histórico

O teste de compressão diametral foi desenvolvido no ano de 1943 pelo professor e engenheiro Fernando Luiz Lobo Carneiro (1913-2001), na cidade do Rio de Janeiro. Na ocasião a região passava por intensa urbanização, destacando-se a construção da Avenida Presidente Vargas no centro da cidade, que levou a necessidade de remoção de diversas construções, estando entre elas a Igreja de São Pedro do Clérigos (Figura 3a), construção histórica de estilo barroco datada em 1732. Com o intuito de preservar a edificação e evitar sua demolição, surgiu a ideia de movê-la de local, sendo incumbido ao então pesquisador do Instituto Nacional de Tecnologia e especialista em concreto o dimensionamento da base de cilindros de concreto, a qual moveria a edificação (INT, 2005).

Na época, algumas experiências haviam sido efetuadas sobre rolos de aço, na Europa. Com isso, ao efetuar seu estudo, constatou que o concreto apresentava tendência de

rompimento ao longo do diâmetro carregado, através dos esforços de tração que surgiam perpendicularmente a aplicação de carga (INT, 2005).

De acordo com Fairbarn e Ulm (2002), o método de teste foi proposto por Lobo Carneiro, no 5º Encontro da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em 1943. E publicado em Paris na França, durante o “International Meeting of Materials Testing Laboratories”, organizado pela RILEM no ano de 1947. Desde então o ensaio passou a ser reconhecido internacionalmente como “Brazilian Test” ou teste de falha por quebra, do inglês “Splitting Tensile Test”, determinando a resistência à tração de forma indireta em diferentes materiais de comportamento frágil (Figura 3b).

Figura 3 – a) Igreja de São Pedro do Clérigos; b) Fernando Luiz Lobo Carneiro, preparando o ensaio de compressão diametral



Fonte: Fairbarn e Ulm (2002, p. 196)

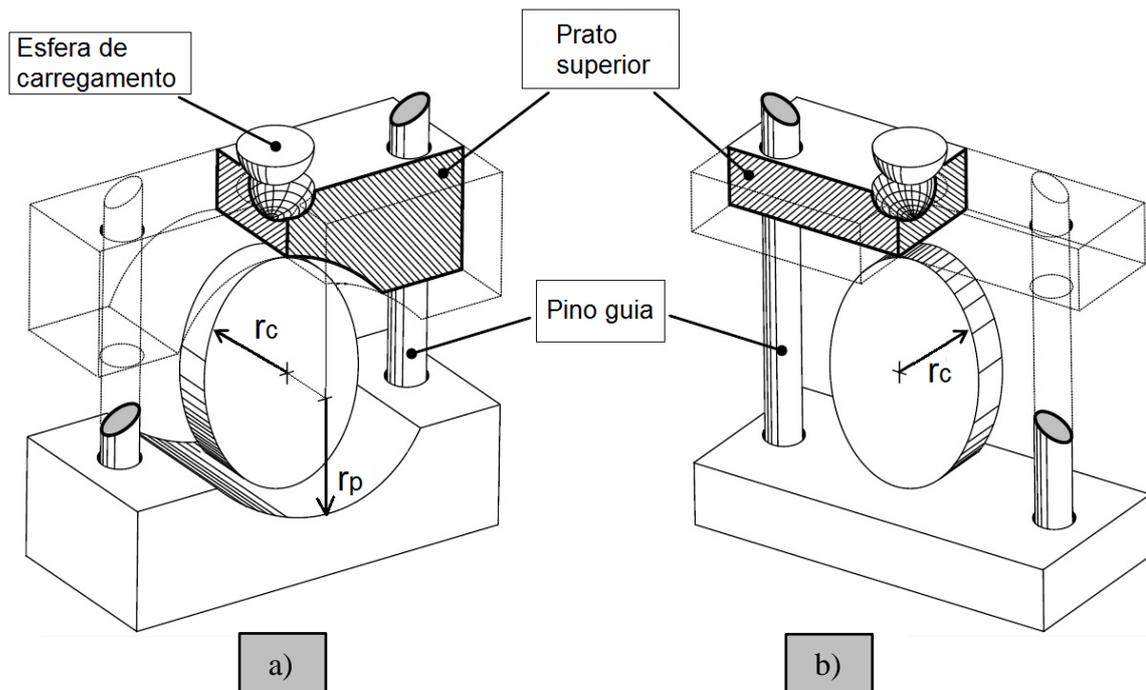
### 2.1.2 Demais aplicações do ensaio

O ensaio de compressão diametral é utilizado para determinar a resistência à tração em diversos materiais de comportamento frágil, como rochas, concreto, argamassa, materiais cerâmicos, materiais asfálticos, amostras de solos, entre outros.

A norma brasileira que trata da execução do ensaio de tração indireta é a NBR 7222 (ABNT, 2011), e apesar de ser utilizada para determinação da propriedade de diferentes materiais é específica para ensaios em concreto e argamassa. Por sua vez, a determinação da resistência à tração de rochas, é descrita pelos métodos D3967 (ASTM, 2016) e pela ISRM

(1978), as quais diferem entre si, principalmente pelo meio de aplicação do carregamento nos espécimes, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – (a) Método sugerido pela ISRM (1978); (b) Método normatizado pela D3967 (ASTM, 2016)



Fonte: Adaptado de Markides e Kourkoulis (2016, p. 145)

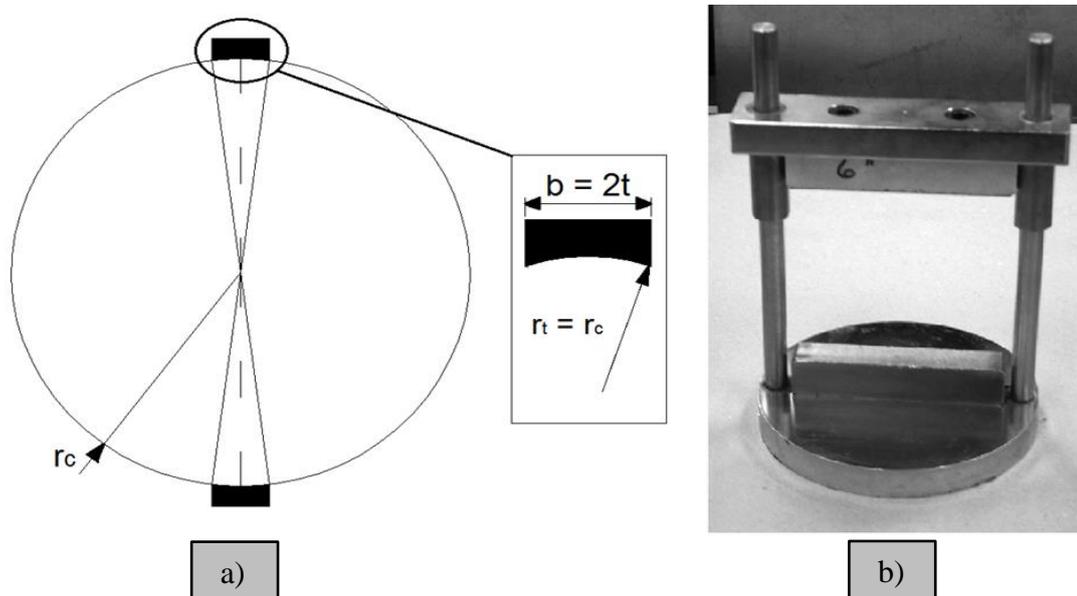
Em relação aos corpos de prova, a D3967 (ASTM, 2016), sugere a utilização de amostras cilíndricas, com razão de espessura/diâmetro entre 0,2 e 0,75, e o diâmetro deve ser de pelo menos dez vezes maior que as dimensões do agregado graúdo. De acordo com Markides e Kourkoulis (2016), o método da D3967 (ASTM, 2016) é semelhante ao teste brasileiro, pois utiliza pratos de aplicação no formato plano, enquanto o método sugerido pela ISRM (1978) recomenda a utilização de pratos curvados formando um raio de circunferência ( $r_p$ ) igual à 1,5 vezes, no mínimo, o raio do espécime ensaiado ( $r_c$ ).

Para Mellor e Hawkes (1971), o método ditado pela ISRM (1978) é eficaz na mitigação das tensões induzidas na borda e visa garantir ruptura centralizada da amostra sem limitar o material, facilitando seu posicionamento bem como a execução do ensaio.

No caso de misturas asfálticas, como o concreto betuminoso utilizado na área de pavimentação, o padrão normativo brasileiro é descrito pelo Departamento Nacional de Estrada e Rodagem (DNER) através da ME 138 (DNER, 1994). Sua conjuntura é praticamente idêntica ao método d6931 (ASTM, 2012), principalmente no que se refere à

aplicação de carga através de friso metálico côncavo com raio de curvatura ( $rt$ ) igual ao raio do espécime ensaiado ( $rc$ ), como consta na Figura 5.

Figura 5 – (a) Friso metálico da ME 138 (DNER, 1994); (b) Aparato metálico da D6931 (ASTM, 2012)



Fonte: (a) Adaptado de ME 138 (DNER, 1994, p. 4); (b) D6931 (ASTM, 2012, p. 4)

Ao efetuar um comparativo entre a ME 138 (DNER, 1994) e a D6931 (2012), ambas recomendam a utilização de friso metálico, sendo a primeira de largura ( $b \cong 2t$ ) de 12,70 mm para o ensaio de espécimes de 101,6 mm de diâmetro, e a segunda espécimes com 150 mm de diâmetro e frisos de 19,05 mm de largura.

Dessa forma, é possível observar que o método empregado no ensaio de compressão diametral pode sofrer variações dependendo do material estudado e respectiva norma técnica empregada, mas ao mesmo tempo levanta dúvidas quanto às influências causadas por tais modificações, bem como se a Equação 1 pode ser considerada válida para todos os casos em que for aplicado, relata Santos et al. (2017).

## 2.2 Comportamento Tensão *versus* Deformação no Ensaio de Compressão Diametral

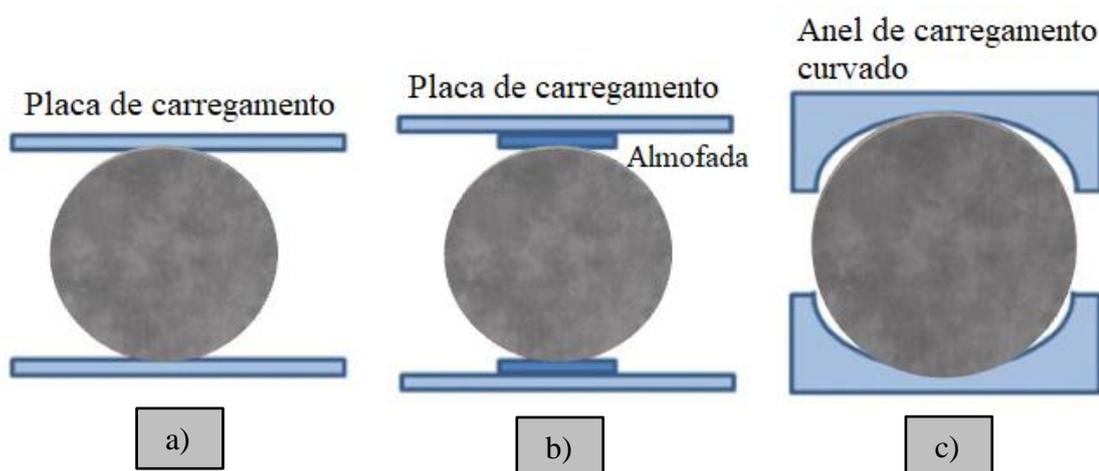
O ensaio de compressão diametral, baseia-se na ruptura do espécime, o qual é comprimido diametralmente por uma carga aplicada ao longo de duas geratrizes opostas. Segundo Araújo (2014) e Botelho e Marchetti (2015), por tratar-se de um ensaio dissimulado na Engenharia, permite além da obtenção da resistência a tração dos materiais frágeis, a

verificação de parâmetros elásticos, através do comportamento de tensão *versus* deformação obtidos durante a realização do ensaio.

Para determinar os parâmetros elásticos, é importante a utilização de um modelo teórico próximo à condição real do experimento, visto que ocorrem diferenças nos valores obtidos dependendo do tipo de solução adotada para a realização do ensaio. Li et al. (2011), Chen et al. (2014), Jin et al. (2017) e Garcia et al. (2017), destacam que existem três soluções principais, as quais modificam a estrutura de propagação de carga sobre a amostra, o que varia a deformação do material devido a condições de interface junto aos espécimes e a taliscas de distribuição de carregamento.

Li et al. (2013) , Heard et al. (2018) e Li et al. (2019) descrevem que, a primeira solução consiste na versão simplificada de carregamento sobre o espécime, onde pressupõe-se aplicação de carga no formato linear (Figura 6a). A segunda solução considera a aplicação de carga de forma distribuída, através de faixas de largura definida e de direção radial, difundida pela aplicação de taliscas/almofadas de madeira (Figura 6b). E finalmente a terceira solução, que envolve distribuição de carga não uniforme, através da variação da área de aplicação de carregamento, devido à intensidade da carga aplicada através do anel de carregamento curvado (Figura 6c).

Figura 6 – Padrões de carregamento do teste brasileiro de tração indireta



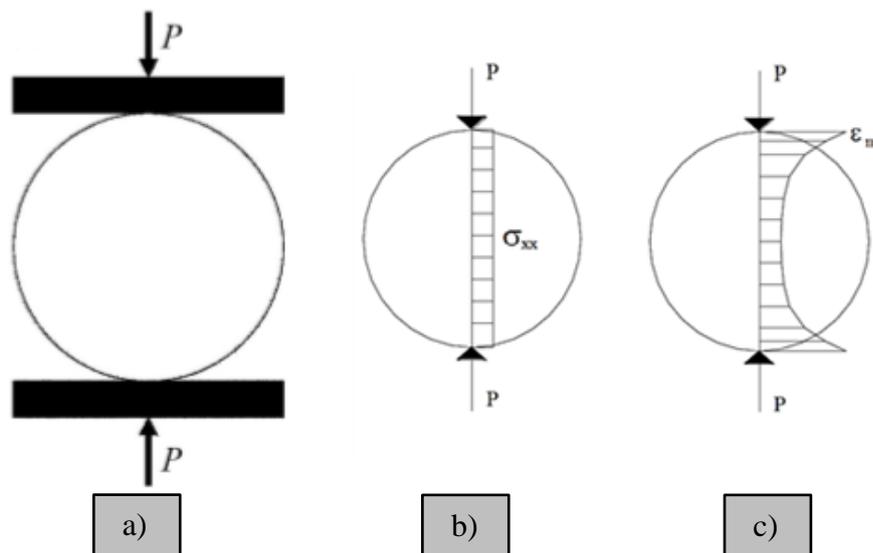
Fonte: Adaptado de Li et al. (2019, p.2552)

Vários pesquisadores tentaram estimar as propriedades elásticas dos diferentes padrões de testes brasileiros. Variando suas condicionantes frente às soluções citadas, como pode ser observado dos tópicos 2.2.1 ao 2.2.3.

## 2.2.1 Configuração sob carga linear

A distribuição uniforme das tensões de tração, bem como a preparação de amostras cilíndricas, estimulou a ampla aplicação do método de teste brasileiro como padrão para materiais frágeis. Essa abordagem pode ter precisão adequada e erro reduzido quando comparado ao teste de tração direta no momento em que a instalação experimental fornece a ação de forças  $P$  concentradas ao longo do espécime, conforme modelo descrito na Figura 7, afirma Japaridze (2015). Ao utilizar a Equação 1, no entanto, considera-se o esforço máximo produzido durante a execução do teste, que consiste em um amostra de material isotrópico, com comportamento elástico homogêneo e linear, comprimido ao longo do diâmetro.

Figura 7 – a) modelo de carga linear; b) comportamento da tensão; c) comportamento da deformação



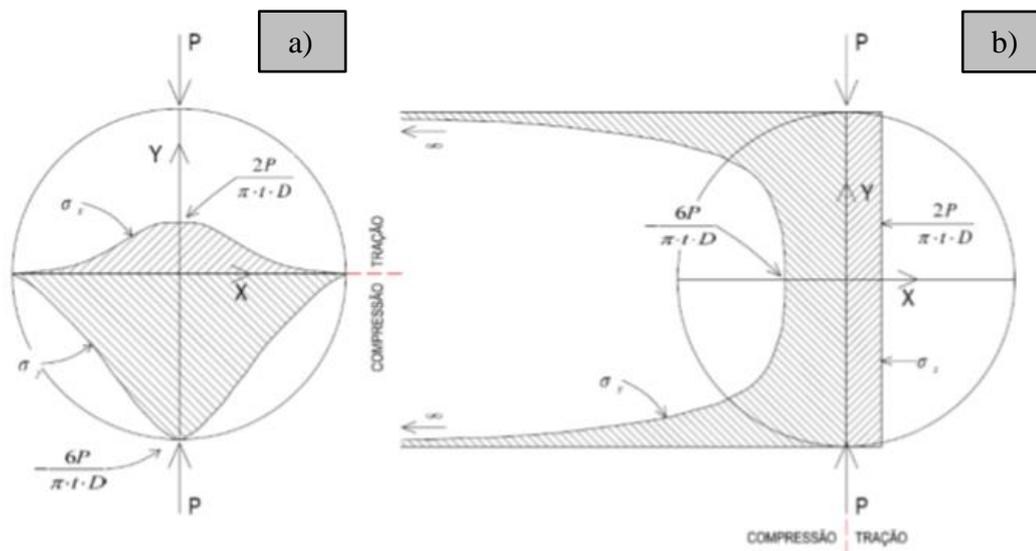
Fonte: a) Jin et al. (2017, p. 2); b) e c) Adaptado de Falcão e Soares (2002)

Segundo Timoshenko e Goodier (1951), a problemática voltada para a aplicação de uma força compressiva concentrada  $P$  na borda de um espécime com diâmetro  $d$ , está relacionada à distribuição radial simples sob o estado plano de tensões, a qual resulta no surgimento de duas componentes de tensão principais, tendo sua intensidade determinada pela Equação 2, onde  $\sigma_{1,3}$  correspondem aos componentes principais de tensão. Ao considerar que a carga pontual  $P$  analisada é equivalente a uma carga  $P$  distribuída ao longo do comprimento  $L$  de um cilindro,  $(P/L)$ , e invertendo o sinal da expressão, a equação retorna à consideração representada através da Equação 1.

$$\sigma_{1,3} = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d} \quad \dots(2)$$

Hondros (1959), apresentou em sua pesquisa soluções de cálculo com esse formato de carregamento, levando em consideração apenas os parâmetros elásticos do material, como seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Kennedy e Hudson (1968), em seus estudos observaram que, no centro do espécime, a tensão vertical de compressão era superior cerca de três vezes a tensão horizontal de tração uniforme (Figura 8a) e verificou o surgimento de pontos de concentração de tensões verticais elevadas, as quais tendiam ao infinito (Figura 8b).

Figura 8 – Distribuição de tensões sob configuração de carregamento linear, a) tensão horizontal e b) tensão vertical



Fonte: Adaptado de Kennedy e Hudson (1968)

Esse valor constante de tensão de tração para a ocorrência da ruptura do material frágil, consiste em um caso idealizado, pois ao executar de forma prática o teste experimental ao aplicar o carregamento sobre o espécime, sempre haverá distribuição em determinada faixa, o que leva a um comportamento de tensões diferente do observado.

### 2.2.2 Configuração sob carga radial uniformemente distribuída em faixa

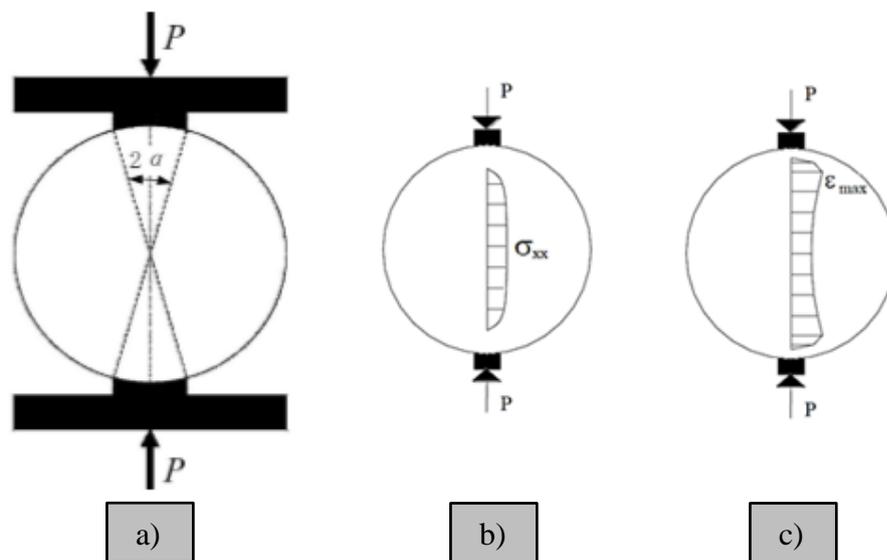
O estudo de distribuição de carga no ensaio brasileiro de tração foi verificado por vários autores, Amadei et al. (1983), publicaram uma solução focada no estudo de distribuição de tensões e deformações em um disco fino, constituído de material anisotrópico,

que sofria aplicação de carga ao longo do diâmetro ao longo de um intervalo. Através de seu estudo determinaram as constantes elásticas e resistência à tração das rochas idealizadas como um meio contínuo linear elástico, homogêneo, ortotrópico ou transversalmente isotrópico.

Chau e Wei (2001), propuseram uma solução analítica tridimensional voltada para a análise da distribuição de tensões em cilindros de testes brasileiros. Wang et al. (2004) desenvolveram uma solução analítica aproximada para calcular o módulo de Young, a resistência à tração e a resistência à fratura, em seu modelo, o módulo de Young pode ser determinado a partir da inclinação do gráfico de carga e deslocamento, tendo como principal desvantagem a razão de Poisson, a qual não pode ser determinada de forma direta.

Para melhorar a análise do problema da distribuição de tensões em um disco diametralmente comprimido, o estudo de Hondros (1959), segundo Fairhurst (1964), considerou uma carga uniforme ( $p$ ) distribuída em um arco finito, formando um ângulo central ( $2\alpha$ ), como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – a) modelo de carga distribuída em arco; b) comportamento da tensão; c) comportamento da deformação



Fonte: a) Jin et al. (2017, p. 2); b) e c) Adaptado de Falcão e Soares (2002)

Hondros (1959), derivou expressões analíticas para a distribuição das tensões do modelo, incluindo as Equações 3 e 4, as quais expressam o valor das componentes de tensões principais normais e paralelas, ao longo do plano formado pelo eixo vertical central do disco comprimido. Dentre os parâmetros envolvidos,  $y$  corresponde à distância do centro do espécime e  $r_c$  ao raio do disco.

$$\sigma_{xx}(0, y) = + \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot \left[ \frac{(1 - y^2/r_c^2) \cdot \text{sen } 2\alpha}{1 - 2 \cdot y^2/r_c^2 \cdot \cos 2\alpha + y^4/r_c^4} - \tan^{-1} \left( \frac{1 + y^2/r_c^2}{1 - y^2/r_c^2} \cdot \tan \alpha \right) \right] \quad \dots(3)$$

$$\sigma_{yy}(0, y) = - \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot \left[ \frac{(1 - y^2/r_c^2) \cdot \text{sen } 2\alpha}{1 - 2 \cdot y^2/r_c^2 \cdot \cos 2\alpha + y^4/r_c^4} + \tan^{-1} \left( \frac{1 + y^2/r_c^2}{1 - y^2/r_c^2} \cdot \tan \alpha \right) \right] \quad \dots(4)$$

A Equação 1, relativa à tensão normal do eixo vertical, apresenta várias frentes de estudo devido a importância desse teste na determinação de tração de materiais frágeis, um dos principais itens correlaciona-se à leitura dos parâmetros centrais do espécime onde  $y = 0$ , o que leva na redução da relação demonstrada pela Equação 3. Por conta disso, assume-se que tal semi-igualdade é válida para pequenos valores do ângulo central ( $2\alpha$ ), como pode-se constatar através da Equação 5.

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot (\text{sen } 2\alpha - \alpha) \cong \frac{2 \cdot p \cdot \alpha}{\pi} \quad \dots(5)$$

Considerando que a carga atua de forma uniforme através da pressão  $p$  sobre o disco e que a mesma equivale à carga pontual  $P$  distribuída ao longo do comprimento do arco, formado pelo ângulo  $2\alpha$ , como mostra a igualdade descrita pela Equação 6, obtém-se a expressão indicada pela Equação 7.

$$p = \frac{P}{2 \cdot \alpha \cdot r \cdot l} \rightarrow p \cdot \alpha = \frac{P}{2 \cdot r \cdot l} = \frac{P}{d \cdot l} \quad \dots(6)$$

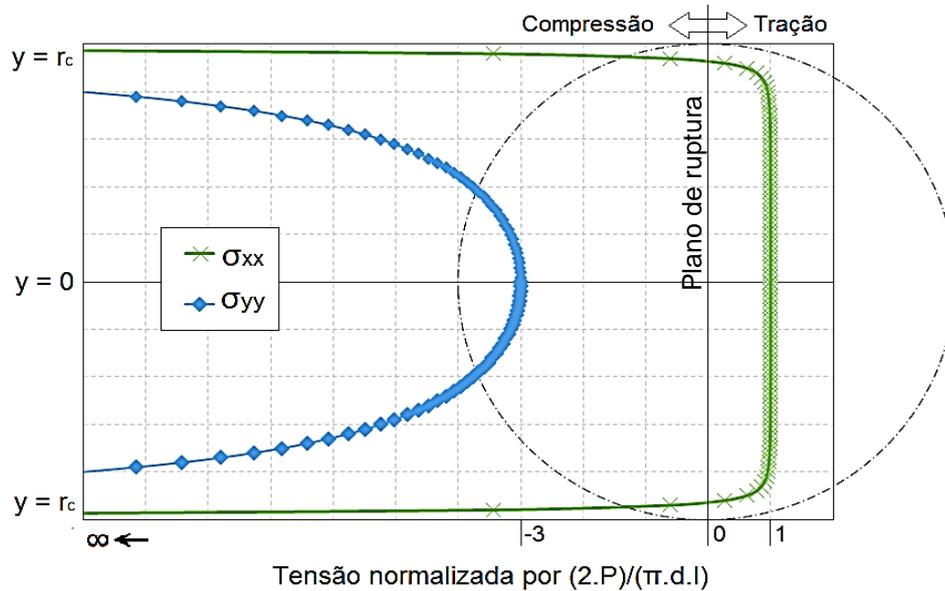
Sendo assim,

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \dots(7)$$

Para valores pequenos de ângulo central ( $2\alpha$ ) obtidos por aplicação de carga em arco de contato, a tensão calculada pela Equação 1, é aproximadamente igual à tensão obtida pela análise de cargas distribuídas em arco e causa a tração no plano perpendicular à aplicação da carga, porém não de maneira completa. A partir dessa conclusão, baseada na distribuição da tensão principal paralela ao carregamento, a qual é compressiva e grandeza de

aproximadamente 3 vezes à tração, Hondros (1959) chegaram à distribuição de tensões principais no eixo vertical para um ângulo  $\alpha = \tan^{-1} 1/12$ , como ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Carga distribuída em arco e ângulo resultante



Fonte: Adaptado de Fairhurst (1964, p. 536)

Sendo assim, a principal diferença entre a análise teórica do carregamento e os modelos distribuídos é que a tensão de tração nesse último é considerada apenas uma parte do uniforme do plano vertical central e, apesar das expressões validarem a Equação 1, ambos os modelos baseiam-se no caso de discos comprimidos e não de cilindros.

Segundo Villar (2006) essa forma de aplicação de carga, tende a reduzir de forma considerável as tensões de compressão nos pontos de aplicação de carga, tendendo a inversão das tensões horizontais. Falção e Soares (2002), afirmam que essas tensões de compressão atuantes na extremidade, apresentam intensidade significativa de acordo com o aumento da largura de contato de transmissão de carga sobre os espécimes, identificando que o tamanho das faixas de distribuição de carga influenciam consideravelmente nos resultados do teste.

### 2.2.3 Configuração sob carga com distribuição não uniforme em área variável

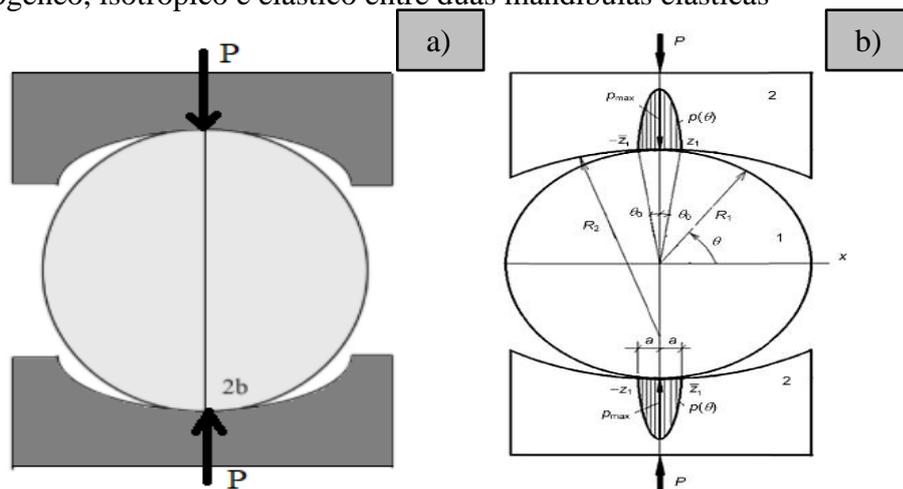
Análises voltadas para o efeito da distribuição de carga em área variável, foram desenvolvidas por Hadley et al. (1970), que conduziram um estudo para estimar o módulo de

Young e a razão de Poisson ao testar materiais elásticos com cargas aplicadas através de uma faixa de carregamento curvado de área variável.

Japaridze (2015) relata que o uso de garras curvadas acima de 0,67 não é ideal para a realização do teste, uma vez que o percentual de tensão elástica no centro do disco em sua configuração padrão diminui drasticamente, levando a um aumento da resistência à tração. Por outro lado, Markides et al. (2016) descreve como principal característica do método sugerido pela ISRM (1972), a igualdade entre o raio da amostra e da mandíbula do aparato.

Heart et al (2018) e Japaridze (2015), pesquisaram o comportamento das amostras sobre a configuração de carga distribuída em curva com aplicação variável (Figura 11a) e verificaram a forma como se dispersa a pressão sob a face de contato do equipamento e o espécime, como consta na Figura 11b.

Figura 11 – a) modelo representativo; b) compactação de uma amostra cilíndrica feita de material homogêneo, isotrópico e elástico entre duas mandíbulas elásticas



Fonte: a) Adaptado de Heard et al. (2018) e b) Japaridze (2015)

Essa frente de estudo é amplamente aplicada na área de avaliação de comportamento de rochas, como discretizado pelo método sugerido pela ISRM (1978), ao contrário do proposto pela D3967 (ASTM, 2016) a qual a face de contato do aparato não acompanha a curvatura do espécime.

### 2.3 Parâmetros de Influência do Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral, apresenta fatores que influenciam nos resultados apresentados pelos espécimes frente a resistência à tração final, dentre os principais que são

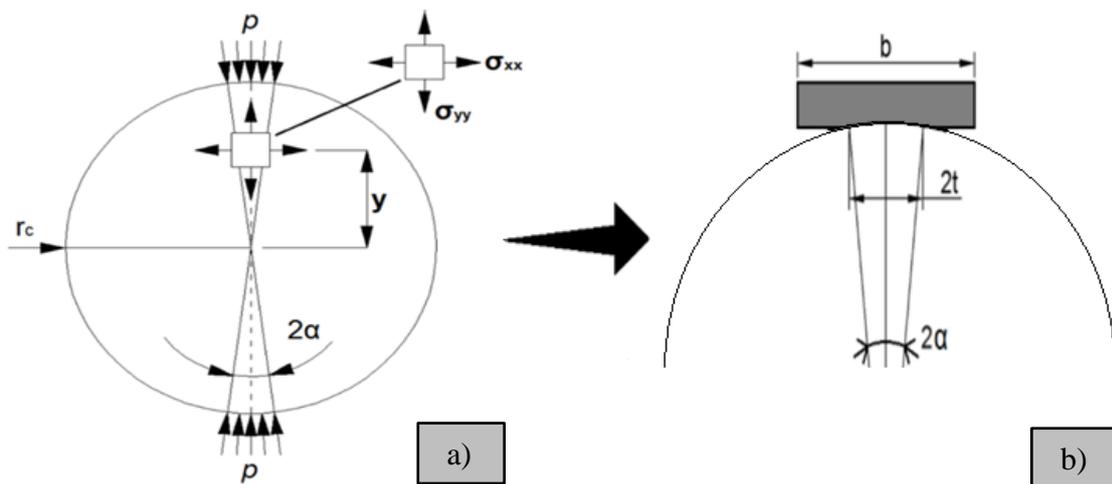
levantados na pesquisa, destaca-se o comportamento apresentado pelos materiais frágeis devido à interferência gerada pela largura efetiva de contato das taliscas de distribuição de carregamento e o local de origem e propagação de fissuras nos elementos.

### 2.3.1 Largura efetiva de contato

A largura ( $b$ ) das tiras, difere da largura efetiva de contato, a qual é correlacionada à aplicação de carga no intervalo ( $2t$ ), como mostra a Figura 12b. De acordo com Santos et al. (2017), essa diferença é explicada pela deformação gerada no elemento de distribuição de carga, sendo significativa no caso da madeira e minimizada ao aplicar tira metálica.

Para introduzir um parâmetro representativo de largura efetiva de contato ( $2t$ ), na determinação da tensão máxima de tração do teste de compressão diametral, Tang (1994) verificou a distribuição real da carga, através da distribuição de pressão uniforme ao longo do arco de contato com o espécime, semelhante à estudada por Hondros (1959) e Fairhurts (1964), como consta na Figura 12a.

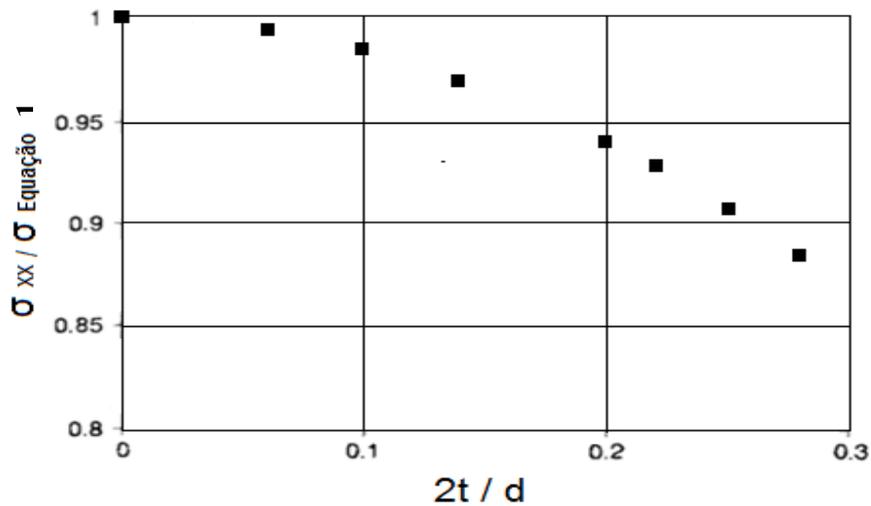
Figura 12 – a) distribuição das tensões; b) diferença entre largura da tira, largura efetiva de contato e ângulo central



Fonte: a) Adaptado de de Fairhurts (1964, p. 535); b) Santos et. al (2017, p. 4)

Contudo, Tang (1994) a partir de seus resultados obtidos numericamente, mostrados na Figura 13, afirma que o erro obtido ao utilizar a Equação 1 ( $fct, sp$ ), para a largura padronizada de aplicação, é cerca de 4%, uma vez que superestima a resistência do material.

Figura 13 – Relação entre o valor de tensão de tração real e o valor obtido com a aplicação da Equação 1



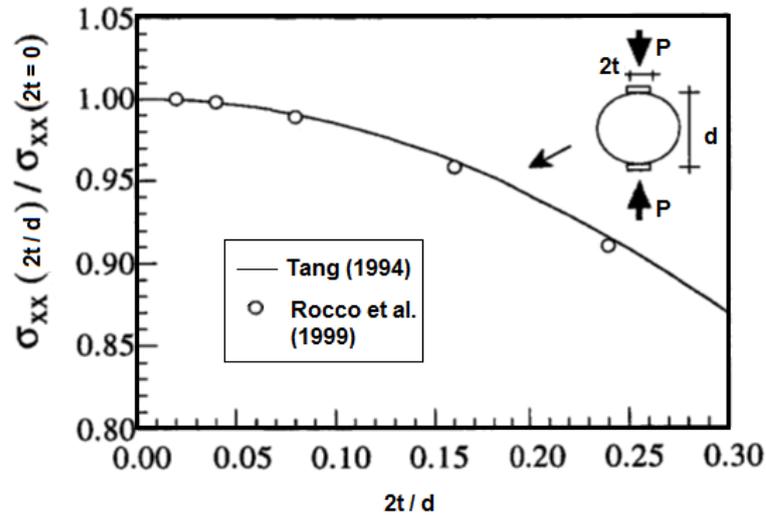
Fonte: Adaptado de Tang (1994, p. 404)

Afim de determinar a tensão real de tração no ensaio de compressão diametral, Tang (1994) propôs a Equação 8, a qual foi obtida por meio de soluções analíticas considerando a largura de distribuição do carregamento.  $\sigma_{xx}$  é o componente de tensão normal ao eixo vertical central,  $p$  o carregamento uniformemente distribuído ao longo da largura efetiva e da altura do espécime ( $P/(2t.l)$ ), expresso em Newtons por milímetro (N/mm),  $t$  a metade da largura de contato efetiva, expressa em milímetros (mm) e  $r_c$  o raio de circunferência do cilindro, expresso em milímetros (mm).

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot p \cdot t}{\pi \cdot r_c} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t}{r_c} \right)^2 \right]^{3/2} \quad \dots(8)$$

Essa solução é implementada por Rocco et al. (1999a), o qual comprova sua validade através de modelagens numéricas pelo uso de elementos finitos, como ilustrado na Figura 14, onde os pontos de análise coincidem com o comportamento verificado por Tang (1994).

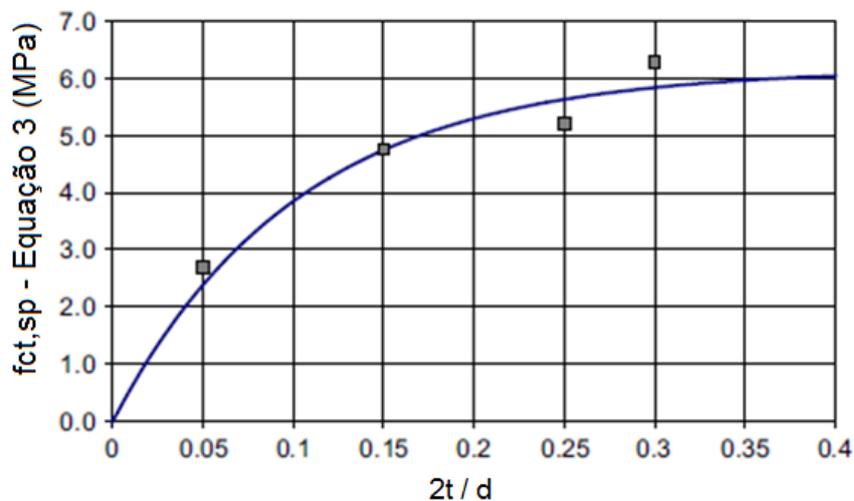
Figura 14 – Resultados da análise numérica de elementos finitos e comparação com os resultados obtidos com a aplicação da Equação 8



Fonte: Adaptado de Rocco et al. (1999a, p. 440)

Riera, Miguel e Iturrioz (2014) estudam o teste brasileiro sob a influência da largura de aplicação de carga em arco, utilizando modelos numéricos de elementos finitos e discretos, verificam a variação no valor da carga de ruptura dependente da Equação 1, constatando que a tensão sofre acréscimo devido o aumento na largura efetiva de contato, como se observa na Figura 15, o que não é consistente pois trata-se de um único material e, portanto, demonstra a superestimação da resistência à tração real quando o parâmetro  $2t$  é ignorado.

Figura 15 – Resultados obtidos para diferentes larguras efetivas de contato

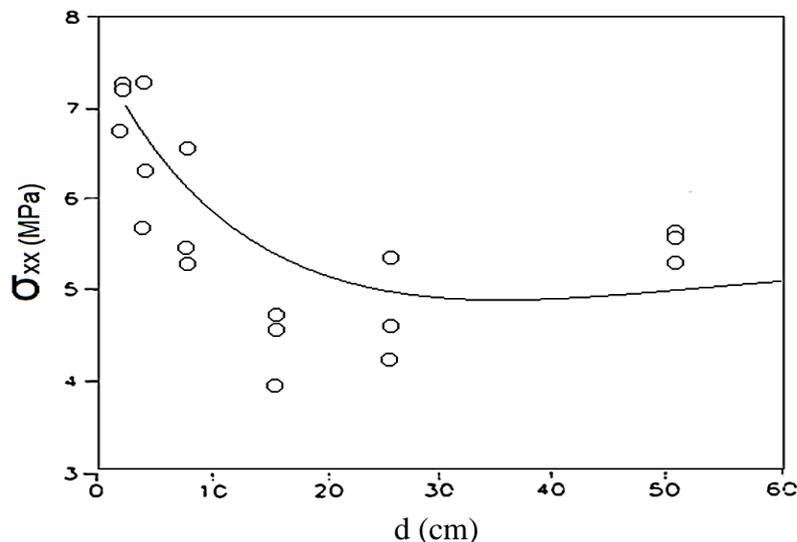


Fonte: Adaptado de Riera, Miguel e Iturrioz (2014, p. 20)

Outro impacto importante no estudo de ensaio de compressão diametral, está relacionado ao tamanho da amostra e ao efeito que ele produz nos resultados, alterando significativamente a resposta final do ensaio. A NBR 7222 (ABNT, 2011) e a C496 (ASTM, 2011) não estabelecem as dimensões dos espécimes, no entanto estudos brasileiros tendem utilizar espécimes de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, enquanto pesquisas americanas optam por amostras de 150 mm por 300 mm.

Bazant et al. (1991), evidenciou tal influência experimentalmente através de ensaios de cilindros com diâmetros diferentes de 19 mm até 508 mm e de mesma altura, executados em concreto de  $f_c = 51,4$  MPa, como demonstrado nos resultados expressos pela Figura 16.

Figura 16 – Resultados obtidos para diferentes dimensões de corpos de prova



Fonte: Adaptado de Bazant et al. (1991, p. 329)

Os resultados observados por Bazant et al. (1991), para cilindros com diâmetros inferiores a 100 mm, foram significativamente maiores, sendo possível observar que ao atingir um patamar estável nos valores da resistência através do aumento no diâmetro, ocorre o desaparecimento do efeito escala. Sendo assim, o pesquisador afirma que a influência correlacionada ao aumento na extensão da fissura com o diâmetro do corpo de prova, resulta em uma mesma liberação de energia na fratura com uma tensão menor.

Carmona (2009) e Carmona (2012), avaliou o contato entre o espécime e o prato de aplicação de carga na forma direta, sem delimitar uma largura finita de distribuição de carregamento ( $2t \approx 0$ ) e sem utilizar tiras de madeira como recomendada por ambas as

normas C496 (ASTM, 2011) e NBR 7222 (ABNT, 2011), em seu estudo também constatou que o efeito foi mais pronunciado para corpos de prova de diâmetros inferiores à 150 mm.

Carmona (2009) também investigou o efeito escala em função do comportamento da tira de madeira através do método padronizado, constatando que, devido à sua ligeira deformação quando aplicada à carga, a superfície de contato com largura efetiva média torna-se de aproximadamente  $2t \approx d/6$  para todos os diâmetros estudados.

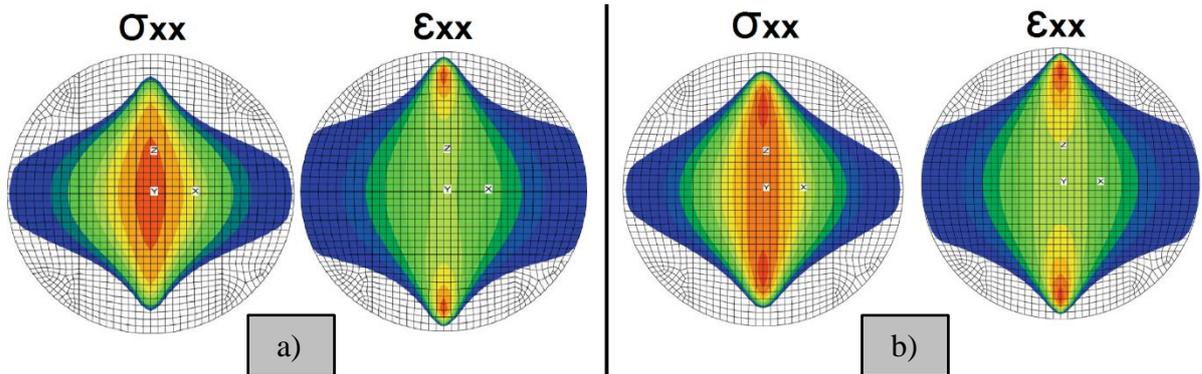
Com a largura efetiva  $2t$  determinada, realizou novos ensaios com a utilização de tiras com largura total  $b$  igual à  $d/6$ , porém, invés de aplicar o carregamento de forma direta através dos pratos de ensaio, empregou duas barras rígidas de mesma largura das tiras. Concluindo que a utilização do conjunto barras rígidas e talisca de madeira, tendem a anular a influência causada pela modificação da escala no ensaio brasileiro, indicando a coerência nas larguras da talisca recomendadas tanto pela norma NBR 7222 (2011) como pela C496 (ASTM, 2011).

### **2.3.2 Local de formação das fissuras**

Estudos frente ao ensaio brasileiro de tração, aplicado ao estudo de local de origem de fissuras e sua propagação, é frequentemente investigada, pesquisadores como Li e Wong (2013), Chen et al. (2018), Liu et al. (2019), Ficher et. al (2019) e Zhao et al. (2019), que realizaram pesquisas voltadas para essa área de análise, avaliando a forma de distribuição das tensões no conjunto e forma da origem e propagação das fissuras devido a deformação do material.

Li e Wong (2013) efetuaram um estudo de modelagem numérica, utilizando amostras tridimensionais, com aplicação de carga baseado no modelo realizado por Tang et al. (2000), o qual constitui-se de um material homogêneo, de comportamento elástico linear e módulo elástico de 50 GPa. Em sua pesquisa analisaram a distribuição de tensões e deformações normais ao eixo vertical dos espécimes, verificando as regiões médias e extremidades dos espécimes, obtendo resultados conforme consta na Figura 17.

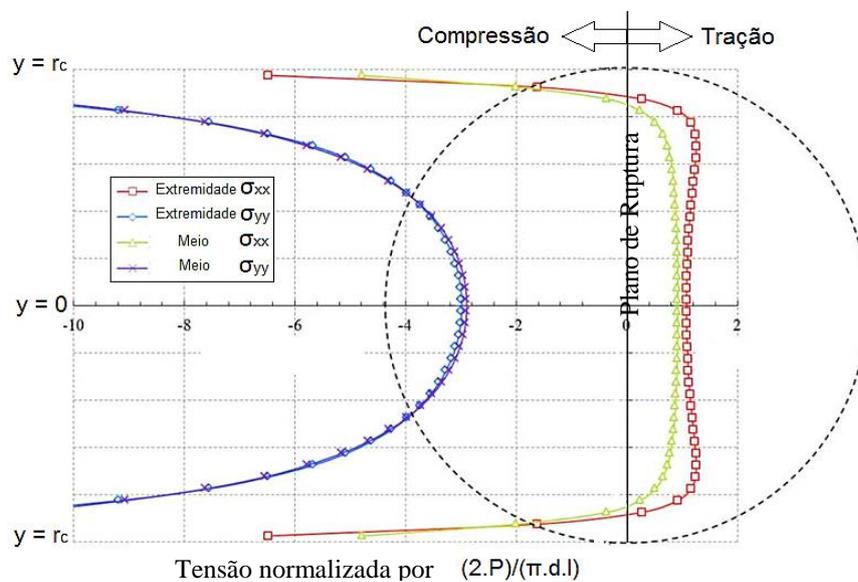
Figura 17 – (a) Tensões e deformações na região mediana; (b) Na extremidade



Fonte: Li e Wong (2013, p. 282)

Através de suas análises, Li e Wong (2013) concluíram que os valores de tensão e deformação máximos encontram-se afastados da parte central do cilindro, a uma distância de aproximadamente 10% do diâmetro da borda carregada e de sua extremidade. Também constatou que, somente ocorreria o surgimento das fissuras próximo ao final da amostra e em sua borda, quando o espécime atingir o critério de máxima deformação. Além disso, identificaram a variação entre as tensões obtidas nas simulações, como pode-se visualizar na Figura 18, demonstrando a modificação das tensões no centro e extremidade das bordas dos espécimes, evidenciando que as fissuras iniciam próximas aos 10% do diâmetro da borda e posteriormente propagando-se para o centro, até atingir sua ruptura.

Figura 18 – Distribuição das tensões principais no eixo vertical no meio e na extremidade do cilindro comprimido



Fonte: Li e Wong (2013, p. 280)

Chen et al. (2018), verificaram a formação de trincas em espécimes de rochas sob tensão de tração, usando testes brasileiros. E confirmou que quando a tensão pré-existente era menor que a tensão gerada pelos danos da trinca era possível avaliar a propagação das fissuras, por outro lado quando a tensão pré-existente excedeu a tensão gerada pelos danos da trinca, tornou-se indeterminado pois ocorria um crescimento instável das trincas sob a amostra.

Zhao et al (2019), investigaram o comportamento de fratura e propagação de fissuras no arenito, seus resultados experimentais levaram a existência de dois tipos de trincas a partir de falhas pré-existentes: trincas nas bordas e trincas secundárias. Ambos iniciam a partir das pontas das falhas pré-existentes e se propagam de maneira estável. Revelando que as trincas surgem primeiramente nas bordas do espécime e posteriormente propagam na direção do carregamento. Seus resultados ajudam na investigação dos mecanismos de falha e propriedades mecânicas de materiais com comportamento frágil.

## **2.4 Correlação Digital por Imagem**

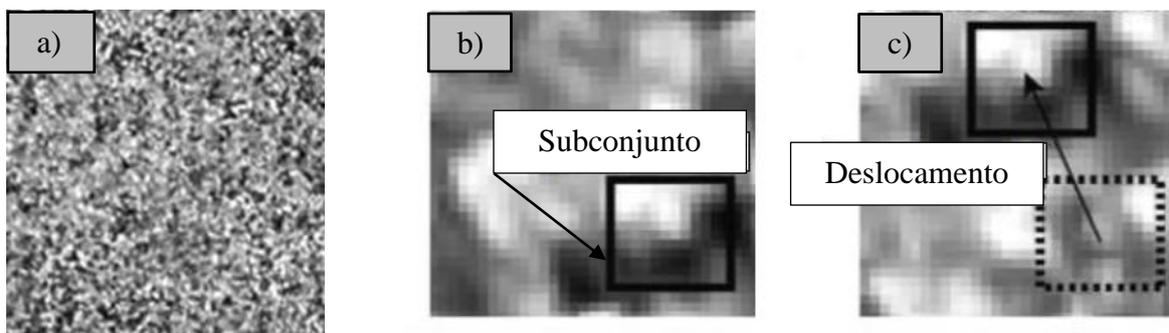
A correlação de imagem digital (DIC, do inglês “*Digital Image Correlation*”), é uma técnica experimental de metrologia, a qual foi desenvolvida e aplicada por Sutton e Chao (1988) e Bruck et al. (1998). Consiste num método óptico que apresenta campos de deslocamentos obtidos por imagens processadas sequencialmente, as quais são capturadas a uma determinada frequência durante a realização de um ensaio (SKARŻYŃSKI, 2011).

Segundo McCormick e Lord (2010), o método não apresenta contato direto com o objeto de ensaio e permite obter medidas precisas de deslocamentos e deformações, em pequena escala, através do uso de equipamentos de fácil acesso e custo relativamente baixo. Além disso, suas medições podem ser feitas em relação a um plano de deformação, o que permite análises bidimensionais e tridimensionais.

Para Hung e Volosuhin (2003), seu mecanismo fornece informações quantitativas e qualitativas sobre o campo de deformações, através do princípio da comparação entre a imagem de referência e imagens deformadas. Conforme Yoneyana e Murasawa (2009), isso é possível devido a identificação de subconjuntos individuais de pixels, que distribuem-se de forma única a partir da intensidade luminosa aplicada sobre o espécime. Essa distribuição de pixels varia devido a aplicação de carga nas amostras e através do comparativo das imagens

estáticas, as quais descrevem as variações nos padrões estocásticos, permitindo identificar o deslocamento através da deformação (Figura 19).

Figura 19 – Subconjunto de identificação de deslocamento relativo: a) padrão estocástico sobre o material; b) antes da deformação; c) após a deformação



Fonte: Adaptado de Yoneyama e Murasaw (2009)

Para produzir o padrão estocástico sob as amostras, é necessário efetuar a preparação da superfície do objeto, através da aplicação de tinta branca fosca e posterior aplicação dispersa de tinta spray preta fosca, criando um alto contraste em relação ao plano de fundo. Pan et al. (2008), indicam que o tamanho do subconjunto de pixels é um parâmetro crítico, pois esse relaciona-se diretamente com a precisão das medições, não devendo ser pequeno, de maneira que torne impossível reconhecer um padrão entre os subconjuntos, e nem grande, capaz de minimizar a precisão dos resultados.

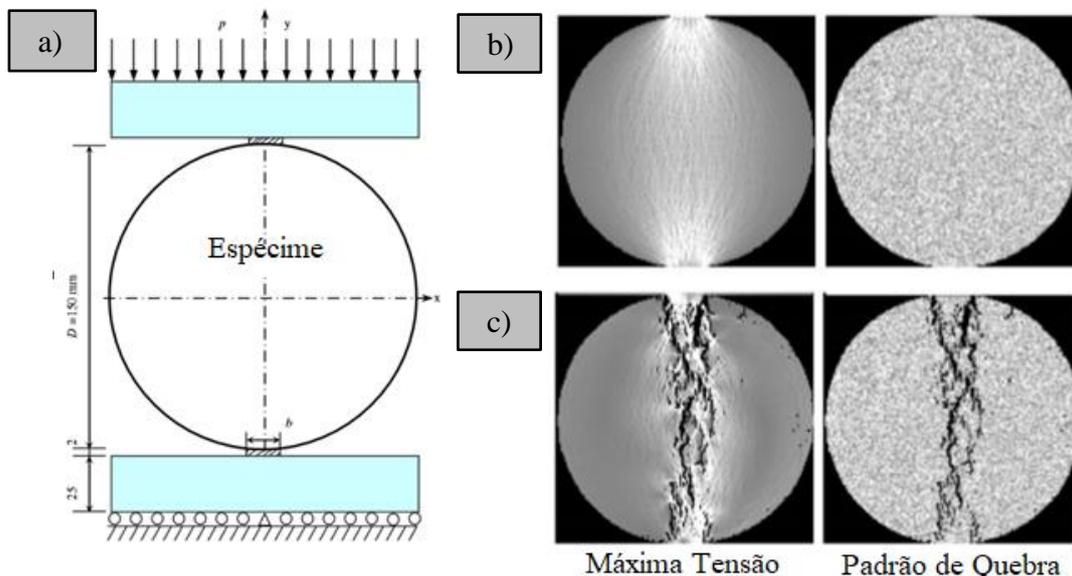
Contudo, apesar de ser um método inovador e de aplicação crescente, para Yoneyama e Murasawa (2009), ainda apresenta obstáculos envolvidos no uso dessa técnica, como as regiões de borda e regiões de deformações excessivas, onde após o surgimento das fissuras as medidas não são possíveis devido a modificação brusca no padrão estocástico e consequente descaracterização dos subconjuntos.

## 2.5 Trabalhos Relacionados a Pesquisa e o uso de Simulações Numéricas

Diversos pesquisadores dedicaram-se a estudos voltados para a análise numérica frente ao estudo de compressão diametral, entre eles, Zhu e Tang (2006), Mahabadi et al. (2009), Rieira et al. (2014), Santos et al. (2017), Abdulah et al. (2018), Zhao et al. (2018), Farimifar et al. (2018), Zhou e Zhuang (2018) e Medina et al (2019).

Zhu e Tang (2006), desenvolveram uma simulação numérica baseada no processo de fratura de rochas, avaliando o processo de deformação e fratura através do ensaio brasileiro de tração, sua condição geométrica adotada consta na Figura 20a, onde introduziu como parâmetro de representação a aplicação do uso de carga estática e dinâmica. Sob carregamento estático, Zhu e Tang (2006), identificaram que a simulação numérica reproduz bem a trinca primária no centro do disco, propagando-se ao longo do diâmetro da amostra e as trincas secundárias próximas às placas de carregamento, como indicado na Figura 20b e 20c.

Figura 20 – a) Modelo simulado; b) início do processo de carregamento do espécime; e c) término do carregamento ao atingir a máxima tensão



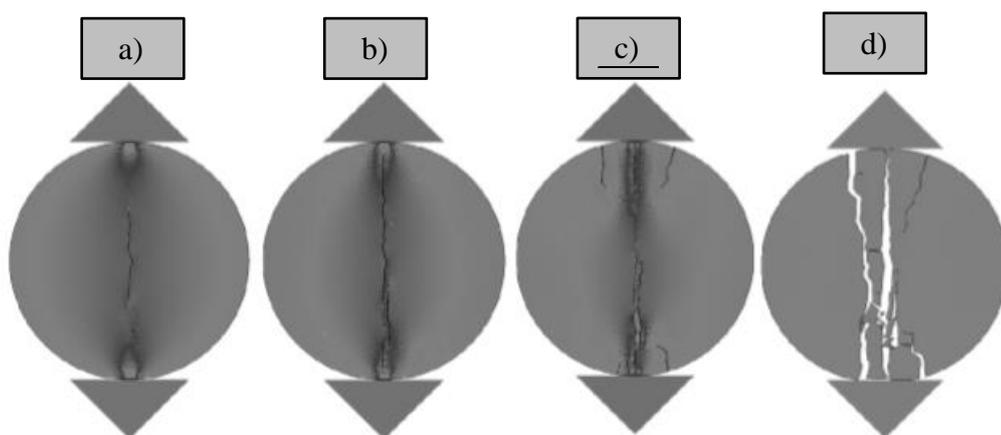
Fonte: Adaptado de Zhu e Tang (2006)

Ainda em suas considerações, Zhu e Tang (2006) observaram que sob carga dinâmica, diferentes padrões de falha e formas de propagação ocorreram, devido às diferentes amplitudes aplicadas ao disco, o que indica que o padrão de falha e seu mecanismo de surgimento estão intimamente relacionados à propagação de ondas de tensão. Observou-se também que, mais rachaduras são desenvolvidas em rochas sob carga dinâmica do que sob carga estática, e os resultados numéricos auxiliam na captura do padrão de falha e dos mecanismos de falha resultantes da propagação da onda de tensão no disco da rocha.

Mahabadi et al. (2009), simularam o comportamento de uma amostra rochosa dividida em camadas sob o teste padrão de disco brasileiro em laboratório, usando o método de elementos finitos e discretos combinados. Verificaram a influência das camadas e a direção do carregamento no comportamento das amostras. A propagação de fraturas da amostra de

rocha homogênea observa-se na Figura 21, onde as rachaduras iniciam no centro do disco quando as tensões de tração excedem à resistência à tração do material, tais fissuras propagam em direção às placas de carregamento (Figura 21b), completando a fratura primária. Para os estágios posteriores (Figura 21c e 21d), novas rachaduras aparecem nas laterais da rachadura primária, sendo essas consideradas fraturas secundárias.

Figura 21 – Evolução da fissuração e fratura; a) 2,1 ms; b) 2,16 ms; c) 2,25 ms e d) 3,6 ms



Fonte: Adaptado de Mahabadi et al (2009)

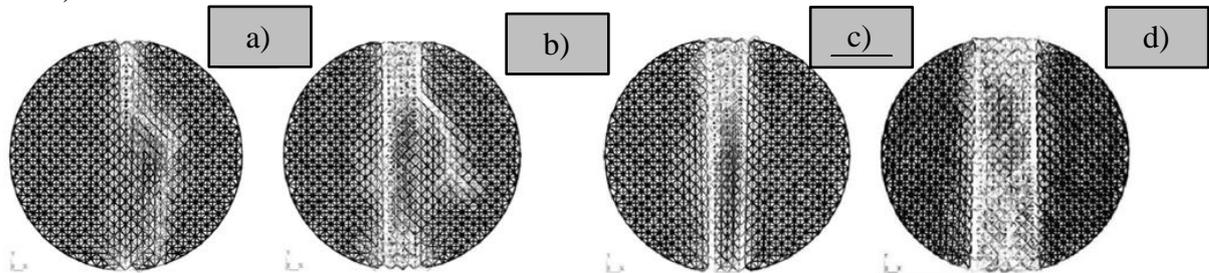
Segundo Mahabadi et al (2009), o resultado do estudo identificou que a presença de camadas desempenha influência no comportamento mecânico, sendo o principal mecanismo de falha do disco homogêneo e dos estratificados, a separação por tração, isso ocorre devido a fraca interface da ligação, que é aproximadamente alinhada ao longo da direção de grandes tensões de cisalhamento localizadas perto da placa de carregamento.

Riera et al. (2014) implementaram através de método dos elementos discretos, um modelo representativo para o estudo de compressão diametral (Figura 22), sendo o material avaliado um concreto de propriedades: 150 mm de diâmetro, 300 mm de altura, módulo de elasticidade de 29,43 GPa, densidade de 2266,7 kg/m<sup>3</sup>, valor médio da energia de fratura de 130 N/m, coeficiente de variação da energia de fratura de 50%, fator de falha de 3, tamanho do módulo de 7,5 mm e comprimento de correlação da energia de fratura de 4L.

Em suas considerações Riera et al. (2014), indicaram cinco casos de análise: caso A, com deslocamentos controlados ao longo da linha central, simulando o carregamento em uma faixa de largura,  $\beta = 0,05$ ; caso B, deslocamentos controlados em linhas dos três nós centrais,  $\beta = 0,15$ ; caso C, contendo restrições nos deslocamentos laterais dos nós carregados; caso D,

com deslocamentos controlados em faixas com cinco nós,  $\beta = 0,25$  e caso E, com sete nós,  $\beta = 0,30$ . Sendo  $\beta$  a divisão da largura das tiras de madeira ( $l$ ) pelo diâmetro ( $D$ ) do espécime.

Figura 22 – Ruptura Típica do modelo sob os diferentes casos; a) Caso A; b) Caso B; c) Caso C e d) Caso D

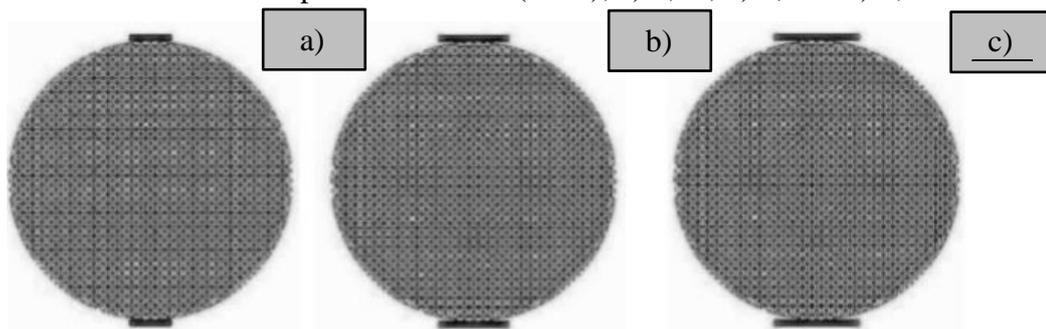


Fonte: Adaptado de Riera et al. (2014)

Como conclusão Riera et al. (2014), identificaram que é possível prever com sucesso a carga de pico, as curvas tensão-deformação e o modo de falha de cilindros de concreto para o teste de determinação de resistência à tração brasileiro. Verificou também que quando a carga é aplicada por meio de faixas rígidas de diferentes relações de  $\beta$ , colocadas sem atrito entre as placas de carga e o cilindro de ensaio, verifica-se que a resistência diametral aumenta com  $\beta$ , tendendo a um valor constante somente para  $\beta > 0,25$ .

Santos et al (2017), avaliaram a influência de diferentes larguras das tiras de distribuição de carga, para a determinação de tração pelo método de compressão diametral. Efetuando estudos experimentais e numéricos para concreto de resistência à compressão axial de 25 MPa, na idade padrão de 28 dias. As proporções de largura das tiras foram de 0,15, 0,25 e 0,30 em relação ao diâmetro da amostra, e para a modelagem numérica efetuou-se a implementação por meio do método dos elementos discretos formados por barras, aplicando a carga conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011) estabelece.

Figura 23 – Casos modelados por Santos et al. (2017); a) 0,15; b) 0,25 e c) 0,30

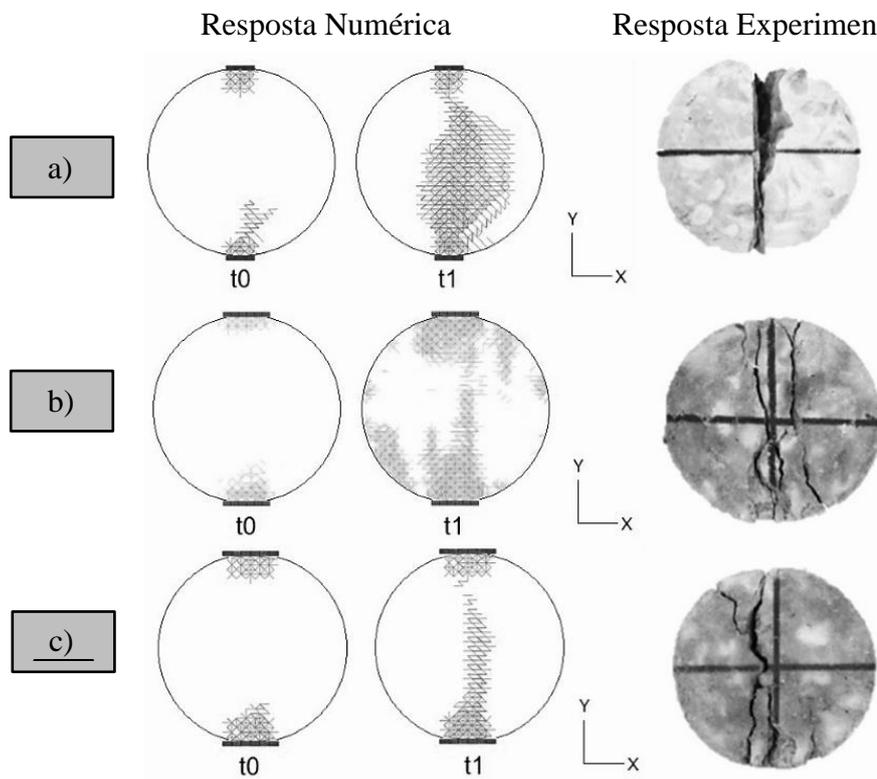


Fonte: Adaptado de Santos et al. (2017).

Santos et al (2017), constataram em seus resultados experimentais que é possível notar um alto coeficiente de variação no teste, um dos aspectos negativos atribuído ao ensaio brasileiro e que, devido aos valores reduzidos de resistência à tração do material, torna-se ainda mais expressivo. Numericamente por sua vez, verificaram que com o aumento na proporção  $b/D$  de 0,15, padronizada pela NBR 7222 (ABNT, 2011), para 0,25, o valor da carga de ruptura aumentou e permaneceu praticamente inalterado na proporção  $b/D$  de 0,30.

Santos et al (2017), também desenvolveu a comparação dos resultados numéricos e experimentais pela avaliação da forma de ruptura exibida pelos espécimes ensaiados e modelados como consta na Figura 24.

Figura 24 – Fissuras obtidas pelos diferentes métodos; a) 0,15; b) 0,25 e c) 0,30

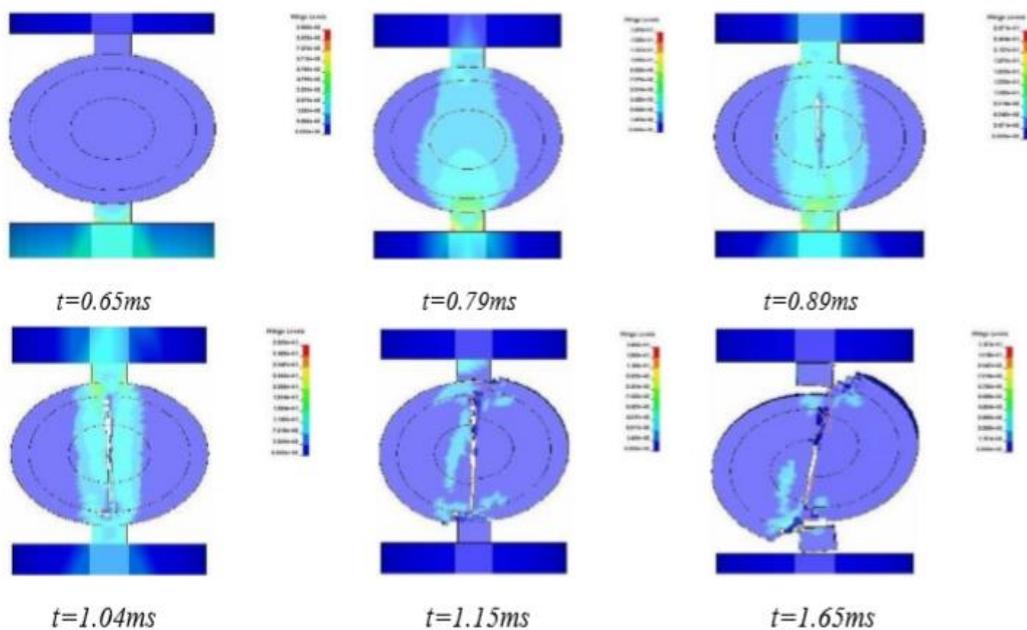


Fonte: Adaptado de Santos et al. (2017).

Como resultado Santos et al (2017), observaram que as modelagens numéricas executadas na pesquisa proporcionaram a identificação da evolução das fissuras de forma otimizada. Entretanto, analisando as imagens dos corpos de prova de concreto ensaiados de forma experimental, é possível concluir que em ambos os casos as fissuras se originam na região de proximidade das bordas, evidenciando a influência das tiras na distribuição do carregamento sobre o espécime.

Zhao et al. (2018), realizaram estudo frente o ensaio de compressão diametral pela barra Hopkinson e simulação numérica, verificando os modos de falha, a mudança da distribuição da tensão e deformação através de um modelo de elementos finitos para amostra de 70 mm de comprimento e 74 mm de diâmetro. A Figura 25 mostra a distribuição da tensão de tração e o modo de falha do material obtida pelos pesquisadores sob compressão transversal em diferentes tempos de leitura.

Figura 25 – Distribuição de tensões sobre o espécime modelado por Zhao et al (2018)



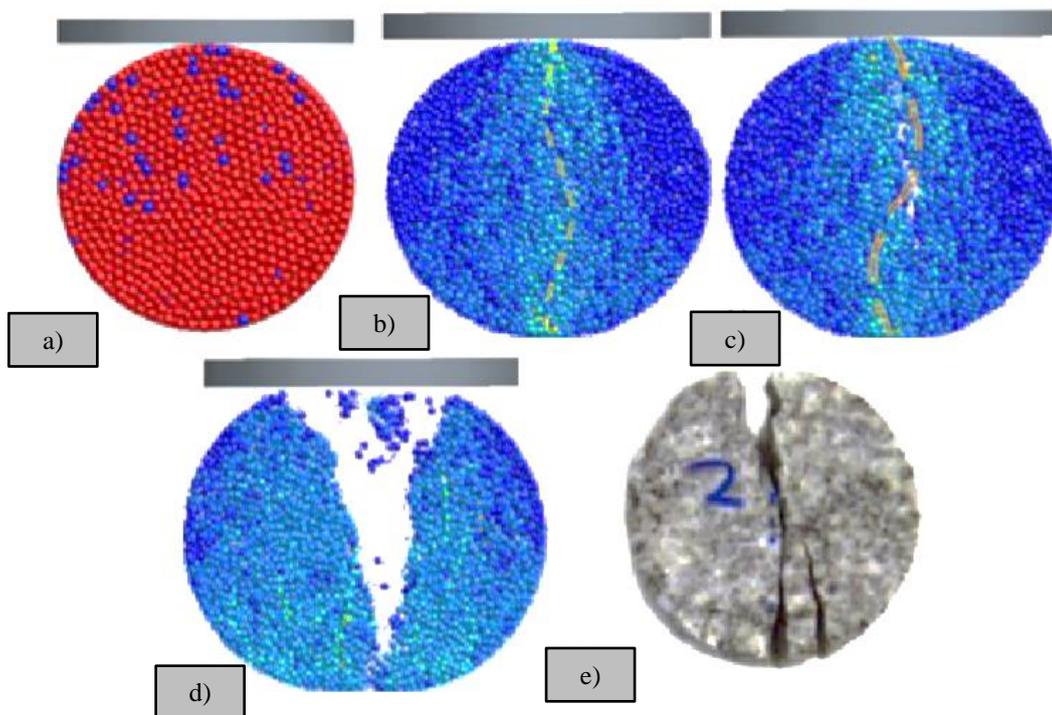
Fonte: Zhao et al (2018)

Durante a propagação do pulso de tensão, Zhao et al (2018) observaram que a compressão apresenta carregamento local nos dois lados da amostra, enquanto a tensão é carregada simetricamente ao longo da direção longitudinal da amostra, até a propagação em 0,89 ms, o centro da amostra alcançou a tensão limite e a fissura ocorreu. A amostra foi completamente rompida em 1,15 ms e depois destruída em 1,65 ms. Comparando os resultados da simulação, a amostra de concreto plano foi completamente rompida e não pôde suportar nenhuma carga em 0,95 ms, enquanto a amostra reforçada ainda apresentava certa capacidade de sustentação, mesmo que fosse completamente rompida como 1,15 ms. Constatando que, o concreto armado possui resistência à tração mais alta que o concreto liso.

Medina et al (2019), utilizaram o método dos elementos discretos em conjunto com um modelo de cimentação de partículas, para avaliação de problemas geotécnicos. Em seu

modelo é assumido que a rocha se comporta como um material cimentado de grãos complexos, sendo deformável. Frente ao estudo de compressão diametral, utilizaram um modelo geométrico de 60 mm de diâmetro e 30 mm de altura (Figura 26a), o teste foi executado movendo a parede rígida superior a uma velocidade constante (0,00002 m/s) até atingir a ruptura do material. O modelo numérico apresentou trincas induzidas por tração, como mostrado na Figura 26d, e em boa concordância com o padrão observado no laboratório e mostrado na Figura 26e.

Figura 26 – a) modelo numérico; b) iniciação das trincas; c) início da ruptura; d) padrão de ruptura numérica; e e) padrão de ruptura experimental



Fonte: Adaptado de Medina et al (2019)

Medina et al (2019) observaram que a curva força-tempo gerada pelas simulações do teste brasileiro, levavam ao aumento na força de forma quase linear até atingir o valor de pico, responsável pela determinação da resistência à tração do material. Em suas considerações verificaram que o modelo de partículas cimentadas é uma ferramenta de pesquisa para auxiliar na compreensão de processos de ruptura de materiais frágeis. Outra conclusão verificada é que a resistência a compressão da amostra aumenta e a deformação na ruptura diminui com o aumento da rigidez dos grãos. Diferentes implementações numéricas vem sendo utilizadas, demonstrando a importância da área na verificação de parâmetros de influência do teste de tração brasileiro.

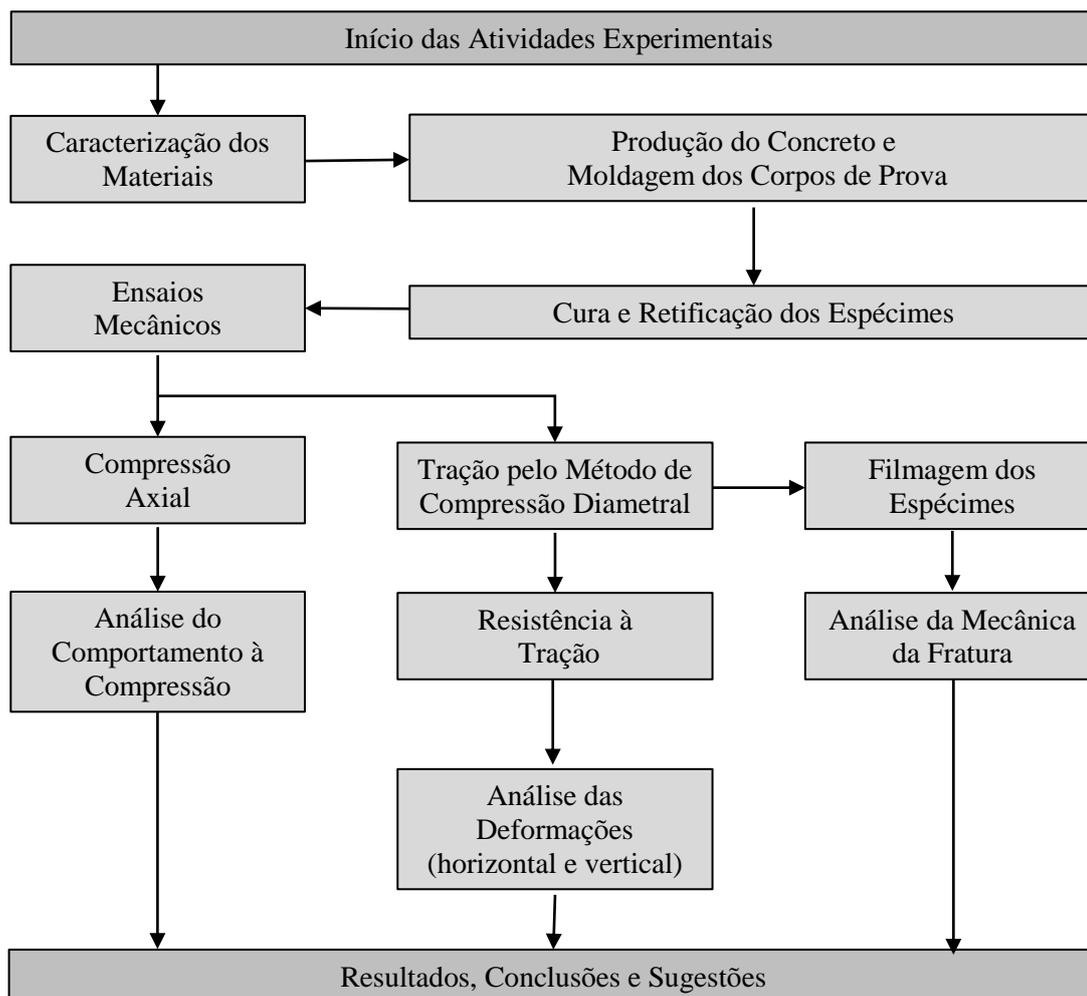
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos normativos utilizados ao longo da pesquisa. A mesma encontra-se dividida em duas etapas de desenvolvimento, sendo a primeira um estudo acerca da análise experimental do ensaio de tração indireta e a segunda, o estudo desse ensaio sob implementação de um modelo de análise numérica, através da associação do Método dos Elementos Discretos compostos por barras (LDEM) junto ao Método dos Elementos Finitos (MEF).

#### 3.1 Estudo Experimental

O esquema apresentado na Figura 27 representa as etapas adotadas para o desenvolvimento do trabalho experimental.

Figura 27 – Organograma das etapas efetuadas experimentalmente



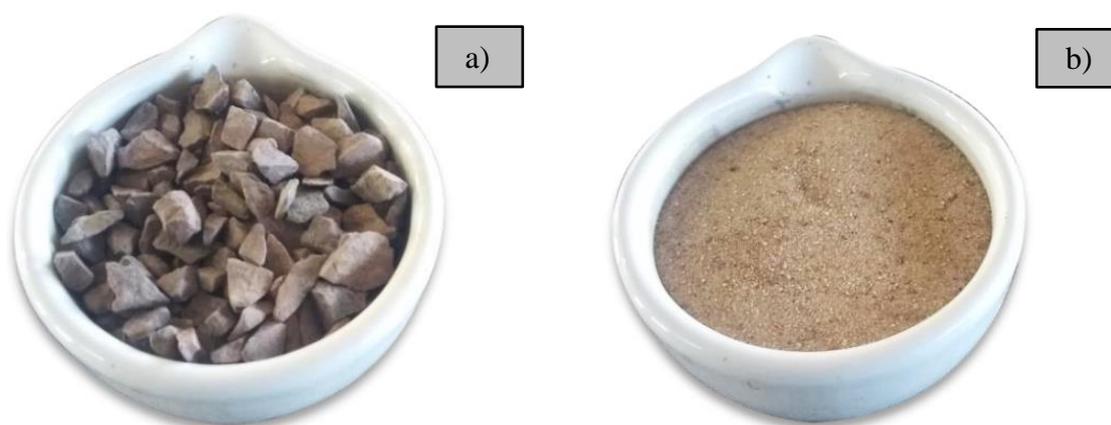
Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.1. Caracterização dos materiais

#### 3.1.1.1 Agregados

Para a produção do concreto foram utilizados agregados graúdos de origem basáltica proveniente do município de Alegrete, Rio Grande do Sul. E como agregado miúdo, areia originária de rio, extraída no município de Manoel Viana, Rio Grande do Sul. Como demonstrados na Figura 28.

Figura 28 – Agregados utilizados na pesquisa: a) graúdo; b) miúdo



Fonte: Elaboração própria.

A caracterização dos agregados, desenvolveu-se conforme os métodos descritos na Tabela 1, os quais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA – Campus Alegrete/RS.

Tabela 1 – Ensaios e normativas utilizadas na caracterização física dos agregados

Agregados	Ensaios	Normas Regulamentadoras
Agregado Miúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT 2003)
	Massa Específica Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Massa Específica	NBR NM 52 (ABNT, 2003)
	Massa Específica Aparente	
Agregado Graúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT 2003)
	Massa Específica Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Massa Específica Agregado Seco	NBR NM 53 (ABNT 2003)
	Massa Específica Saturada Superfície Seca	
	Massa Específica Aparente	
Absorção de água		

Fonte: Elaboração própria.

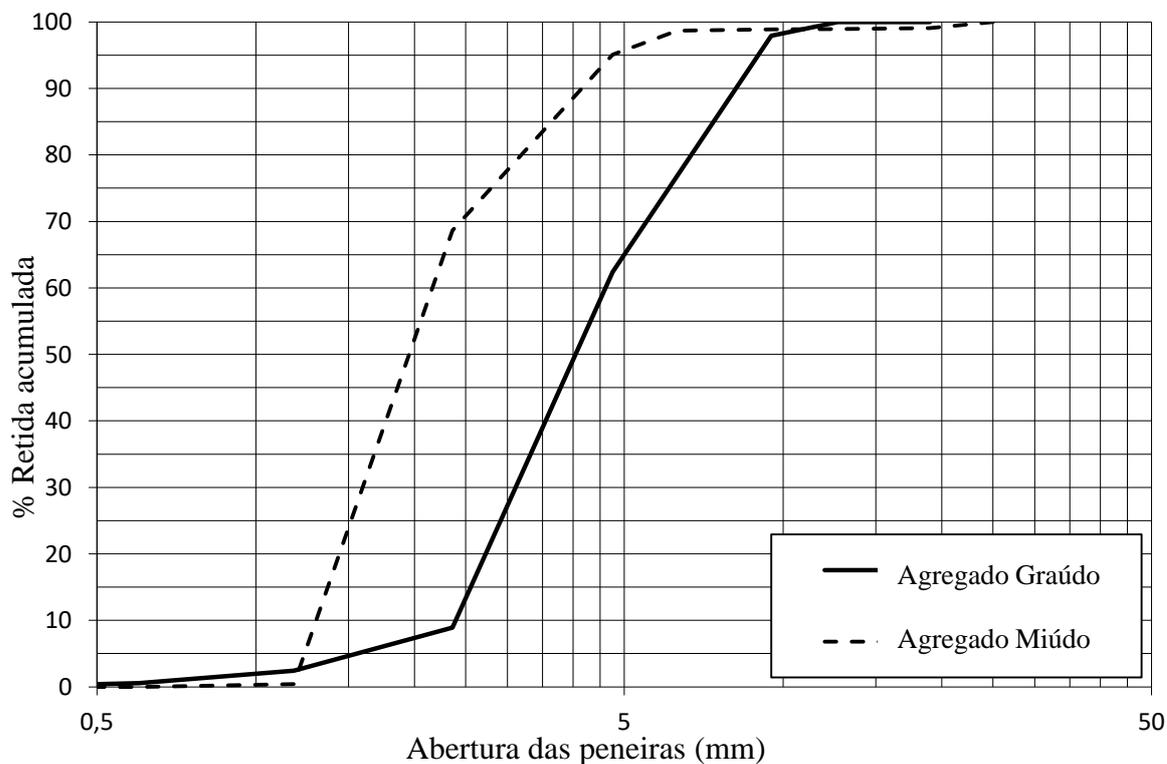
Juntamente com a caracterização granulométrica dos agregados e demais propriedades destacadas anterior, também foram efetuadas a determinação da dimensão máxima característica, módulo de finura e gráfico representativo da composição granulométrica dos materiais, como pode ser observado na Tabela 2 e na Figura 29.

Tabela 2 – Propriedades de caracterização física dos agregados

Agregados	Propriedades	
Agregado Miúdo	Dimensão Característica (mm)	0,60
	Módulo de Finura	1,72
	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63
	Massa Específica Aparente Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,58
	Massa Específica Saturada Superfície Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,60
Agregado Graúdo	Dimensão Característica (mm)	12,70
	Módulo de Finura	5,60
	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,71
	Massa Específica Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,88
	Massa Específica Saturada Superfície Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,79
	Absorção de água (%)	1,94

Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Curvas das composições granulométricas dos agregados graúdo e miúdo



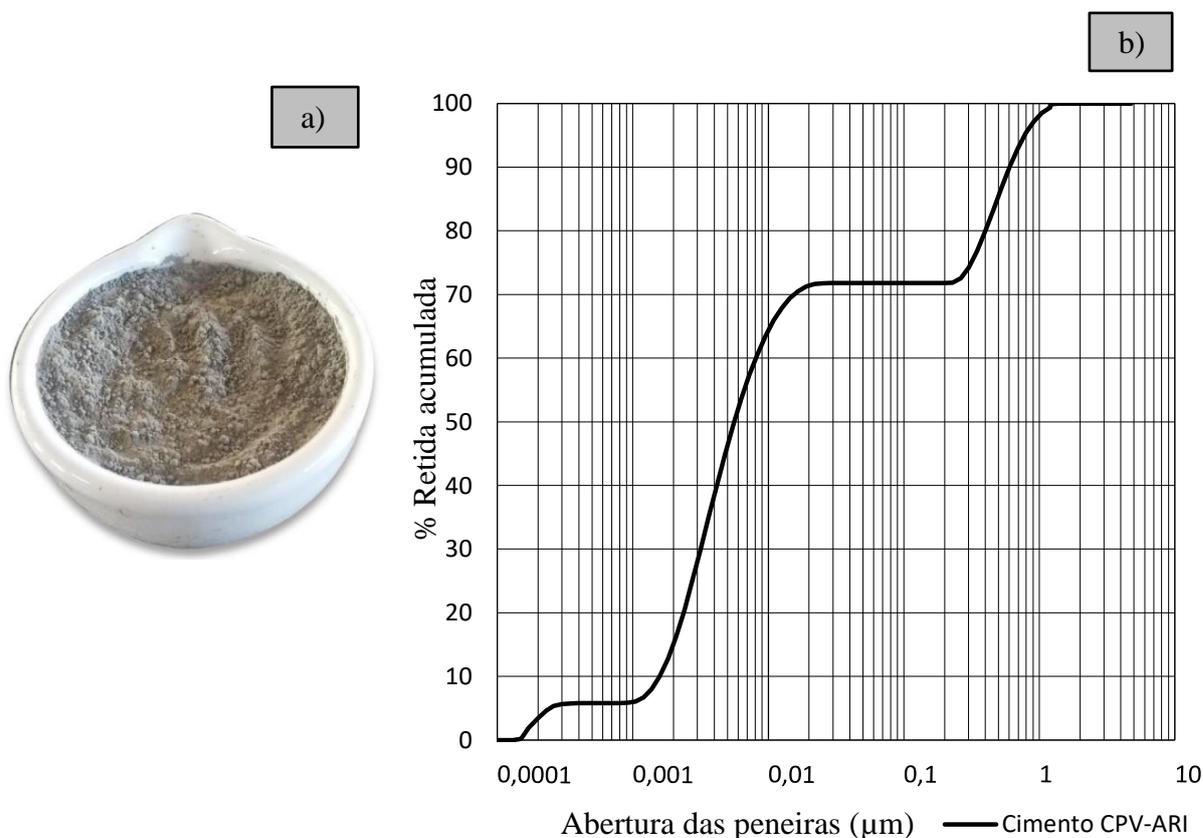
Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.1.2 Cimento Portland

Como material aglomerante foi utilizado o Cimento Portland do tipo CP V ARI (Alta Resistência Inicial), da marca Votoran adquirido no comércio local da cidade de Alegrete/RS. A verificação da massa específica do material, foi realizada pelo ensaio prescrito pela NM 23 (ABNT, 2001), e a caracterização de sua composição granulométrica foi determinada através da média entre três amostras através da técnica de difração de raios laser, pelo analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000™, realizada no Laboratório de Nanobiotecnologia Aplicada à Farmácia e Ciências Farmacêuticas da Universidade Federal do Pampa, localizado no Campus de Uruguai/RS.

A massa específica do Cimento CPV ARI através do frasco de Le Chatelier apresentou-se na ordem de 2,98 g/cm<sup>3</sup>, onde a curva representativa da composição granulométrica e o material utilizado são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Cimento Portland utilizado: a) Cimento tipo CPV ARI e b) Curva de composição granulométrica



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.1.3 Superplastificante

O concreto produzido apresenta baixa relação água/cimento e requer a utilização de aditivo superplastificante, a fim de garantir sua trabalhabilidade. O mesmo é da empresa MC-BAUCHEMIC Brasil Indústria e Comércio LTDA, situada na cidade de Tijuco Preto, pertencente ao estado de São Paulo. A nomenclatura descretizada pelo fabricante é MC - PowerFlow e apresenta densidade de 1,05 g/cm<sup>3</sup> e teores de cloretos e álcalis inferiores a 0,10.

### 3.1.1.4 Água

Na produção do concreto, utilizou-se água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da cidade de Alegrete/RS. A mesma apresentou-se isenta de quaisquer impurezas e contaminantes, não provocando quaisquer reações ao concreto.

### 3.1.2 Produção do concreto

O traço utilizado no estudo, foi dosado para atender uma resistência à compressão axial ( $f_c$ ) de 45 MPa. Os materiais para a produção do traço e sua respectiva composição estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos materiais para produção do concreto

Consumo de material (kg/m <sup>3</sup> de concreto)				Relação a/c	Teor de argamassa (%)	Superplastificante (%)
Cimento	Areia	Brita	Água			
454,88	768,75	1050,77	195,60	0,43	53,82	0,075 (em relação à massa de cimento)

Fonte: Elaboração própria.

Para a produção do traço de concreto C45 utilizou-se a betoneira de eixo inclinado, disponibilizada no laboratório de Engenharia Civil, efetuando assim o preparo do concreto de maneira mecanizada. Durante a execução da moldagem dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone no estado fresco (Figura 31), a fim de verificar a consistência do traço, bem como especifica a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Figura 31 – Produção do concreto e verificação da consistência



Fonte: Elaboração própria.

No ensaio de abatimento de tronco de cone no estado fresco, identificou-se a consistência média de 100 mm, sendo considerado um abatimento característico de elementos estruturais de fundações e pavimentos sob lançamento convencional do concreto.

### 3.1.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados em todos os ensaios possuem formato cilíndrico com dimensões de 100 mm de diâmetro ( $d$ ) e 200 mm de altura ( $l$ ), os quais são moldados em formas metálicas revestidas com óleo mineral e adensados de acordo com ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015). Após a moldagem dos espécimes, a normativa estabelece o tempo de repouso para endurecimento de 48 horas, o qual foi respeitado, posteriormente os espécimes passam por desforma, são identificados e colocados em cura úmida à uma temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95 %, até a execução dos ensaios na idade padrão de 28 dias.

Na Figura 32 são demonstradas as formas utilizadas e os corpos de prova produzidos e posteriormente desmoldados após o endurecimento dos espécimes.

Figura 32 – Espécimes: a) formas metálica para produção; b) concreto moldado e c) pós desforma, aplicação da pintura e demarcação para realização dos ensaios mecânicos



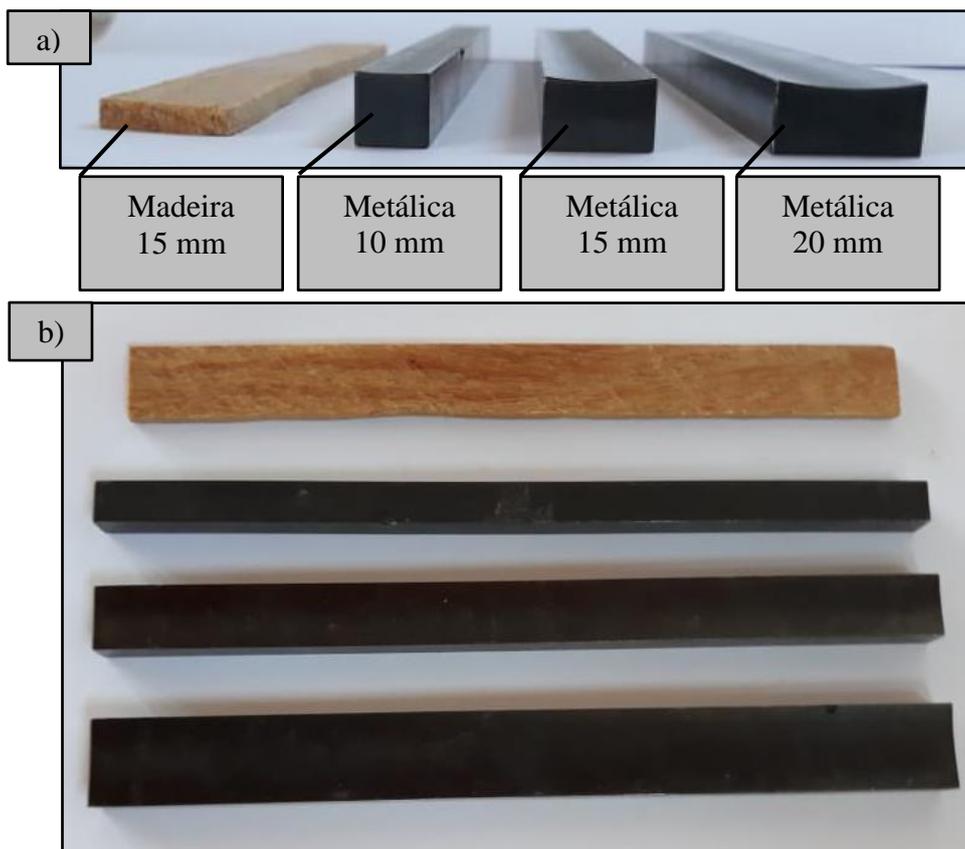
Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.2.2 Tiras de distribuição do carregamento

Os elementos utilizados como face de contato entre o dispositivo de ensaio e o corpo de prova, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), apresentam dimensões específicas e devem ser confeccionadas por tiras de madeira ou aglomerado de consistência dura. Porém, a proposta desta pesquisa, consiste em utilizar não somente as taliscas estabelecidas pela norma, mas também taliscas metálicas curvadas de largura variadas, como observado na Figura 33.

Para a produção das tiras normatizadas, levou-se em conta a norma NBR 10024 (ABNT, 2012) e utilizou-se madeira classificada como dicotiledônea de nome científico “*Dipteryx Odorata*”, cujo nome popular é “Cumaru” e apresenta densidade aparente de 1090 Kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão paralela às fibras de 94,2 MPa (IPT, 2013). As tiras metálicas utilizadas, foram confeccionadas em aço pela indústria de usinagem MULTFER, localizada em Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul.

Figura 33 – Taliscas a serem utilizadas a) face Frontal; b) face Superior



Fonte: Elaboração própria.

As taliscas metálicas possuem concavidade com raio de curvatura igual à dos espécimes, enquanto as taliscas de madeira são planas, ambas com suas dimensões especificadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição das taliscas utilizadas para distribuição do carregamento

Nomenclatura Adotada	Material	b (mm)	Proporção b/d (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
CMD	Madeira *	15 *	0,15 *	3,0 ± 0,5 *	≥ 200,0 *
CMT10	Metal	10	0,10	9,5 - Bordas	
CMT15		15	0,15		
CMT20		20	0,20		

\* Descrição conforme estabelecido pela NBR 7222 (ABNT, 2011)

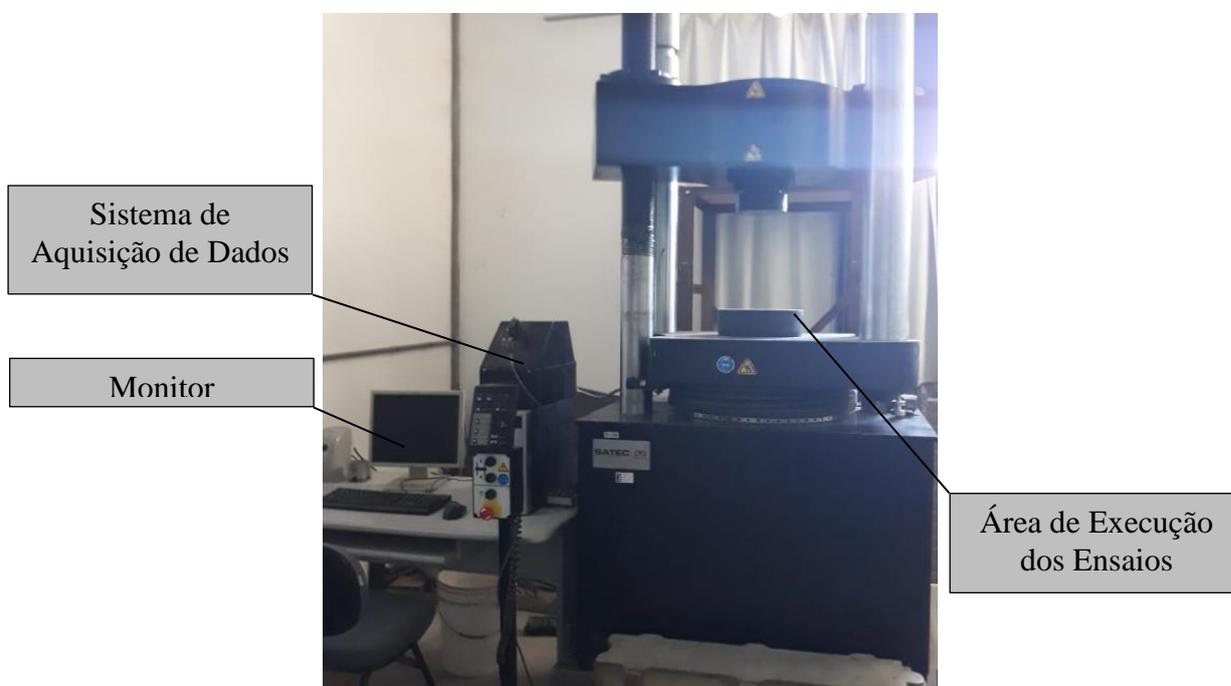
Observações: b - largura talisca e d- diâmetro da amostra.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.3 Ensaios de caracterização mecânica

Nos ensaios de compressão axial e compressão diametral do concreto utiliza-se a máquina de Sistema Hidráulico Estático de Testes Universais, modelo SATEC™ 5590-HVL Series, da marca INSTRON®, demonstrado na Figura 34, a qual possui célula de carga com capacidade de até 1500 KN, leitura e armazenamento de dados de maneira simultânea no que refere ao carregamento aplicado ao espécime, bem como ao deslocamento vertical do prato de aplicação da carga.

Figura 34 – Equipamento para os ensaios mecânicos e aquisição dos dados



Fonte: Elaboração própria

Ao todo são realizados cinco ensaios de compressão axial e quarenta de tração indireta, sendo, dez espécimes efetuados por configuração de taliscas de carregamento, totalizando o quantitativo de quarenta e cinco espécimes como consta na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantitativo de Corpos de Prova (CP's) por ensaio mecânico

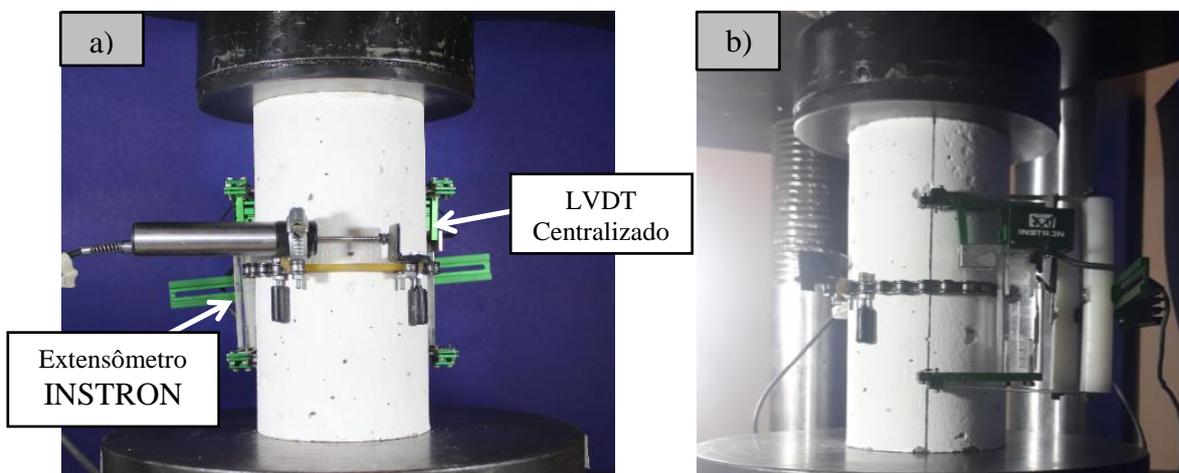
Ensaio	Compressão Axial	Compressão Diametral			
		CMD	CMT10	CMT15	CMT20
Nº de CP's	5	10	10	10	10

Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.3.1 Ensaio de compressão axial

Os ensaios de compressão axial realizam-se com espécimes cilíndricos de concreto, a fim de verificar a resistência característica do traço segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007). Para a determinação do comportamento do material frente à tensão *versus* deformação, a taxa de carregamento empregada foi de 0,05 mm/min, onde o deslocamento vertical foi obtido pelo extensômetro da INSTRON. Em conjunto, foram utilizados dispositivos para determinação da deformação horizontal, os quais são compostos de correntes acopladas com LVDT'S (*Linear Variable Differential Transformer* – Transformador Diferencial de Variação Linear), sendo estes posicionados no centro dos espécimes, como pode ser verificado na Figura 35.

Figura 35 – Compressão axial, posicionamento dos equipamentos a) frontal e b) lateral



Fonte: Elaboração própria.

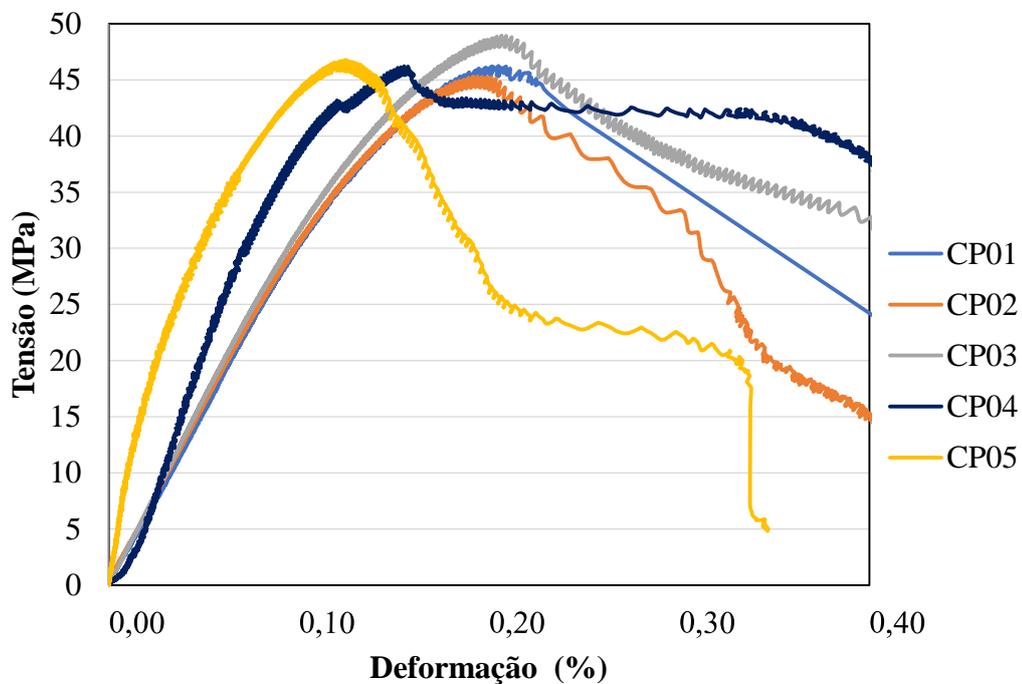
O concreto utilizado no estudo apresentou resistência média à compressão ( $f_c$ ) de 46,70 MPa, detectado através do ensaio de compressão axial sob cinco amostras. As respectivas curvas de tensão *versus* deformação são demonstradas na Figura 36 e seus respectivos dados por amostra através da Tabela 6, onde verificam-se um módulo de elasticidade médio para o concreto de 31,03 GPa e resistência a compressão média de 46,70 MPa, o que atende a resistência estimada para o traço.

Tabela 6 – Dados gerais de resistência à compressão axial

Nº CP	dméd (mm)	Área CP (mm <sup>2</sup> )	Força (KN)	E (GPa)	Resistência (MPa)
CP01	100,10	7869,70	363,87	28,93	46,24
CP02	100,20	7885,43	357,35	28,23	45,32
CP03	100,17	7880,18	385,65	29,08	48,94
CP04	100,17	7880,18	364,25	42,35	46,22
CP05	100,24	7891,20	369,15	26,54	46,78
			Média	<b>31,03</b>	<b>46,70</b>
			Desvio Padrão	<b>5,73</b>	<b>1,21</b>
			CV	<b>18,48%</b>	<b>2,60%</b>

Fonte: Elaboração própria

Figura 36 – Curvas tensão *versus* deformação características do concreto



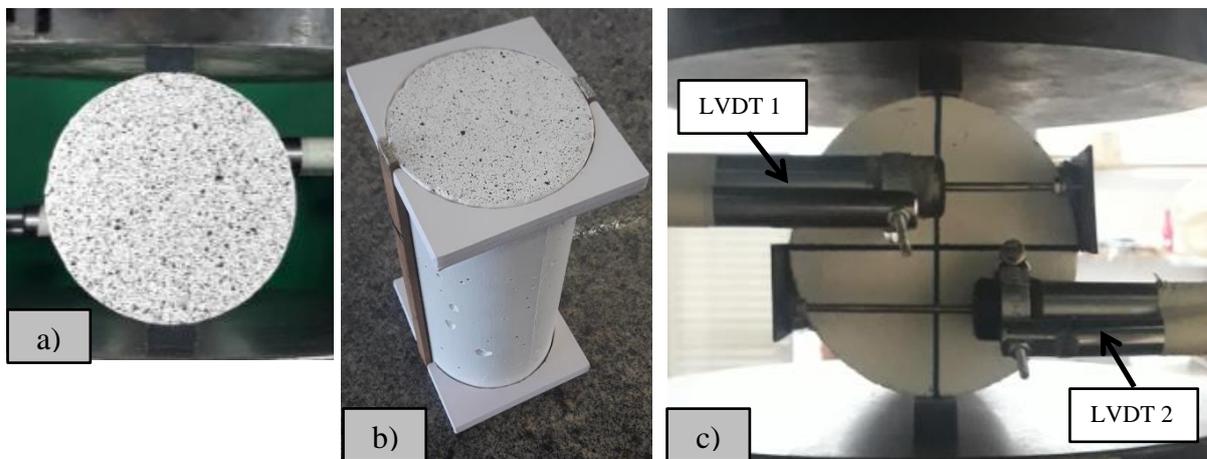
Fonte: Elaboração própria.

Aplicando a equação correspondente a concretos até 50 MPa constantes na NBR 6118 (ABNT, 2014), foi possível determinar o valor empírico correspondente à resistência à tração do concreto. Considerado o valor da resistência à compressão média como resistência à compressão característica do concreto. Desta forma, o valor correspondente à resistência à tração do concreto ficou na margem de  $f_{ct, m} = 3,89$  MPa, sendo cerca de 8,33% da resistência à compressão, estando próximo à relação usualmente estimada.

### 3.1.3.2 Ensaio de compressão diametral

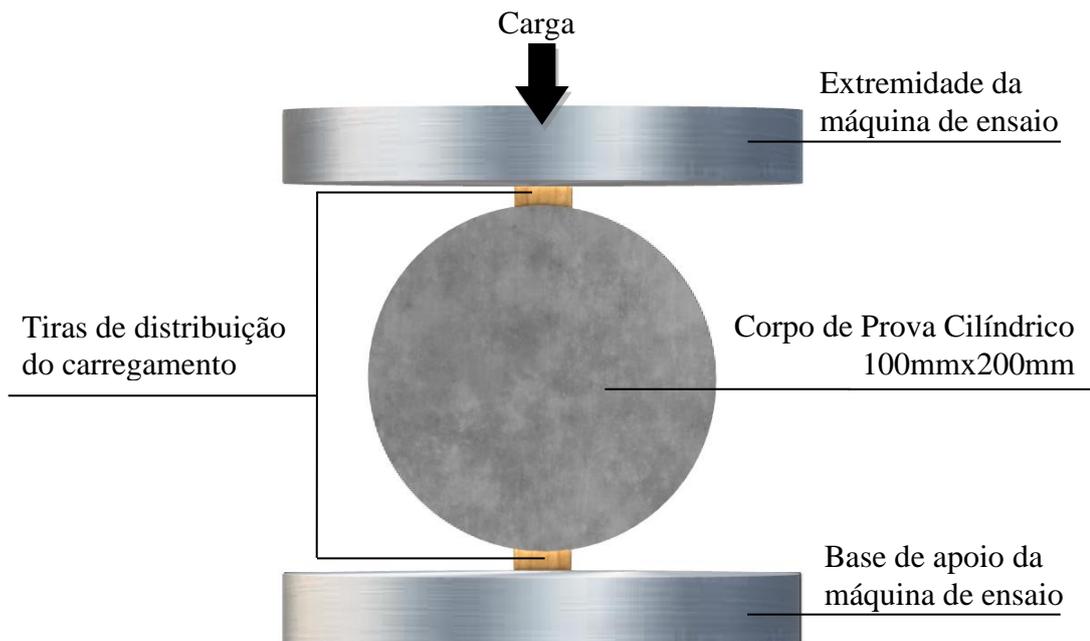
Para a execução do ensaio de tração indireta, os espécimes de concreto e as taliscas de distribuição de carregamento têm suas superfícies preparadas, sendo posicionados sob o equipamento, como demonstrado na Figura 37 e 38. Na face posterior do espécime são posicionados os LVDT's, visando realizar a leitura dos deslocamentos horizontais do ensaio.

Figura 37 – Detalhamento do conjunto para ensaio de compressão diametral a) espécime sob vista anterior, b) gabarito de centralização das taliscas e c) vista posterior



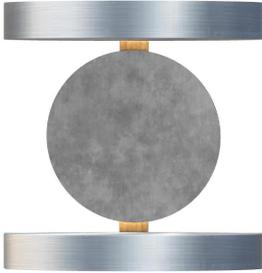
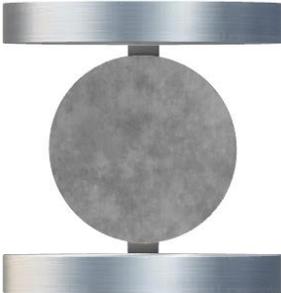
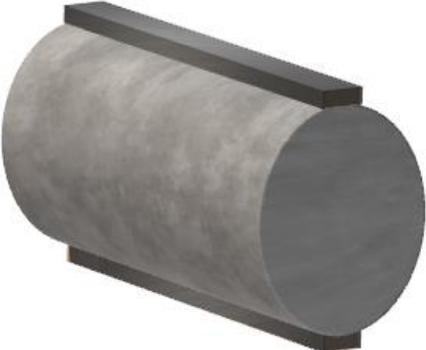
Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 – Detalhamento do conjunto para ensaio de compressão diametral



Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Detalhamento das diferentes configurações a serem efetuadas no ensaio

Conjunto de Ensaio	Detalhamento Frontal	Detalhamento Longitudinal
CMD		
CMT10		
CMT15		
CMT20		

Fonte: Elaboração própria.

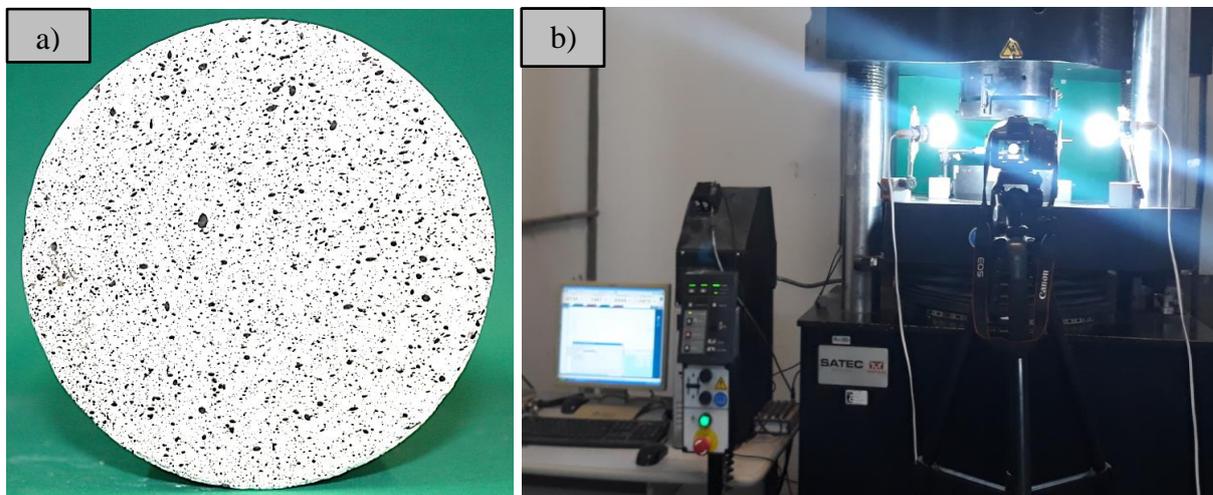
Ao todo são estudadas quatro configurações de ensaio como detalhado na Figura 39, uma seguindo as especificações da normativa NBR 7222 (ABNT, 2011) e três utilizando diferentes configurações de largura efetiva de taliscas metálicas, as quais possuem curvatura equivalente as amostras.

### 3.1.4 Procedimento para correlação digital por imagem

Os ensaios de tração indireta passam pelo processo de filmagem, através da utilização de uma câmera de alta resolução digital (1920x1080 pixels), sendo essa fixada junto da parte móvel do mecanismo de ensaio, a partir do auxílio de braços magnéticos ajustáveis. Os espécimes possuem iluminação direta, através da utilização de uma lâmpada direcionada.

Para conseguir uma boa resolução, a face do corpo de prova é regularizada e sob sua superfície é produzido um padrão estocástico, o qual é gerado pela aplicação de tinta branca fosca em conjunto com a posterior aplicação de spray preto fosco, como consta na Figura 40.

Figura 40 – a) superfície projetada para o espécime contendo o padrão estocástico; b) fixação dos equipamentos para filmagem dos ensaios



Fonte: Elaboração própria.

A partir dos arquivos de vídeos foram extraídas imagens estáticas na extensão jpeg e posteriormente foram exportadas para o ambiente computacional do *Software GOM Correlate*, através da utilização da versão gratuita (GOM, 2021), visando analisar em ambiente bidimensional os deslocamentos e deformações resultantes do material. O programa é fornecido pela empresa de metrologia industrial GOM, localizada em Braunschweig, na

Alemanha. Ao longo da pesquisa foram realizadas a extração das filmagens, porém não foram efetuadas o DIC para análise dos deslocamentos e deformação dos espécimes.

### 3.2 Análise Numérica

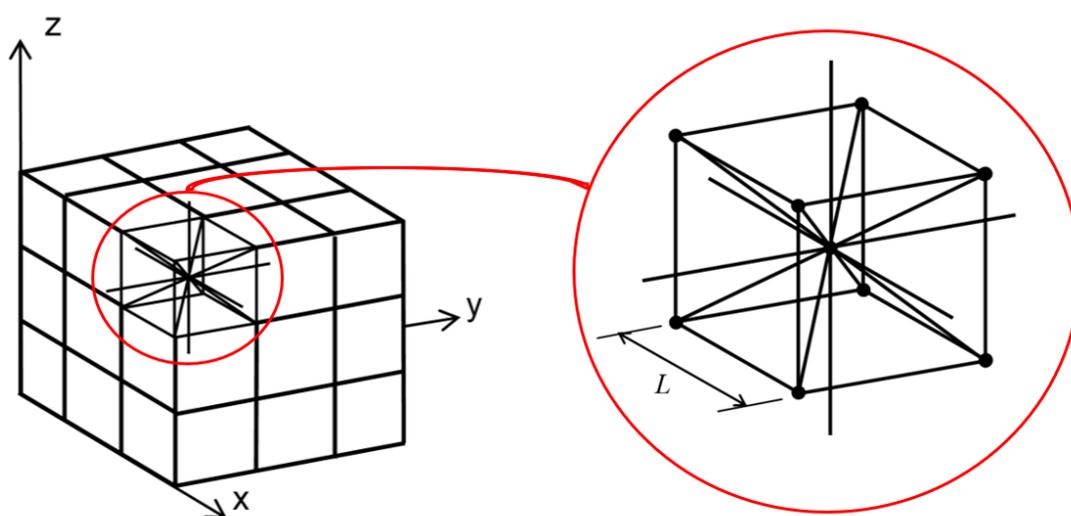
Através das propriedades do concreto obtidas experimentalmente, realizaram-se as implementações numéricas, utilizando o método dos elementos discretos formado por barras (LDEM) em conjunto com o método dos elementos finitos (MEF), para elaborar um modelo representativo do ensaio de tração indireta.

#### 3.2.1 Método dos elementos discretos formados por barras

O Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM) segundo Kostaski (2012), representa um sólido contínuo por um arranjo espacial de barras com massas, concentradas em suas extremidades.

O módulo básico consiste em 20 barras capazes de suportar apenas cargas axiais. Baseado na ideia de Narfeh e Hezfy (1978), Riera (1984) desenvolveu o método demonstrado na Figura 41, onde cada nó é composto por três graus de liberdade, os quais correspondem aos componentes do vetor de deslocamento em um sistema de referência global.

Figura 41 – Representação do corpo prismático e modelo cúbico simplificado do DEM



Fonte: Adaptado de Kostaski (2012, p.37)

As equações que relacionam as propriedades dos elementos com as constantes elásticas de um meio contínuo e isotrópico são:

$$A_l = L^2 \frac{(9+8\delta)}{2(9+12\delta)} \quad \dots(9)$$

$$A_d = \frac{2\sqrt{3}}{3} A_l \quad \dots(10)$$

$$\delta = \frac{9\nu}{4-8\nu} \quad \dots(11)$$

Onde  $A_l$  representa a área da seção transversal do elemento longitudinal,  $L$  o comprimento do modelo cúbico simplificado,  $A_d$  a área dos elementos diagonais,  $\nu$  o coeficiente de Poisson e  $\delta$  o coeficiente representativo do sólido isotrópico. As Equações 9 e 10 podem ser encontradas de forma mais detalhada nas pesquisas desenvolvidas por Nayfeh e Hefzy (1978) e Dalguer et al (2001).

Riera, Miguel e Iturrioz (2016) e Kostascki et al. (2014) destacam que quando o coeficiente de Poisson é de 0,25 existe uma equivalência completa entre o modelo discreto e o contínuo isotrópico. Desta forma equações representativas de movimento e condições de equilíbrio, conforme a segunda Lei de Newton, podem ser aplicadas sobre as forças atuantes do sistema sob cada nó, o que forma:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad \dots(12)$$

Onde  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  e  $x$  representam os vetores aceleração, velocidade e deslocamento,  $M$  a matriz de massa,  $C$  a matriz de amortecimento e  $F(t)$  e  $P(t)$  os vetores das forças internas e externas que atuam nas massas nodais. Assim é efetuada sua integração sob o domínio do tempo de forma explícita sob diferenças finitas.

Segundo os critérios de Courant-Friedrichs-Lewy por Bathe (1996), a integração não sofre comprometimento quando o incremento de tempo é controlado. Miguel, Iturrioz e Riera (2014) comprovam que o espaço de tempo não pode extrapolar o valor resultante da Equação 13, garantindo a estabilidade do método de integração em materiais elásticos lineares. Sendo assim, a limitação do incremento de tempo:

$$\Delta_t \leq \frac{0,6L}{c_p} \quad \dots(13)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots(14)$$

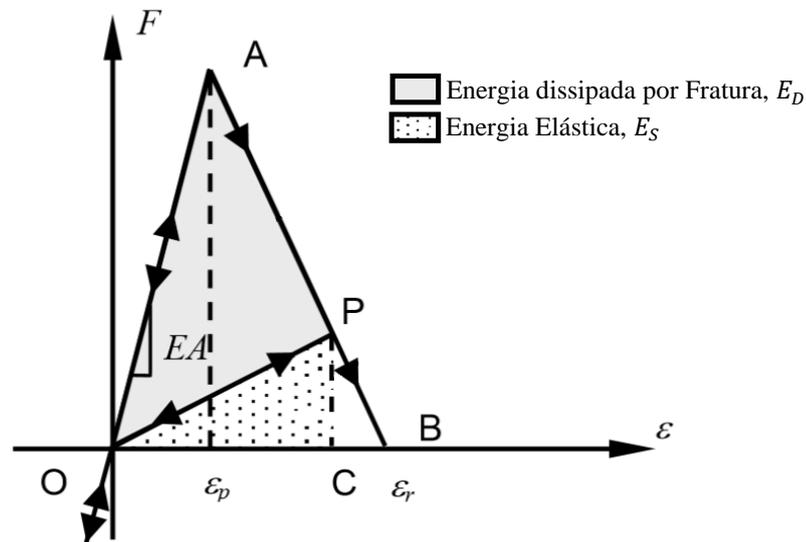
Onde o  $C_p$  a velocidade de propagação de ondas longitudinais,  $E$  o módulo de elasticidade e  $\rho$  a massa específica do material.

### 3.2.2 Lei Bilinear ou modelo de Hillerborg

A lei de amolecimento proposta por Hillerborg (1978) para materiais quase frágeis, foi amplamente utilizada para simular o comportamento de diversos materiais. Riera e Iturrioz (1995) adaptaram esta lei no contexto do LDEM como uma alternativa de capturar os efeitos gerados pela nucleação e propagação das fissuras, as quais levam à redução da capacidade de carga de um elemento.

Os parâmetros e símbolos utilizados na definição do modelo constitutivo são representados na Figura 42, sendo eles:  $F$  a força axial no elemento;  $\varepsilon$  a deformação específica;  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $A$  a área da seção transversal do objeto.

Figura 42 – Modelo constitutivo Bilinear



Fonte: Adaptado de Kostaski (2012, p.40)

Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010) descrevem o gráfico força *versus* deformação, onde demonstra-se as energias envolvidas no modelo constitutivo, sendo elas: a área do triângulo OAB a densidade de energia necessária para a ruptura do elemento, a área do triângulo OPC a

densidade de energia elástica armazenada com esta lei e a área do triângulo OAP a densidade de energia de dano armazenada no elemento.

Na definição básica do LDEM apenas falhas por tração são permitidas. Sendo o colapso do elemento e sua perda de capacidade de carga determinados pela igualdade entre a densidade de energia dissipada por dano e a energia de fratura. Em contrapartida, quando o elemento é submetido a tensões de compressão, o comportamento obtido pelo mesmo é elástico linear, fazendo com que a falha passe a ser provocada por tração indireta. Para Kupfer e Gerstle (1973), esta suposição é aceitável para materiais quase frágeis, pois a tensão máxima de compressão uniaxial é cinco a dez vezes maior que à tração uniaxial do elemento.

A deformação crítica de falha do elemento ( $\varepsilon_p$ ), representada pelo ponto A na Figura 43, é a deformação alcançada antes do início do processo de dano do material. A relação entre  $\varepsilon_p$  e a energia específica de fratura  $G_f$  é determinada pela Mecânica da Fratura Linear Elástica (RIERA; MIGUEL; ITURRIOZ, 2014), demonstrada nas Equações 15 e 16, a qual, leva em consideração o fator de falha ( $R_f$ ), o módulo de elasticidade do elemento (E), a presença de defeito intrínseco de tamanho ( $a$ ) e um parâmetro adimensional ( $Y$ ), o qual depende das dimensões do espécime e da trinca gerada sob o elemento.

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad \dots(15)$$

$$R_f = \frac{1}{Y\sqrt{a}} \quad \dots(16)$$

### **3.2.3 Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM) associado ao Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Pinto (2010) recomenda utilizar o LDEM de forma integrada ao método dos elementos finitos da plataforma do *software Abaqus*, devido à desvantagem e falta de flexibilidade do método dos elementos discretos nos problemas de modelagem de geometria complexa e condições de contorno. Para Kostascki (2012) o *Abaqus/Explicit* proporciona soluções precisas, robustas e de alto desempenho para problemas não-lineares complexos, devido a capacidade do sistema agir de forma eficaz em problemas acentuadamente não-lineares, o que o torna eficiente no estudo de problemas quase estáticos.

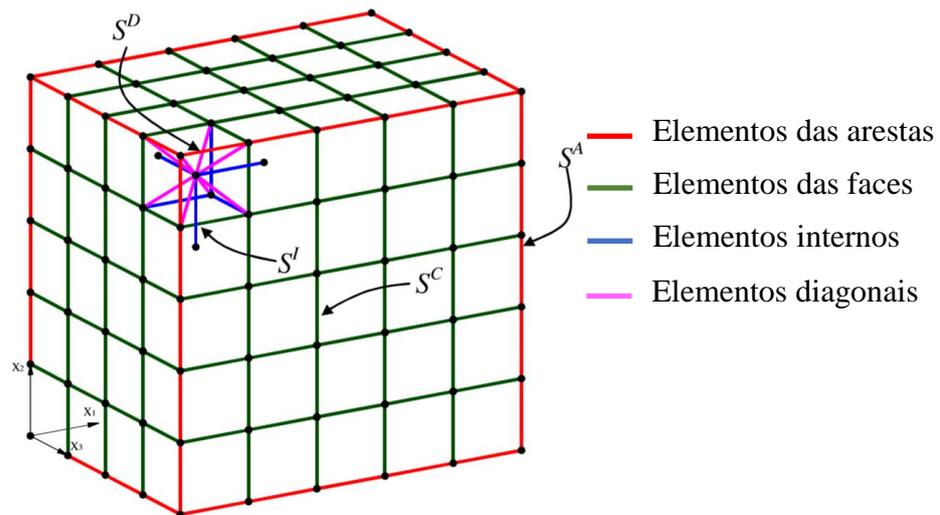
### 3.2.3.1 Modelagem treliça espacial

No LDEM o corpo contínuo é substituído por uma treliça espacial através do *Abaqus/Explicit*, formado por superposições de módulos básicos, utilizando elementos finitos de barras tridimensional com 2 nós (T3D2). Kostascki, Pinto e Iturrioz (2010) ressaltam que cada um desses elementos encontram-se associados a uma seção e a um tipo de material.

Na disposição cúbica estudada, podem ser identificados quatro tipos de seções diferentes: os elementos das arestas ( $S^A$ ), os elementos das faces ( $S^C$ ), os elementos internos ( $S^I$ ) e os elementos diagonais ( $S^D$ ) do modelo global, sendo estes expressos pela Equação 17 e observados pela Figura 43.  $A_l$  e  $A_d$  foram definidos anteriormente pelas Equações 9 e 10.

$$S^A = \frac{A_l}{4} ; S^C = \frac{A_l}{2} ; S^I = A_l ; S^D = A_d \quad \dots(17)$$

Figura 43 – Cubo do LDEM e suas diferentes seções modeladas no ambiente *Abaqus/Explicit*



Fonte: Adaptado de Kostascki et al. (2010, p. 5265)

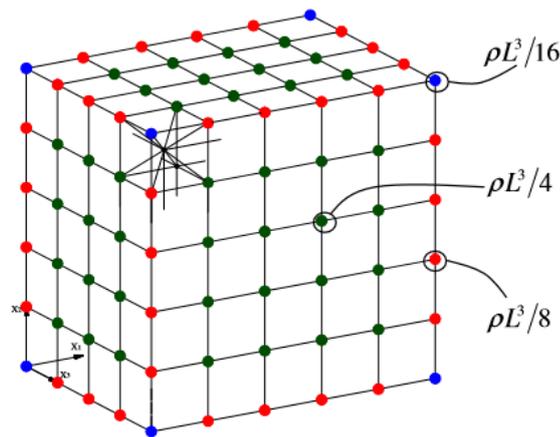
### 3.2.3.2 Determinação das massas

A massa do elemento discretizado no LDEM concentra-se nos nós do modelo espacial e varia conforme a seção e o volume de influência de cada ponto. Ao levar em conta o modelo cúbico básico anteriormente apresentado, o volume representativo do módulo era de  $L^3$ , sendo sua massa o conjunto do nó central e o somatório da oitava parte dos demais nós dos vértices. Para o módulo cúbico, a massa deve ser igual a  $\rho L^3$ , sendo  $\rho$  a massa específica do material.

Ao formar a massa de um módulo cúbico, o nó central leva toda massa correspondente a  $\rho L^3/2$  e as oitavas partes dos nós dos vértices uma massa correspondente à  $8\rho L^3/16$ . Assim, os nós dos vértices azuis, das arestas em vermelho e das faces em verde, possuem um oitavo, um quarto e metade da massa do nó completo, respectivamente (Figura 44).

O *software Abaqus/Explicit*, no entanto, não coloca as massas unicamente concentradas nos nós, pois causaria a indefinição de algumas barras, levando por consequência a erros nos cálculos. Desta forma para evitar tais erros, será implementado sob o sistema de estudo a igualdade entre a densidade de massa das barras e as massas nodais do modelo DEM. Detalhes sobre este implemento, deduções e conclusões da discretização das massas podem ser encontrados em Kostascki (2012).

Figura 44 – Modelo gerado com o DEM e suas massas nodais indicativas



Fonte: Kostascki et al. (2010, p. 5266)

### 3.2.3.3 Modelo constitutivo inserido no ambiente *Abaqus*

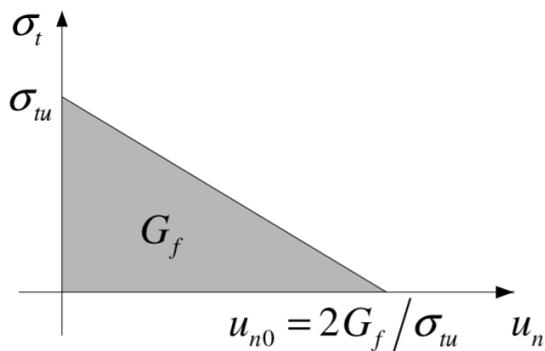
O modelo de ruptura para o concreto no *Abaqus/Explicit*, tem características similares a da lei constitutiva bilinear, sendo o comportamento à compressão sempre elástico linear antes do dano e a remoção dos elementos quando totalmente danificados ser possível.

O *Abaqus* utiliza o modelo de fissuras distribuídas (*smearred crack model*) para representar discontinuidades do comportamento frágil no concreto, o critério de fratura se baseia no modelo de Hillerborg (1978), usando assim a taxa de liberação de energia ( $G_f$ ) como parâmetro de fratura. Na Figura 45, demonstra-se a relação construtiva após a ocorrência da tensão máxima, a qual é representada pela Equação 18.

$$\sigma_{tu} = E\varepsilon_p \quad \dots(18)$$

O deslocamento não transmite mais tensões e  $u_{n0}$  encontra-se diretamente relacionado com a deformação limite  $\varepsilon_r$ . Ao efetuar a modelagem do sistema leva-se em consideração o valor da deformação crítica no lugar do deslocamento.

Figura 45 – Modelo tensão pós falha *versus* deslocamento utilizado no *Abaqus/Explicit* associado à energia de fratura do DEM



Fonte: Kostaski et al. (2012, p. 101)

### 3.2.3.4 Inclusão de aleatoriedade no ambiente *Abaqus*

A aleatoriedade é incluída nas propriedades do material, segundo Rocha (1989), devido a necessidade de levar em conta as imperfeições do cubo elementar em relação a escala real.

Sendo assim, o mesmo é introduzido no modelo *Abaqus* considerando a tenacidade do material  $G_f$ , como uma variável aleatória e admitindo uma mesma distribuição de probabilidades do tipo Weibull, a qual é determinada pela Equação 19, onde  $\beta$  representa o parâmetro de escala e  $\gamma$  o parâmetro de forma.

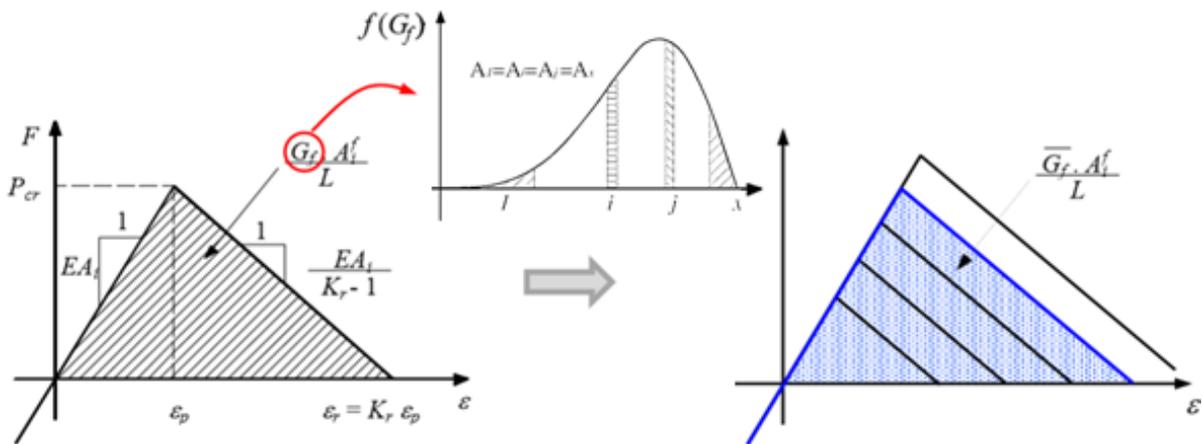
$$F(G_f) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{G_f}{\beta}\right)^\gamma\right]} \quad \dots(19)$$

O método de incorporação da aleatoriedade na energia específica de fratura  $G_f$  é mostrado na Figura 46, onde a energia se relacionada com a área da lei constitutiva.

Comprovando o que os pesquisadores Kostaski (2012) e Soares (2015) relatam, que diferentes elementos levam a diferentes modelos constitutivos, no entanto com formas similares.

Segundo Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010) e Kostaski (2012) para adicionar o aspecto aleatório no *Abaqus*, seleciona-se uma quantidade  $x$  de materiais correspondente ao intervalo  $[1; x]$  e gera a quantidade correspondente a quatro vezes este valor, totalizando as seções de ligação dos intervalos. As seções que correspondem aos elementos são colocadas nas arestas, faces, internas e diagonais e os tamanhos dos  $x$  intervalos são em função da densidade de probabilidade  $F(G_f)$ , sendo sua área constante e igual a  $1/x$  dentro destes intervalos.

Figura 46 – Esquema representativo da incorporação de aleatoriedade no DEM através da utilização do Modelo de Hillerborg e considerando  $G_f$  como campo de aleatoriedade sob  $\varepsilon_p$

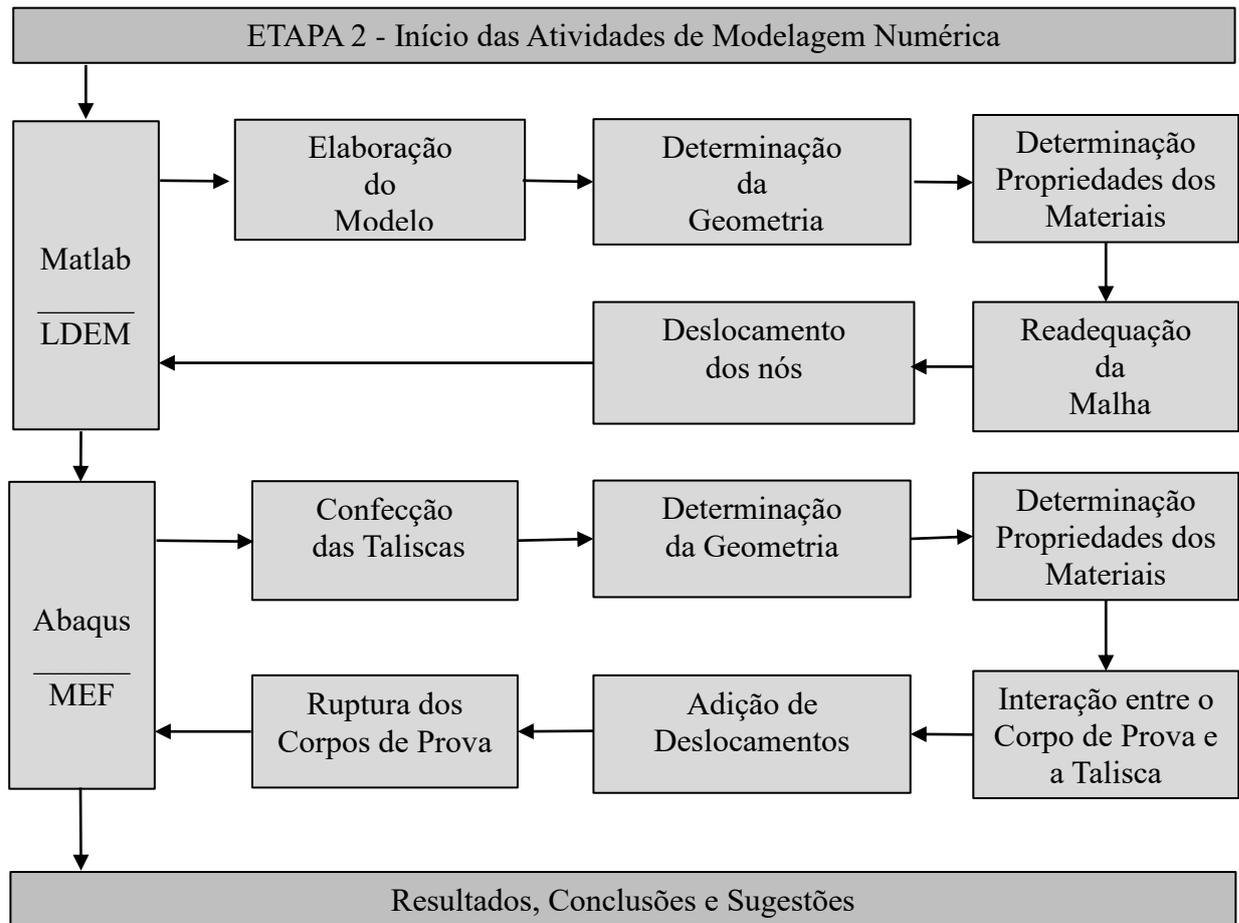


Fonte: Adaptado de Kostaski (2012, p. 54)

### 3.2.4 Parâmetros das simulações

Para proporcionar flexibilidade na simulação de problemas com geometria e condições de contorno mais complexas, como os indicados no presente trabalho, pretende-se criar modelos mistos utilizando o LDEM em conjunto com o MEF. O modelo treliça com propriedades do material, seções e dimensões do LDEM, é elaborado com o auxílio do software *Matlab*, gerando um arquivo.inp, o qual é aberto no ambiente computacional do software *Abaqus/Explicit*, o passo a passo desenvolvido consta na Figura 47, com o indicativo das etapas realizadas.

Figura 47 – Organograma de atividades a serem implementadas numericamente



Fonte: Elaboração própria.

Após a implementação dos passos descritos acima, o trabalho gerou os modelos cilíndricos de mesmas dimensões estudadas no modelo experimental, sendo: 100 mm de diâmetro ( $d$ ) com um módulo de espessura para a simulação bidimensional e com 200 mm de altura ( $l$ ) para os modelos tridimensionais. O grande problema do modelo confeccionado para a simulação, é a sua forma geométrica, pois o LDEM, é formado por superposição de um módulo básico de treliça espacial cúbica (Figura 42), assim sendo, de grande complexidade a realização de geometrias cilíndricas.

Para gerar a malha cilíndrica, serão eliminados todos os nós que apresentarem coordenadas fora de um círculo de diâmetro de 100 mm e serão deslocados os nós próximos à superfície cilíndrica para a mesma com o intuito de finalizar em uma superfície mais circular possível. Todas as etapas são realizadas sem alterar a rigidez dos elementos.

Com a malha pronta é introduzido o corpo cilíndrico no *Abaqus/Explicit*, sendo confeccionadas as tiras de madeira e metálicas conforme as descrições utilizadas no programa experimental. As tiras aparecem nas simulações com geometrias diferentes, com o objetivo de

determinar quais as melhores dimensões para a execução deste ensaio. Serão impostos sob o modelo, deslocamentos que levem à ruptura dos corpos de prova simulados.

Sendo assim, é possível analisar as formas de ruptura sob as diferentes configurações estudadas, e verificar a concordância com os resultados experimentais.

### 3.2.4.1 Caracterização e propriedades do modelo numérico em estudo

Para modelar as condições do ensaio de compressão diametral utilizou-se um modelo híbrido, onde o espécime de concreto foi simulado com o LDEM, e as taliscas de distribuição de carregamento foram simuladas com o método dos elementos finitos (FEM) para o caso de taliscas de madeira. As propriedades das taliscas são apresentadas na Tabela 7, as quais foram baseadas em dados constantes no catálogo de propriedade do IPT (2013) entre outras pesquisas como Marques (2014), Silva (2015) e Santos et. al. (2017).

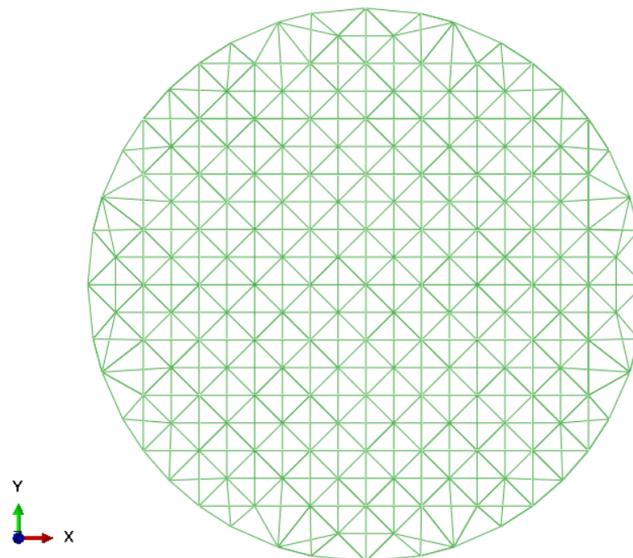
Tabela 7 – Propriedades das taliscas utilizadas nas simulações

Propriedades	FEM
b/d	0,15
Classe	C60
$E_{c90}$ [GPa]	1,225
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	800
$\nu$	0,3

Fonte: Elaboração própria.

O espécime cilíndrico de concreto com diâmetro 100 mm foi simulado com LDEM em estado plano de deformações, como mostrado na Figura 48. Para conseguir este estado plano, efetuou-se a simulação considerando um módulo de espessura unitária e todos os deslocamentos foram restritos nessa direção. O modelo tridimensional apresenta a mesma seção no plano, porém com um comprimento de 200 mm.

Figura 48 – Malha LDEM cilindro de 10 módulos



Fonte: Elaboração própria.

O concreto utilizado retrata o material reproduzido também experimentalmente sendo neste estudo da classe C50. Foram definidas as propriedades do material como o módulo de elasticidade, a tensão máxima de tração e o valor da energia de fratura obtido através de correlações matemáticas da CEB/90 (1993).

O comprimento de correlação, comprimento característico do módulo cúbico e o coeficiente de variação da energia de fratura foram obtidos de outros trabalhos de referência como Silva (2019), Riera, Miguel e Iturrioz (2014), Maders et. al. (2012) e Kostaski et. al. (2010). Os dados de todos os parâmetros utilizados para simular o concreto com o LDEM são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros do concreto utilizados na simulação

Propriedades	Concreto
E (GPa)	31,03
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2399,66
$\nu$	0,25
$G_f$ (N/m)	73,022
CV $G_f$ (%)	20
$\epsilon_p$	0,000125286
$L_{cor}$ (m)	0,04

Fonte: Elaboração própria.

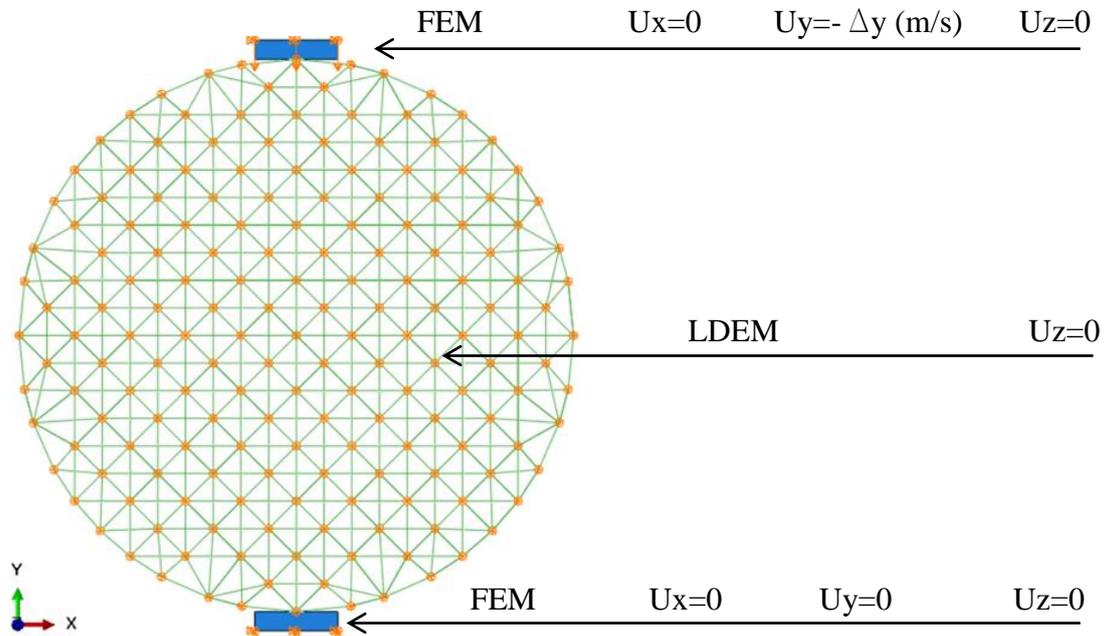
Para isso, utilizamos um arquivo de entrada gerado no Matlab com um modelo de 10 módulos cúbicos de diâmetro do espécime nas direções dos eixos x e y, e um módulo de espessura para o exemplar em 2D. Depois de importar a malha criada para o ambiente Abaqus/Explicit, modelaram-se as taliscas para o recebimento das condições de contorno. Posicionou-se na parte superior e inferior da amostra cimentícia como pode ser observado pela Figura 49, a qual retrata o conjunto híbrido modelado.

A interação utilizada entre o espécime cilíndrico e as tiras de distribuição de carregamento, foi gerada através de contato mecânico do tipo “surface-to-surface contact”. Essa lei de contato, disponível no Abaqus/Explicit, é definida por duas leis. No contato normal, é utilizado “hard” contact no qual as superfícies dos materiais (cilindro e taliscas) não se superpõem, mas podem separar-se após o contato. Para definirmos o comportamento tangencial, utilizamos as condições “*Tangencial Behaviour*” que em princípio foi considerado interação entre superfícies com deslocamento entre as partes do conjunto, ou seja através do comando “*frictionless*”.

Quanto às condições de deslocamento de cargas, nomeou-se as configurações representadas na Figura 49, através da ferramenta “load”, gerando os vínculos nos nós do cilindro, e nas tiras de distribuição de carregamento inferior e superior, ambos de forma individualizada. Sendo que os nós do conjunto ficam restringidos na direção z e ao mesmo tempo permitido nas demais direções (para criar um modelo de estado plano de deformações).

Quanto à tira de distribuição de carregamento inferior efetuou-se a restrição nas três direções de modo a representar de forma fiel ao ensaio experimental, o qual efetua o deslocamento pela plataforma da prensa através do contato com a tira de distribuição de carregamento superior. Assim, na tira de distribuição de carregamento foram impedidos o deslocamento nos eixos x e z, permitindo a compressão ao longo do eixo y, com uma velocidade de carregamento de  $-\Delta y$  (m/s) de deslocamento negativo ou de compressão.

Figura 49 – Condições de contorno do modelo plano



Fonte: Elaboração própria

### 3.2.4.2 Determinação da velocidade de aplicação de carregamento

A necessidade de analisarmos a velocidade de aplicação de carga durante a simulação numérica, dá-se pela inviabilidade de utilizar a mesma velocidade de carregamento do ensaio experimental, 1,10 mm por minuto (taliscas de madeira) e 0,20 mm por minuto (taliscas metálicas).

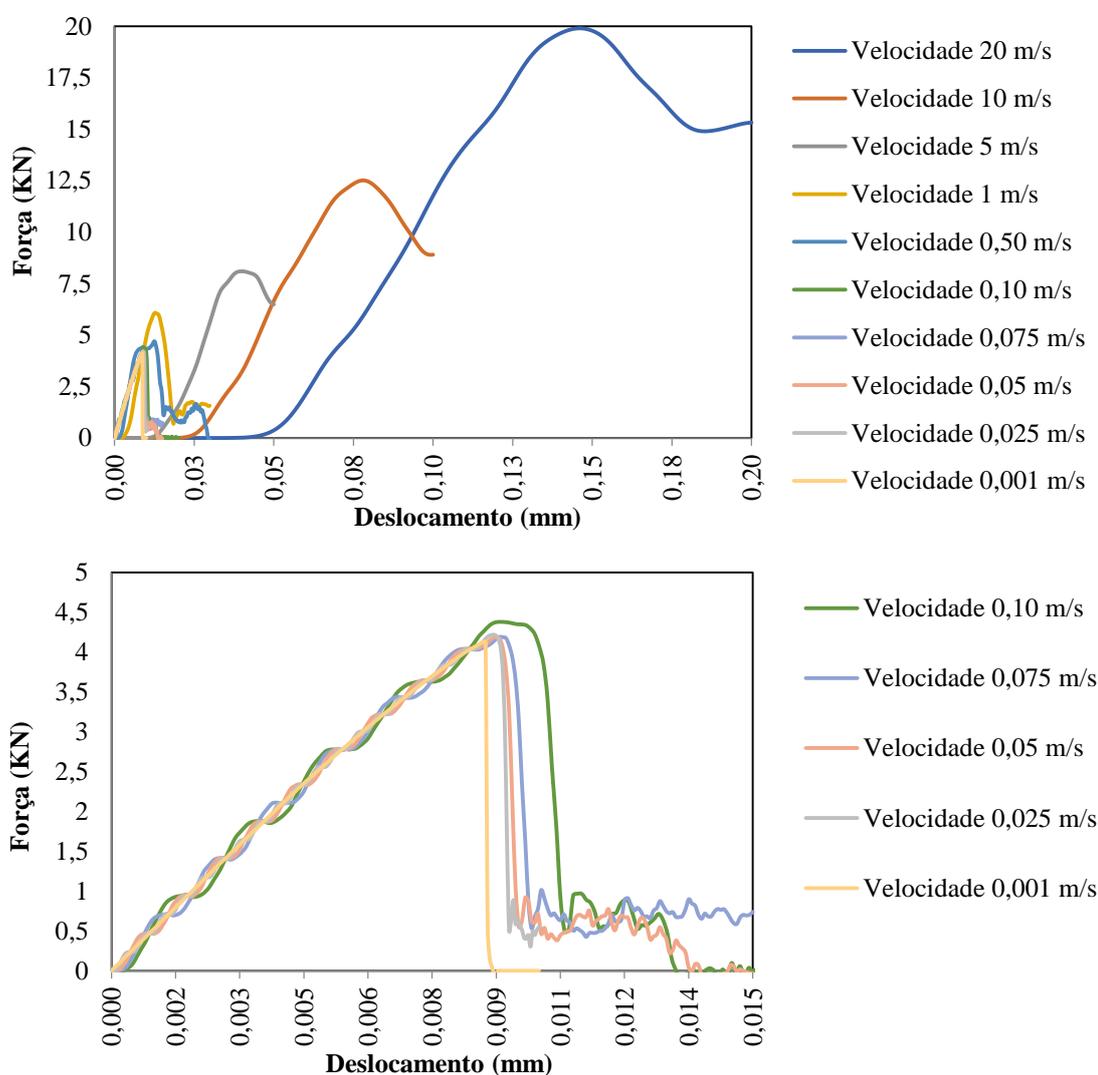
Desta forma, é importante definir através deste tópico a maior velocidade de carregamento de ensaio que apresente resultados de um carregamento quase-estático e coerentes com os obtidos experimentalmente. Uma vez que, velocidades maiores podem apresentar respostas dinâmicas e formas de ruptura diferenciadas como será evidenciado a seguir.

Cabe salientar que a análise da velocidade de carregamento é realizada para um tamanho de módulo elementar do LDEM de 0,01m (cilindro com 10 módulos de diâmetro) devido ao tempo de processamento deste modelo ser o mais rápido (através do uso de um computador Acer Nitro 5, Intel Core i7, memória RAM 16Gb, obteve-se uma demora de aproximadamente cinco minutos para a velocidade mais lenta). Foi então utilizado para este modelo, um passo de integração constante de  $6.8117e-07$  segundos, sendo este menor ao que o valor representativo de  $dt$  crítico do sistema. Em todas as simulações foram observadas as

energias envolvidas na simulação, assim como as curvas de reações ao longo do tempo, ou seja, reação de deslocamento aplicado.

A Figura 50, mostra as curvas força-deslocamento encontradas para as diferentes velocidades empregadas no modelo numérico. Pode-se observar que a partir de uma velocidade de carregamento inferior a 0,10 m/s as curvas começam a apresentar o mesmo comportamento, importante fator para escolher uma simulação com comportamento quase-estático, característico do ensaio experimental.

Figura 50 – Comportamento força *versus* deslocamento sobre as velocidades estudadas



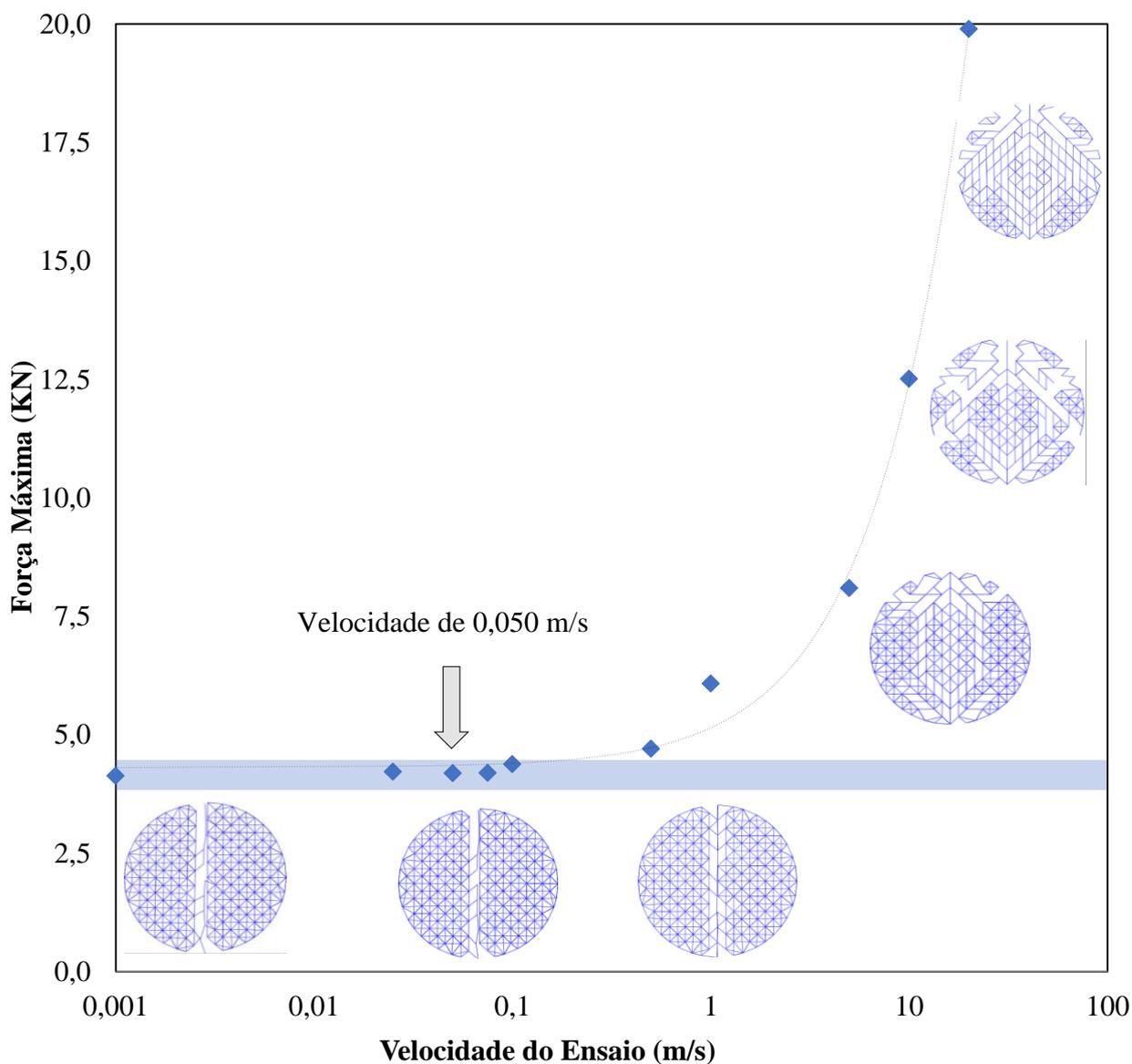
Fonte: Elaboração própria.

Através da correlação entre a força-deslocamento das simulações, comprovamos que para as velocidades superiores a 0,10 m/s o comportamento mostra modificação contínua e mais significativas, o que pressupõe movimento e mudança característica de carregamentos

dinâmicos. Para as velocidades igual e inferiores a 0,10 m/s, o comportamento dos modelos tendem a estabilizar, nos levando a considerar o comportamento próximo ao estado de equilíbrio, tal qual é encontrado em carregamentos quase-estáticos.

Efetuada um comparativo entre a força máxima aplicada e sua respectiva velocidade de ensaio, através da Figura 51, encontramos a velocidade a ser empregada neste estudo. Nesta figura observa-se também, que as configurações de ruptura encontram-se instáveis para faixas de velocidade superiores. Também avaliamos a taxa de erro dos conjuntos, através da Tabela 9, demonstrando que ocorrem erros reduzidos e similaridade entre a velocidade que será aplicada.

Figura 51 – Comportamento força máxima *versus* velocidade de ensaio



Fonte: Elaboração própria.

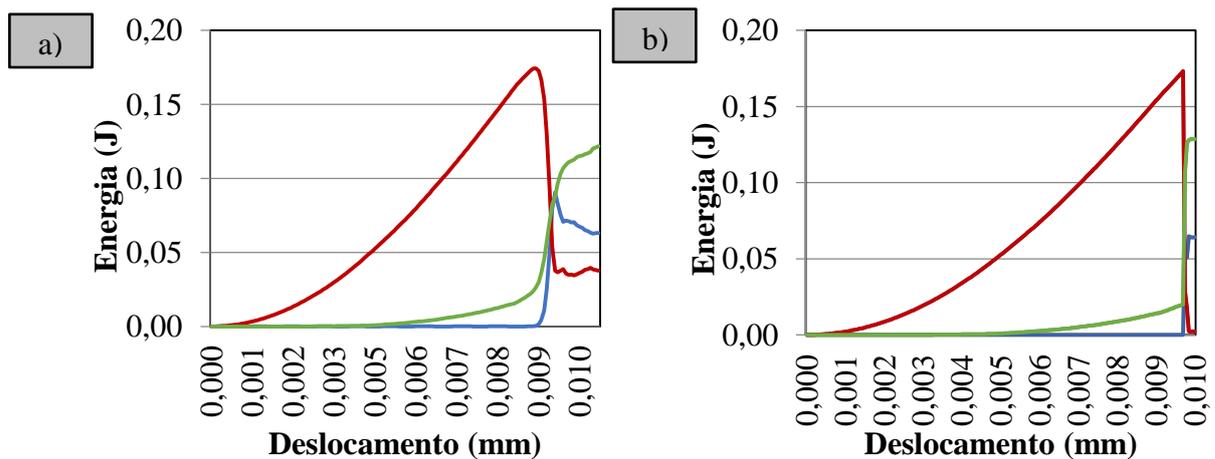
Tabela 9 – Correlação de erros sobre velocidades de ensaio

Velocidade (m/s)	0,001	0,025	0,05	0,075	0,1
Erro (%)	0	2,04	1,36	1,4	5,96

Fonte: Elaboração própria.

Como podemos observar à partir de 0,10m/s podemos considerar o comportamento quase-estático, porém a velocidade de 0,050 m/s apresenta erro inferior a 2%, sendo considerada uma opção mais representativa para este comportamento sem necessidade de tempo de simulação excessivo. Para afirmar que as características entre as velocidades escolhida de 0,050m/s e a mais lenta analisada de 0,001m/s, efetuamos uma comprovação das energias e rupturas para assim justificar a escolha da velocidade empregada na pesquisa, como mostra a Figura 52 que destaca o comportamento similar de ambos.

Figura 52 – Balanços energéticos: a) velocidade 0,050 m/s e b) velocidade 0,001m/s



Observações: — Cinética — Elástica — Dano

Fonte: Elaboração própria.

Podemos constatar que ambas simulações apresentaram comportamento das energias aproximados sendo esse de fato quase-estático, devido a praticamente não ocorrer energia cinética até o instante de ruptura do espécime, onde também surge a elevação da energia dissipada por dano. O formato de ruptura do corpo ocorre de forma semelhante, demonstrando falha nos mesmos trechos e de maneira centralizada ao longo do diâmetro para ambos, como esperado para a ruptura típica do ensaio, o que não ocorre nas velocidades mais elevadas. Para as demais simulações com velocidade superior a 0,50m/s, as rupturas ocorrem bruscamente sendo característica de um comportamento dinâmico.

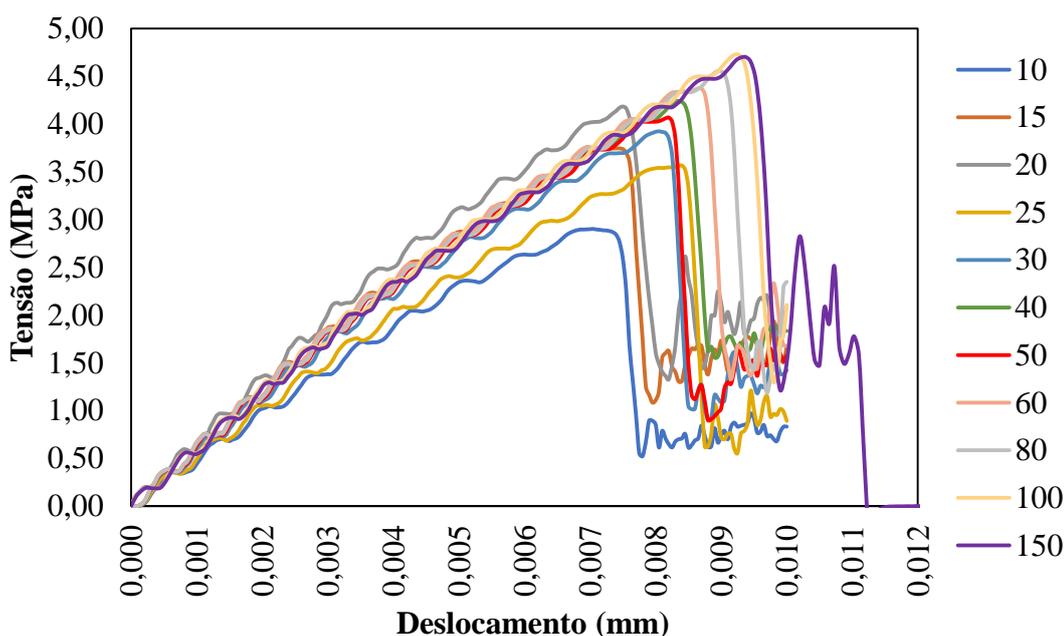
Sendo assim, diante de toda análise efetuada, optou-se por trabalhar com a velocidade de 0,050 m/s, uma vez que seus resultados são característicos do comportamento esperado para o ensaio, bem como seu tempo de simulação é mais viável para posterior aplicação em malhas mais densas. Além destes fatores, apresentam um erro inferior a 2%, quando comparadas com a velocidade mais inferior de 0,001 m/s.

### 3.2.4.3 Análise do tamanho da malha

Após a escolha da velocidade de ensaio determinada no tópico anterior, a qual ficou fixada em 0,050 m/s, foi avaliado o tamanho da malha, a qual será implementada em todas simulações bidimensionais e tridimensional para as configurações em estudo. Para esta análise foram considerados modelos com todas as propriedades iguais, exceto o número de módulos da malha. O menor modelo empregado tem 10 módulos de diâmetro ( $L_c=0.01\text{m}$ ) e o maior com 150 módulos de diâmetro ( $L_c=0,000667$ ).

Na Figura 53, mostram-se as curvas tensão (calculadas com a Equação 1) *versus* deslocamento no ponto de aplicação do carregamento de todos modelos analisados. Como pode-se observar as malhas são em sua maioria semelhantes, demonstrando que a distribuição de carga sobre o espécime dá-se de maneira equivalente. Ocorrendo de forma mais estabilizada para as malhas acima de 30 módulos.

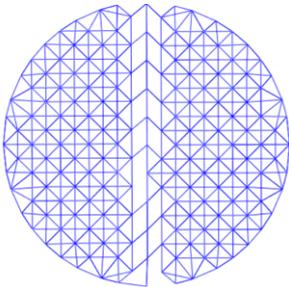
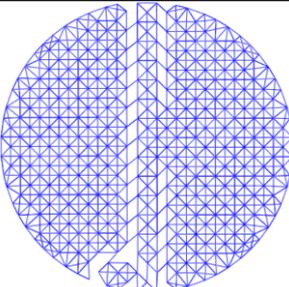
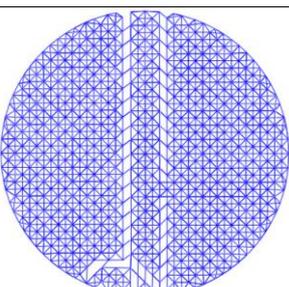
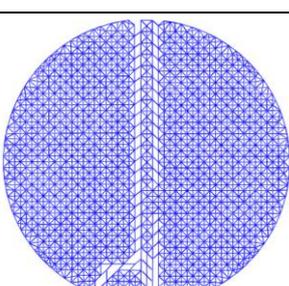
Figura 53 – Comparativo entre tensão *versus* deslocamento das malhas estudadas



Fonte: Elaboração própria.

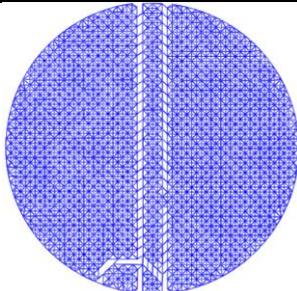
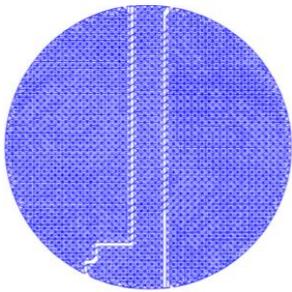
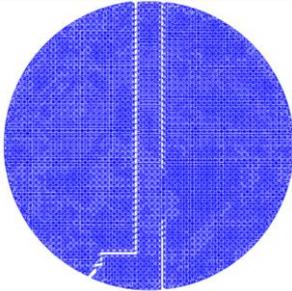
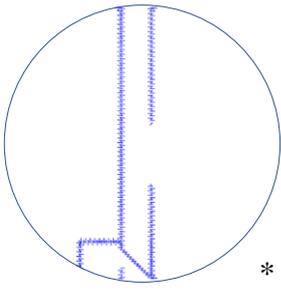
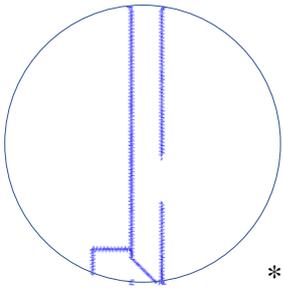
Para escolhermos a malha mais adequada para este estudo, efetuamos um comparativo do número de módulos de cada modelo juntamente com o comprimento do módulo básico ( $L_c$ ) de cada simulação, os erros das malhas em relação ao modelo mais discretizado, que supõe-se também ser o mais preciso (neste caso evidenciado pelo modelo com 150 módulos na diagonal, o qual considera-se com erro nulo), assim como a respectiva ruptura do espécime, essas identificadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Erros de significância e ruptura das diferentes malhas

Nº de Módulos	$L_c$ (m)	Erro (%)	Forma da Ruptura
10x10x1	0,01000	42,39	
15x15x1	0,00667	11,70	
20x20x1	0,00500	16,95	
25x25x1	0,00400	76,96	

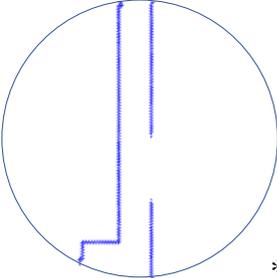
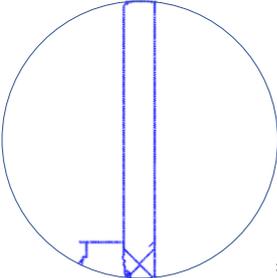
Continua...

... continuação.

Nº de Módulos	Lc (m)	Erro (%)	Forma da Ruptura
30x30x1	0,00334	16,84	
40x40x1	0,00250	15,79	
50x50x1	0,00200	0,95	
60x60x1	0,00167	13,20	 *
80x80x1	0,00125	9,57	 *

Continua.

...continuação.

Nº de Módulos	Lc (m)	Erro (%)	Forma da Ruptura
100x100x1	0,00100	6,08	
150x150x1	0,00067	0,00	

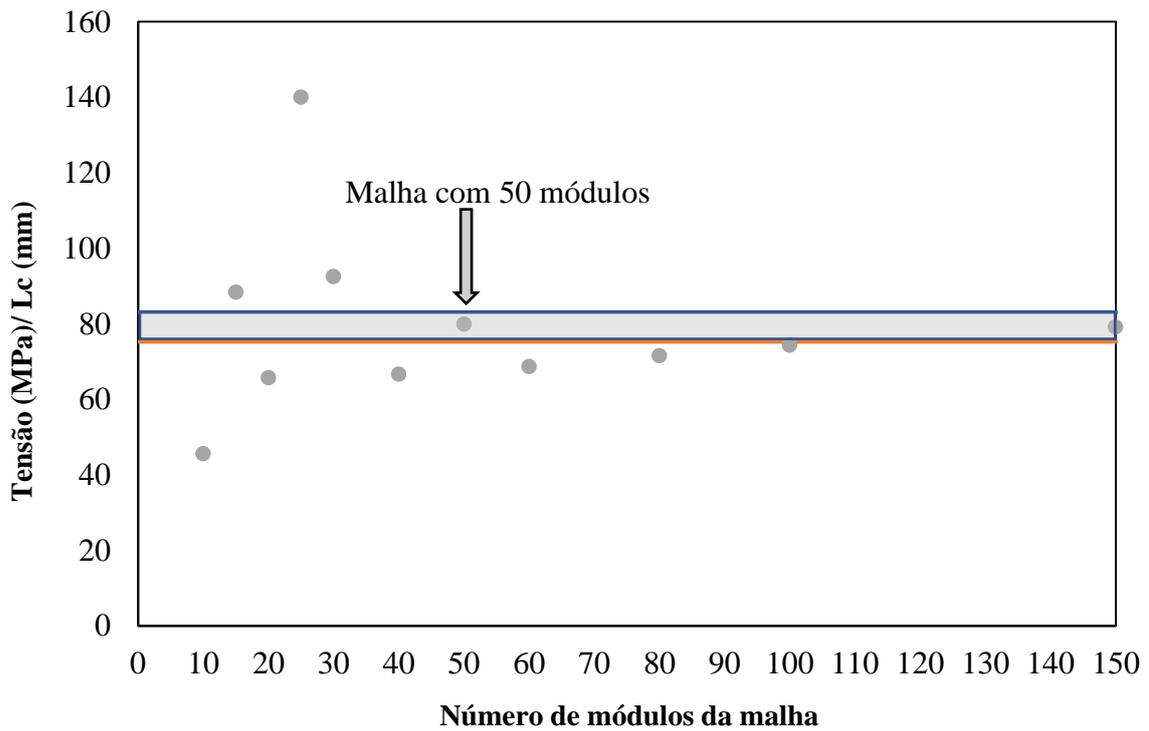
\* Rupturas indicadas através das barras rompidas para melhor identificar fratura do espécime.

Fonte: Elaboração própria

Constata-se que todos os modelos aplicados apresentaram o formato de ruptura similar, não sendo este um fator de predominância para a escolha do modelo. No entanto, o erro de significância das simulações em relação ao modelo idealizado de 150 módulos, apresentam variações significativas. Para identificar a malha que possui maior representatividade e ao mesmo tempo não demande um tempo elevado de processamento, efetuou-se a correlação entre a tensão do conjunto sobre seu respectivo comprimento de módulo em relação ao número de módulos da malha aplicada, como detalhado na Figura 54.

Como podemos identificar no gráfico, e levando em consideração uma faixa de correspondência entre o caso idealizado de 5%, sobre a malha de 150 módulos, verificamos que a malha de 50 módulos fica dentro da faixa representativa, bem como é o modelo dentre as malhas intermediárias que possui menor erro de operacionalização.

Figura 54 – Comparativo entre tensão *versus* número de módulos entre as malhas estudadas



Fonte: Elaboração própria.

Sendo assim, através de todas análises observadas, podemos concluir que o conjunto idealizado para realização dos ensaios são na velocidade de carregamento de 0,050 m/s e malha com 50 módulos no diâmetro do corpo de prova, por apresentar comportamento adequado e tempo de execução de ensaio admissível (cerca de dez minutos para o modelo bidimensional simplificado). Isso se deve a esta velocidade demonstrar comportamento estático, e à malha apresentar comportamento das energias e propagação das fissuras de forma típica. As malhas mais densas apresentaram bons resultados, porém seu tempo de execução da simulação são muito elevados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSÕES

### 4.1 Resultados da Análise Experimental

Neste tópico serão demonstrados o desempenho dos corpos de prova mediante à resistência de tração obtida por compressão diametral sob as diferentes configurações de distribuição de carregamento, assim como seus respectivos comportamentos frente à força *versus* deslocamento vertical e horizontal, finalizando com a análise de ruptura desses espécimes.

#### 4.1.1 Resistência à tração pelo método de compressão diametral

A determinação da resistência à tração pelo ensaio brasileiro, foi realizada através da aplicação da Equação 1, normatizada pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Para isso, foram necessários os valores das cargas máximas aplicadas aos espécimes, em conjunto com os valores médios de diâmetro ( $dméd$ ) e comprimento ( $lméd$ ), esses obtidos da média de três leituras efetuadas sobre cada corpo de prova. Desta forma, a Tabela 11 mostra as médias entre as resistências dos sistemas em estudo, bem como os respectivos desvios padrão e coeficiente de variação (CV).

Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio brasileiro de tração

Modelo	Nº CP	$dméd$ (mm)	$lméd$ (mm)	Força (KN)	Resistência (MPa)
CMD	CP01	100,27	199,00	126,23	4,03
	CP02	100,33	197,67	155,21	4,98
	CP03	100,43	199,00	147,82	4,71
	CP04	100,27	199,00	146,68	4,68
	CP05	100,33	198,67	161,59	5,16
	CP06	100,23	199,00	109,07	3,48
	CP07	100,20	198,00	142,64	4,58
	CP08	100,27	198,33	106,55	3,41
	CP09	100,40	198,67	124,99	3,99
	CP10	100,37	198,00	132,73	4,25
Dados Gerais		Média	Desvio Padrão (MPa)	CV	
		4,33	0,57	12,86%	

Continua...

...continuação.

Modelo	Nº CP	dméd (mm)	lméd (mm)	Força (KN)	Resistência (MPa)
CMT10	CP01	100,60	199,33	86,64	2,75
	CP02	100,07	199,00	115,01	3,68
	CP03	100,13	198,67	98,90	3,17
	CP04	100,23	198,67	115,59	3,70
	CP05	100,13	198,67	124,92	4,00
	CP06	100,03	200,67	128,65	4,08
	CP07	100,07	199,33	107,46	3,43
	CP08	100,03	198,33	127,91	4,10
	CP09	100,17	198,33	145,77	4,67
	CP10	100,37	199,00	95,74	3,05
Dados Gerais	Média	Desvio Padrão (MPa)		CV	
	<b>3,66</b>	<b>0,55</b>		<b>14,97%</b>	
CMT15	CP01	100,20	198,00	113,20	3,63
	CP02	100,43	198,67	123,40	3,94
	CP03	100,33	199,00	97,44	3,11
	CP04	100,20	198,67	112,54	3,60
	CP05	100,27	198,00	99,04	3,18
	CP06	100,27	199,33	129,93	4,14
	CP07	100,37	198,67	123,02	3,93
	CP08	100,30	198,00	124,32	3,99
	CP09	100,40	199,33	121,91	3,88
	CP10	100,13	198,33	140,51	4,50
Dados Gerais	Média	Desvio Padrão (MPa)		CV	
	<b>3,79</b>	<b>0,40</b>		<b>10,63%</b>	
CMT20	CP01	100,37	200,33	147,68	4,68
	CP02	100,20	198,67	134,81	4,31
	CP03	100,30	199,33	133,61	4,25
	CP04	100,10	199,67	114,72	3,65
	CP05	100,43	198,33	166,45	5,32
	CP06	100,30	199,33	118,50	3,77
	CP07	100,07	199,33	167,68	5,35
	CP08	100,47	198,33	127,91	4,09
	CP09	100,10	199,33	134,59	4,29
	CP10	100,37	197,67	133,92	4,30
Dados Gerais	Média	Desvio Padrão (MPa)		CV	
	<b>4,40</b>	<b>0,54</b>		<b>12,29%</b>	

Fonte: Elaboração própria.

Efetuiu-se também um estudo através da análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias utilizando o método de Fisher, ambos usando uma significância de 95%, o que tornou possível determinar estatisticamente a igualdade entre as médias dos conjuntos estudados.

Para isso, utilizou-se a análise diferencial de Fisher, que conforme Neto (2002) estima a variância populacional, onde os dados são descritos pelos graus de liberdade (DF) utilizados para calcular a estimativa do conjunto, a soma dos quadrados (SQ), o quadrado médio (QM) e o valor representativo de Fisher (F), o qual representa a razão entre a variação entre as médias da amostra e a variação dentro das amostras. Os resultados da análise são detalhados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados análise de variância

ANOVA	DF	SQ	QM	Valor F	Prob>F
Modelo	3	4,17209	1,3907	4,64817	<b>0,00758</b>
Erro	36	10,77091	0,29919		
Total	39	14,943			

Fonte: Elaboração própria.

Como a probabilidade obtida estatisticamente foi superior ao valor F, sendo esse de 0,758%, para um nível de significância de 0,05, as médias da população são ditas diferentes de forma significativa. Logo conclui-se que sob a hipótese nula as médias de todos os níveis são iguais, enquanto para a hipótese alternativa, as médias de mais de um nível são diferentes.

Sendo assim, através do método estatístico de Fisher efetuou-se a avaliação da significância entre conjuntos amostrais, onde o valor representativo igual a 1 caracteriza sistemas que apresentam variação significativa e igual a 0 sistemas que não apresentam variação significativa. Para este estudo utilizam-se um parâmetro de significância de 5% e um desvio de erro médio (SEM) fixo, como demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados da significância entre os conjuntos pelo método de Fisher

Teste de Fisher	Diferença Média	SEM	t Valor	Prob	Alpha	Sig
CMT10-CMD	-0,664	0,2446	-2,7144	0,0101	0,05	1
CMT15-CMD	-0,537	0,2446	-2,1953	0,0347	0,05	1
CMT15-CMT10	0,127	0,2446	0,5192	0,6068	0,05	0
CMT20-CMD	0,074	0,2446	0,3025	0,7640	0,05	0
CMT20-CMT10	0,738	0,2446	3,0169	0,0048	0,05	1
CMT20-CMT15	0,611	0,2446	2,4978	0,0172	0,05	1

Fonte: Elaboração própria.

Como constatado na Tabela 13, não observam-se variações significativas entre a utilização de taliscas metálicas com 10 mm ou 15 mm (CMT15 e CMT10), bem como entre as taliscas metálicas de 20 mm e de madeira (CMT20 e CMD). Com isso, afirma-se que dentro dos conjuntos amostrais as taliscas de distribuição de carregamento metálicas de 15 mm e 10 mm possuem resultados e comportamento são similares, assim como entre as taliscas de madeira de 15 mm e metálica de 20 mm.

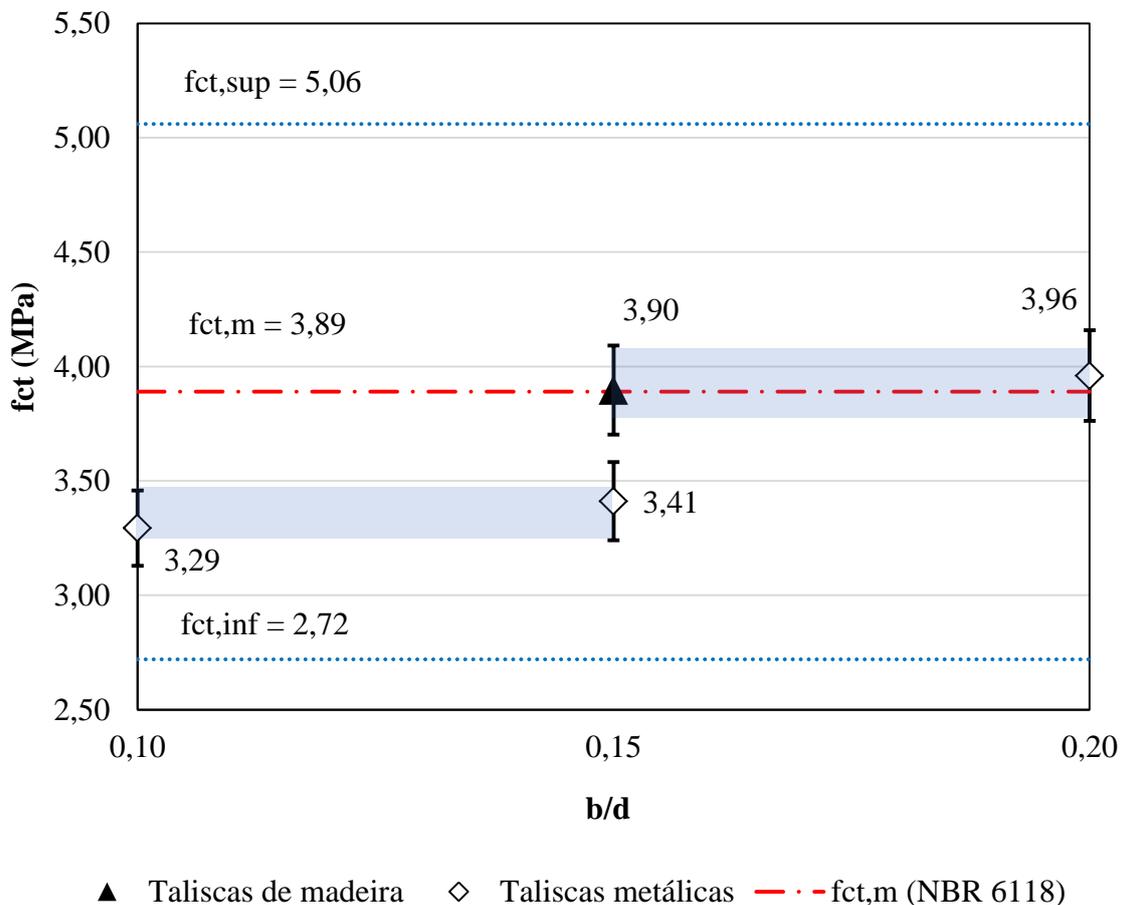
Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) a resistência à tração direta pode ser considerada como 0,90 da resistência à tração indireta encontrada no ensaio de compressão diametral, e quando não possui ensaios que determinem, a mesma pode ser calculada a partir do valor médio da resistência à compressão axial. A normativa ressalta que  $f_{ct,m}$  (resistência à tração média), para concretos até 50MPa é calculada como mostra a Equação 20:

$$f_{ct,m} = 0,30f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad \dots(20)$$

Sendo o  $f_{ck}$  correspondente ao valor médio da resistência à compressão axial, 46,70MPa segundo o resultado experimental detalhado na Tabela 6, resultando em 3,89 MPa. A NBR 6118 (ABNT, 2014) também estabelece os limites de 0,70 e 1,30 do  $f_{ct,m}$  como limites inferior e superior.

Essa equiparidade dos resultados médios obtidos nos ensaios de compressão diametral são também observados no gráfico ilustrado na Figura 55, onde são calculadas a resistência à tração direta a partir dos valores médios de resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral, sendo essas comparadas com o valor de  $f_{ct,m}$  calculado pela Equação 20.

Figura 55 – Resultados comparativos entre resistência à tração direta calculada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e proporção b/d



Fonte: Elaboração própria

Com isso para a configuração com talisca de madeira atingimos uma resistência á tração de 3,897 MPa, estando praticamente na mesma representatividade do fct,m. A talisca metálica de 10 mm alcança um fct de 3,29 MPa estando no intervalo do fct,m e fct,inf. Para a talisca metálica de 15 mm obteve-se um fct de 3,41 MPa também apresentando-se na faixa de intervalo entre o fct,m e fct,inf. E por fim, a talisca metálica de 20 mm atingiu um fct de 3,96 MPa estando próximo ao fct,m e incluso na faixa entre fct,m e o fct,sup. Através disso, conclui-se que ambas configurações de estudo são representativas, uma vez que estão entre as faixas estipuladas pela norma como limite representativo.

Ao avaliar diretamente a resistência à tração das configurações de estudo nota-se que, a talisca metálica de 10 mm demonstrou resultado de 15,42 % inferior ao fct,m, assim como a talisca metálica de 15 mm apresentou resultado de 12,34 % inferior ao mesmo, para as demais configurações ocorreu superestimação onde, a configuração de talisca de madeira de 15 mm

apresentou-se praticamente na mesma ordem que o  $f_{ct,m}$  e a talisca metálica de 20 mm demonstrou 1,80 % superior ao  $f_{ct, m}$ . No gráfico mostrado na Figura 55 fica claro a análise realizada estatisticamente pela Tabela 13, comprovando que não há diferença significativa entre os conjuntos de metal de 10 mm e 15 mm e os de madeira e metal de 20 mm.

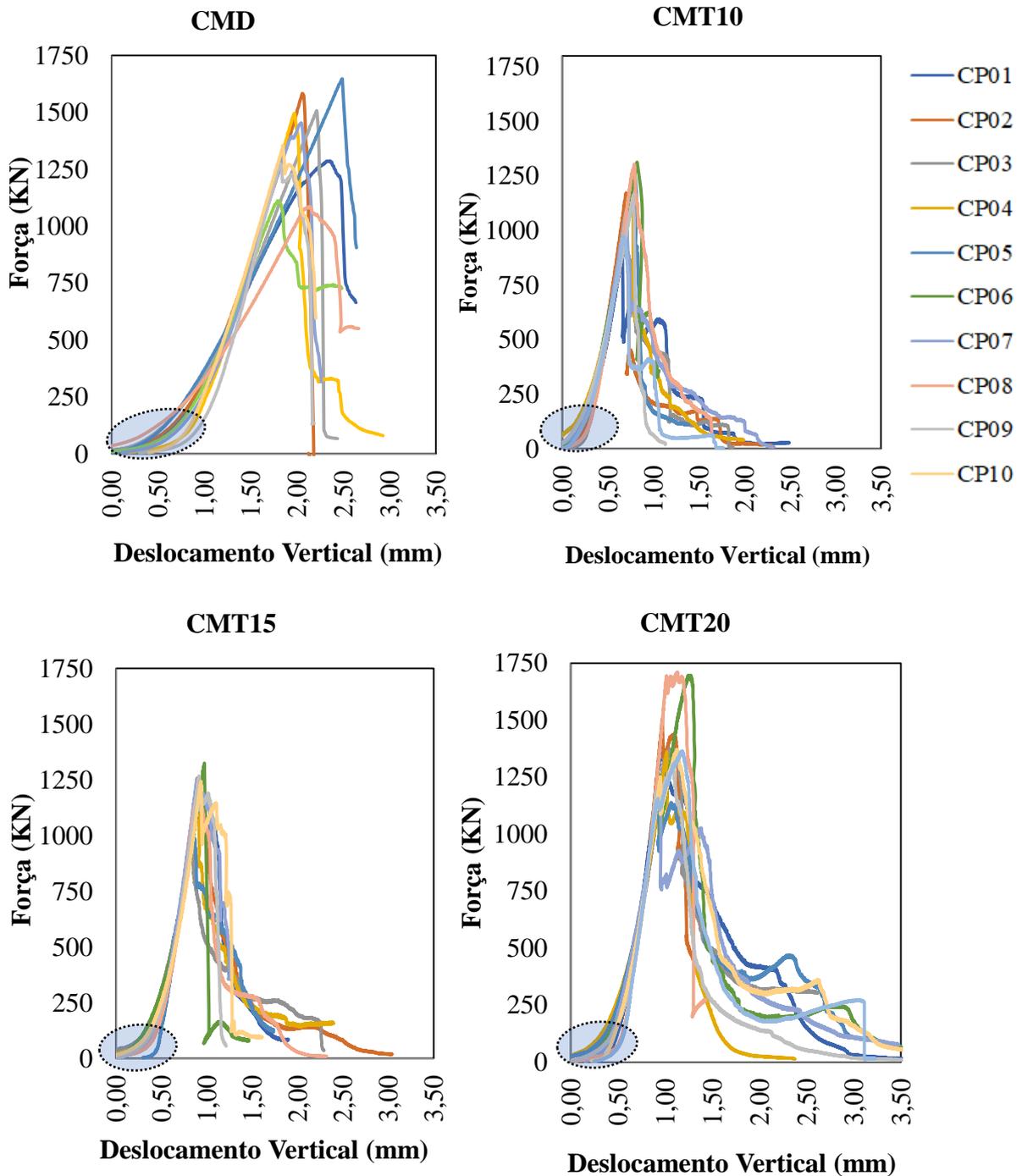
#### **4.1.2 Análise força *versus* deslocamento vertical**

A análise do comportamento de força *versus* deslocamento vertical dos espécimes, foram obtidas através da aplicação de carga durante a realização do ensaio de compressão diametral e a variação de deslocamento da própria prensa. Com isso foi possível efetuar o comparativo entre o comportamento dos diferentes espécimes para cada configuração de estudo. A Figura 56 representam-se as configurações de força *versus* deslocamento vertical para cada modelo: CMD, CMT10, CMT15 e CMT20.

Como observado no gráfico pode-se afirmar que todos os ensaios apresentaram uma ruptura frágil, a qual é característica do material cimentício em estudo. Além deste fator destaca-se que no início do ensaio ocorre a acomodação das taliscas junto ao corpo de prova independente da talisca utilizada, porém ocorrem padrões mais suavizados para as taliscas de madeira se comparada aos demais conjuntos, sendo este fator justificável pela rigidez inferior da madeira se comparável às taliscas metálicas.

É possível observar que para os conjuntos metálicos o comportamento exibido após a ruptura, indicado nos gráficos varia suavemente com a alteração da largura das tiras, indicando uma variação na liberação de energia na fratura resultante, este trecho torna-se mais suave para a talisca mais largas, uma vez que ela distribui com maior uniformidade o carregamento.

Figura 56 – Comparativo força *versus* deslocamento vertical das amostras para as diferentes condições em estudo



Fonte: Elaboração própria.

Diante dos comportamentos é possível verificar as similaridades entre os conjuntos CMD/CMT20 e CMT10/CMT15 anteriormente comprovados estatisticamente, onde a faixa de tempo para a acomodação das taliscas ocorrem de forma mais branda sob os conjuntos de talisca de madeira de 15 mm e metálica de 20 mm levando por consequência os espécimes a

atingirem patamares mais elevados de força aplicada. Além desse fator, quando utilizadas taliscas metálicas de 10 mm, apesar de atingirem a capacidade de carga inferior aos demais conjuntos, demonstra maior repetitividade entre o trecho acomodação talisca/espécime.

A Tabela 14 demonstra o comparativo das inclinações por configuração de ensaio e espécime, onde identifica-se a inclinação média, desvio padrão e coeficiente de variação dos modelos avaliados.

Tabela 14 – Comportamento frente a inclinação da curva força-deslocamento

Inclinação curva força - deslocamento				
n° CP	CMD	CMT10	CMT15	CMT20
CP01	8,66	17,16	15,15	24,16
CP02	11,61	21,13	19,87	23,71
CP03	9,83	17,56	15,16	20,72
CP04	12,32	16,32	23,55	23,44
CP05	8,58	21,67	12,62	19,45
CP06	13,95	20,68	15,94	22,04
CP07	12,18	25,19	23,28	14,17
CP08	7,56	26,20	25,46	26,07
CP09	9,28	22,26	25,01	18,39
CP10	9,32	21,87	19,04	24,82
<b>Média</b>	10,33	21,00	19,51	21,70
<b>Desv. Padrão</b>	1,86	2,95	4,21	3,24
<b>CV</b>	18%	14%	22%	15%

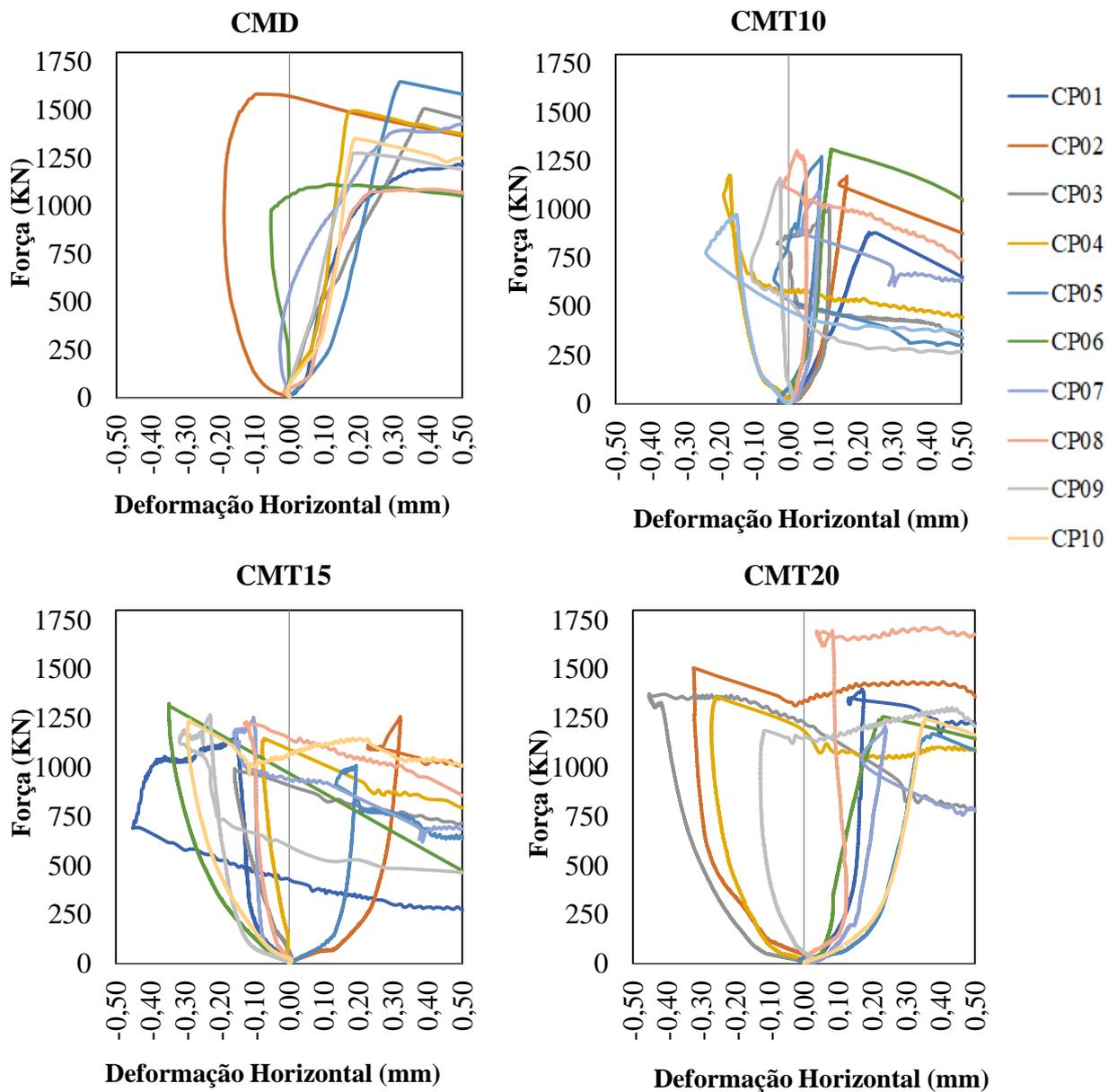
Fonte: Elaboração própria.

Como observa-se o coeficiente de variação das inclinações nos conjuntos variam de 14% a 22%, sendo a talisca metálica de 10mm de maior repetitividade, além deste aspecto observa-se a similaridade das inclinações nos conjuntos metálicos, sendo esses consideravelmente superiores à inclinação com configuração em madeira. É importante destacar o baixo desvio padrão das amostras sob configuração de madeira.

### 4.1.3 Análise força *versus* deformação horizontal

A análise da força *versus* deformação horizontal dos espécimes foram obtidas através da aplicação de carga por parte do equipamento de ensaio e o somatório entre os deslocamentos obtidos pelos LVDT's fixados sobre a borda dos espécimes como demonstrado anteriormente. Com isso, a Figura 57 representa as configurações de força *versus* deslocamento horizontal para as configurações CMD, CMT10, CMT15 e CMT20.

Figura 57 – Comparativo força *versus* deformação horizontal das amostras para as diferentes condições estudadas



Fonte: Elaboração própria.

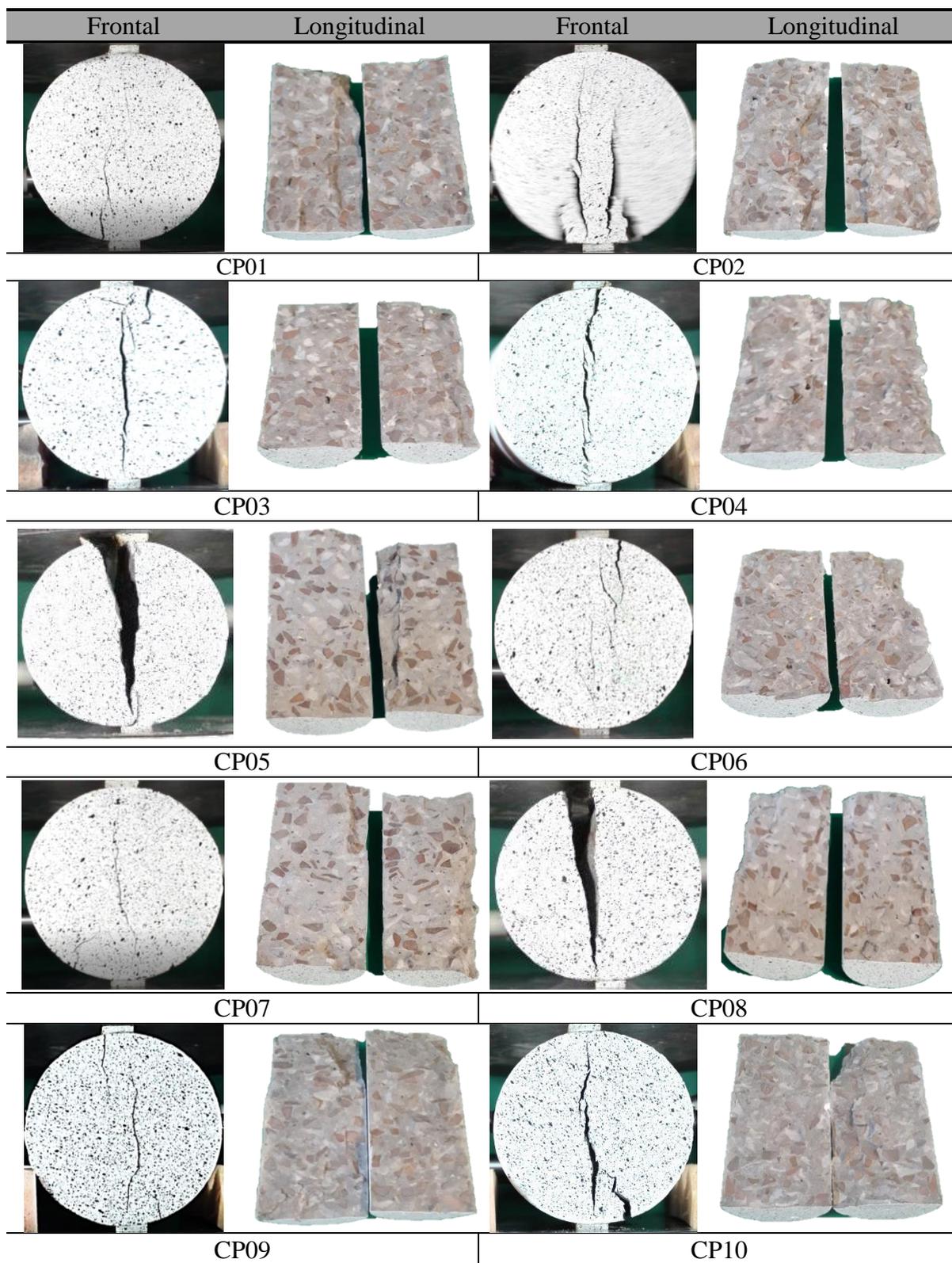
Como podemos constatar através da Figura 57, as leituras de deformação horizontais dos conjuntos apresentam uma grande variação dos resultados, onde em alguns casos ocorre até mesmo esforços de compressão no eixo vertical, em vez de tração. Este fato é totalmente contraditório, uma vez que na teoria apenas esforços de tração estariam atuando verticalmente sobre os espécimes.

Algumas hipóteses levantadas é que aparentemente pode estar ocorrendo uma rotação dos corpos de prova ao longo do ensaio ou também os LVDT's apresentaram algum problema de calibração ou leitura. Para realmente detectar o que ocorreu aos espécimes com os deslocamentos horizontais, deve ser realizado uma análise através de correlação digital das imagens captadas através das filmagens dos corpos de prova, uma vez que isto não foi possível processar ao longo deste trabalho e será desenvolvido no futuro.

#### **4.1.4 Análise de falha dos espécimes sob as diferentes configurações**

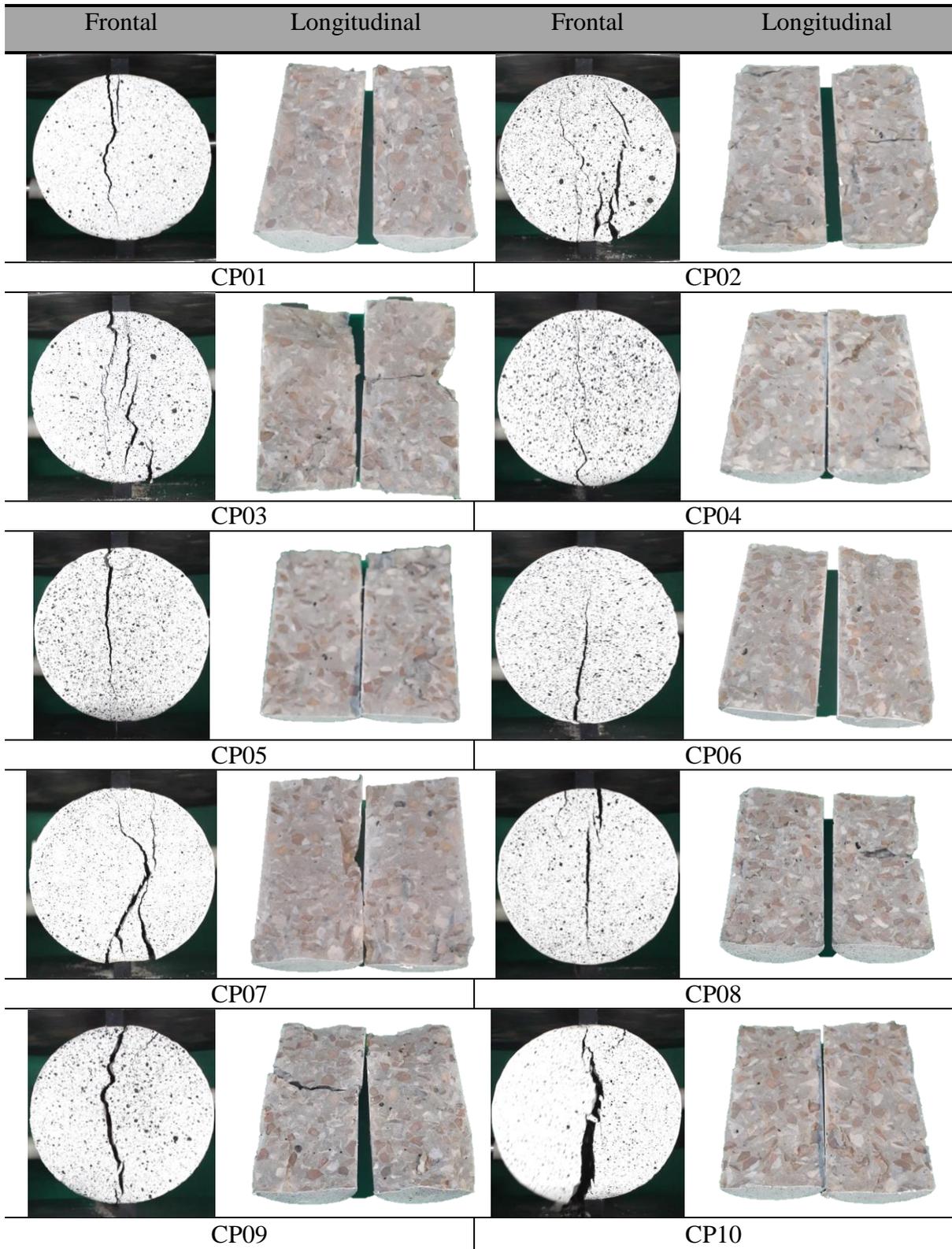
A verificação do formato de ruptura dos corpos de prova ocorreu através da análise das filmagens para futuro processamento do DIC, verificando a forma de propagação das fissuras na face do espécime e posteriormente ao longo do comprimento do material para todas configurações estudadas. A Figura 58 mostra o comportamento final de falha na face para os espécimes submetidos a distribuidores de carregamento (taliscas) de madeira conforme dimensões e características normatizada na NBR 7222 (ABNT, 2011). Enquanto as Figuras 59, 60 e 61 mostram a ruptura dos espécimes com taliscas de distribuição de carregamento metálicas com larguras efetivas de 10mm, 15mm e 20mm respectivamente.

Figura 58 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas de madeira



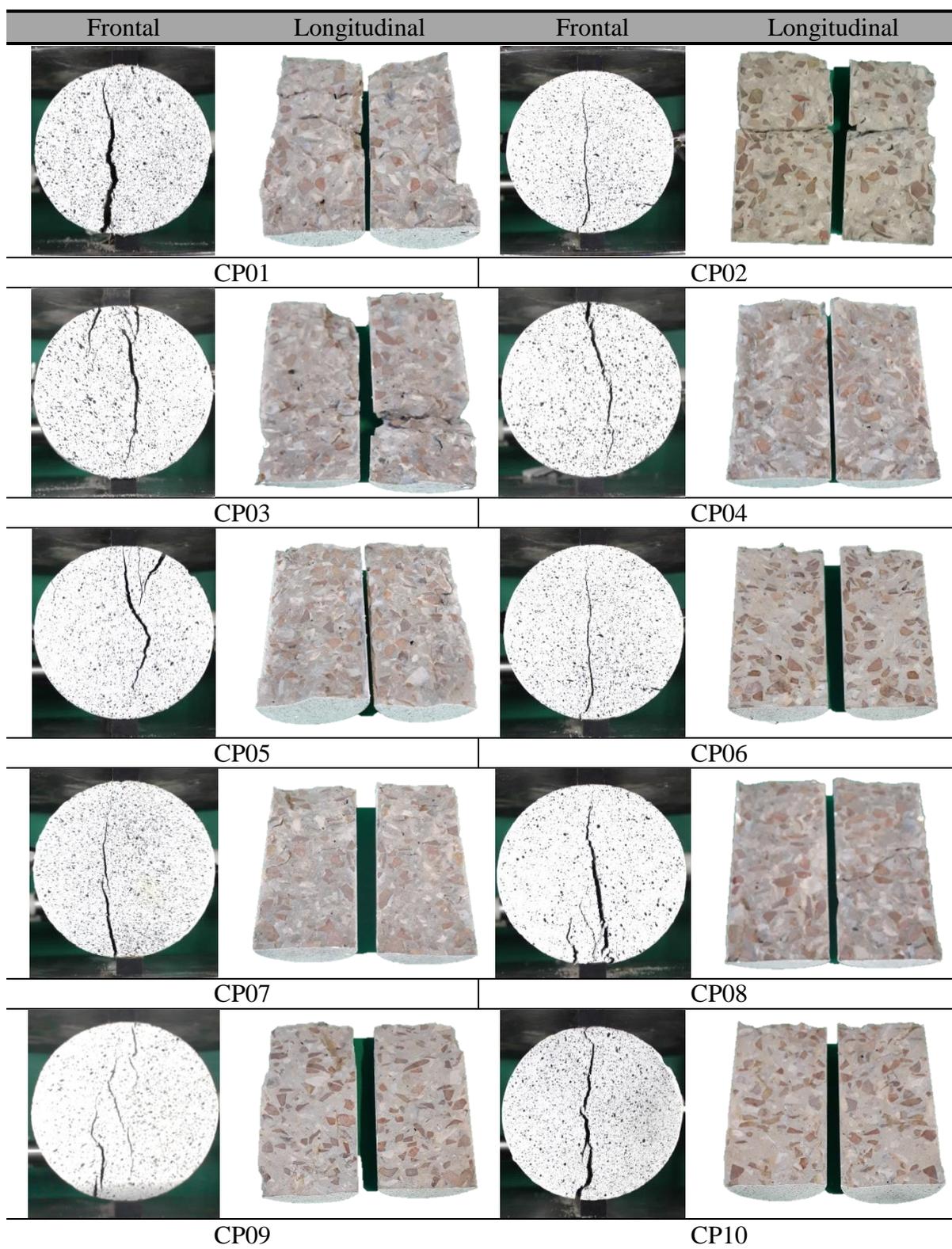
Fonte: Elaboração própria.

Figura 59 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 10mm - CMT10



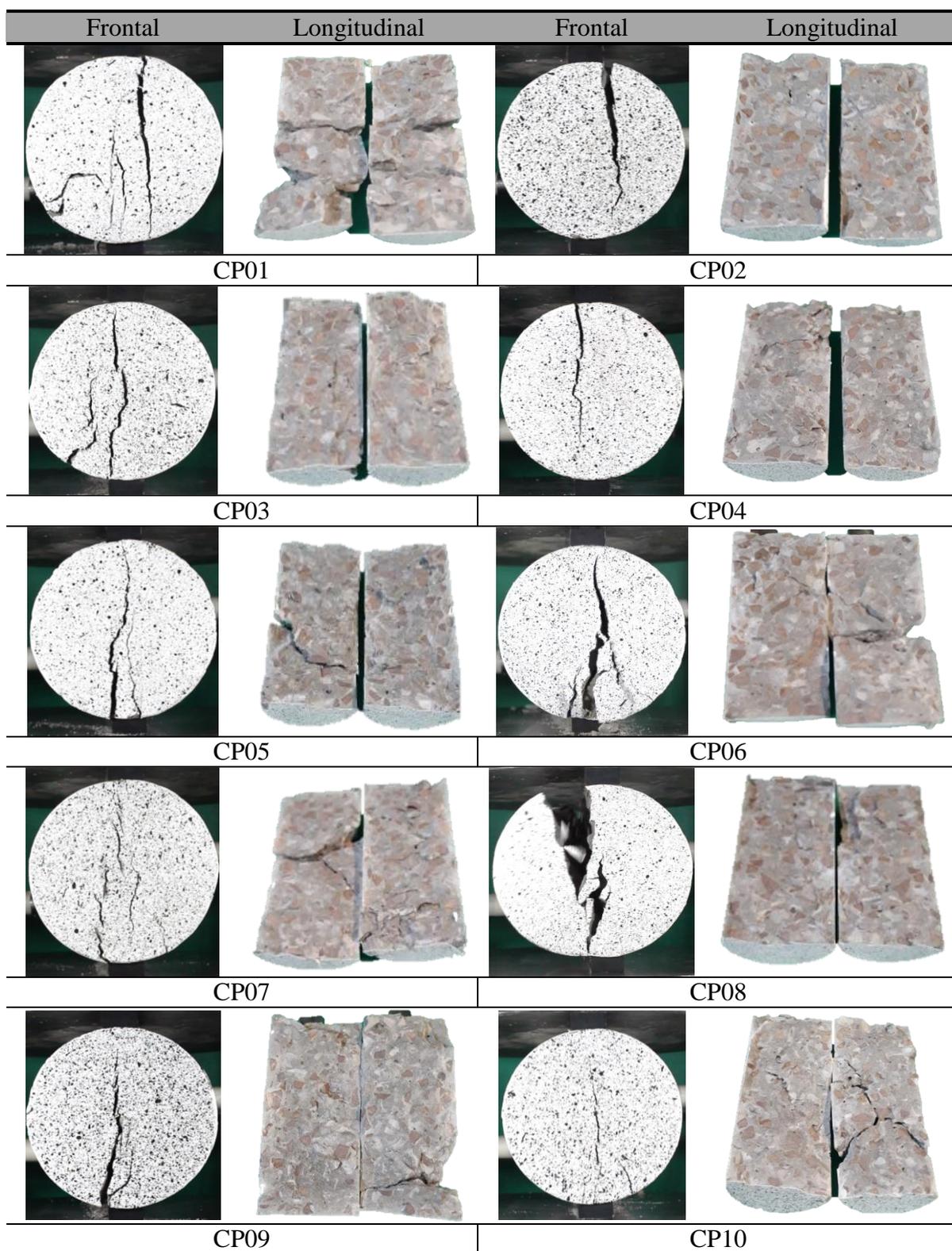
Fonte: Elaboração própria.

Figura 60 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 15mm - CMT15



Fonte: Elaboração própria.

Figura 61 – Formas de ruptura frontal e longitudinal quando utilizadas taliscas metálicas de 20mm - CMT20



Fonte: Elaboração própria.

Foi observado que a forma de ruptura do espécime e o seu grau de fragmentação também variam dentro de um mesmo caso estudado, não sendo possível determinar um padrão de falha totalmente representativo. Uma explicação para tal aleatoriedade deve-se a distribuição não uniforme dos agregados na matriz do concreto, os quais interferem na propagação dos esforços e conseqüentemente no surgimento das fissuras por parte da matriz cimentícia.

Contudo, foi possível concluir que o local onde se origina a fissura na face não coincide com o centro exato do cilindro em inúmeros ensaios, além deste fator, a grande maioria dos corpos de prova apresentaram mais de uma fissura conjunta que provocam a ruptura final do espécime, esse fator acaba divergindo da teoria que dá embasamento ao ensaio e detalha a ruptura típica sendo resultante de uma fissura centralizada ao longo do diâmetro do corpo de prova. Também é importante destacar o surgimento de ruptura ao longo do comprimento dos espécimes submetidos a distribuidores de carga metálicos, uma hipótese que justifica tal ocorrência seria a rigidez elevada destas taliscas, não ocorrendo uma acomodação entre elemento ensaiado e talisca de forma suavizada.

Dessa maneira, as formulações utilizadas para o cálculo da tensão de tração máxima, as quais não divergem significativamente, podem ser consideradas apenas aproximações do real valor característico da resistência à tração do concreto, uma vez que na grande maioria a falha não ocorre por fissura central.

## **4.2 Resultados Análise Numérica - Diferentes Distribuidores de Carregamento**

Nesse tópico apresentam-se os resultados obtivos numericamente de forma bidimensional e tridimensional sob os conjuntos estudados, sendo os conjuntos amostrais contemplados pela variação das taliscas e distribuição de carregamento sob o ensaio de compressão diametral tal qual ensaiado de forma experimental.

### **4.2.1 Modelos bidimensionais (2D)**

Para modelar as condições do ensaio de compressão diametral utilizou-se um modelo híbrido como descrito anteriormente. Onde o espécime de concreto foi simulado com o método dos elementos discretos formado por barras (LDEM), e as taliscas de distribuição de carregamento foram simuladas com composto o método dos elementos finitos (FEM). As

propriedades das taliscas empregadas na pesquisa são de dois materiais distintos, madeira e aço com características descritas na Tabela 15, as quais foram baseadas em dados constantes no catálogo de propriedade do IPT (2013) entre outros como Marques (2014), Silva (2015) e Santos et. al. (2017).

As configurações com taliscas metálicas foram simuladas somente com elementos discretos e foram colocadas forças aplicadas sobre os nós da superfície de contato. Isto é possível devido a grande diferença de rigidez entre o concreto e o aço característico das taliscas, sendo que nessas condições os distribuidores de carregamento se comportariam como superfícies rígidas.

As configurações com taliscas de madeira também foram simuladas com parte das placas metálicas entrando em contato com sua superfície (CMD MM), de modo a representar a face de contato com a máquina de ensaio, isso foi necessário devido à deformação apresentada pelas taliscas, uma vez que quando verificadas suas reações trechos apresentaram valores negativos, o que não representa o modelo real.

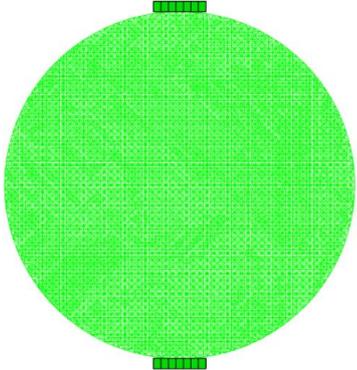
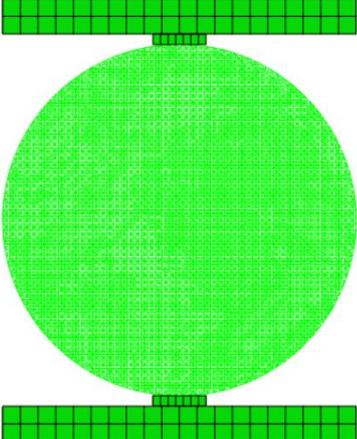
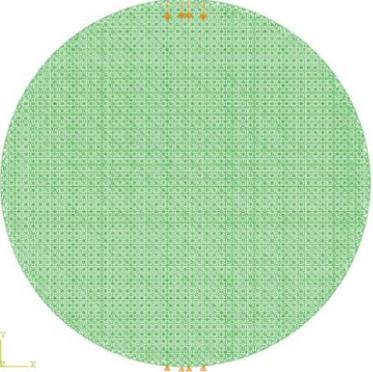
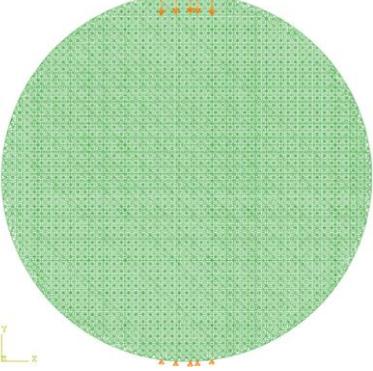
Tabela 15 – Propriedades das taliscas utilizadas nas simulações

Propriedades	FEM Madeira	FEM Aço
b/d	0,15	0,10 / 0,15 / 0,20
Classe	C60	E210
$E_{c90}$ [GPa]	1,225	210
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	800	7800
$\nu$	0,30	0,30

Fonte: Elaboração própria.

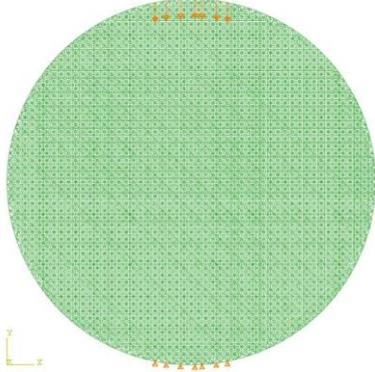
A malha final para implementação dos estudos sob as diferentes configurações de talisca adotada foi de 51x51 módulos (o modelo foi levemente alterado em relação à análise efetuada no item 3.2.4.3 Análise do tamanho da malha, visando uma melhor distribuição das cargas sobre os nós), com amplitude fixada através da velocidade de ensaio de 0,050 m/s, a qual será padrão de utilização nos espécimes. Os modelos simulados foram discretizados conforme a Tabela 16 que demonstra a superfície das taliscas de distribuição de carregamento em suas distintas correlações b/d.

Tabela 16 – Modelos simulados sob diferentes taliscas de distribuição de carga

Talisca (Nomenclatura)	b/d	Malha LDEM
<p>Madeira (CMD - M)</p>	<p>0,15</p>	
<p>Madeira (CMD - MM)</p>	<p>0,15</p>	
<p>Metálica (CMT10)</p>	<p>0,10</p>	
<p>Metálica (CMT15)</p>	<p>0,15</p>	

Continua...

...continuação.

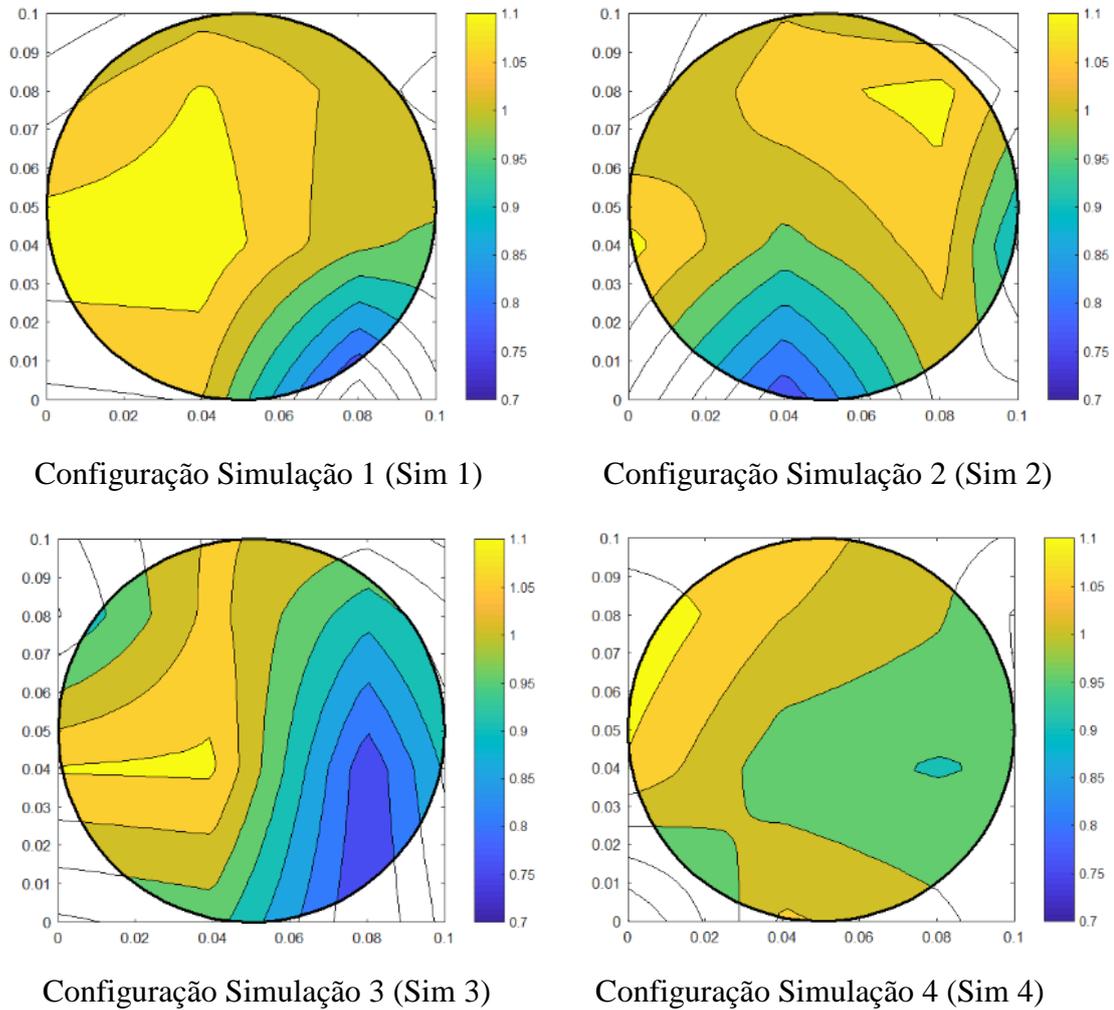
Talisco (Nomenclatura)	b/d	Malha LDEM
Metálica (CMT20)	0,20	

Fonte: Elaboração própria

Cabe salientar que a representação do concreto no LDEM (cujas propriedades são mostradas na Tabela 8) é realizada uma distribuição aleatória considerando que a energia de fratura tem média e coeficiente de variação conhecidos. Porém para a distribuição espacial das propriedades nas diferentes simulações variaram-se os parâmetros. Por esse motivo e para representar a variabilidade real do concreto, são utilizadas quatro configurações diferentes, sendo cada uma empregada em sua respectiva simulação.

Desta maneira, a Figura 62 mostra a distribuição espacial da energia de fratura no plano bidimensional, representando as quatro configurações utilizadas neste estudo. Vale ressaltar que a mesma foi normalizada em relação a energia de fratura média do material e como demonstrado através do plano 2D, as simulações mesmo com as aleatoriedades não varia drasticamente, contendo similaridade dos trechos com maior resistência e certa proporcionalidade das faixas com menor capacidade de suporte de carga.

Figura 62 – Distribuição espacial de propriedades sob modelo bidimensional

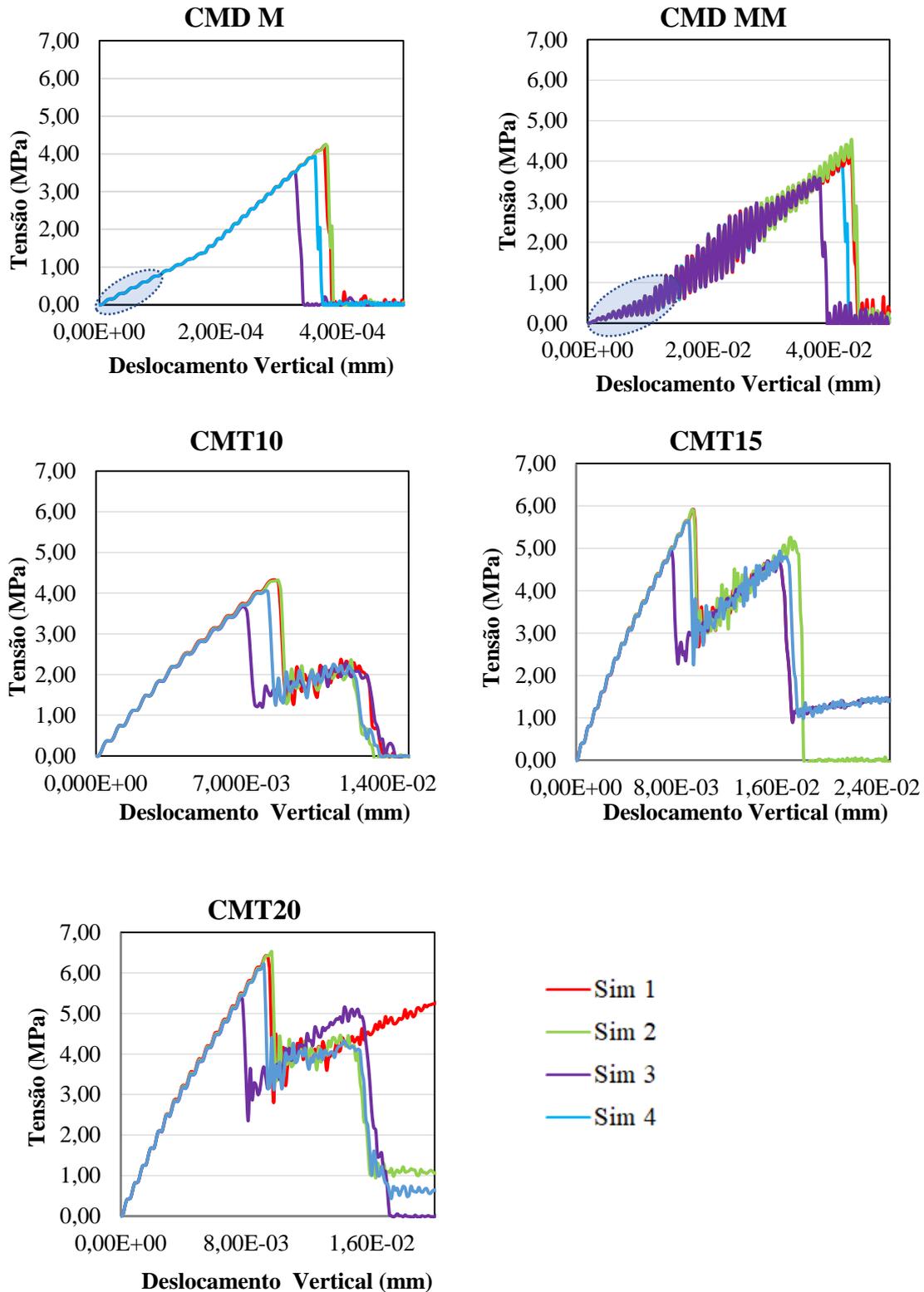


Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.1.1 Resultados dos modelos bidimensionais

A Figura 63, evidencia as curvas de tensão *versus* deslocamento vertical para todos os casos analisados. Onde observa-se a variação na tensão de ruptura de cada configuração de distribuição espacial sob energia de fratura diferenciada. Para a determinação do deslocamento das taliscas metálicas a medição dá-se sobre os pontos de aplicação de carga. Assim como nas taliscas de madeira (CMD M) o deslocamento é determinado através da parte superior da talisca e no conjunto talisca de madeira e placa metálica (CMD MM) a medição parte da superfície superior da placa metálica. Isso é realizado para que a medição dos deslocamentos torna-se mais próximas das leituras realizadas experimentalmente.

Figura 63 – Comportamento tensão *versus* deslocamento vertical dos conjuntos em análise



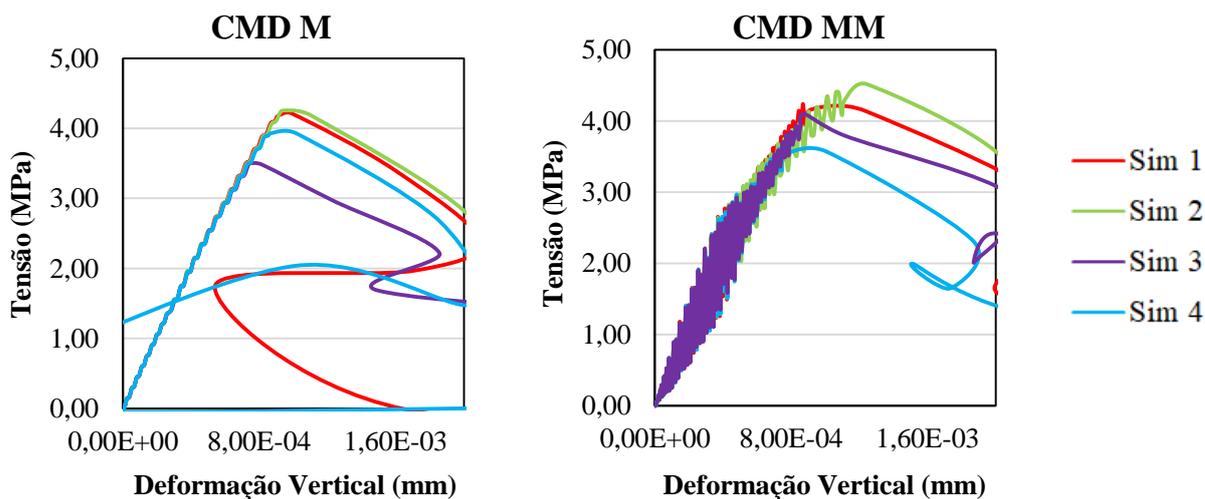
Fonte: Elaboração própria

Como observa-se nas configurações com taliscas de madeira ocorre um comportamento de acomodação entre espécime e os uniformizadores de carga similar ao

comportamento observado experimentalmente. Da mesma maneira que para os conjuntos com taliscas metálicas essa acomodação ocorre de forma menos suavizada.

A Figura 64 demonstra o comportamento dos espécimes diante da deformação vertical ao longo da aplicação de carga no material.

Figura 64 – Comportamento tensão *versus* deformação vertical dos conjuntos em análise



Fonte: Elaboração próprio

Observa-se que o comportamento de deformação apresenta o esforço de tração, conforme teoria do experimento. Onde verifica-se que as inclinações dos conjuntos com taliscas de distribuição de carga metálicas são similares em ambos os casos em estudo, além deste fato ocorrem dois patamares de inclinação nesses casos, indicando o primeiro trecho como acomodação dos distribuidores de carregamento junto ao espécime, e posteriormente como de fato inicia a deformação do material.

Assim como, para os casos com taliscas de madeira ocorre uma deformação mais suavizada tanto no caso CMD M como no CMD MM, este último com maiores vibrações de ajuste talisca/espécime, sendo uma das justificativas para tal comportamento à deformação das taliscas de madeira nas faces de contato com a placa metálica.

Em resumo apresenta-se na Tabela 17 as médias das tensões de tração máxima calculadas seguindo a Equação 1, levando em consideração o modelo em estado plano, onde observam-se valores bem próximos aos encontrados experimentalmente.

Tabela 17 – Média de resistência dos conjuntos 2D com desvio padrão e CV

Modelo	Nº Simulação	Força Máxima (KN)	Resistência (MPa)
<b>CMD M</b>	Sim 1	1,304	4,21
	Sim 2	1,391	4,25
	Sim 3	1,109	3,50
	Sim 4	1,262	3,93
Dados gerais	Média Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
	<b>3,98</b>	<b>0,35</b>	<b>8,71</b>
<b>CMD MM</b>	Sim 1	1,304	4,23
	Sim 2	1,391	4,52
	Sim 3	1,109	3,60
	Sim 4	1,262	4,10
Dados gerais	Média Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
	<b>4,11</b>	<b>0,38</b>	<b>9,31</b>
<b>CMT 10</b>	Sim 1	1,332	4,33
	Sim 2	1,328	4,31
	Sim 3	1,127	3,66
	Sim 4	1,250	4,06
Dados gerais	Média Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
	<b>4,09</b>	<b>0,27</b>	<b>6,59</b>
<b>CMT 15</b>	Sim 1	1,822	5,91
	Sim 2	1,823	5,92
	Sim 3	1,870	6,07
	Sim 4	1,739	5,65
Dados gerais	Média Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
	<b>5,89</b>	<b>0,15</b>	<b>2,61</b>
<b>CMT 20</b>	Sim 1	1,98	6,43
	Sim 2	2,01	6,53
	Sim 3	1,66	5,40
	Sim 4	1,92	6,22
Dados gerais	Média Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
	<b>6,15</b>	<b>0,45</b>	<b>7,25</b>

Fonte: Elaboração própria.

Para afirmar as correlações observadas graficamente entre os resultados, efetuou-se um estudo através da análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias utilizando o método de Fisher, ambos usando uma significância de 95%, o que tornou possível determinar

estatisticamente a igualdade entre as médias dos conjuntos estudados. Para isso, utilizou-se a análise diferencial de Fisher, como realizado anteriormente nos conjuntos experimentais, avaliando assim a variância populacional, os resultados encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados análise de variância modelos bidimensionais

ANOVA	DF	SQ	QM	Valor F	Prob>F
Modelo	4	18,57833	4,64458	35,28737	1,8205E-7
Erro	15	1,97433	0,13162		
Total	19	20,55265			

Fonte: Elaboração própria.

Como a probabilidade obtida estatisticamente foi superior ao valor F, para um nível de significância de 0,05, as médias da população são ditas diferentes de forma significativa. Sendo assim, através do método estatístico de Fisher efetuou-se a avaliação da significância entre conjuntos amostrais, como demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados da significância entre os conjuntos pelo método de Fisher

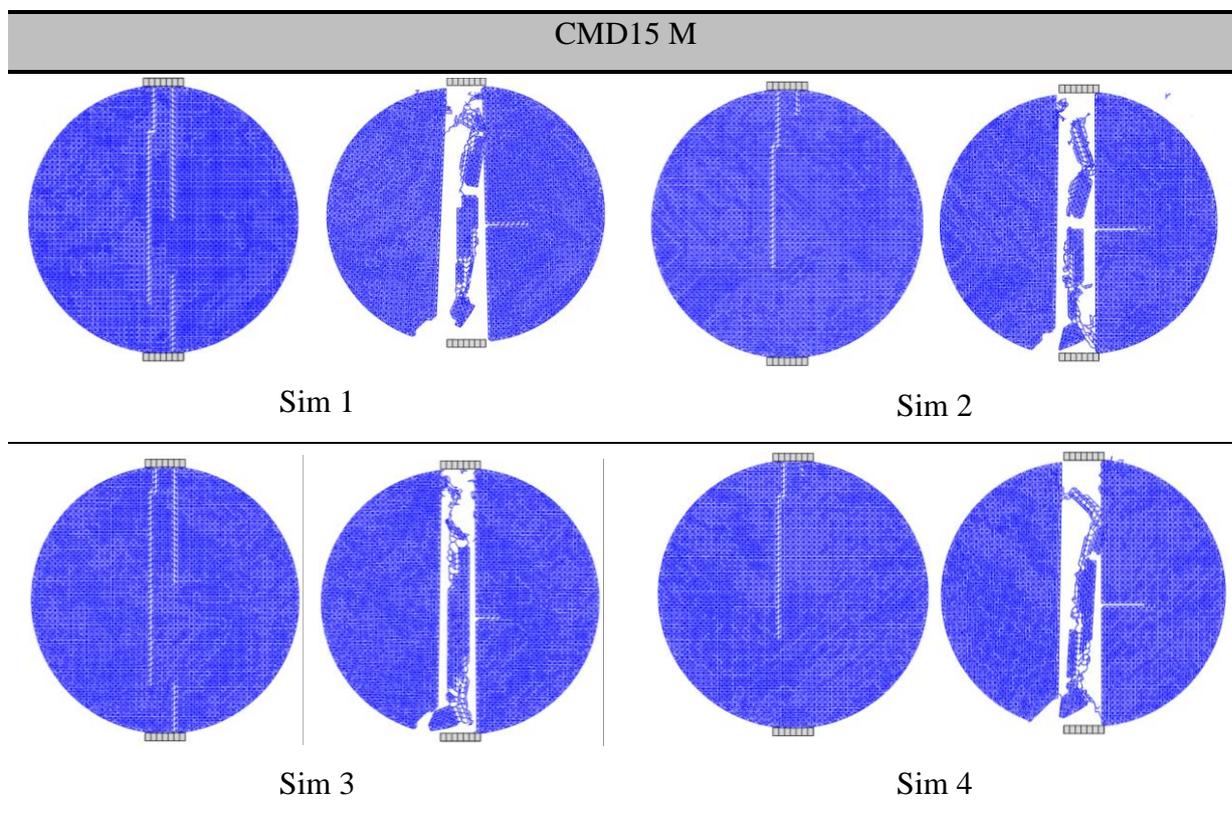
Teste de Fisher	Dif.Média	SEM	t Valor	Prob	Alpha	Sig
CMD MM CMD M	0,14	0,2565	0,54573	0,5933	0,05	0
CMT10 CMD M	0,1175	0,2565	0,45802	0,6535	0,05	0
CMT10 CMD MM	-0,0225	0,2565	-0,08771	0,9313	0,05	0
CMT15 CMD M	1,915	0,2565	7,46483	1,998E-6	0,05	1
CMT15 CMD MM	1,775	0,2565	6,9191	4,901E-6	0,05	1
CMT15 CMT10	1,7975	0,2565	7,00681	4,232E-6	0,05	1
CMT20 CMD M	2,1725	0,2565	8,46859	4,243E-7	0,05	1
CMT20 CMD MM	2,0325	0,2565	7,92286	9,700E-7	0,05	1
CMT20 CMT10	2,055	0,2565	8,01056	8,472E-7	0,05	1
CMT20 CMT15	0,2575	0,2565	1,00376	0,33141	0,05	0

Fonte: Elaboração própria

Como constata-se na Tabela 18, não observam-se variações significativas entre as configurações com taliscas de madeira CMD M e CMD MM, além deste fator à similaridade entre a utilização de taliscas metálicas de 10 mm e taliscas de madeira (CMT10/CMD M e CMT10/CMD MM), bem como entre as taliscas metálicas de 20 mm e 15 mm (CMT20 e CMT15). Com isso, afirma-se que dentro dos conjuntos amostrais as taliscas de distribuição de carregamento metálicas de 20 mm e 15 mm os resultados e comportamento são similares, assim como entre as condições de talisca de madeira e metálica de 10 mm através dos estudos numéricos bidimensionais.

A Tabela 20 apresenta os comportamentos de ruptura do material sob as diferentes configurações. Identifica-se que por mais que sejam diferentes simulações e formas de distribuição espacial de propriedades, a forma de ruptura são muito similares. Isso ocorre devido à variação das propriedades dentro do espaço plano serem reduzidas ( $L_{cor} = 0,04$  m). Também é importante observar que a ruptura dos espécimes tem a tendência de começar em uma das bordas de contato com a talisca na parte superior e propagar até a borda oposta.

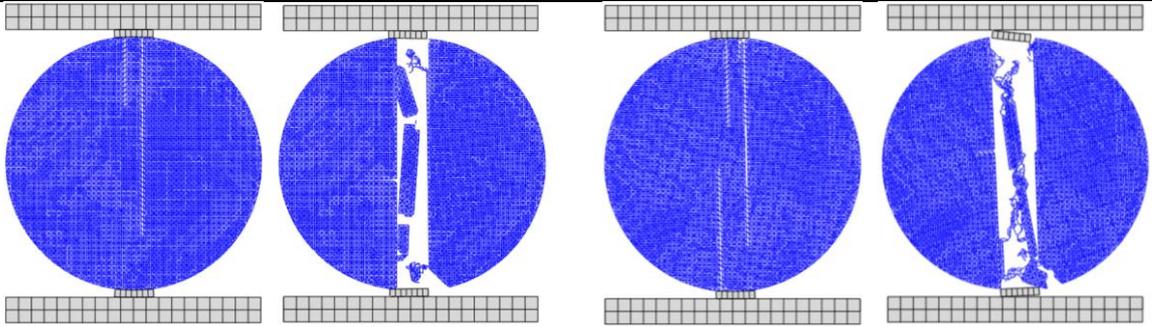
Tabela 20 – Formato de Ruptura dos conjuntos em análise bidimensional



Continua...

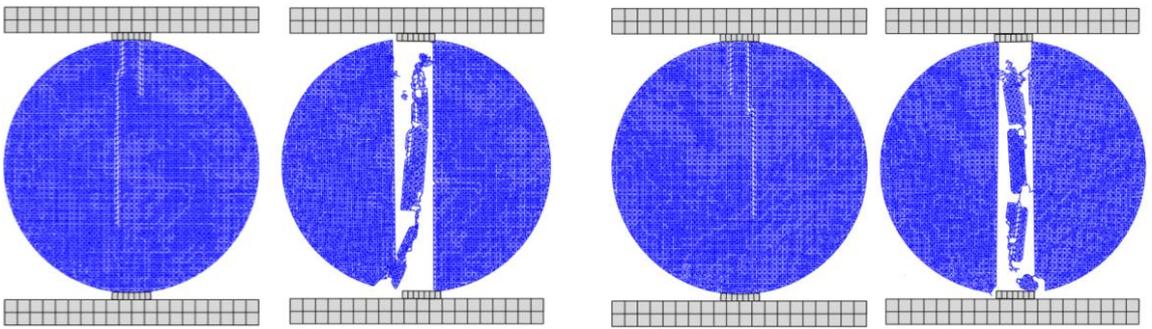
...continuação.

CMD15 MM



Sim 1

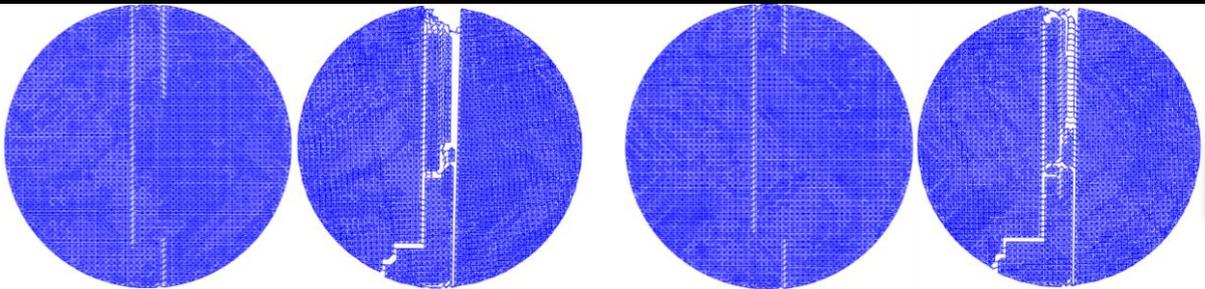
Sim 2



Sim 3

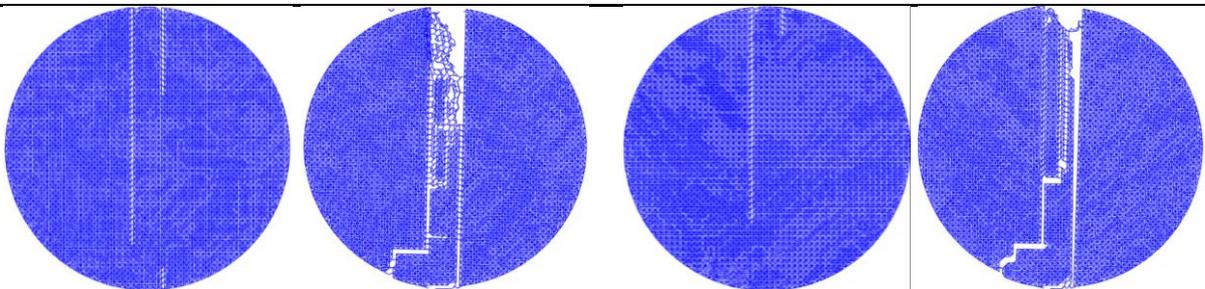
Sim 4

CMT10



Sim 1

Sim 2



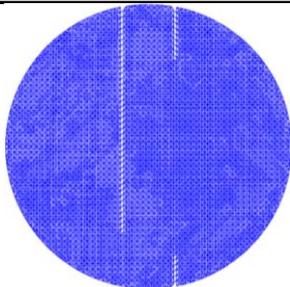
Sim 3

Sim 4

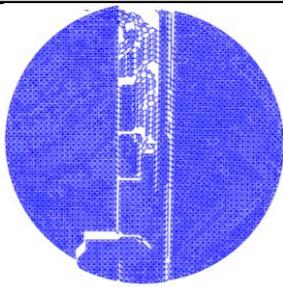
Continua...

...continuação.

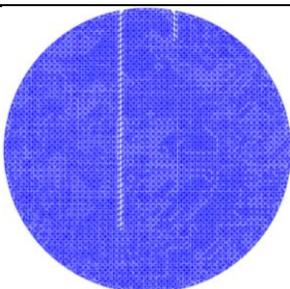
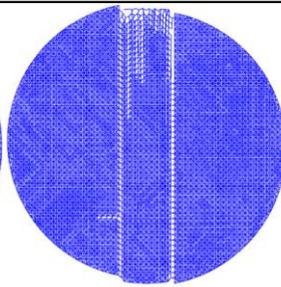
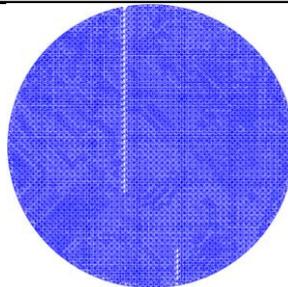
CMT15



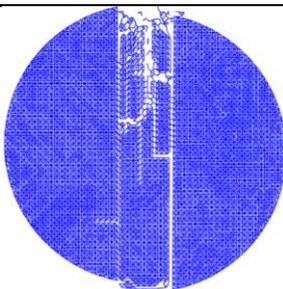
Sim 1



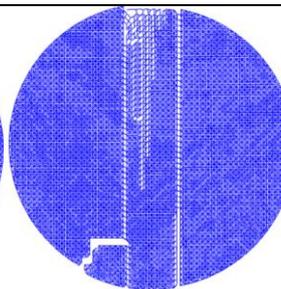
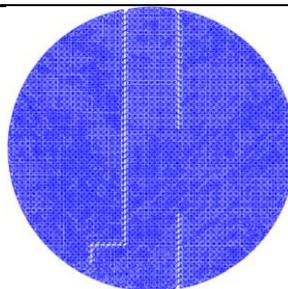
Sim 2



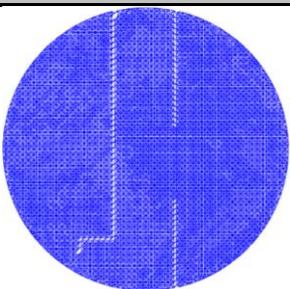
Sim 3



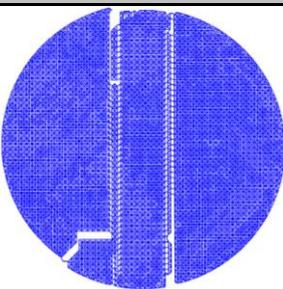
Sim 4



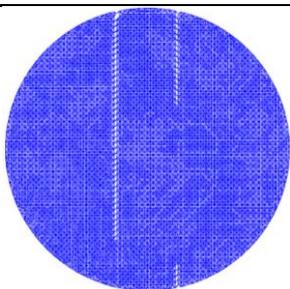
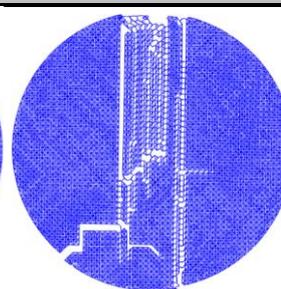
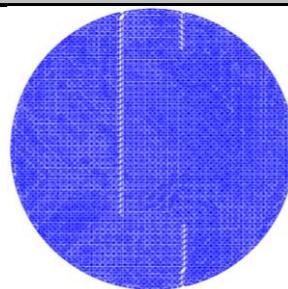
CMT20



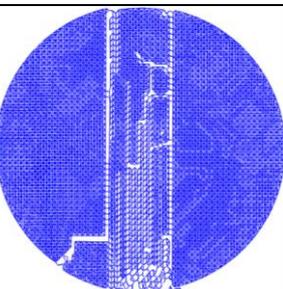
Sim 1



Sim 2



Sim 3



Sim 4

Fonte: Elaboração própria

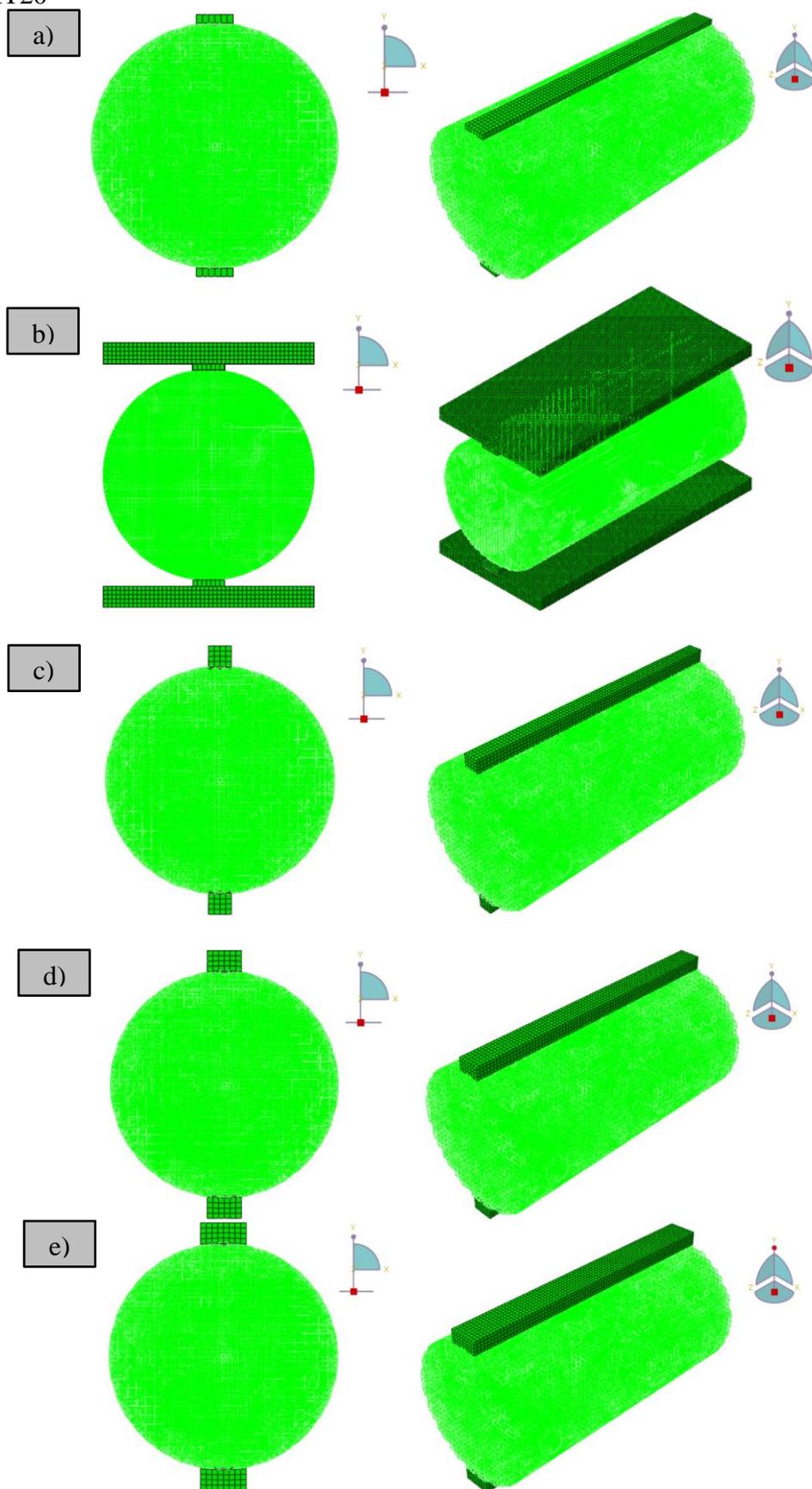
Como pode-se identificar, todas configurações apresentam ruptura do material semelhantes, bem como a similaridade no início e propagação das fissuras sobre o espécime.

É importante destacar a tendência dos conjuntos romperem através da largura das tiras de distribuição, o que fica evidenciado pelo comprimento da fratura final da face.

#### **4.2.2 Resultado modelo tridimensional (3D)**

A análise do modelo tridimensional, ocorre através da inclusão de malha ao longo do eixo z do sistema, formando uma malha com composição 50x50x100, a qual representa o corpo do espécime ensaiados experimentalmente de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. A velocidade de ensaio para as composições serão de 0,050 m/s, assim como anteriormente definido nos ensaios do modelo 2D. Nas composições avaliadas, utilizou-se a análise das cinco configurações avaliadas bidimensionalmente, tais como: CMD M, CMD MM, CMT10, CMT15 e CMT20, para o modelo tridimensional implementa-se uma única configuração para avaliar o comportamento do espécime. Isso foi decidido devido ao tempo necessário para realizar mais simulações, e tendo pelo menos uma simulação em 3D obtem-se uma ideia dos resultados esperados. Na Figura 65 demonstra-se o detalhamento das composições avaliadas no modelo tridimensional.

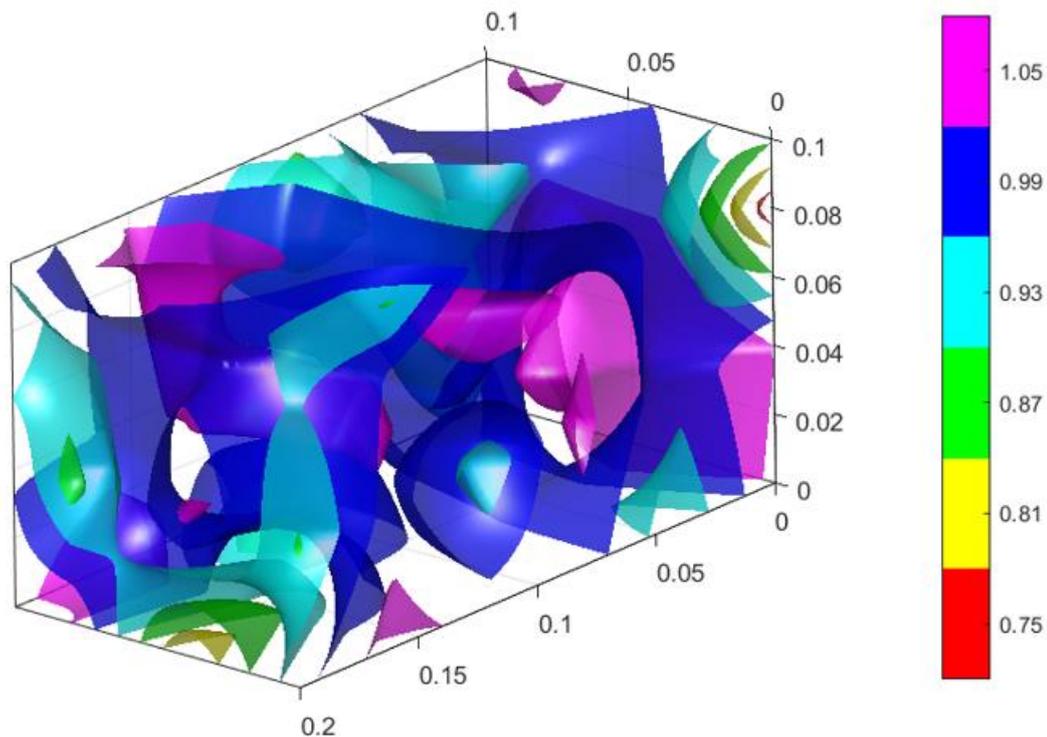
Figura 65 – Composições tridimensionais: a) CMD M; b) CMD MM; c) CMT10; d) CMT15 e e) CMT20



Fonte: Elaboração própria

Além das configurações estudadas, vale salientar que a representação do concreto no LDEM para o modelo 3D é realizada por distribuição aleatória considerando que a energia de fratura tem uma média e coeficiente de variação conhecidos, assim como anteriormente aplicado ao modelo 2D. Desta maneira, a Figura 66 mostra a distribuição espacial da energia de fratura no modelo tridimensional, representando a configuração utilizada no estudo.

Figura 66 – Distribuição espacial de propriedades sob modelo tridimensional

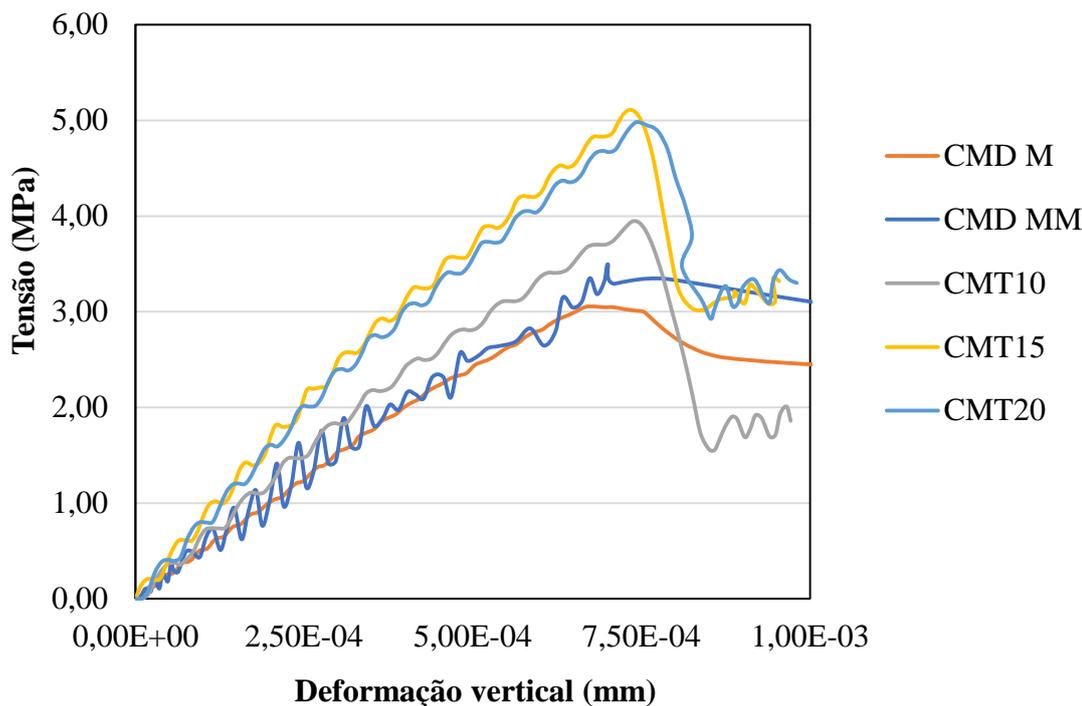


Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.2 .1 Curvas tensão *versus* deformação vertical

Na Figura 67 as curvas tensão *versus* deformação para uma simulação do modelo tridimensional com diferentes condições de contorno. É interessante observar que por mais que o modelo seja exatamente o mesmo (ou seja com o mesmo arranjo espacial de propriedades como detalhado na Figura 66) a resposta modifica de maneira considerável de acordo com o modo de aplicação de carregamento.

Figura 67 – Comportamento tensão *versus* deformação vertical configurações 3D em estudo

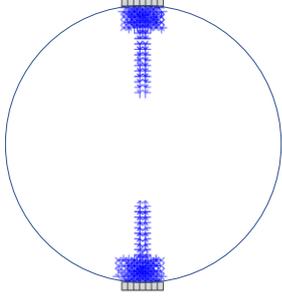
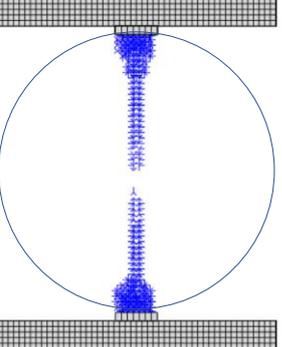
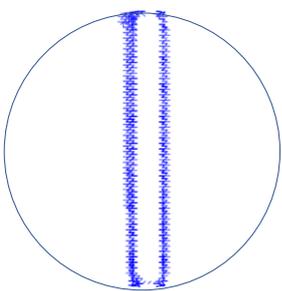
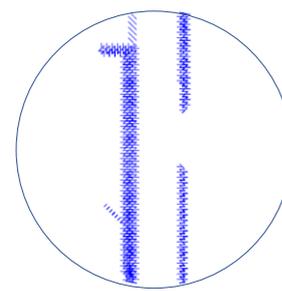
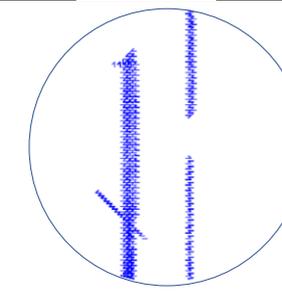


Fonte: Elaboração própria.

Como pode-se observar frente ao comportamento tensão-deformação dos conjuntos 3D, assim como identificado bidimensionalmente não ocorrem variações significativas entre as configurações com taliscas de madeira CMD M e CMD MM. Além deste fator a similaridade entre a utilização de taliscas metálicas de 10 mm e taliscas de madeira (CMT10/CMD M e CMT10/CMD MM) devido ao formato da inclinação e acomodação do conjunto bem como a proximidade da tensão. Além deste aspecto observa-se também bem que as taliscas metálicas de 20 mm e 15 mm (CMT20 e CMT15) também apresentam similaridade na forma da inclinação e faixa de resistência final da simulação, podendo esse último ser justificado pela estabilização das cargas conforme ocorre o aumento de largura efetiva das tiras de distribuição.

Para verificar o comportamento das simulações frente à fratura, a Tabela 21 apresenta a ruptura na face do corpo sob as diferentes configurações, onde a demonstração ocorre através das barras rompidas para melhor detalhar a forma de dano nos espécimes.

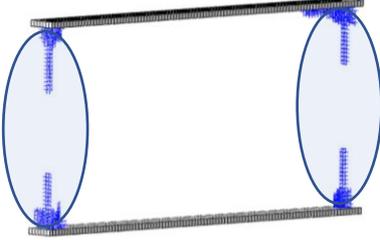
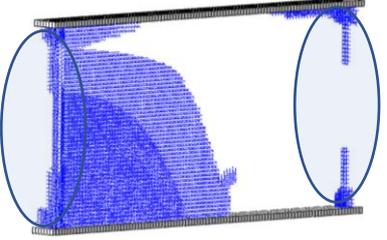
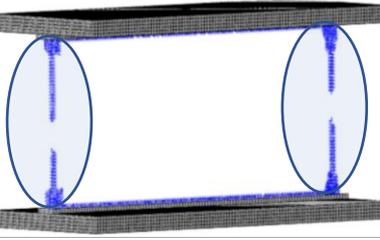
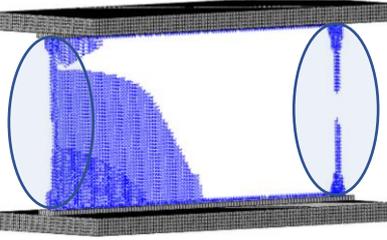
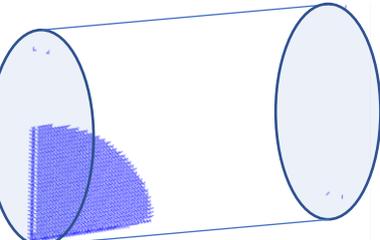
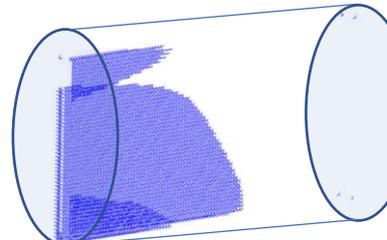
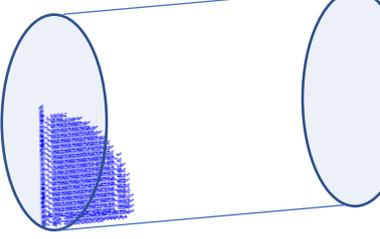
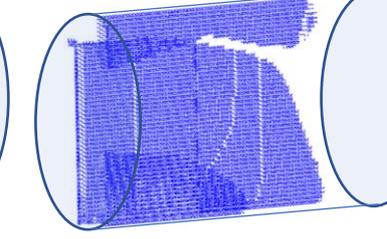
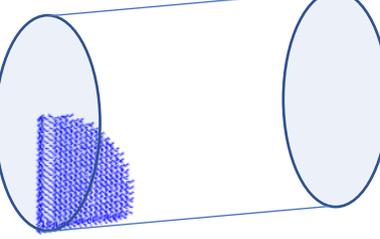
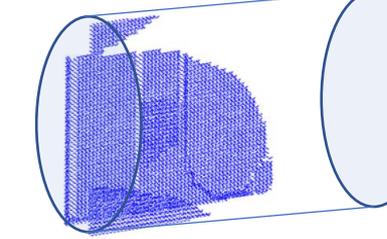
Tabela 21 – Formato de ruptura na face dos espécimes e respectivas resistências

Nomenclatura	Resistência (MPa)	Ruptura Face
CMD - M	3,05	
CMD - MM	3,49	
CMT10	3,95	
CMT15	4,98	
CMT20	5,13	

Fonte: Elaboração própria

A evolução das fissuras na configuração tridimensional demonstradas pela Tabela 22, representa a forma de propagação das fraturas ao longo do eixo z. Como pode-se constatar, a evolução da ruptura parte de uma das bordas de contato com a talisca e avança ao longo do comprimento do espécime, não ocorrendo grande variação entre as configurações.

Tabela 22 – Formato de ruptura longitudinal das configurações no sistema 3D

Nomenclatura	Evolução da fissura longitudinal	
CMD - M		
CMD - MM		
CMT10		
CMT15		
CMT20		

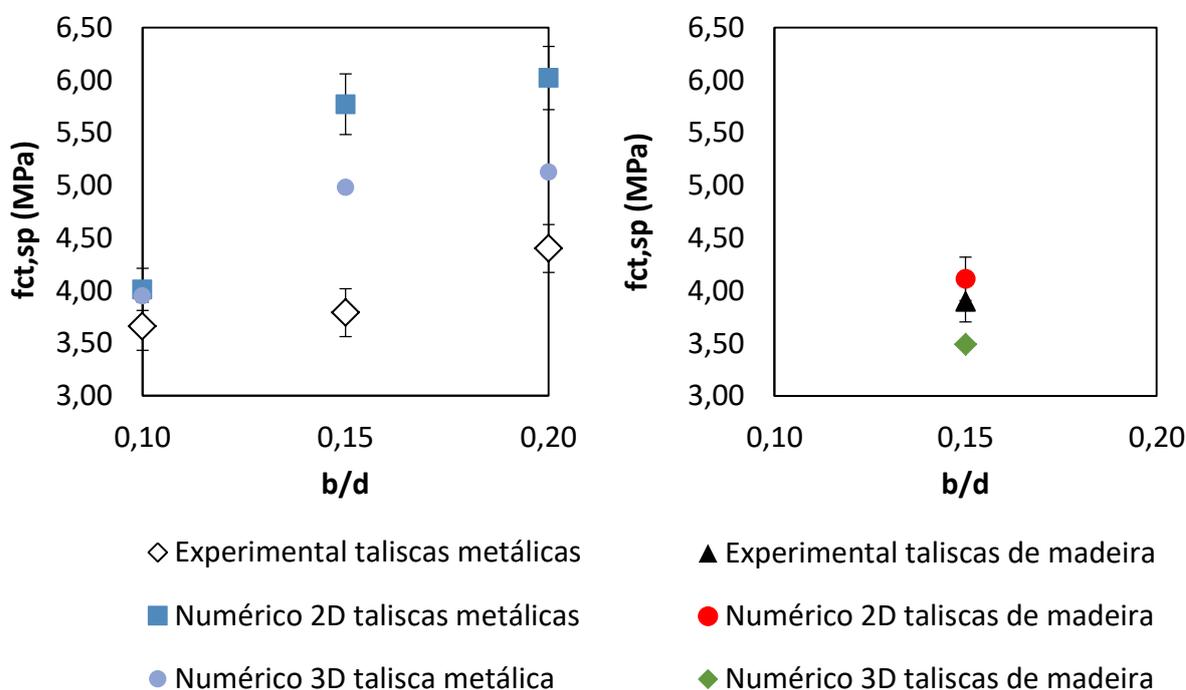
Fonte: Elaboração própria.

### 4.3 Análise Comparativa dos Resultados

#### 4.3.1 Resistência à tração pelo método de compressão diametral

Os comparativos entre as configurações estudadas experimental e numericamente nesta pesquisa são mostrados na Figura 68, demonstrando as correlações entre os modelos e suas similaridades.

Figura 68 – Comparativos entre os conjuntos experimentais e numéricos em estudo



Fonte: Elaboração própria

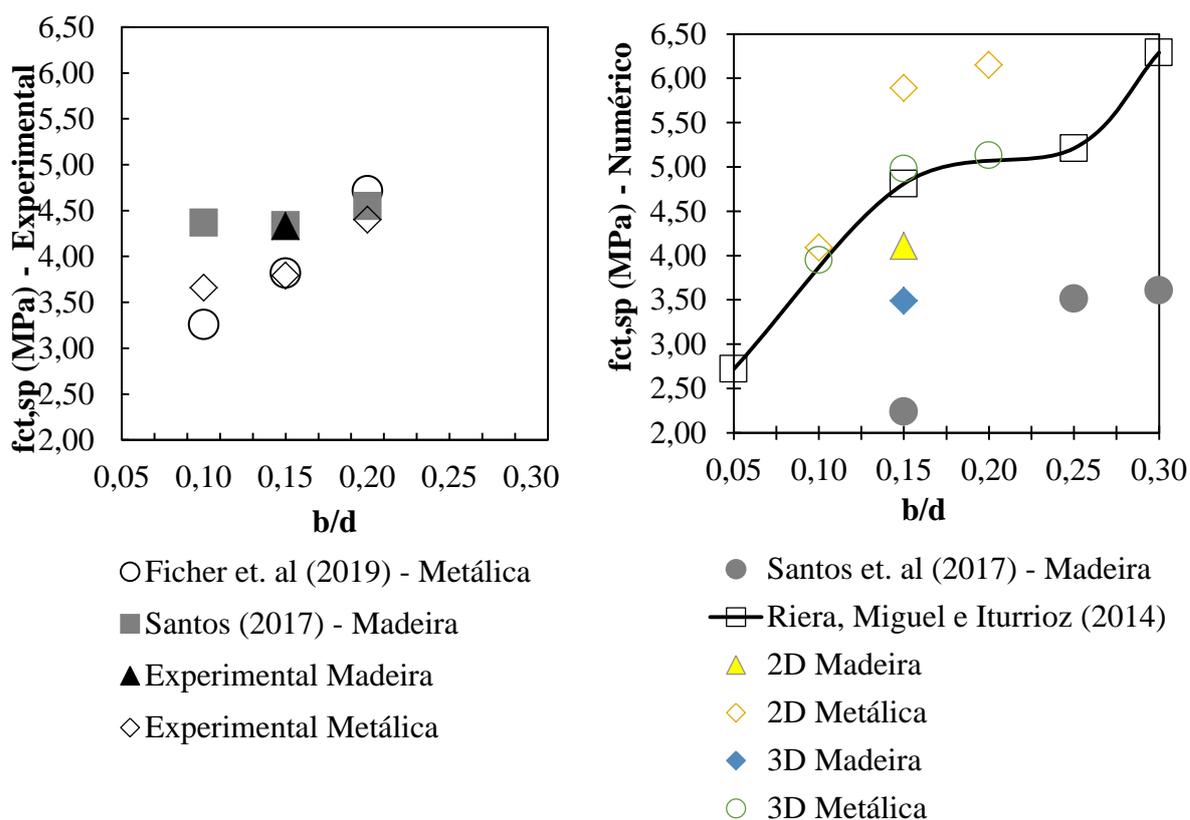
Conforme a figura, observa-se que a resistência da simulação 3D para a configuração de talisca metálica de 10 mm é próxima aos valores encontrados na simulação em 2D. Porém nas demais configurações os resultados 3D apresentaram-se sempre inferiores aos resultados 2D, estando sempre na ordem de 85 % da resistência bidimensional.

Também é interessante notar o comportamento experimental, onde nota-se pouco aumento da resistência entre as taliscas metálicas de 10 mm e 15 mm, mas para a configuração de 20 mm o aumento é mais considerável, já nas análises numéricas as simulações apresentaram salto entre as configurações de 10 mm e 15 mm, para os modelos de 15 mm e 20 mm não há variação significativa. Quanto a configuração de talisca de madeira,

nota-se a representatividade do sistema numérico bidimensional, o qual apresenta valores significativamente próximos aos obtidos experimentalmente.

A Figura 69, mostra a comparação dos resultados encontrados neste trabalho com outros pesquisadores citados na bibliografia que utilizaram materiais similares como distribuidores de carregamento.

Figura 69 – Comparativos entre os resultados obtidos no estudo e bibliografia



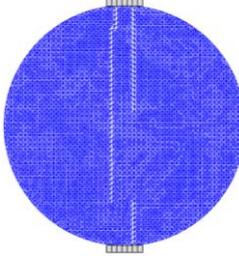
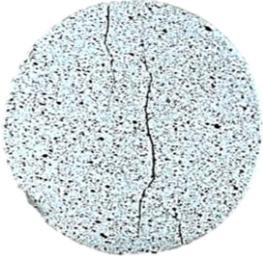
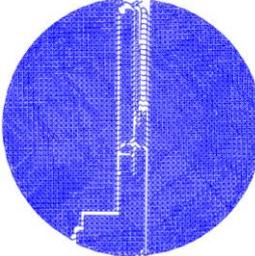
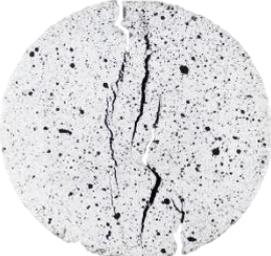
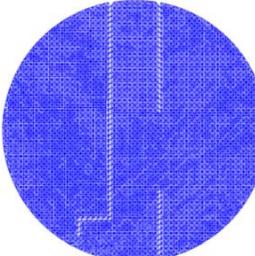
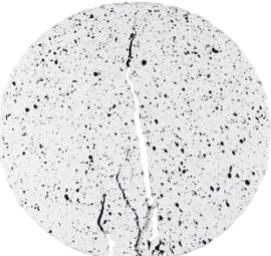
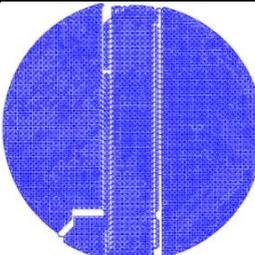
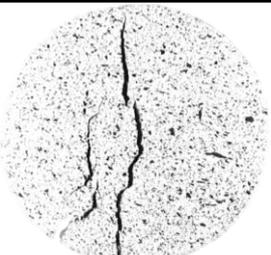
Fonte: Elaboração própria.

No comparativo, constata-se similaridade dos dados experimentais entre a configuração das taliscas metálicas com os valores atingidos por Ficher et. al (2019). Além deste fator, também observa-se similaridade dos resultados do sistema 3D com a linha de tendência de resultados de Riera, Miguel e Iturrioz (2014).

#### 4.4.2 Ruptura final dos modelos

O comparativo entre as rupturas obtidas experimentalmente e numericamente são apresentadas na Tabela 23, onde observa-se a similaridade do dano na face do espécime.

Tabela 23 – Comparativo entre rupturas da face sob modelo numérico 2D e experimental

Nomenclatura	Ruptura Numérico 2D	Ruptura Experimental
CMD		
CMT10		
CMT15		
CMT20		

Fonte: Elaboração própria.

Foi possível constatar que tanto no modelo 2D como experimental o local de origem das fissuras na face não coincide com o centro exato do corpo de prova, além deste fator a grande maioria dos espécimes apresentaram mais de uma fissura conjunta que ocasionam a ruptura final do espécime. A propagação das fissuras para as taliscas metálicas origina na em uma das bordas de contato, enquanto para as taliscas de madeira a tendência de propagação ocorre pelo contato com a largura efetiva, a qual concentra a distribuição dos esforços.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve por finalidade avaliar o mecanismo de falha causado durante o ensaio de compressão diametral, sob as diferentes configurações de distribuidores de carregamento, visando determinar as influências da resistência à tração de maneira experimental e numérica. Dentre as principais conclusões obtidas no trabalho destacam-se:

Análise experimental:

- ❖ Os resultados médios de resistência à tração para as taliscas de madeiras coincidem diretamente com os valores propostos pela norma 6118 (ABNT, 2014).
- ❖ Os conjuntos CMD e CMT20 obtiveram valores significativamente próximos ao  $f_{ct,m}$ .
- ❖ Através da análise da ANOVA e método de Fisher os resultados de resistência à tração não demonstraram diferença significativa entre as configurações de madeira de 15 mm e metal de 20 mm.
- ❖ O comportamento da resistências à tração pelo método de compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) demonstraram-se representativas sob as diferentes configurações avaliadas, uma vez que ambas estiveram inclusas entre a faixa superior e inferior determinada pela normativa NBR6118 (ABNT, 2014).
- ❖ A análise estatística pelo método de Fisher sob os valores médios obtidos de resistência à tração, constatou que dentro dos conjuntos amostrais avaliados as taliscas metálicas de 15 mm e 10 mm demonstram resultados similares, assim como as configurações de talisca de madeira e metálica de 20 mm.
- ❖ O comportamento dos corpos de prova durante à análise da força máxima aplicada pelo deslocamento vertical, demonstra diferentes faixas de tempo para acomodação das taliscas junto aos espécimes.
- ❖ Foi possível identificar que para o conjunto de taliscas de madeira a interação de distribuição de carregamento entre talisca e espécime ocorre de forma mais suavizada, sendo a diferença de rigidez da madeira em relação ao metal importante para o processo de transferência de esforços sob o conjunto estudado.
- ❖ As leituras de força máxima por deslocamento horizontal, demonstrou grande variação dos resultados, alguns casos apresentaram esforços de compressão, em vez de tração, o que contradiz totalmente a teoria que dá embasamento para o experimento. Alguns fatores levantados como possíveis causas: ocorrência de rotação dos espécimes e/ou

falha na leitura dos LVDT's. Para melhor identificar este comportamento as análises do DIC seriam imprescindíveis.

- ❖ Quanto ao formato de ruptura dos espécimes, observou-se grande variação entre o formato e grau de fragmentação dentro de um mesmo conjunto de amostras, o que não possibilitou determinar um padrão de falha totalmente representativo para cada configuração.
- ❖ A aleatoriedade da matriz cimentícia é tida como uma provável causa da dispersão dos resultados de ruptura, uma vez que aspectos como diâmetro e formato dos agregados interferem diretamente na distribuição dos esforços dentro do espécime.
- ❖ O local de origem das fissuras na face não coincidem com o centro do corpo de prova em inúmeros ensaios.
- ❖ A grande maioria dos espécimes apresentaram múltiplas fissurações que ocasionam a ruptura final do espécime. Esse fator diverge com a teoria que embasa o ensaio de compressão diametral, o qual descreve a ruptura típica do espécime resultante de uma fissura centralizada ao longo do diâmetro do material.

Análise numérica:

- ❖ As curvas tensão *versus* deformação, mostraram um comportamento similar ao obtido experimentalmente.
- ❖ O comportamento de acomodação entre a máquina de ensaio e as taliscas de distribuição de carregamento são semelhantes ao comportamento experimental, sendo para a configuração em madeira a mais suavizada. Este fator está diretamente interligado a rigidez e deformação do material de distribuição de carga.
- ❖ As formas de ruptura apresentaram pouca variação entre as simulações, sendo essas próximas ao experimental, uma vez que demonstram múltiplas fissuras como resultante para a fratura do espécime.
- ❖ O arranjo espacial dos espécimes influencia na distribuição dos esforços sobre o conjunto, e conseqüentemente na propagação do dano nos pontos mais frágeis do corpo de prova, o que também ocorreu experimentalmente devido a distribuição da matriz cimentícia.
- ❖ A falha dos espécimes com tiras metálicas independente da largura de contato do uniformizador de carga, ocorrem sempre próximo da borda de contato com o espécime.

- ❖ A ruptura dos espécimes com taliscas de madeira demonstram o início do dano na face próximo da largura efetiva da talisca.
- ❖ O modelo tridimensional demonstra que a fissura propaga das bordas de contato para o centro do corpo na face do espécime, assim como nas simulações bidimensional, e também conclui que ao longo do comprimento as mesmas se alastram das bordas para o centro do diâmetro.

Em relação aos estudos futuros, são realizadas as seguintes recomendações:

- ❖ Estudar a relação entre resistência à tração direta e resistência à tração pelo método de compressão diametral.
- ❖ Utilizar as tiras metálicas com maior concavidade de raio em relação ao cilindro, assim como recomendado para o estudo de rochas.
- ❖ Reduzir a taxa de aplicação do carregamento, visando captar com maior precisão a propagação das fissuras no ensaio de compressão diametral, avaliando a influência deste parâmetro nos resultados.
- ❖ Utilizar os extensômetros em conjunto com a correlação de imagens para determinar deformações e deslocamentos sob o ensaio de compressão diametral.
- ❖ Observar a influência da utilização de um corpo de prova com malha confeccionada com mais módulos básicos e com comprimento do módulo menor.
- ❖ Executar este estudo com concreto de resistências inferiores e estudo de outros materiais, como argamassas, cerâmicas e rochas.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton. Curso de concreto armado, Volume I, II, III e IV. **Editora Dunas**, 2014.

AMADEI B, ROGERS JD, GOODMAN RE. Elastic constants and tensile strength of anisotropic rocks. **International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering**, pp 189–196. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_: **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_: **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_: **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_: **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_: **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_: **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_: **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_: **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_: **NBR 10024**: Chapa dura de fibra de madeira – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_: **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos ed prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6931**: Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. West Conshohocken, 2012.

\_\_\_: **C496/C496M**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, 2011.

\_\_\_: **D3967**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. West Conshohocken, 2016.

BAHRAMI, Bahador; AYATOLLAHI, Majid R.; TORABI, A. R. Predictions of fracture load, crack initiation angle, and trajectory for V-notched Brazilian disk specimens under mixed mode I/II loading with negative mode I contributions. **International Journal of Damage Mechanics**, v. 27, n. 8, p. 1173-1191, 2018.

BATHE, J., Finite element procedures, **Prentice-Hall**, Inc., New Jersey, 1996.

BRUCK H.; MCNELL S.; SUTTON M. and PETTERS W. Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction. **Experimental mechanics**, p 261-267, 1989.

CARMONA, Sergio; AGUADO, Antonio. New model for the indirect determination of the tensile stress-strain curve of concrete by means of the Brazilian test. **Materials and structures**, v. 45, n. 10, p. 1473-1485, 2012.

CHAU KT, WEI XX. A three-dimensional analytic solution for the Brazilian test. **International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering**, Beijing, China, pp 141-144, 2001.

CHEN, J. J., GUO, B. Q., LIU, H. B., LIU, H., & CHEN, P. W. Dynamic Brazilian test of brittle materials using the split Hopkinson pressure bar and digital image correlation. **Strain**, v. 50, n. 6, p. 563-570, 2014.

CHEN, Yulong; IRFAN, Muhammad; SONG, Chenpeng. Verification of the Kaiser Effect in Rocks under Tensile Stress: Experiment Using the Brazilian Test. **International Journal of Geomechanics**, v. 18, n. 7, p. 04018059, 2018.

CHOU YC, CHEN CS. Determinar constantes elásticas de transversalmente rochas isotrópicos usando o teste brasileira e processo iterativo. **Int J Numer Anal Meth Geomech** 32 (3): 219-234. doi: 10.1002 / nag.619 . 2008.

DALGUER, L.A., IRIKURA, K., RIERA, J.D., CHIU, H.C, The importance of the dynamic source effects on strong ground motion during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Brief interpretation of the damage distribution on buildings. **Bull. Seismol. Soc. Am.**, v. 91, p. 1112-1127, 2001.

DNER - Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. **ME 138**: Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Brasília, 1994.

DOKHANI V, YU H, BLOYS B. Um modelo de estabilidade do poço de xisto Formações: representando anisotropia força e instabilidade fluido induzida. **J Nat Gás Sci Eng** 32: 174-184. 2016.

DUAN K, KWOK CY. Elemento de modelagem Discreta de anisotrópica balançar sob condições de ensaio brasileiras. **Int J Mech Rocha Min** 78: 46-56. 2015.

FAIRBARN, E. M. R.; ULM, F. J. A Tribute to Fernando L. L. B. Carneiro (1913-2001) Engineer and Scientist who invented the Brazilian Test. **Materials and Structures**, [s.l.] v. 35, p. 195-196, Abr. 2002.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Discussão sobremodos de ruptura observados no ensaio de compressão diametral. In: Encontro de Asfalto, n 16., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2002.

FICHER, N. M., dos Santos, F. J. K., Bandeira, M. V. V., Cardoso, C. V., Kostascki, L. E., & Marangon, E. COB-2019-0770. Study of the influence of steel strips width in the Brazilian Test. **Anais...** COBEM, Uberlândia, 2019.

GARCÍA, V. J., MÁRQUEZ, C. O., ZUÑIGA-SUÁREZ, A. R., ZUÑIGA-TORRES, B. C., & VILLALTA-GRANDA, L. J. Brazilian test of concrete specimens subjected to different loading geometries: review and new insights. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 2, p. 343-363, 2017.

GOM, CORRELATE. Software de análise mecânica da fratura. Site Empresa Gom, 2021. Disponível em: < <https://www.gom.com/en/products/gom-correlate>>. Acesso: 20 de março de 2021.

HADLEY, William O.; HUDSON, W. Ronald; KENNEDY, Thomas William. A method of estimating tensile properties of materials tested in indirect tension. University of Texas at Austin, **Center for Highway Research**, 1970.

HEARD, W., SONG, B., WILLIAMS, B., MARTIN, B., SPARKS, P., & NIE, X. Dynamic Tensile Experimental Techniques for Geomaterials: A Comprehensive Review. **Journal of Dynamic Behavior of Materials**, 4(1), 74–94. 2018.

HILLERBORG, A. **A Model for Fracture Analysis**. Cod LUTVDG/TV BM-3005/1-8, 1978.

HONDROS G. Materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. **Aust J Appl Sci** 10(3):243–268. 1959.

HUNG P.C. and VOLOSHIN A.S. Strain Measurement by Digital Image Correlation, Vol XXV, **In-plane**, 2003.

INT - INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. Instituto Nacional de Tecnologia, desde 1921 gerando Tecnologia para o Brasil. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.int.gov.br/docman/informacoes-institucional/251-livro-doint-80-anos/file>>. Acesso em: 28 outubro 2019, 16:52.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil**. São Paulo, 2013. Disponível em: <[http://www.ipt.br/download.php?filename=980-Catalogo\\_de\\_Madeiras\\_Brasileiras](http://www.ipt.br/download.php?filename=980-Catalogo_de_Madeiras_Brasileiras)>

JAPARIDZE, Levan. Stress-deformed state of cylindrical specimens during indirect tensile strength testing. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 7, n. 5, p. 509-518, 2015.

JIN, X., HOU, C., FAN, X., LU, C., YANG, H., SHU, X., & WANG, Z. Quasi-static and dynamic experimental studies on the tensile strength and failure pattern of concrete and mortar discs. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 15305, 2017.

KENNEDY, T. W., & HUDSON, W. R. Application of the indirect tensile test to stabilized materials. **Highway Research Record**, 235. 1968.

KOSTESKI, L.; RIERA, J. D.; ITURRIOZ, I.; SINGH, R. K.; KANT, T. Analysis of reinforced concrete plates subjected to impact employing the truss-like discrete element method. **Fatigue Fract Engng Mater Struct** 00, p. 1-13, 2014.

KOSTESKI, L.E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KOSTESKI, L.E., PINTO, O., ITURRIOZ, I., Combinação entre o Metodo dos Elementos Discretos Compostos por Barras e o Metodo dos Elementos Finitos no Ambiente Abaqus. **Anais...** Em: Associação Argentina de Mecânica Computacional – Mecânica Computacional Vol XXIX, Buenos Aires, Argentina. p. 5259-5283. 2010.

KUPFER, H. B.; GERSTLE, K. H. Behavior of concrete under biaxial stresses. **Journal of Engineering Mechanics**, v.99, p.853-866. 1973.

LI, DIYUAN; WONG, LOUIS NGAI YUEN. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. **Rock mechanics and rock engineering**, v. 46, n. 2, p. 269-287, 2013.

LI, HUI; LAI, BITAO; LIU, HUIHAI. Determination of Tensile Elastic Parameters from Brazilian Tensile Test: Theory and Experiments. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, p. 1-18, 2019.

LU, Y. B.; LI, Q. M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials. **International journal of impact engineering**, v. 38, n. 4, p. 171-180, 2011.

MADERS, L.; KOSTESKI, L.E.; ITURRIOZ I. Estudo do efeito de escala no método dos elementos discretos formado por barras. **Mecânica Computacional**, v. XXXI, p. 1857-1876, 2012.

MARCHETTI, O.; BOTELHO, M. H. C. Concreto armado-Eu te amo. **Editora Blucher**, 2015.

MARKIDES CF, KOURKOULIS SK. A tensão de campo num padronizado disco brasileira: a influência do tipo de carga que actua sobre o comprimento de contacto real. **Rocha Mech Rocha Eng** 45 (2): 145-158. doi: 10,1007 / s00603-011-0201-2. 2012.

MARKIDES CF, PAZIS DN, KOURKOULIS SK. Em influência de atrito sobre o estresse fi eld do ensaio de tração brasileira. **Mech rocha da rocha Eng** 44 (1): 113-119. doi: 10,1007 / s00603-010-0115-4. 2011.

MARKIDES, Ch. F.; KOURKOULIS, S. K. The Influence of Jaw's Curvature on the Results of the Brazilian Disc Test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, [s.l.] v. 8, n. 2, p. 127-146, Abr. 2016.

MCCORMICK, N.; LORD, J. Digital Image Correlation. *Materials Today*, [s.l.] v. 13, n. 12, p. 52-54, Dez. 2010.

MEDINA, L. D., DE FARIAS, M. M., RASMUSSEN, L., & RE CAREY, C. A. Simulation of resistance and deformability of rocks via discrete elements with cemented particles. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 35(1). 2019.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - microestrutura, propriedades e materiais. 3ª Ed. São Paulo: **IBRACON**, 2008.

MELLOR, M. & HAWKES, I. A medição da resistência à tracção por compressão diametral. A medição da resistência à tracção por Mellor, M. & Hawkes, I. (1971). *Geologia de Engenharia*, 5 n° 2, p. 173-225. 1971.

MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I.; RIERA, J. D. - Avaliação do Ensaio de Tração Indireta Considerando Fratura e a Heterogeneidade do Concreto. XXXVI Jornada Sulamericana de Engenharia Estrutural. *Anais...* Montevideu, Uruguai. 2014.

NAYFEH, A.H., e HEFZY, M.S., Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. *AIAA Journal*, v. 16(8), p. 779-787, 1978.

NETO, Pedro Luiz de Oliveira Costa. *Estatística*. Editora Blucher, 2002.

PAN, B.; XIE, H.; WANG, Zhaoyang; QIAN, K.; WANG, Zhiyong. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, [s.l.] v. 16, n. 10, p. 7037-7048, Mai. 2008.

PINTO, O. T. Interação do método dos elementos discretos (MED) e do método dos elementos finitos (MEF) implementado no ambiente do sistema Abaqus. *Anais...* Em: Salão de Iniciação Científica. Livro de resumos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/46517>> Acessado em: 10 de outubro de 2019.

RIERA, J. D.; MIGUEL, L. F. F.; ITURRIOZ, I. Evaluation of the discrete element method (DEM) and of the experimental evidence on concrete behaviour under static 3D compression. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 39, n. 11, p. 1366-1378, 2016.

RIERA, J.D., Local Effects In Impact Problems In Concrete Structures. *Anais...* Em: proceedings, Conf. on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants, UFRGS, 1984. Porto Alegre, Rs, Brasil, 1984.

RIERA, J.D.; ITURRIOZ, I. Discrete element dynamic-response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading. In: *Numerical Methods in Engineering*, Wiley & Sons, v. 11, p. 417-426, 1995.

RIERA, J.D.; ROCHA, M.M., A note on velocity of crack propagation in tensile fracture. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, v. XII/3, p. 217-240, 1991.

RINALDI, A., Krajcinovic, D., PERALTA, P. and LAI, Y.C. “Lattice models of polycrystalline microstructures: a quantitative approach”, **Mechanics of Materials**, Vol. 40, pp. 17-36. 2008.

ROCCO, C., GUINEA, G. V., PLANAS, J., & ELICES, M. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: theoretical analysis. **Materials and Structures**, v. 32, n. 6, p. 437, 1999a.

ROCCO, C., GUINEA, G. V., PLANAS, J., & ELICES, M. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: experimental verification. **Materials and Structures**, v. 32, n. 3, p. 210, 1999b.

ROCHA, M. M. **Ruptura e Efeitos da Escala em Materiais não Homogêneos**. Tese – CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1989.

SANTOS, Francisco Junior Keche dos. **Análise do ensaio de compressão diametral para concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA. 2017.

SANTOS, F. J. K., MARQUES, J. R., BANDEIRA, M. V. V., ZYDECK, R. C., KOSTESKI, L. E., & MARANGON, E. Análise Experimental E Numérica Do Ensaio Brasileiro. **Anais...** Em: CILAMCE, Florianópolis, Santa Catarina. 2017.

SHU, RONGHUA; YIN, TUBING; LI, XIBING. Effect of Heating Rate on the Dynamic Compressive Properties of Granite. **Geofluids**, v. 2019, 2019.

SKARŻYŃSKI, Ł.; SYROKA, E.; TEJCHMAN, J. Measurements and Calculations of the Width of the Fracture Process Zones on the Surface of Notched Concrete Beams. **Strain**, v. 47, p. 319-332. 2011.

SOARES, F. S.; ITURRIOZ, I. Simulação da propagação subcrítica de fissuras em materiais quase frágeis aplicando uma versão do método de elementos discretos formados por barras. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, p. 153-162, 2015.

SUTTON M. and CHAO Y. Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision digital image correlation. **TAPPI Journal**, p 153-156, 1986.

TANG, C. A. et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in TANG, T. Effects of Load-Distributed Width on Split Tension of Unnotched and Notched Cylindrical Specimens. **Journal of Testing and Evaluation**, [s.l.] v. 22, n. 5, p. 401-409, Set. 1994.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. Theory of elasticity. 2ª Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity. **International Journal of Rock**. 1951.

VILLAR, E. G. **Efecto de la temperatura em la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas.** (Minor Thesis) 66 f. Departamento d'Infraestructura del Transport i del Territori, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2006.

WANG QZ, JIA XM, KOU SQ, ZHANG ZX, LINDQVIST PA. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. **Int J Rock Mech Min Sci** 41(2):245–253. 2004.

XU G, CHEN F, XIAO JQ. **Influência da condição de contato carga sobre balançar resistência à tracção.** Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chin J Rock Mech Eng 25 (1): 168-173. 2006.

YANG, F., MA, H., JING, L., ZHAO, L., & WANG, Z. Dynamic compressive and splitting tensile tests on mortar using split Hopkinson pressure bar technique. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 12, n. 4, p. 730-746, 2015.

YONEYAMA, S.; MURASAWA, G. **Digital Image Correlation. Experimental Mechanics. Sample Chapters**, In: Encyclopedia of Life Support Systems. [s.l.] 2009. Não paginado. Disponível em: <<http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-194-04.pdf>> Acesso em: 10 de novembro 2019, 15:22.

ZENG X, WEI Y. Deflexão rachadura em meios quebradiços com heterointerfaces de geneous e sua aplicação em fracking xisto. **J Mech Phys Sólidos** 101: 235-249. 2017.

ZHAO, Shijun; ZHANG, Qing; LIU, Limin. Crack Initiation, Propagation, and Coalescence Experiments in Sandstone Brazilian Disks Containing Pre-Existing Flaws. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

ZHAO, Shijun; ZHANG, Qing; LIU, Limin. Crack Initiation, Propagation, and Coalescence Experiments in Sandstone Brazilian Disks Containing Pre-Existing Flaws. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

ZHOU J, ZHANG L, PAN Z, Z HAN. Estudo numérico de Fluidos impulsionado propagação de fractura quase furo na rocha reservatório laminado utilizando PFC 2D. **J Nat Gás Sci Eng** 36: 719-733. 2016.

ZHU WC, TANG CA. Simulação numérica de disco brasileiro falha rocha sob carga estática e dinâmica. **Int J Mech Rocha min Sci** 43 (2): 236-252. doi: 10.1016 / j.ijrmmms.2005.06.008. 2006.