

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FAGNER FERNANDES DA SILVA

**USO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO**

**Alegrete
2015**

FAGNER FERNANDES DA SILVA

**USO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Luis Eduardo Kostascki

**Alegrete
2015**

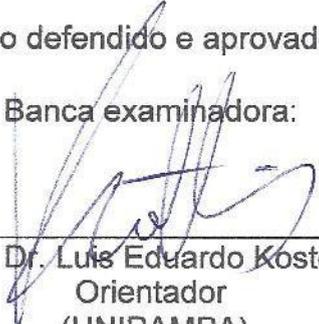
FAGNER FERNANDES DA SILVA

**USO DE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02 de DEZEMBRO de 2015.

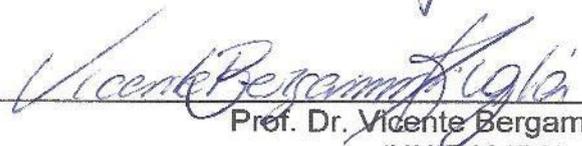
Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Ederli Marangon
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia
(UNIPAMPA)

RESUMO

O ensaio de tração por compressão diametral, também conhecido como o ensaio brasileiro de tração é o mais utilizado para descobrir a resistência à tração do concreto. Isto se dá pela facilidade de ensaio e pelo seu baixo custo em relação aos outros ensaios. Este consiste em comprimir a lateral de um corpo de prova de forma que o mesmo rompa por tração. Nas superfícies entre o corpo de prova e a máquina de ensaios universais recomenda-se o uso de tiras de madeira para que a carga se distribua melhor ao longo do material estudado. A largura da tira de madeira influencia diretamente no resultado final de resistência. Uma forma de análise que vem crescendo ao longo dos anos é a utilização de métodos numéricos na fratura de corpos de vários materiais, dessa forma, este trabalho faz o uso de Métodos de Elementos Discretos e Métodos de Elementos Finitos para o estudo do ensaio brasileiro de tração. Os resultados encontrados mostram que com o aumento de largura da tira até uma relação entre o diâmetro do corpo de prova sobre a largura da tira de 0,25; há um aumento da resistência à tração por compressão diametral. Após esta relação, há uma queda na resistência à tração indireta. Os valores de resistência com diferentes tamanhos de módulos foram muito aleatórios, não podendo assim afirmar o real comportamento do corpo de prova ao alterá-los. Nas simulações, as fissuras se propagaram de forma vertical, sempre das regiões em contato com a tira da madeira para o centro do corpo de prova.

Palavras chaves: Tiras de madeira, ensaio brasileiro de tração, métodos numéricos.

ABSTRACT

The tensile by diametrical compression test, also known as Brazilian tensile test is the most utilized to find the tensile resistance of the concrete, because it is an ease test and have a low cost compared to other tests. Such a test consist in a radial compression of a sample until it breaks by tensile. On the surfaces between the sample and the universal testing machine is recommend the use of wooden strips so the load is distributed in a better way over the material of study. The width of the wood strip directly influence the results of the resistance test. One way of analysis that has been growing over the years is the use of numerical methods in fracture bodies of various materials, so in this work is used the Discrete Element Method and the Finite Element Method for the study of the Brazilian tensile test. The results obtained shows that the tensile by diametrical compression resistance increases with the increment of the width of the wood strip, until a relation between the diameter and width of the sample of 0,25; after this value the direct tensile resistance decrease. A random set of resistance values for the different modules size tested were found, not allowing a description of the real behavior of the tested samples. In the simulations, the cracks propagated vertically, form the zone in contact with the wood strip to the center of the sample.

Keywords: Wood stripes, brazilian tensile test, numerical methods.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 Ensaio de Resistência à Tração do Concreto	9
2.1.1 Ensaio de Tração Axial.....	9
2.1.2 Ensaio de Tração na Flexão.....	10
2.1.3 Ensaio de Tração por Compressão Diametral	13
2.2 Relação entre a Resistência à Tração Direta e à Tração Indireta	15
2.3 Trabalhos Relacionados à Pesquisa	16
2.3.1 Rocco et al (1999).....	16
2.3.2 Falcão e Soares (2002)	18
2.3.3 Riera, Miguel e Iturrioz (2014).....	20
2.3.4 Estudo de Marques (2015).....	21
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 Método dos Elementos Discretos Formado por Barras	24
3.2 Lei Constitutiva Bi linear	26
3.3 Interação do MED e MEF Implementado no Ambiente do Sistema Abaqus.....	31
3.3.1 Modelagem da Trelça Espacial	31
3.3.2 Massa da Trelça Espacial	32
3.3.3 Inserção do Modelo Constitutivo no Abaqus	33
3.3.4 Adição de Aleatoriedade	34
4 MODELAGEM DO CASO DE ESTUDO.....	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1 Tensão de tração indireta versus Deformação Horizontal.....	40
5.2 Tensão de ruptura de tração indireta versus relação β	43
5.3 Energia versus Deformação.....	45
5.4 Forma de Ruptura	49
5.4.1 Caso I.....	49
5.4.2 Caso II	50
5.4.3 Caso III	52
5.4.4 Caso IV	53
5.4.5 Caso V	55

5.4.6 Caso VI.....	56
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1 Conclusões.....	58
6.2 Trabalhos Futuros	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Existem três ensaios de resistência à tração do concreto, o ensaio de tração axial, o de tração por flexão e o de tração por compressão diametral. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral também conhecido mundialmente como ensaio brasileiro de tração é o mais empregado e através dele encontra-se a resistência à tração indireta do concreto, já que para se obter tração aplica-se compressão.

O ensaio brasileiro de tração consiste na aplicação de carregamento uniaxial de compressão, ocorrendo dessa forma esforço de tração transversal, que é dissipada ao longo do diâmetro na direção vertical. Para uma melhor distribuição da força aplicada pela máquina de ensaios universais, utiliza-se duas tiras de madeiras entre o corpo de prova e a máquina, uma acima do corpo e outra abaixo (NBR 7222, ABNT, 2011).

Durante anos estudou-se ensaios de falhas no concreto, porém pelo fator escala e pela heterogeneidade do concreto, sua largura e rigidez não se obtinha resultados com boa precisão (MIGUEL; ITURRIOZ; RIERA, 2014). Através de estudos de métodos numéricos se faz possível simular ensaios indestrutíveis do concreto no próprio ambiente de trabalho.

Os métodos numéricos utilizados são o Método dos Elementos Discretos (MED) em conjunto com o método dos elementos finitos (MEF). O MED forma uma treliça espacial desenvolvida por cubos, onde estes são compostos por barras. Pelo fato deste método não haver flexibilidade, faz-se o uso do MEF utilizando o software Abaqus (KOSTESKI, 2012).

O objetivo geral desta pesquisa é a realização do estudo do ensaio de resistência à tração por compressão diametral por meio de simulações numéricas.

Os objetivos específicos do estudo são:

- a) Encontrar resultados de tração indireta do concreto convencional através de simulações;
- b) Observar o modo de ruptura das modelagens de corpos de prova;
- c) Avaliar a influência da mudança de largura das chapas de madeira nos resultados de tração indireta;

- d) Analisar a influência da mudança no tamanho do módulo¹ das modelagens de corpos de prova das simulações nos resultados de tração indireta;

A importância da pesquisa dá-se ao fato de que, através do ensaio pode-se quantificar a resistência à tração do concreto convencional e também que os resultados são baseados em hipóteses ainda simplificadoras, como sobre a homogeneidade do material, podendo assim ser mais explorados.

O estudo do ensaio faz-se bastante interessante, pois vários fatores influenciam diretamente no valor de resistência encontrado, como por exemplo as tiras de madeira e a velocidade de execução do ensaio.

¹ Comprimento de cada barra do cubo básico, ou distância entre dois nós.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

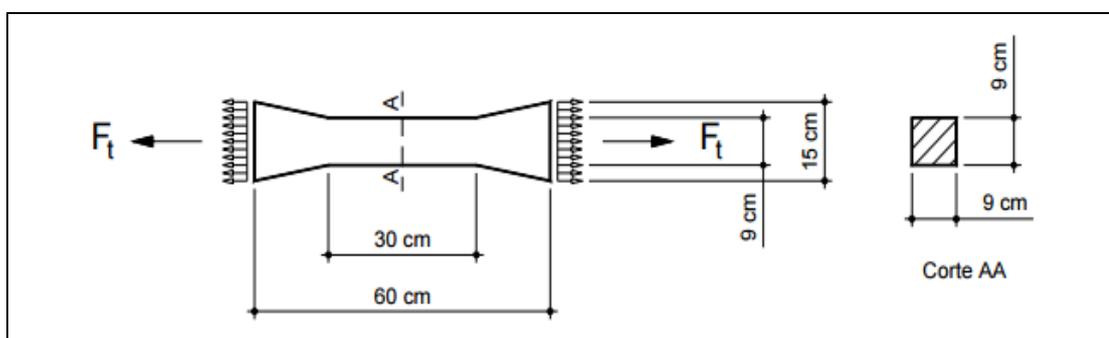
2.1 Ensaios de Resistência à Tração do Concreto

A determinação da resistência à tração do concreto pode ser encontrada por três diferentes ensaios, o ensaio de tração axial, o ensaio de tração na flexão e o ensaio de tração por compressão diametral (ARAÚJO, 2001).

2.1.1 Ensaio de Tração Axial

Através deste ensaio pode-se encontrar a resistência direta à tração, porém não possui normalização no Brasil, mesmo assim, a NBR 6118 (ABNT, 2014) utiliza o valor de tração direta para o cálculo de fissuração do concreto. Conforme Pinheiro, Muzardo e Santos (2007), o corpo de prova possui uma área central menor do que nas bordas, suas dimensões mais usuais estão representadas na Figura 1.

Figura 1 - Corpo de Prova para o Ensaio Tração Axial



Fonte: Isaia (2005, p. 623)

A fórmula da resistência à tração direta do concreto está expressa pela Equação 1:

$$f_{ct} = \frac{F_t}{A_{ct}} \quad \dots(1)$$

Sendo:

f_{ct} = Resistência à tração (MPa)

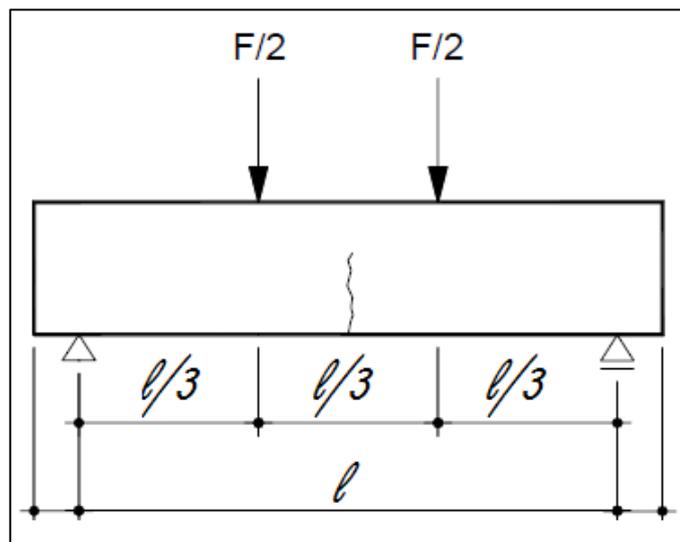
F_t = Força de tração aplicada (N)

A_{ct} = Área da seção transversal (mm²)

de prova em sua seção de ruptura, desta forma é possível determinar a largura e altura média. As dimensões finais devem ser o resultado da média de três determinações.

Conforme Isaia (2005), a ruína do corpo de prova no ensaio de tração na flexão acontece através da ruptura do concreto na região entre as duas forças aplicadas (Figura 3). Neste local, o momento fletor é o máximo e as forças cortantes são praticamente zero.

Figura 3 – Ruptura na região onde o momento é máximo



Fonte: Modificado de Isaia (2005)

Para a consideração anterior, utiliza-se a Equação 2:

$$f_{ct,f} = \frac{FL}{bd^2} \quad \dots(2)$$

Sendo:

$f_{ct,f}$ = Resistência à tração na flexão (MPa)

F = Força aplicada (N)

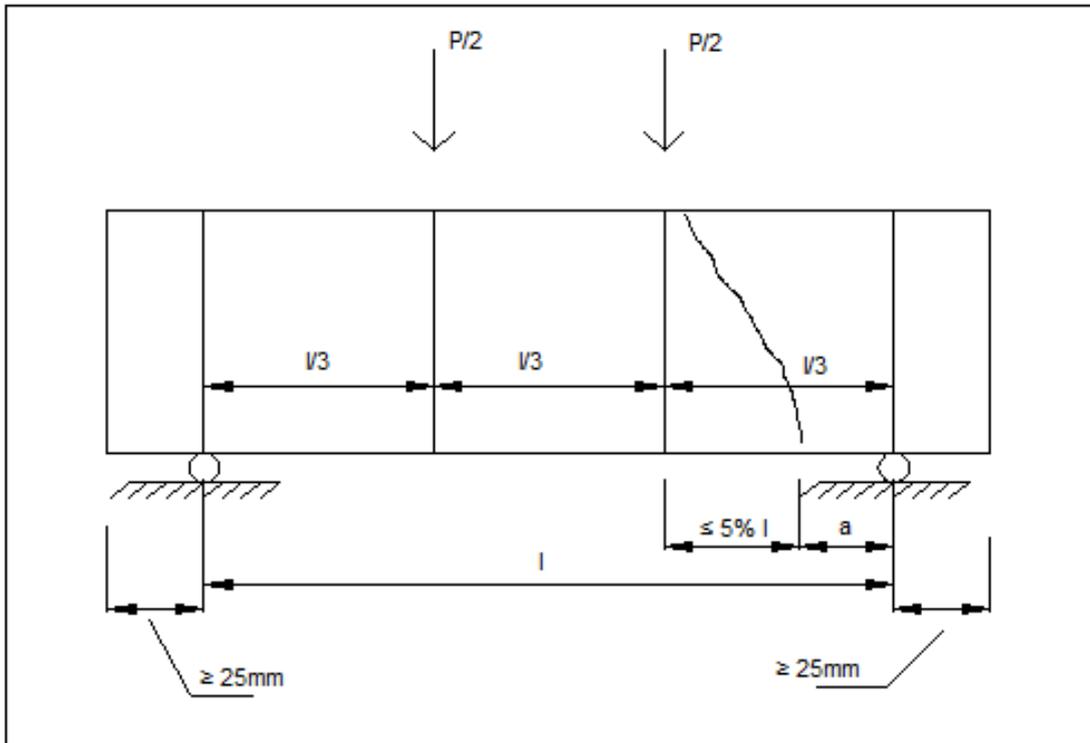
L = Comprimento do vão (mm)

b = Largura do corpo de prova (mm)

d = Altura do corpo de prova (mm)

Se a ruptura ocorrer fora do terço médio, a uma distância do local onde aplica-se uma das forças for inferior ou igual a 5% do comprimento do vão (Figura 4), utiliza-se a Equação 3.

Figura 4 – Ruptura fora da região onde o momento é máximo



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010, p. 4)

$$f_{ct,f} = \frac{3Fa}{bd^2} \quad \dots(3)$$

Sendo:

$f_{ct,f}$ = Resistência à tração na flexão (MPa)

F = Força aplicada (N)

b = Largura do corpo de prova (mm)

d = Altura do corpo de prova (mm)

a = Distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm)

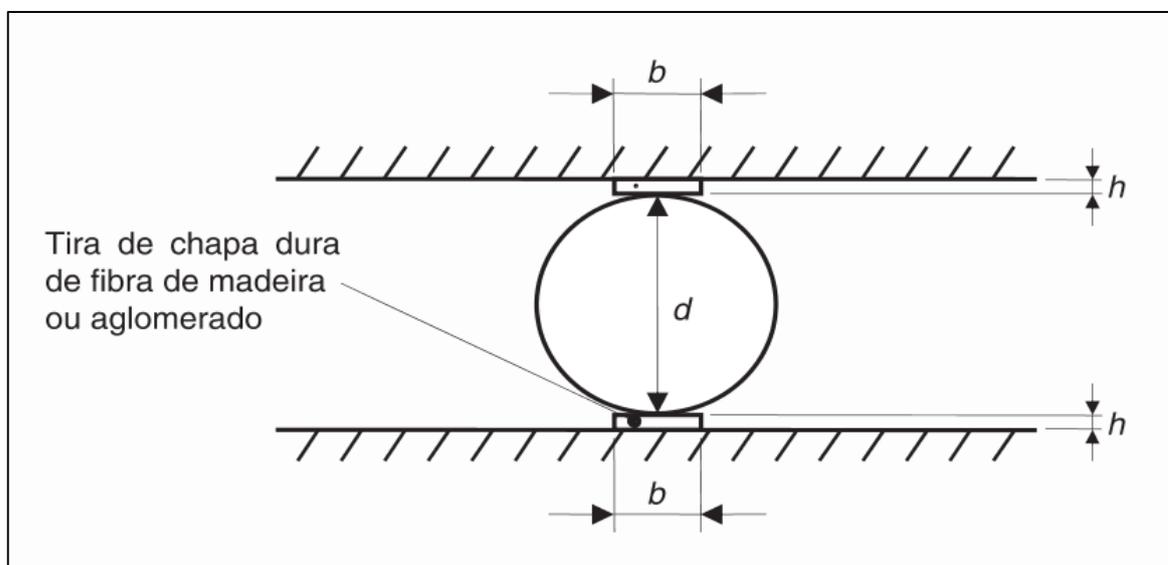
2.1.3 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Também conhecido como ensaio brasileiro de tração, este experimento é o mais utilizado para a obtenção de resultados de tração do concreto. Uma das razões por ser tão disseminado dá-se ao fato de que o ensaio é de baixo custo e por possuir tamanha semelhança ao ensaio de compressão axial.

A aparelhagem para este teste pode ser definida pela NBR 5739 (ABNT, 2007) e pela NBR 7215 (ABNT, 1996). A moldagem dos corpos de prova é determinada pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), neste ensaio são retirados resultados de resistência à tração de forma indireta, onde o ensaio consiste basicamente em colocar um corpo de prova na posição horizontal apoiada por duas chapas de madeira sobre o prato da máquina de compressão, conforme verifica-se na Figura 5. Deve-se aplicar a carga sem choques e de forma continuamente, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

Figura 5 – Ensaio brasileiro de tração



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

Conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), as tiras de madeira devem possuir base (b) de 0,15 vezes o diâmetro (d), podendo haver uma variação de 0,01 mm e a altura deve ser 3,5 mm e sua variação pode ser até 0,5 mm.

A resistência à tração por compressão diametral é encontrada através da Equação 4:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad \dots(4)$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração indireta (MPa)

F = Força aplicada (N)

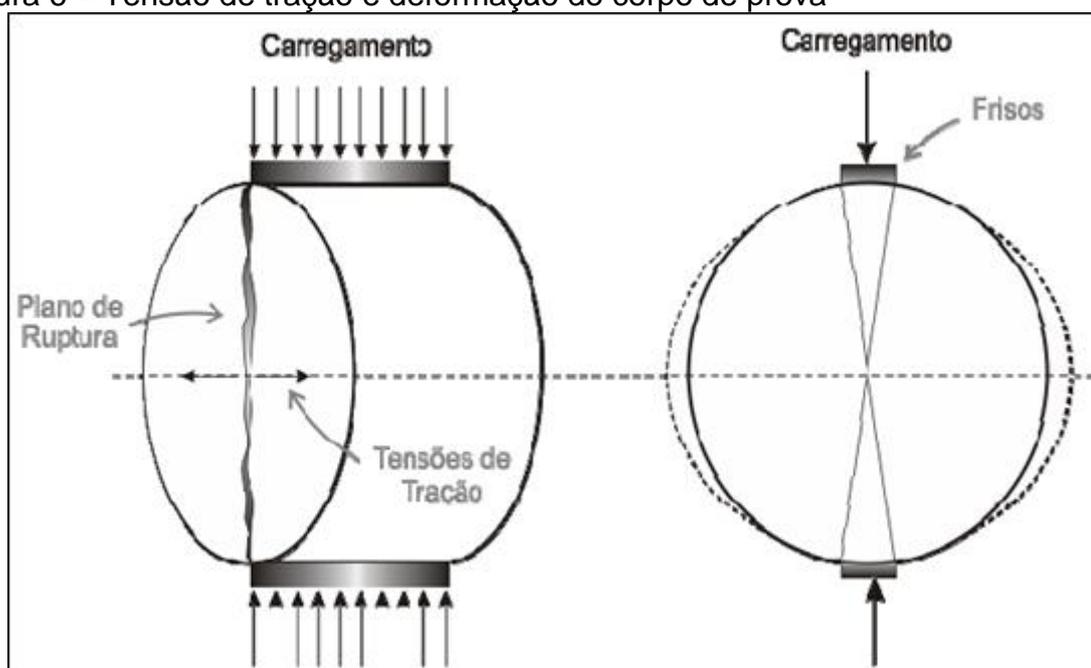
L = Comprimento do vão (mm)

d = Altura do corpo de prova (mm)

De acordo com Falcão e Soares (2002), o resultado de tração deste ensaio não é direto pois o cilindro solicitado à compressão diametral não se encontra em um estado uniaxial, já que o diâmetro do corpo de prova não está submetido apenas por tensões de tração.

Segundo Sena (2013), a deformação não depende apenas da tensão de tração atuante, pois a tensão de tração ocorre de maneira constante por todo diâmetro solicitado, já a deformação máxima na extremidade e mínima no centro do corpo de prova. Isso acontece porque a deformação possui influência da tensão de compressão que age transversalmente à superfície. Na Figura 6, podem ser observadas a tensão de tração (à esquerda) e a deformação do corpo de prova (à direita).

Figura 6 – Tensão de tração e deformação do corpo de prova



Fonte: Brito (2006, p. 11)

Como já citado, para a realização do ensaio necessita-se chapas de madeira nas extremidades onde o corpo de prova recebe o carregamento, como pode ser observado pela Figura 6. De acordo com Conterato (2011), essas tiras são inseridas para impedir que haja pontos de elevadas tensões de compressão nos extremos do diâmetro vertical do corpo de prova, impedindo assim que ocorra puncionamento.

2.2 Relação entre a Resistência à Tração Direta e à Tração Indireta

Existem várias bibliografias que citam a relação entre a resistência à tração axial e à tração por compressão diametral. Para realização da pesquisa serão utilizadas as considerações dadas por Mehta e Monteiro (2008), pelo Comitê Euro-Internacional de Concreto (CEB/90, 1993) e por Rocco et al (1999).

Mehta e Monteiro (2008) concluíram que o ensaio de tração por compressão diametral superestima de 10 a 15% o ensaio de tração direta.

As resistências à tração direta e a indireta foram também relacionadas pela CEB/90 (1993) e são expressas pela Equação 5.

$$f_{ct} = 0,9f_{ct,sp} \quad \dots(5)$$

De acordo com Rocco et al (1999), a relação entre as resistências à tração indireta e direta (Equação 6) dá-se por um fator de relação, que depende da largura da tira de madeira e do diâmetro do corpo de prova.

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ct}}{(1 - \beta^2)^{3/2}} \quad \dots(6)$$

Onde

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração indireta (MPa)

f_{ct} = Resistência à tração direta (MPa)

β = Fator de relação

Este fator de relação é expresso pela Equação 7.

$$\beta = \frac{l}{D} \quad \dots(7)$$

β = Fator de relação

l = Largura da tira de madeira (mm)

D = Diâmetro do corpo de prova (mm)

2.3 Trabalhos Relacionados à Pesquisa

2.3.1 Rocco et al (1999)

O artigo estuda o ensaio brasileiro de tração no concreto. A pesquisa foi realizada experimentalmente e teve por objetivo analisar os efeitos de alteração de largura da chapa de madeira e alteração nas dimensões do corpo de prova.

Testou-se 2 materiais, argamassa, com o traço da argamassa em peso igual a 1:0,5:3 (cimento: água: areia) e rocha de granito.

Para argamassa foram confeccionadas amostras prismáticas, de seção quadrada. O tamanho (D) destas foram de 17 mm, 38 mm, 75 mm, 150 mm e 300 mm e todas com 50 mm de espessura. Para o granito, moldou-se corpos de prova cilíndricos com espessura de 30 mm. Seus diâmetros (D) foram de 30 mm, 60 mm, 120 mm e 240 mm. As tiras para o ensaio eram de madeira compensada, com 3 mm de espessura e comprimento igual a cada corpo de prova ensaiado. As larguras (b) ensaiadas foram nas proporções b/D de 0,04; 0,08; e 0,16.

Tabela 1 –Dados e resultados do ensaio para a argamassa

D (mm)	B/d (%)	Nº teste	$f_{ct,sp}$ (MPa)	s^2 (MPa)	C_v^3 (%)
300	16	2	3,87	0,07	1,8
150	16	4	3,96	0,18	4,6
150	8	3	3,78	0,11	2,9
150	4	3	3,70	0,04	1,0
75	16	4	4,03	0,09	2,1
75	8	4	3,81	0,15	3,9
75	4	4	3,73	0,07	1,9
37	16	3	4,36	0,14	3,3
37	8	4	3,95	0,13	3,3
17	16	3	5,04	0,20	3,9

Fonte: Rocco et al (1999, p. 213)

Tabela 2 – Dados e resultados do ensaio para o granito

D (mm)	B/d (%)	Nº teste	$f_{ct,sp}$ (MPa)	s (MPa)	C_v (%)
240	16	3	10,39	0,26	4.4
120	16	4	10,41	0,15	1.5
120	8	4	10,12	0,28	2.8
120	4	4	10,05	0,18	1.8
60	16	4	10,76	0,05	0.5
60	8	4	10,24	0,19	1.9
60	4	4	10,15	0,7	0.7
30	16	6	11,03	0,09	0.8
30	8	3	10,43	0,13	1.2

Fonte: Rocco et al (1999, p. 213)

² Desvio Padrão

³ Coeficiente de Variação

A resistência à tração indireta medida no ensaio de tração por compressão diametral depende do tamanho da amostra e da largura da tira de suporte de carga. De acordo com o tamanho do modelo e a largura da tira, foram encontradas diferenças de até 30% do valor da resistência à tração indireta para um dado material.

Ao analisar a Tabela 1 e a Tabela 2, pode-se observar que à medida que o D aumenta, o $f_{ct,sp}$ diminui. Também é possível observar que a medida que aumenta-se a relação b/D , o $f_{ct,sp}$ também aumenta.

É importante notar que, como consequência do efeito da largura das tiras de madeira, a força de tração medida em amostras do mesmo tamanho podem diferir consideravelmente, especialmente para as pequenas amostras.

2.3.2 Falcão e Soares (2002)

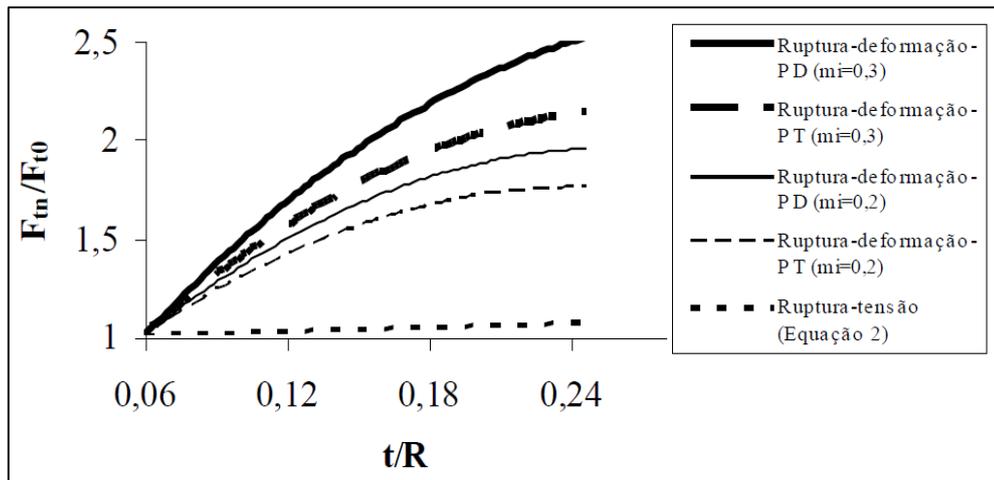
O artigo analisa a influência das dimensões dos frisos metálico utilizado no ensaio de compressão diametral através dos resultados de ensaios realizados em misturas asfálticas, solo-cimento e concreto-cimento.

Na realização do ensaio preparou-se frisos metálicos com diferentes larguras, um com largura sendo equivalente à metade do diâmetro do corpo de prova, outro com a largura igual ao diâmetro e outro que simulasse a compressão concentrada. Para cada mistura foram confeccionados 5 corpos de prova onde tiveram cerca de 15% de variações em sua média.

Em misturas asfálticas, havia sido observada a formação de trincas pouco perceptível no corpo de prova antes do registro da força máxima. A hipótese estudada foi que a força máxima inicia o processo de falha pelo ponto submetido à deformação máxima. A propagação das trincas acontece até a ruptura total do corpo de prova, onde então acontece um decréscimo da força aplicada.

Realizando as divisões da largura (t) pelo raio (R) e a divisão da força máxima de ruptura para qualquer t/R (F_{tn}) pela força máxima de ruptura para t/R igual a 0,06 (F_{t0}), encontra-se uma forma de verificar a limitação da resistência à tração indireta para caracterizar a ruptura de um material elástico. Isto pode ser verificado, apenas quando ruptura se inicia no centro do corpo de prova por possuir tensão de tração máxima.

Gráfico 1 – Misturas asfálticas

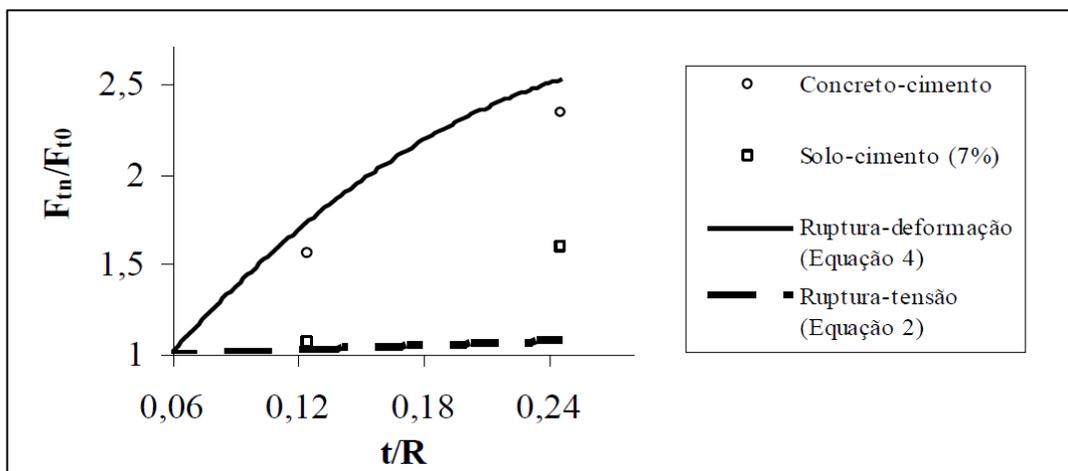


Fonte: Falcão e Soares (2002, não paginado)

O Gráfico 1 apresenta a comparação dos critérios de ruptura por resistência à tração e deformação crítica para ensaios em misturas asfálticas. Estes materiais possuem coeficientes de Poisson diferentes, um de 0,2 e outro com 0,3. As forças de rupturas maiores necessitam de friso com larguras maiores, sendo esta tendência mais relevante ao considerar o parâmetro de deformação crítica. As curvas que representam o critério deformação crítica foram obtidas considerando-se os estados planos de deformação (PD) e de tensão (PT).

Para misturas cimentadas, foram moldadas misturas de solo laterítico com teor de cimento de 7% (solo-cimento) e corpos-de-prova de concreto-cimento.

Gráfico 2 – Misturas cimentadas



Fonte: Falcão e Soares (2002, não paginado)

O Gráfico 2 apresenta a comparação dos critérios de ruptura por resistência à tração e deformação crítica para ensaios em misturas cimentadas.

Através de análise do Gráfico 2, conclui-se que quanto maior for a largura dos frisos, menor é o valor de tração indireta encontrado. Dependendo da largura dos frisos, pode ocorrer primeiramente ruptura por cisalhamento, assim, parece que a trinca inicial partiu das extremidades do corpo de prova, não se propagando sobre o diâmetro solicitado. Em virtude dos fatos mencionados, a resistência ao cisalhamento de um material pode influenciar na força máxima necessária ao cálculo da resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral.

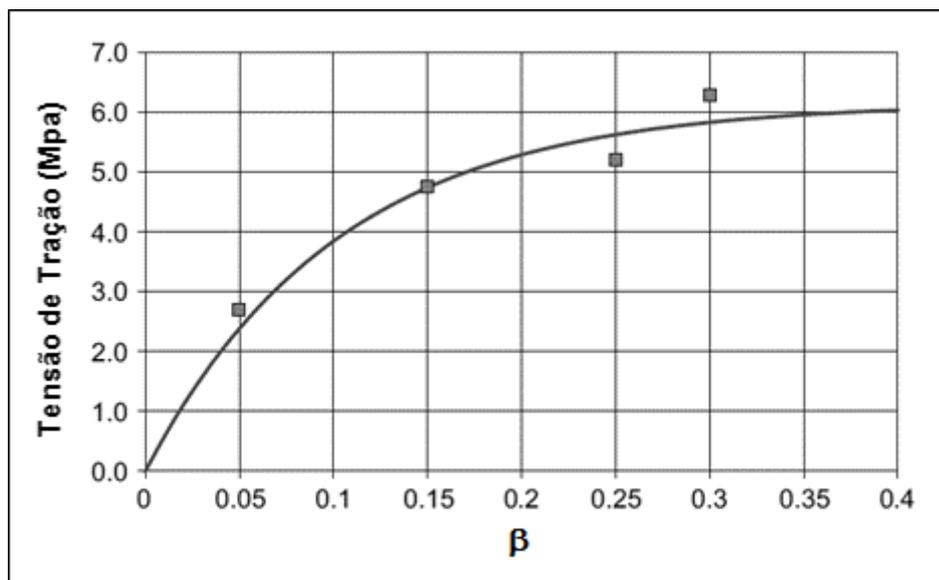
2.3.3 Riera, Miguel e Iturrioz (2014)

O artigo apresenta o estudo da influência dos frisos de madeira nos resultados encontrados no ensaio brasileiro de tração em concreto, sendo realizado através da aplicação do método dos elementos discretos.

O ensaio realizado por meio de simulações numéricas utilizou corpos de provas cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura. As propriedades do concreto foram o módulo de elasticidade E igual a 29,43 GPa, a densidade ρ de 2266,7 kg/m³, o valor médio da energia de fratura $\mu(G_f)$ de 130 N/m, o coeficiente de variação da energia de fratura $CV(G_f)$ de 50%, o fator de falha R_{fc} de 3, o tamanho do módulo L de 7,5 mm e o comprimento do espaço de aleatoriedade l_c de 4L.

Considerou-se cinco casos para os corpos experimentados: caso A, onde os deslocamentos controlados ao longo da linha central, simulando o carregamento em uma faixa de largura, $\beta = l/D = 0,05$; caso B, deslocamentos controlados em linhas dos três nós centrais, $\beta = 0,15$; caso C, muito semelhante ao caso B, porém contendo restrições dos deslocamentos laterais dos nós com cargas; caso D, com deslocamentos controlados em faixas com cinco nós, $\beta = 0,25$ e caso E, com sete nós, $\beta = 0,30$. Onde β é a divisão da largura dos frisos de madeiras (l) pelo diâmetro (D) do corpo de prova.

Gráfico 3 – Tensão de tração indireta média x β



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

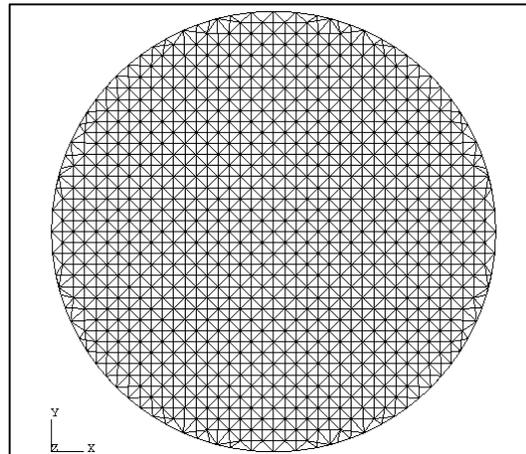
Para um bom resultado foram executadas cinco simulações para cada caso, onde no Gráfico 3 representa tensão de tração pelo β , analisando o gráfico é possível identificar que quanto maior é a largura das tiras de madeira, maior é sua tensão de tração indireta até uma relação de β igual a 0,4. A resistência á tração indireta tende a estabilizar a partir da relação β igual a 0,4.

2.3.4 Estudo de Marques (2015)

O corpo de prova (CP) cilíndrico simulado foi de concreto, com dimensões de 150 mm de diâmetro D e 300 mm de altura H . Suas propriedades foram, módulo de elasticidade E igual a 29,43 GPa, a densidade ρ de 2266,7 kg/m³, o valor médio da energia de fratura $\mu(G_f)$ de 130 N/m, o coeficiente de variação da energia de fratura $CV(G_f)$ de 50%, o fator de falha R_{fc} de 3, o tamanho do módulo L de 7,5 mm e comprimento do espaço de aleatoriedade l_c de 4L.

Para programação base do MED utilizou-se o software Matlab, dessa maneira foi possível gerar corpo de prova prismático, que foi modificado para uma seção cilíndrica. Para a formação de um corpo cilíndrico, gerou-se um círculo com diâmetro igual a 150 mm. Logo, eliminaram-se as barras localizadas fora desse círculo. As barras internas próximas ao círculo foram deslocadas para o mesmo, de forma que não alterassem a rigidez de ligação.

Figura 7 – Forma do corpo de prova simulado

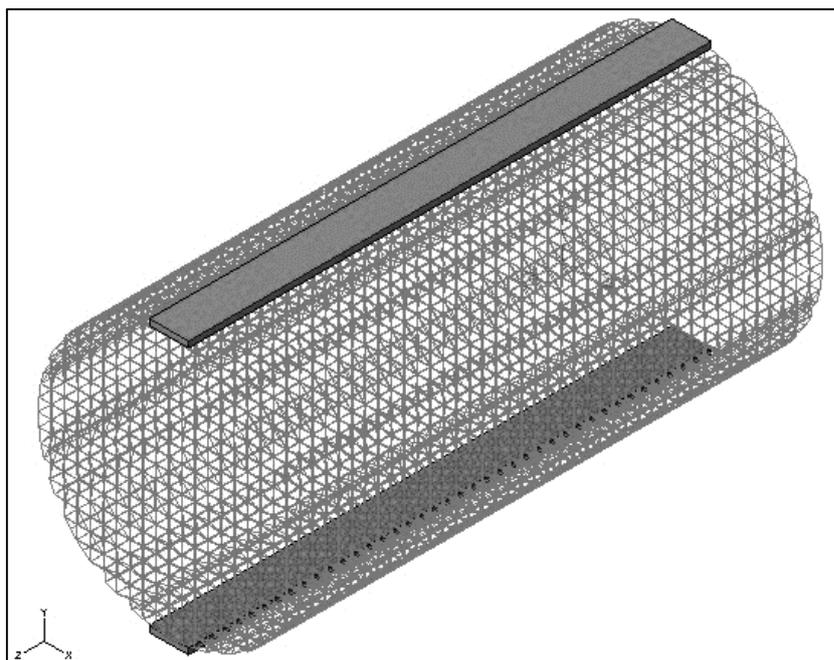


Fonte: Marques (2015, p. 40)

A Figura 7 mostra o corpo de prova simulado por Marques (2015), nota-se que nas proximidades da superfície possui uma aproximação das barras ao círculo como citado anteriormente.

Após a realização da programação do DEM no Matlab, o arquivo foi exportado para o Abaqus. Assim, podem ser modeladas no Abaqus as tiras de madeira necessárias no ensaio com módulos de elasticidade perpendicular às fibras de 0,975 GPa e 1,225 GPa, sendo elas de classe C40 e C60, respectivamente.

Figura 8 - Modelo de simulação



Fonte: Marques (2015, p. 42)

A Figura 8 representa o modelo de simulação esperado neste estudo, interagindo concreto com as chapas de madeira. Estas chapas de madeiras tiveram dimensões variáveis, de forma que pudesse analisar a influência de suas larguras nos resultados da resistência à tração indireta dos corpos de prova.

Na Tabela 3 estão apresentados os casos estudados por Marques (2015).

Tabela 3 - Simulações realizadas por Marques (2015)

Nome	β	Madeira	Espessura (mm)	Encaixe
Caso 1	0,15	C-20	3,5	Não
Caso 2	0,15	C-60	3,5	Não
Caso 3	0,15	C-60	3,5	Sim
Caso 4 (malha 45°)	0,15	C-60	3,5	Sim
Caso 5	0,25	C-20	3,5	Não
Caso 6	0,25	C-60	3,5	Não
Caso 7	0,25	C-60	3,5	Sim
Caso 8	0,3	C-20	3,5	Não
Caso 9	0,3	C-60	3,5	Não
Caso 10	0,3	C-60	3,5	Sim
Caso 11	0,3	C-20	7,0	Não
Caso 12	0,3	C-60	7,0	Não

Fonte: Marques (2015, p. 44)

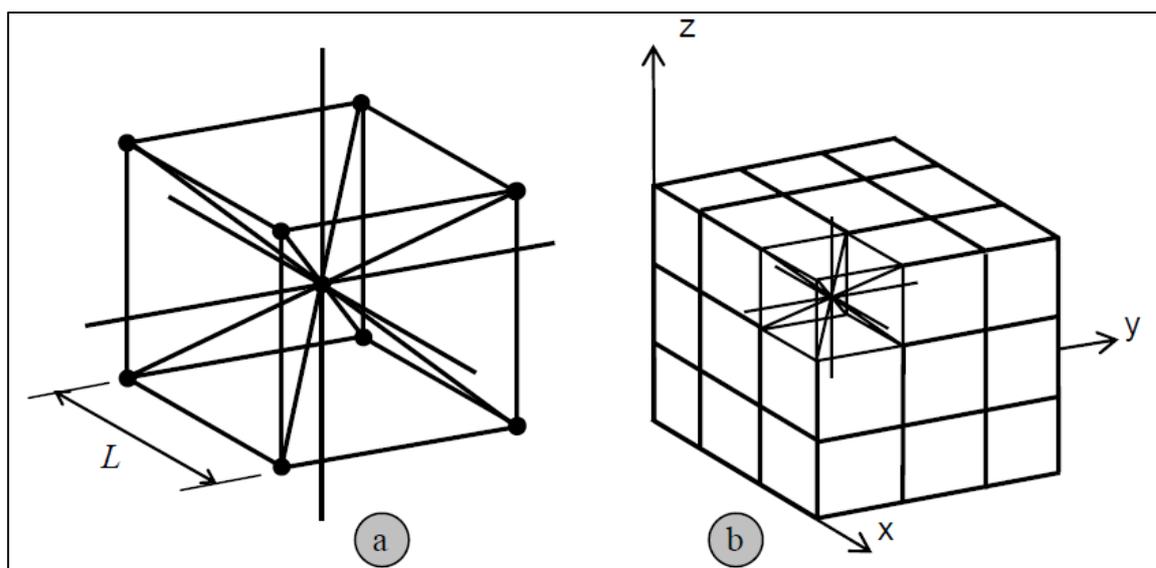
Segundo o Marques (2015), pode-se observar que a tira influencia consideravelmente na tensão de ruptura do corpo de prova, porém em seu estudo não foi possível descobrir a relação β ideal para o ensaio. Também concluiu, que as fissuras se propagaram das extremidades em contato com a tira para o centro do diâmetro, ocorrendo assim ruptura e que quanto maior a resistência da madeira, encontram-se melhores resultados.

3 METODOLOGIA

3.1 Método dos Elementos Discretos Formado por Barras

O Método dos Elementos Discretos (MED) é representado por uma forma cúbica, onde esta geometria constitui-se por outras configurações cúbicas (módulos básicos). O módulo básico é formado por 20 barras, nas quais possuem a função de suportar apenas cargas axiais e por 9 nós (encontro das barras), locais onde as massas ficam concentradas. Cada nó possui três graus de liberdade, o qual corresponde aos componentes do vetor de deslocamento em um sistema de referência global (KOSTESKI, 2012).

Figura 9 – Representação do MED



Fonte: Kostascki (2012, p. 37)

Na Figura 9a, pode-se observar como é formado o módulo básico. Já na Figura 9b, é mostrado a forma cúbica básica com suas configurações cúbicas.

As equações da área transversal dos elementos longitudinais para materiais elásticos isotrópicos e a área diagonal são expressas pela Equação 8 e pela Equação 9, respectivamente:

$$A_l = \phi L^2 \quad \dots(8)$$

Sendo:

A_l = Área transversal dos elementos longitudinais (cm²)

ϕ = Coeficiente expresso pela Equação 10

L = Comprimento do módulo básico (cm)

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta \phi L^2 \quad \dots(9)$$

Sendo:

A_l = Área transversal dos elementos longitudinais (cm²)

ϕ = Coeficiente expresso pela Equação 10

δ = Coeficiente expresso pela Equação 11

L = Comprimento do módulo básico (cm)

Os coeficientes ϕ e δ , são expressas pela Equação 10 e Equação 11, respectivamente:

$$\phi = \frac{9 + 8\delta}{18 + 24\delta} \quad \dots(10)$$

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

Onde ν é o coeficiente de Poisson do material.

De acordo com Miguel, Iturrioz e Riera (2014), quando $\nu=0,25$ há uma equivalência completa entre o modelo discreto e um contínuo isotrópico. Quando $\nu \neq 0,25$ aparecem pequenas diferenças para termos de corte.

Para os materiais sólidos, as equações de movimento podem ser determinadas através do somatório das forças que atuam sobre as massas modais, expressa pela Equação 12:

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

Sendo:

M = Matriz de massa

C = Matriz de amortecimento

\ddot{x} = Vetor de aceleração

\dot{x} = Vetor de Velocidade

$F(t)$ = Forças internas

$P(t)$ = Forças externas

Conforme Miguel, Iturrioz e Riera (2014), para os materiais elásticos lineares a estabilidade do método de integração estabelece que o espaço de tempo não extrapole o valor resultante da Equação 13:

$$\Delta t \leq \frac{0,6L}{C_p} \quad \dots(13)$$

A velocidade de propagação de ondas longitudinais é dada pela Equação 14:

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

Sendo:

C_p = Velocidade de propagação de ondas longitudinais

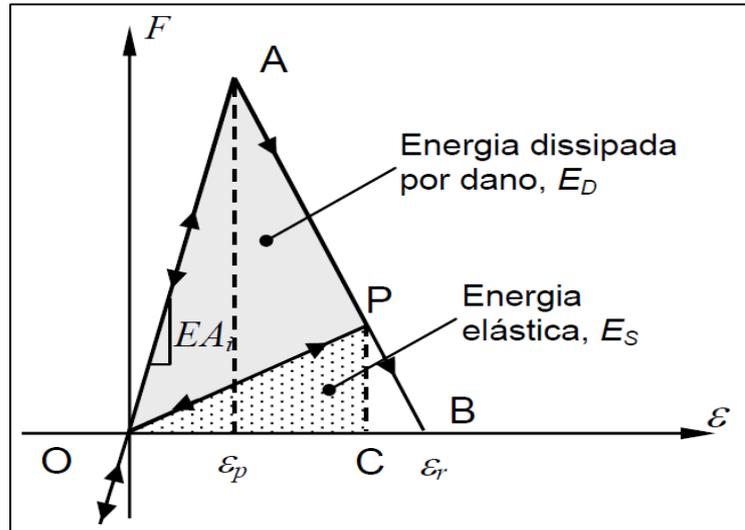
E = modulo de elasticidade

ρ = massa específica

3.2 Lei Constitutiva Bi linear

Conforme Riera e Iturrioz (1995), a lei bi linear analisa a ruptura frágil e, além disso, é possível capturar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação das fissuras, portanto, considera-se a diminuição na capacidade de carga do elemento.

Figura 10 – Relação constitutiva bi linear utilizada no MED



Fonte: Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010, p. 5262)

A Figura 10 demonstra um gráfico força por deformação, onde a área do triângulo OAB representa a densidade de energia necessária para a ruptura da área de influência do elemento, já a área do triângulo OPC é a densidade de energia elástica armazenada no elemento e a área do triângulo OAP representa a densidade de energia por fratura (KOSTESKI; PINTO; ITURRIOZ, 2010).

A Equação 15 apresenta a relação essencial do elemento bi linear.

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} EA_i \varepsilon & se \rightarrow \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ EA_i \varepsilon_p \frac{\varepsilon_r - \varepsilon}{\varepsilon_r - \varepsilon_p} & se \rightarrow \varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_r \\ 0 & se \rightarrow \varepsilon > \varepsilon_r \end{cases} \quad \dots(15)$$

Sendo:

ε = Energia dissipada pela fratura

ε_r = Deformação limite

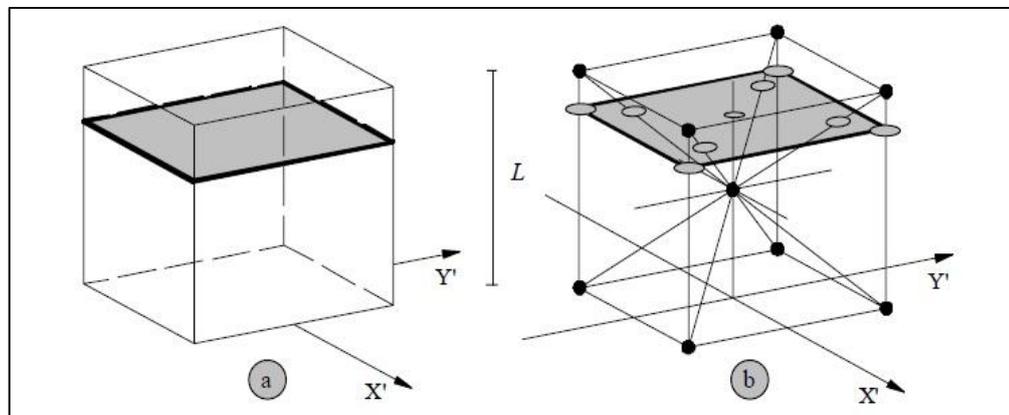
ε_p = Deformação crítica de falha

E = Módulo de elasticidade

A_i = Área da barra longitudinal ou diagonal

De acordo com Maders, Kosteski e Iturrioz (2012), estabelece-se como condição que a energia dissipada pela ruptura do material ininterrupto e sua representação discreta sejam correspondentes, de forma que, possa-se levar em consideração a energia de fratura dissipada no processo de ruptura. Dessa forma, se considera a ruptura do módulo básico com dimensões $L \times L \times L$ (Figura 11a). Em contrapartida, a energia dissipada quando o cubo é fracionado em duas partes leva em consideração a contribuição de cinco elementos longitudinais e quatro elementos diagonais (Figura 11b).

Figura 11 – Modelo Cúbico



Fonte: Kosteski (2012, p. 39)

A Equação 16 expressa a energia dissipada pela fratura de uma amostra ininterrupta de material em razão de uma ruptura paralela a uma de suas faces:

$$\Gamma = G_f \Lambda = G_f L^2 \quad \dots(16)$$

Sendo:

Γ = Energia dissipada pela fratura

G_f = Energia específica de fratura

Λ = Área de fratura atual

A Equação 17 expressa a energia dissipada pelo módulo básico:

$$\Gamma_{MED} = G_f \left(4 \cdot 0,25 \cdot C_A + C_A + 4 \cdot C_A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 \right) L^2 \quad \dots(17)$$

Onde o primeiro termo, a soma dos quatro elementos do eixo, já o termo intermediário, considera o elemento interno e o último termo, as os quatro elementos diagonais. Segundo Kosteski (2012), quando acontece a ruptura de um elemento, originam-se áreas de fraturas equivalentes apontadas na Equação 16, liberando assim, energia de ruptura que depende da área de fratura e da equação constitutiva do material.

Igualando a Equação 15 com a Equação 16, obtém-se que C_A é igual a $3/22$. Assim, tem-se a área de fratura equivalente para as barras longitudinais (A_l^f) e para as barras diagonais (A_d^f), onde são dadas pela Equação 18 e pela Equação 19.

$$A_l^f = \frac{3}{22} L^2 \quad \dots(18)$$

$$A_d^f = \frac{4}{22} L^2 \quad \dots(19)$$

A deformação crítica de falha (Equação 20), localizada no ponto A da Figura 10, é a máxima deformação que o elemento atinge antes do começo do dano. A relação entre a deformação crítica de falha e a energia específica de fratura é dada em termos conceituais da Mecânica de Fratura Linear Estática (RIERA; MIGUEL; ITURRIOZ, 2014).

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad \dots(20)$$

Sendo:

ε_p = Deformação crítica de falha

R_f = Fator de falha

G_f = Energia específica de fratura

E = Módulo de elasticidade

O fator de falha é encontrado através da Equação 21. Segundo Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010), este fator leva em consideração um defeito intrínseco de tamanho a .

$$R_f = \frac{1}{Y\sqrt{a}} \quad \dots(21)$$

Onde Y é um parâmetro adimensional que depende tanto das dimensões do espécime enquanto da trinca.

De acordo com Riera, Miguel e Iturrioz (2014), a deformação crítica é a ocorrência de perda de capacidade de carga do elemento. Através da Equação 22, pode-se relacionar a deformação limite com a deformação crítica de falha. Essa relação se dá pela constante da Equação 23 e segundo Riera e Rocha (1991), seu valor mínimo deve ser 1, de forma que, garanta a estabilidade do algoritmo.

$$\varepsilon_r = K_r \varepsilon_p \quad \dots(22)$$

Sendo:

ε_r = Deformação limite

K_r = Constante Equação 23

ε_p = Deformação crítica de falha

$$K_r = \left(\frac{G_f}{E\varepsilon_p^2} \right) \left(\frac{A_i^f}{A_i} \right) \quad \dots(23)$$

Sendo:

K_r = Constante

G_f = Energia específica de fratura

ε_p = Deformação crítica de falha

E = Módulo de elasticidade

A_i^f = Área de fratura equivalente

A_i = Área da barra longitudinal ou diagonal

3.3 Interação do MED e MEF Implementado no Ambiente do Sistema Abaqus

A ausência de flexibilidade na modelagem de problemas com geometria e condições de contorno complexas é a principal desvantagem do método dos elementos discretos. Numa forma de contornar parte das limitações deste método, faz-se o uso integrado com o método dos elementos finitos através do software Abaqus (PINTO, 2010).

3.3.1 Modelagem da Treliça Espacial

Como informa Kostaski, Pinto e Iturrioz (2010, p. 33), através do método dos elementos finitos de barra tridimensional com 2 nós, com o uso do Abaqus, gera-se a superposição de cubos básico, constituindo assim a treliça espacial. Neste software, a uma seção para cada elemento, onde cada seção atribui-se um tipo de material. No módulo básico, identifica-se quatro tipos de seções distintas, correspondendo a elementos da aresta (Equação 24), nas faces (Equação 25), internos (Equação 26) e diagonais (Equação 27), do modelo global.

$$S^A = \frac{A_l}{4} \quad \dots(24)$$

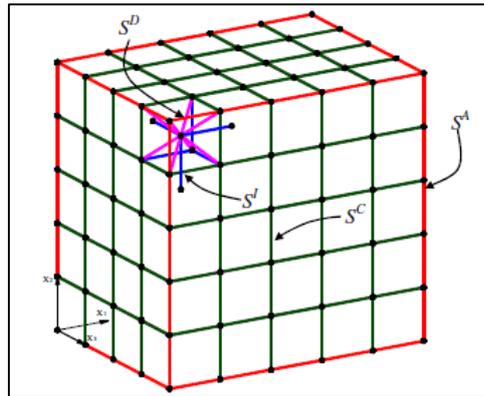
$$S^C = \frac{A_l}{2} \quad \dots(25)$$

$$S^I = A_l \quad \dots(26)$$

$$S^D = A_d \quad \dots(27)$$

Onde A_l e A_d foram definidas pela Equação 8 e pela Equação 9, respectivamente.

Figura 12 – Modelo de treliça espacial



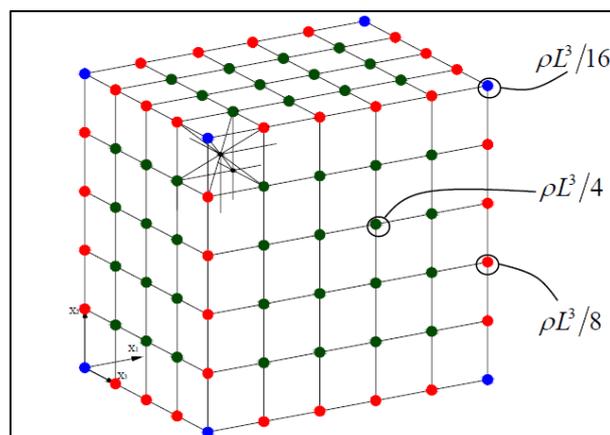
Fonte: Kosteski, Pinto e Iturrioz (2010, p. 5266)

A Figura 12 representa o modelo global, com os elementos da aresta (em vermelho), nas faces (em verde), internos (em azul) e diagonais (em roxo).

3.3.2 Massa da Treliça Espacial

Como já citado no item 3.1, a massa dos elementos concentra-se em cada nó, assim este valor depende do volume de influência de cada nó, onde o volume de um cubo básico representado na Figura 9 é L^3 . Sendo assim, encontra-se a massa multiplicando a densidade com o volume.

Figura 13 – Concentração da massa na treliça espacial



Fonte: Kosteski (2012, p. 99)

Na Figura 13, representa um modelo global onde a massa dos nós das quinas (em azul), os nós das arestas (em vermelho) e os nós das faces (em verde) são expressas pela Equação 28, pela Equação 29 e pela Equação 30, respectivamente.

$$m^q = \frac{\rho L^3}{16} \quad \dots(28)$$

$$m^A = \frac{\rho L^3}{8} \quad \dots(29)$$

$$m^c = \frac{\rho L^3}{4} \quad \dots(30)$$

Onde ρ é a densidade do material.

No Abaqus não é capaz de determinar uma barra com massa igual a zero. Dessa forma, decide-se utilizar a mesma densidade inserida nas massas nodais do MED (KOSTESKI, 2012). Assim, encontra-se a massa das barras centrais e das barras do vértice, respectivamente, pela Equação 31 e pela Equação 32.

$$\frac{\rho L^3}{2} = \frac{6\rho_l \phi L^3}{2} + \frac{16\rho_d \delta \phi L^3}{2\sqrt{3}} \quad \dots(31)$$

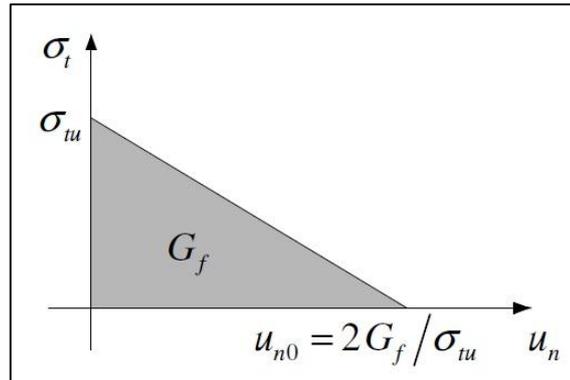
$$\frac{\rho L^3}{16} = \frac{6\rho_l \phi L^3}{8} + \frac{2\rho_d \delta \phi L^3}{2\sqrt{3}} \quad \dots(32)$$

3.3.3 Inserção do Modelo Constitutivo no Abaqus

As características do modelo de ruptura para o concreto simulada no Abaqus são parecidas a da lei constitutiva bi linear. Das quais ressalta-se que o comportamento à compressão é sempre elástico e que podem-se eliminar os elementos quando forem totalmente danificados (*KOSTESKI; PINTO; ITURRIOZ, 2010*)

Como explica Kosteki (2012), para demonstrar descontinuidades no comportamento frágil do concreto o Abaqus utiliza o modelo de fissuras distribuídas e baseia-se na lei constitutiva bi linear.

Figura 14 – Relação constitutiva



Fonte: Kostaski (2012, p. 101)

Ao observar a Figura 14 pode-se identificar que a medida que o deslocamento (u_{n0}) aumenta, menor é a tensão. Isto acontece após a falha do material. A deformação que chega no ponto no qual não há mais distribuição de tensão é diretamente relacionada com a deformação limite. No Abaqus, ao invés do deslocamento, se especifica o valor da deformação limite.

A tensão máxima de falha é expressa pela Equação 33.

$$\sigma_{tu} = E\varepsilon_p \quad \dots(33)$$

3.3.4 Adição de Aleatoriedade

Leva-se em conta a tenacidade do material G_f como uma variável para acrescentar a aleatoriedade no MED (Equação 34), considerando para este aspecto aleatório a distribuição de probabilidades do tipo Weibull de dois parâmetros (Rocha, 1989).

$$F(G_f) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{G_f}{\beta} \right)^\gamma \right] \quad \dots(34)$$

Sendo:

$F(G_f)$ = A função de densidade de probabilidade

G_f = Energia específica de fratura

γ = Parâmetro de forma

β = Parâmetro escala

A função de G_f (Equação 35) é dada pela derivada da expressão anterior

$$G_f = cte \cdot \varepsilon_p^2 \quad \dots(35)$$

Onde a constante cte é expressa com a Equação 36.

$$cte = \frac{E(1-\nu^2)}{R_f} \quad \dots(36)$$

Para adição do aspecto aleatório no Abaqus, escolhe-se uma quantidade x de materiais e então gera-se quatro vezes esta quantidade x de tipos de seções ligadas a estes. As seções são correspondentes a elementos colocados nas arestas, nas faces, internas e diagonais. São definidos os tamanhos dos x intervalos através da função de densidade de probabilidade de ε_p , fazendo que a probabilidade dentro destes seja a mesma, ou seja, que área encerrada nestes intervalos seja constante e igual a $1/x$ (KOSTESKI; PINTO; ITURRIOZ, 2010).

Conforme Kostascki (2012), dá-se o valor de ε_p médio de qualquer intervalo correspondente para qualquer conjunto de propriedades do material. As propriedades são similares, a probabilidade que um valor de ε_p fique nestes intervalos é constante. Para adicionar aleatoriedade em um elemento, sorteia-se um número correspondente ao intervalo $[1; x]$ com distribuição de probabilidade uniforme, e atribui-se o material ao elemento. Deste jeito, atinge-se uma quantidade parecida de elementos em qualquer conjunto de propriedade do material, e globalmente encontra-se uma distribuição do tipo Weibull de ε_p e G_f .

4 MODELAGEM DO CASO DE ESTUDO

Primeiramente, modelou-se novos corpos de prova com o uso do MED através das programações utilizadas por Marques (2015), estes possuindo dimensões de 150 mm de diâmetro D e 300 mm de altura H . Suas propriedades foram, módulo de elasticidade E igual a 29,43 GPa, a densidade ρ de 2266,7 kg/m³, o valor médio da energia de fratura $\mu(G_f)$ de 130 N/m, o coeficiente de variação da energia de fratura $CV(G_f)$ de 50%, o fator de falha R_{fc} de 3. Como estudou-se a influência da mudança do tamanho de módulo básico L , utilizou-se 3,5 mm e 5 mm e comprimento do espaço de aleatoriedade l_c de $4L$.

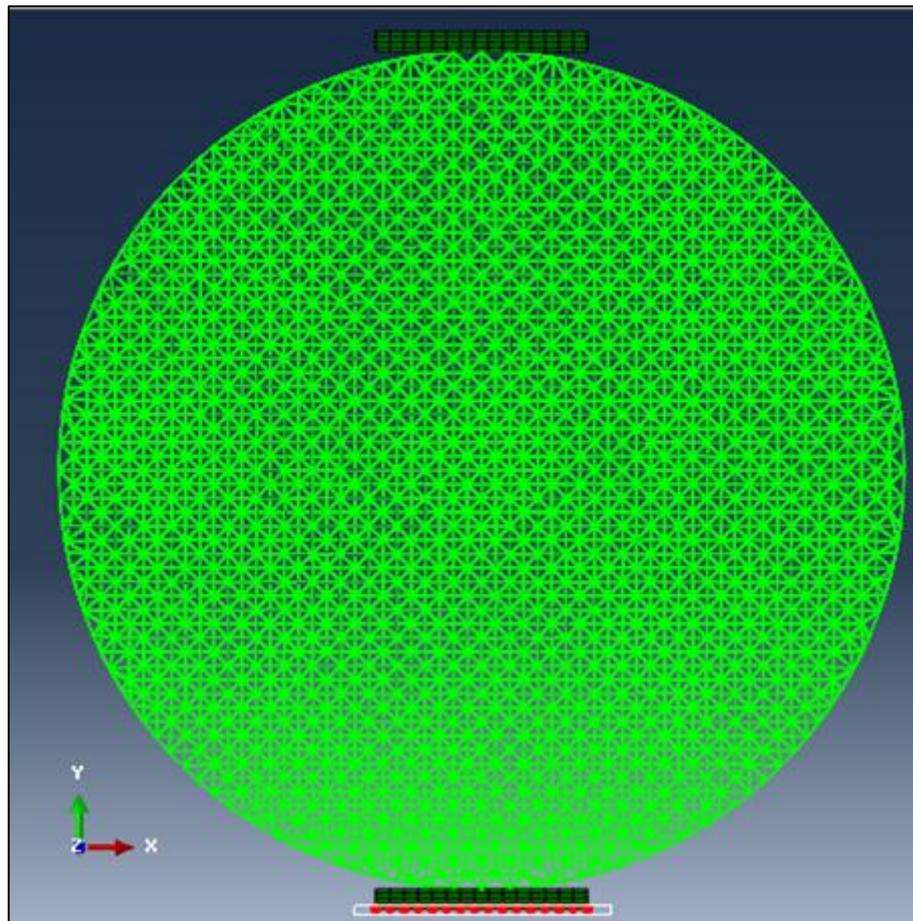
Logo, os corpos de prova criados no Matlab foram exportados para o Abaqus, onde então obteve-se uma diferente distribuição de aleatoriedade para cada um.

Com o Método dos Elementos finitos através do abaqus, modelara-se novas tiras de madeira da classe C60 para cada amostra e com diferentes relações de β (0,15; 0,25 e 0,30), com altura de 3,5 mm e comprimento de 300 mm. Posteriormente, inseriu-se as propriedades das tiras com densidade de 800 kg/m³, módulo de elasticidade perpendicular às fibras de 1,225 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Depois, posicionou-se as tiras abaixo e acima dos corpos de prova, adicionou-se interação entre o corpo de prova e as tiras. Logo, inseriu-se as malhas nas tiras, as condições de contorno, a carga e então realizou-se as simulações dos mesmos com velocidade de 0,1 m/s.

Com os corpos de prova simulados, precisou-se obter os resultados.

Na Figura 15, observa-se o local onde foi encontrado os valores das solicitações.

Figura 15 - Solicitações no corpo de prova modelado

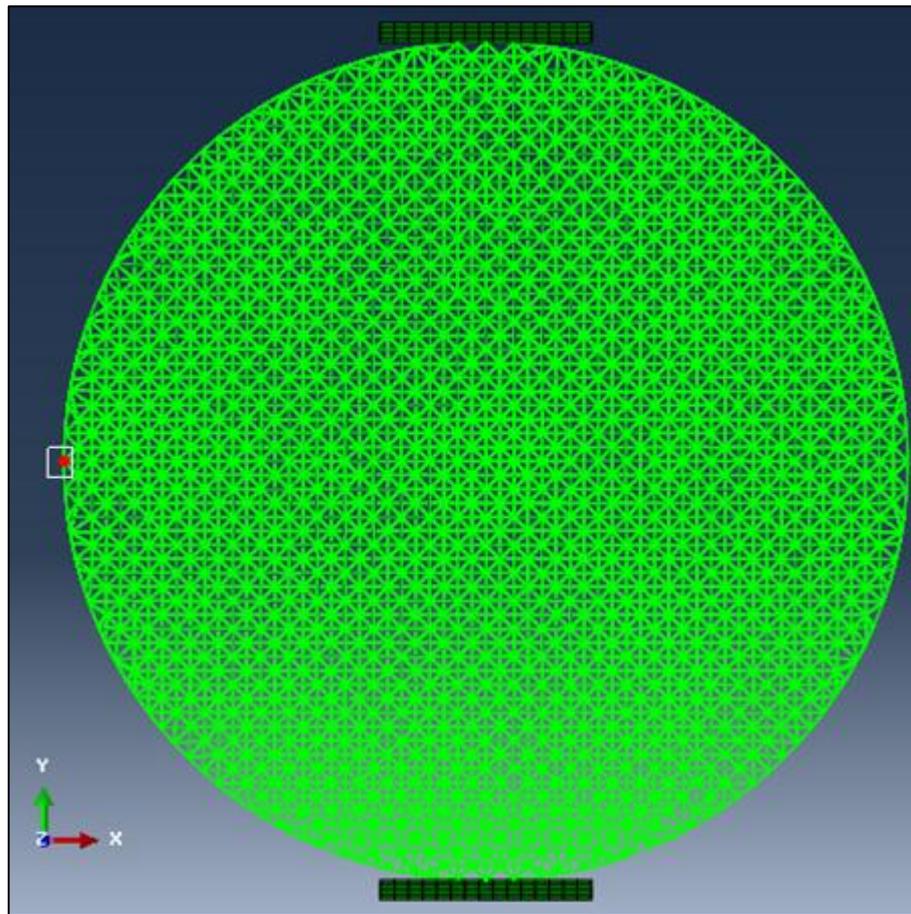


Fonte: Próprio autor

Para encontrar os valores das solicitações no corpo de prova modelado, necessitou-se descobrir cargas impostas nos nós inferiores da tira de baixo (Figura 15), posteriormente, somou-se todas estas cargas, encontrando assim as solicitações no corpo de prova. Logo para encontrar as tensões, usou-se a Equação 4.

Na Figura 16, observa-se o local onde foram encontrados os valores de deslocamento.

Figura 16 - Deslocamento Horizontal no corpo de prova modelado



Fonte: Próprio autor

Os valores de deslocamento horizontal foram encontrados utilizando coordenadas. Considerou-se que o centro do corpo de prova modelado estava localizado na origem de um eixo bidimensional (0 mm; 0 mm), selecionou-se dessa forma nós da extremidade esquerda do corpo de prova (-150 mm; 0 mm) como pode-se observar Figura 16. Como o corpo de prova utilizado é tridimensional, encontrou-se os deslocamentos de todos os nós nesta coordenada, assim fez-se a média dos deslocamentos dos nós. Para a extremidade direita (+150 mm; 0 mm), realizou-se o mesmo processo descrito anteriormente. Para encontrar a deformação realizou-se a soma dos deslocamentos da extremidade esquerda e extremidade direita, ambas em módulo, dividido pelo diâmetro do corpo de prova (150 mm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o estudo das simulações numéricas, fez-se necessário modelar dois corpos de prova através do MED, um com tamanho de módulo básico de 3,75 mm e um com 5 mm. No Abaqus utilizou-se três diferentes larguras da tira de madeira por tamanho de módulo básico, sendo assim seis casos ensaiados.

No Abaqus, ao submeter os corpos à carga, precisou-se observar a velocidade, de forma que, o corpo de prova não fosse submetido a carga dinâmica alta que resultasse em uma energia cinética elevada num baixo intervalo de tempo. Logo após vários testes, escolheu-se uma velocidade de 0,1 m/s.

Os valores de β estudado são de 0,15; 0,25 e 0,30. Numa maneira de facilitar o estudo, separou-se os corpos de prova por casos no qual observa-se na Tabela 4.

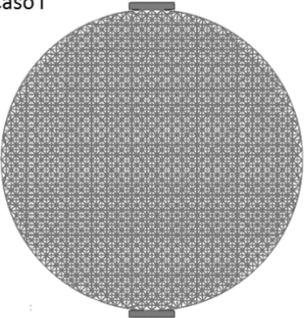
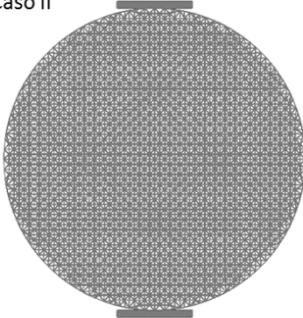
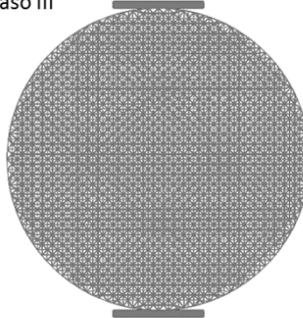
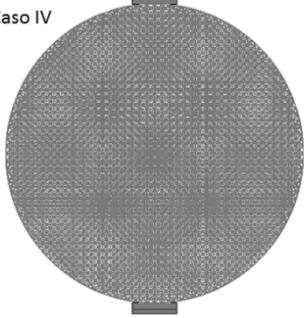
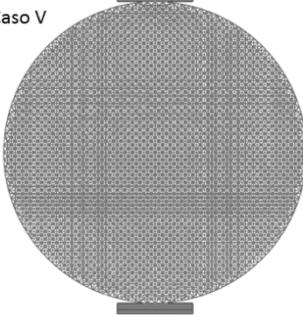
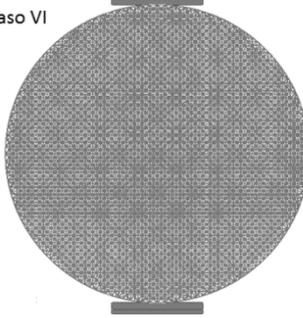
Tabela 4 – Informações sobre os corpos de prova modelados

Caso	CP (mm)	Tamanho do módulo básico (mm)	β
I	150x300	5,00	0,15
II	150x300	5,00	0,25
III	150x300	5,00	0,30
IV	150x300	3,75	0,15
V	150x300	3,75	0,25
VI	150x300	3,75	0,30

Fonte: Próprio autor

Os modelos simulados podem ser observados na Figura 17. Na moldagem através do MED, os corpos de prova de dimensões de 150 mm de diâmetro (D) e 300 mm de altura (H), com tamanho do módulo básico de 5 mm, utilizou-se 31 nós no eixo X, 31 nós no eixo Y e 61 nós no eixo Z e para tamanho do módulo básico de 3,75 mm, utilizou-se 41 nós no eixo X, 41 nós no eixo Y e 81 nós no eixo Z.

Figura 17 – Modelos Simulados

	$\beta = 0,15$	$\beta = 0,25$	$\beta = 0,30$
Tamanho do Módulo Básico 5,00 mm	Caso I 	Caso II 	Caso III 
Tamanho do Módulo Básico 3,75 mm	Caso IV 	Caso V 	Caso VI 

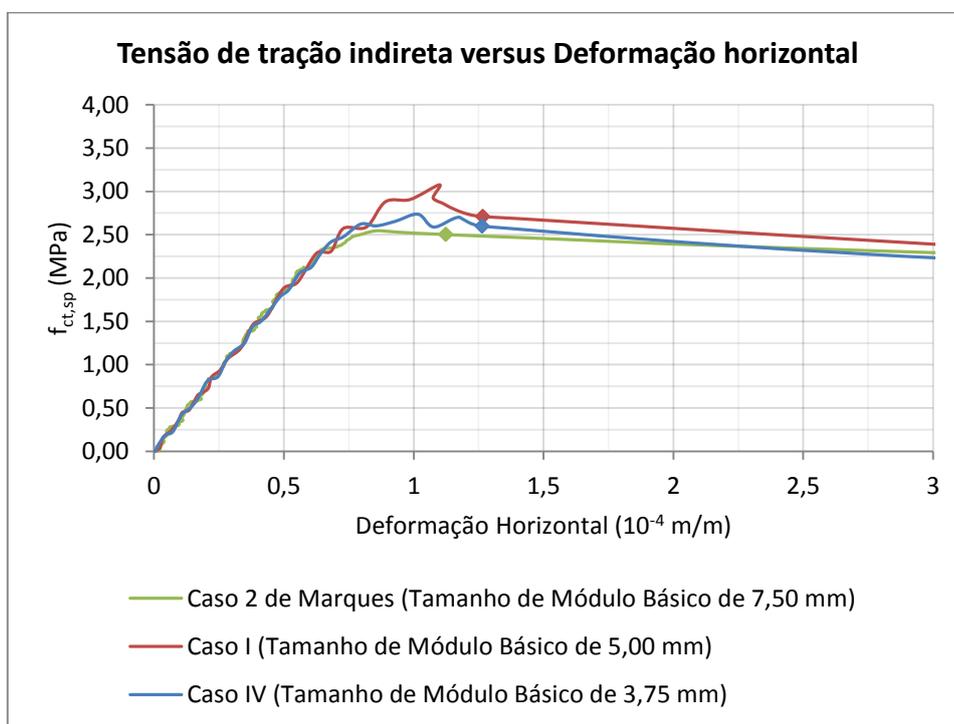
Fonte: Próprio autor

5.1 Tensão de tração indireta versus Deformação Horizontal

Para modelar os corpos de prova de concreto utilizando o MED, utilizou-se dois diferentes tamanhos de módulo L, de 3,75 mm e 5 mm. Destas, retirou-se resultados de resistência à tração indiretas, que podem ser comparados com os resultados de Marques (2015), que utilizou L de 7,5 mm.

No Gráfico 4, pode-se observar a variação de tensão e deformações horizontais entre o Caso I e Caso IV deste trabalho e o Caso 2 do estudo de Marques (2015), ambos os casos com β igual a 0,15.

Gráfico 4 - Tensão versus deformação horizontal dos casos I e IV deste trabalho e Caso 2 de Marques (2015)

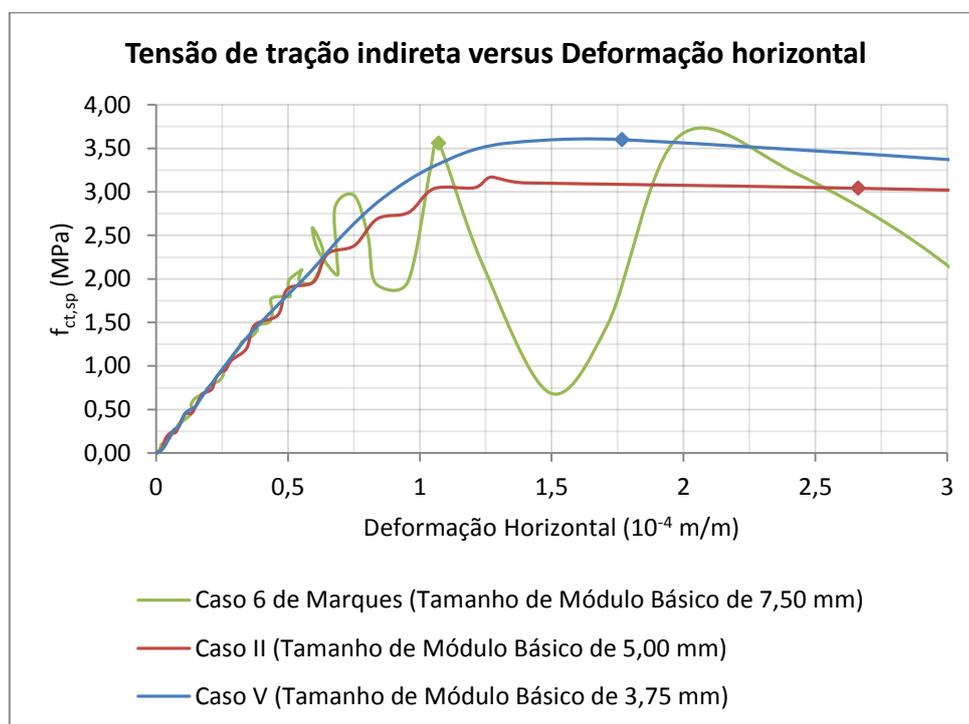


Fonte: Próprio autor

Inicialmente, as curvas do Gráfico 4 possuem comportamentos semelhantes, à medida que os corpos se aproximam da ruptura, a tensão no caso I em vermelho, aumenta de uma forma mais acelerada em relação ao caso IV em azul e ao caso 2 de Marques (2015). Logo após a ruptura, as deformações horizontais continuam aumentando e a tensão de ambos os casos diminuem. Analisando os três casos observa-se que o Caso I, com a tamanho de módulo básico de 5,00 mm resistiu a maiores solicitações. O valor de tensão de ruptura foi de 2,501 MPa para o caso 2 de Marques (2015), 2,709 MPa para o Caso I e 2,598 MPa para o caso IV.

No Gráfico 5, pode-se observar a variação de tensão e deformações horizontais entre o Caso II e Caso V deste trabalho e o Caso 6 do estudo de Marques (2015), ambos os casos com β igual a 0,25.

Gráfico 5 - Tensão versus deformação horizontal dos casos II e V deste trabalho e Caso 6 de Marques (2015)

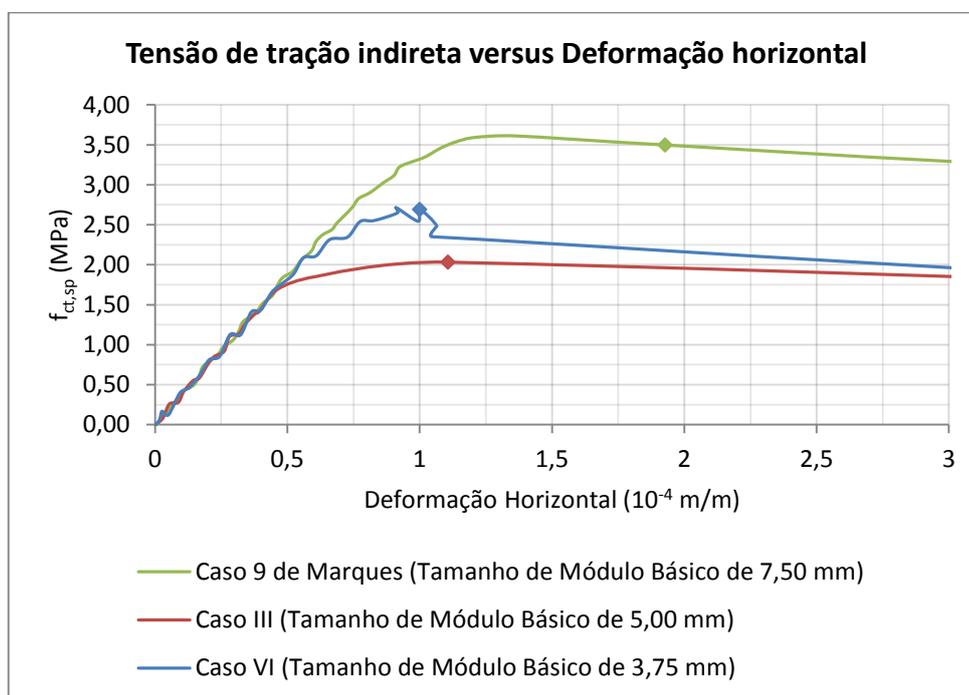


Fonte: Próprio autor

Inicialmente no Gráfico 5, os três casos possuem comportamentos semelhantes, ao se aproximarem da ruptura, as modelagens de corpos de provas adotam resultados distintos, os casos II e V os valores de tensão aumentaram até chegar a ruptura, onde então ocorre queda logo após nesses casos. No caso 6 de Marques (2015), a medida que se aproxima da ruptura os valores de tensão começam a oscilar de forma considerável. Os valores de tensão de ruptura foram de 3,560 MPa para o caso 6 de Marques (2015), 3,041 MPa para o Caso II e 3,600 MPa para o caso V.

No Gráfico 6, pode-se observar a variação de tensão e deformações horizontais entre o Caso III e Caso VI deste trabalho e o Caso 9 do estudo de Marques (2015), ambos os casos com β igual a 0,30.

Gráfico 6 - Tensão versus deformação horizontal dos casos III e VI deste trabalho e Caso 9 de Marques (2015)



Fonte: Próprio autor

Ao observar o Gráfico 6, nota-se que no início do ensaio as três curvas têm o mesmo comportamento, um aumento na tensão de tração indireta e da deformação horizontal, logo após, o caso 9 de Marques (2015) possui um aumento de tensão maior em relação aos casos III e VI e por fim após a ruptura existe uma queda na tensão e a deformação continua a aumentar. Os valores de tensão de ruptura foram de 3,498 MPa para o caso 9 de Marques (2015), 2,033 MPa para o Caso III e 2,350 MPa para o caso VI.

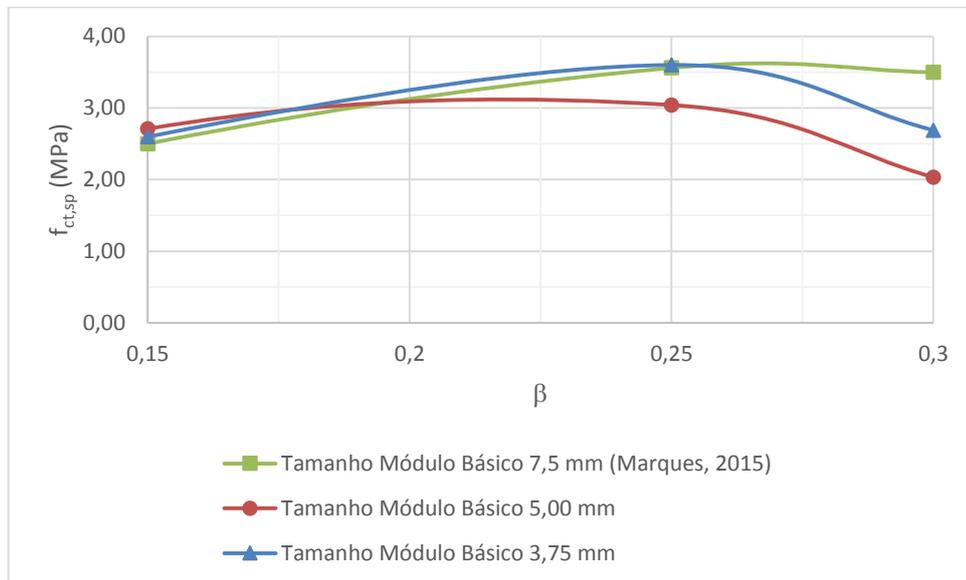
5.2 Tensão de ruptura de tração indireta versus relação β

As tiras de madeiras utilizadas no ensaio foram modeladas através do Abaqus. Para uma melhor análise separou-se os resultados entre os diferentes tamanhos de módulo básicos.

O Gráfico 7 expressa a resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) versus a relação β , que é a largura da tira de madeira dividido pelo diâmetro do corpo de prova. A curva em vermelho representa os corpos de prova com tamanho de módulo básico de 3,75 mm, curva azul os com tamanho de módulo básico de 5 mm e a curva verde

representa os resultados de Marques (2015), com tamanho de módulo básico de 7,5 mm.

Gráfico 7 - Resistência à tração indireta versus relação β



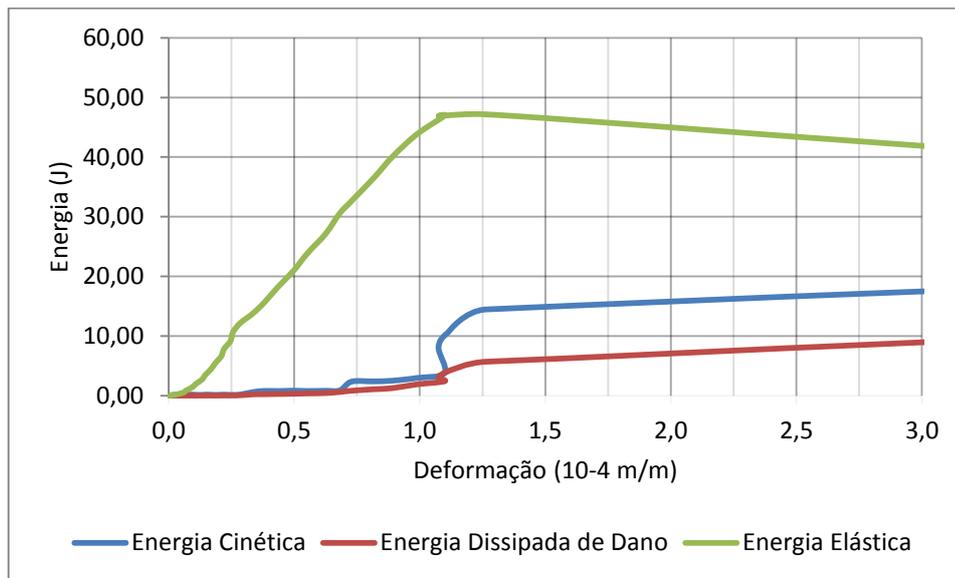
Fonte: Próprio autor

No Gráfico 7, com um crescimento de resistência do β de 0,15 para 0,25 e posteriormente uma redução até o β 0,30; pode-se observar que a queda na resistência do estudo de Marques (2015) foi menor em relação a queda dos tamanhos de módulo básico de 5,00 mm e 3,75 mm. Porém ambos os casos obtiveram diferentes comportamento em relação a curva do Gráfico 3, que são os resultados encontrados por Riera, Miguel e Iturrioz (2014), no qual cita que quanto maior é o valor de β , maior o valor de tensão de ruptura a ser encontrado.

5.3 Energia versus Deformação

No Gráfico 8 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformação do Caso I.

Gráfico 8 – Curvas de energia versus deformação do Caso I

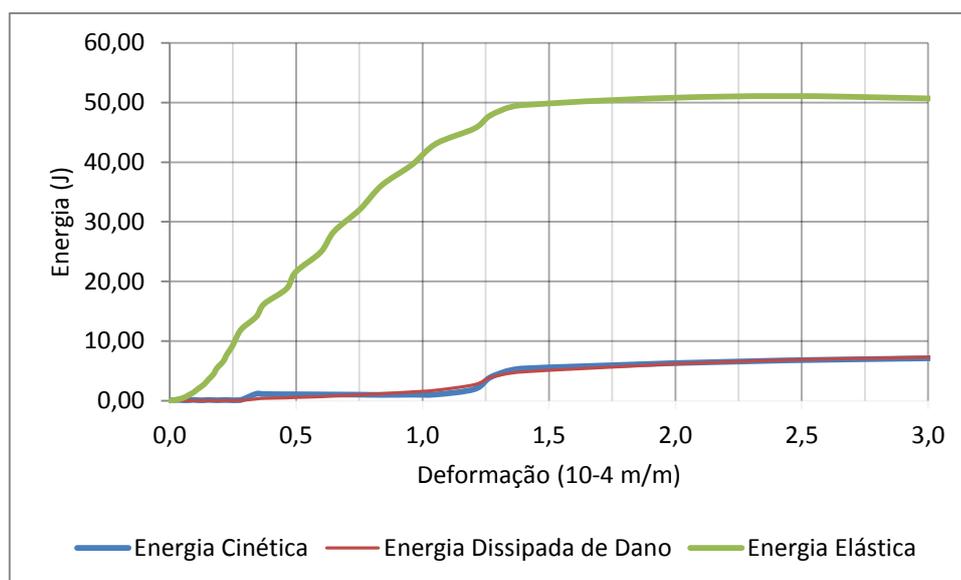


Fonte: Próprio autor

No Gráfico 8, pode-se observar que até a ruptura houve um aumento expressivo na energia elástica e um baixo crescimento da energia dissipada e energia cinética. Posteriormente a ruptura, houve uma queda brusca de energia elástica e um aumento expressivo de energia dissipada de dano e energia cinética.

No Gráfico 9 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformação do Caso II.

Gráfico 9 – Curvas de energia versus deformação do Caso II

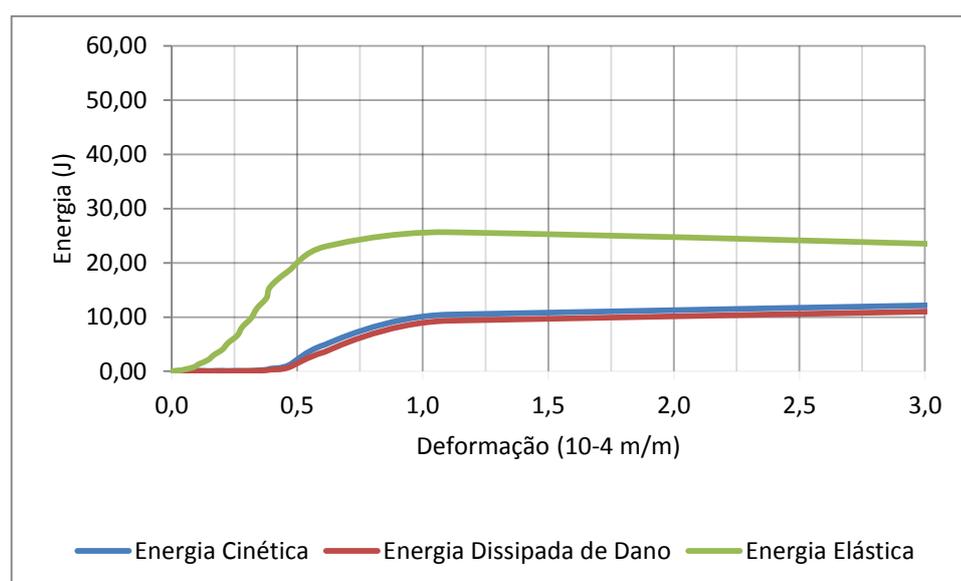


Fonte: Próprio autor

Observa-se no Gráfico 9 o comportamento das energias ao longo da deformação, onde logo após a ruptura, ocorreu uma diminuição de energia elástica e um aumento de energia cinética e energia dissipada de dano.

No Gráfico 10 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformação do Caso III.

Gráfico 10 – Curvas de energia versus defesa do Caso III

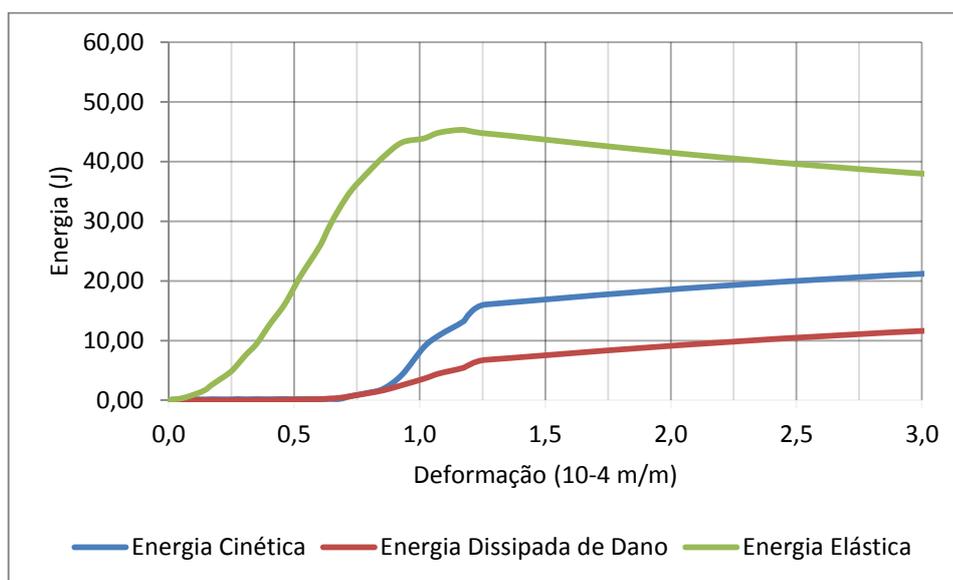


Fonte: Próprio autor

Nota-se no Gráfico 10, que a energia elástica tem um crescimento maior do que as outras energias, logo após, a energia elástica atinge o seu maior valor e então começa a diminuir, ocorrendo assim a ruptura do corpo de prova e aumento nas energias dissipada de dano e cinética.

No Gráfico 11 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformaçãõ do Caso IV.

Gráfico 11 - Curvas de energia versus deformaçãõ do Caso IV

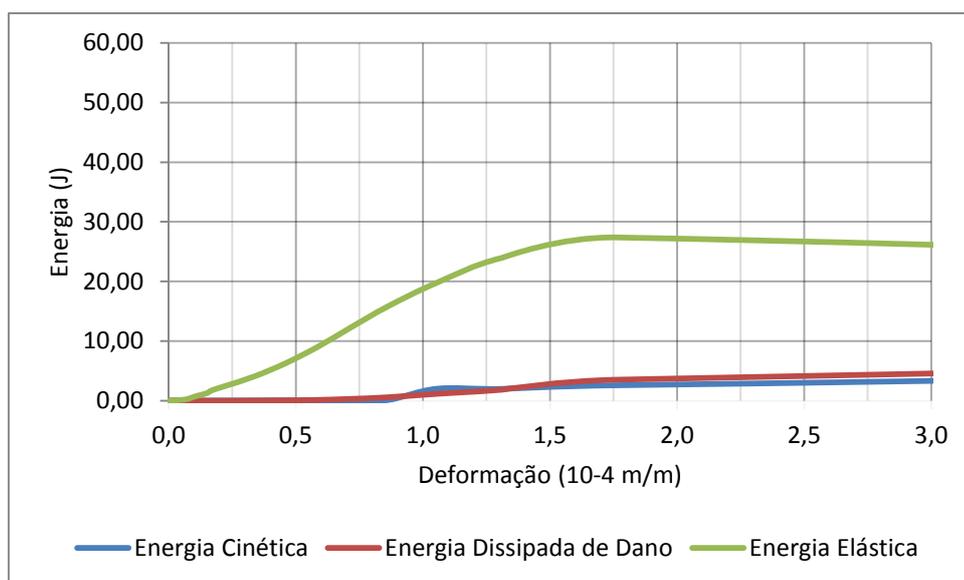


Fonte: Próprio autor

No Gráfico 11, observa-se que antes da ruptura a energia elástica houve um grande aumento de energia elástica em relação as energias dissipada de dano e cinética, já posteriormente a ruptura, as energias dissipada no dano e cinética aumentam e a energia elástica diminui.

No Gráfico 12 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformaçãõ do Caso V.

Gráfico 12 – Curvas de energia versus deformação do Caso V

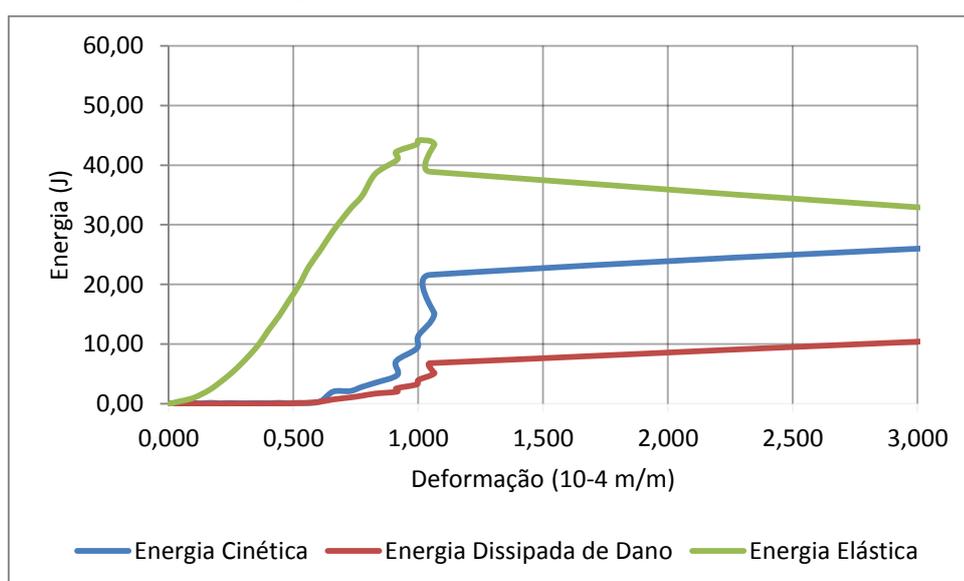


Fonte: Próprio autor

Ao observar o Gráfico 12, pode-se notar que antes da ruptura houve aumento energia elástica e um baixo crescimento das energias dissipada de dano e cinética. Posteriormente a ruptura as energias dissipada de dano e cinética tem um crescimento maior, ultrapassando a energia elástica que tem uma diminuição.

No Gráfico 13 estão apresentadas as energias cinética, dissipada de dano e elástica versus deformação do Caso VI.

Gráfico 13 – Curvas de energia versus deformação do Caso VI



Fonte: Próprio autor

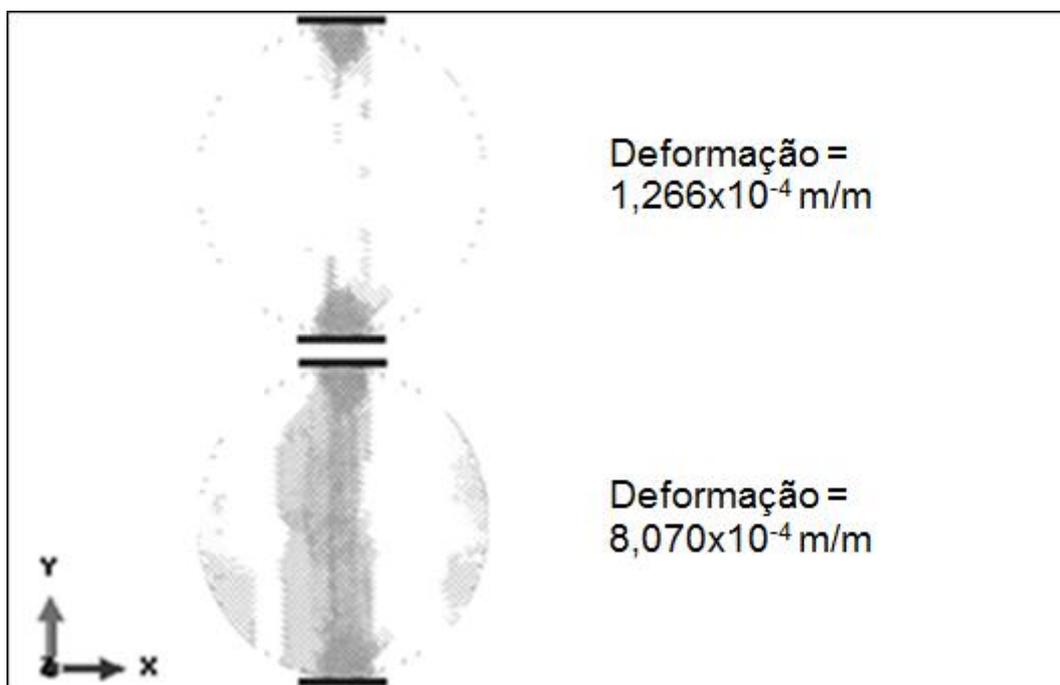
No Gráfico 13, observa-se que do início da simulação até o momento da ruptura, a energia cinética e a energia dissipada de dano são menores que a energia elástica. Após a ruptura essa situação se inverte, sendo as energias dissipada de dano e cinética maiores que a energia elástica.

5.4 Forma de Ruptura

5.4.1 Caso I

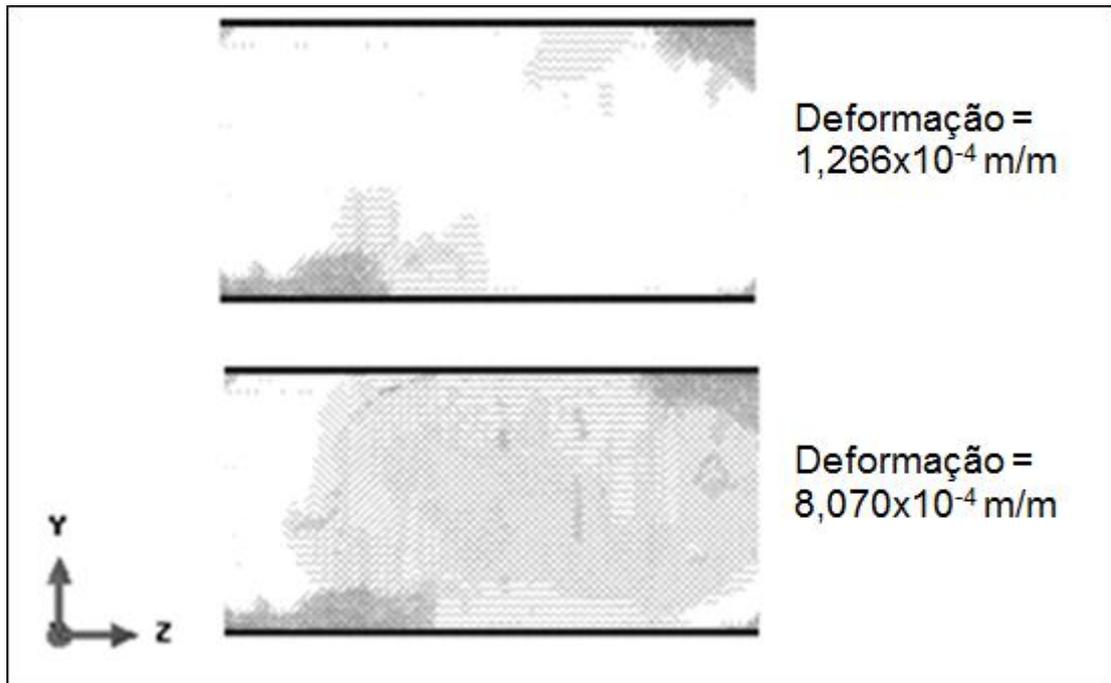
A Figura 18 apresenta os nós rompidos do corpo de prova. Pode-se observar que as fissuras começaram das extremidades para o centro do corpo ensaiado, diferentemente de como é citado por Falcão e Soares (2002), no qual as fissuras iniciam do centro para as extremidades do corpo de prova. Na Figura 19, observa-se que as fissuras iniciaram na parte inferior da extremidade esquerda e na parte superior da extremidade direita do corpo ensaiado, onde estas, se dispersaram para o centro. No momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $1,266 \times 10^{-4}$ m/m para $8,070 \times 10^{-4}$ m/m.

Figura 18 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso I



Fonte: Próprio autor

Figura 19 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso I

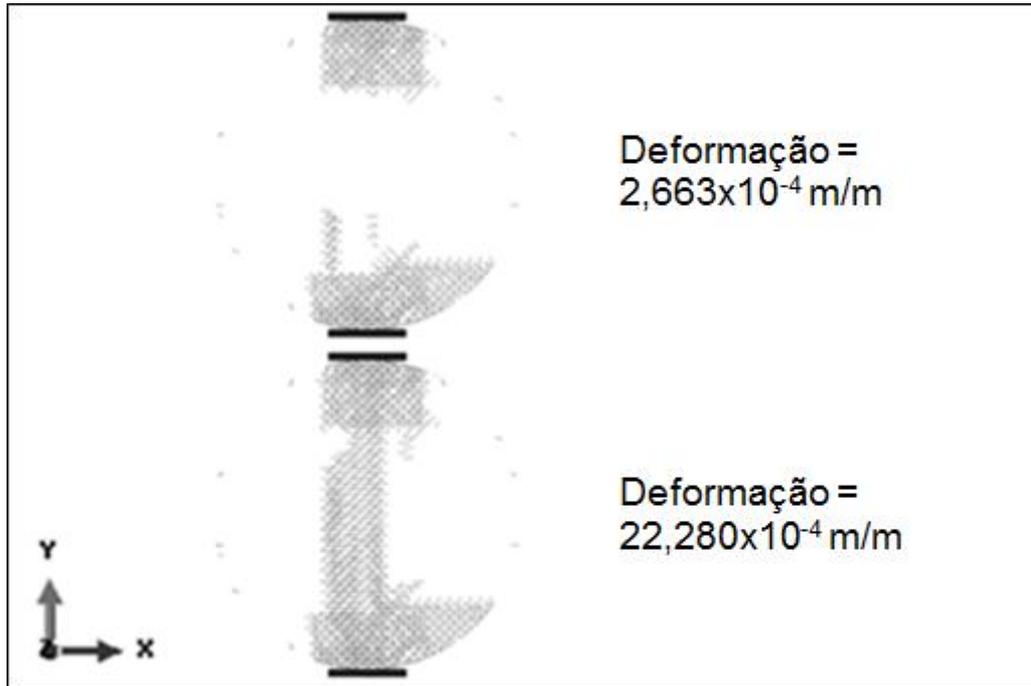


Fonte: Próprio autor

5.4.2 Caso II

Neste caso, no momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $2,663 \times 10^{-4} \text{ m/m}$ para $22,280 \times 10^{-4} \text{ m/m}$. Observa-se na Figura 20 que as fissuras se propagaram das extremidades apoiadas pela tira de madeira para o centro do corpo de prova. Na Figura 21, pode-se notar que as fissuras ocorreram nas partes inferior e superior das extremidades esquerda e direita do corpo de prova, respectivamente. A ruptura ocorreu na extremidade esquerda do corpo.

Figura 20 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso II



Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso II

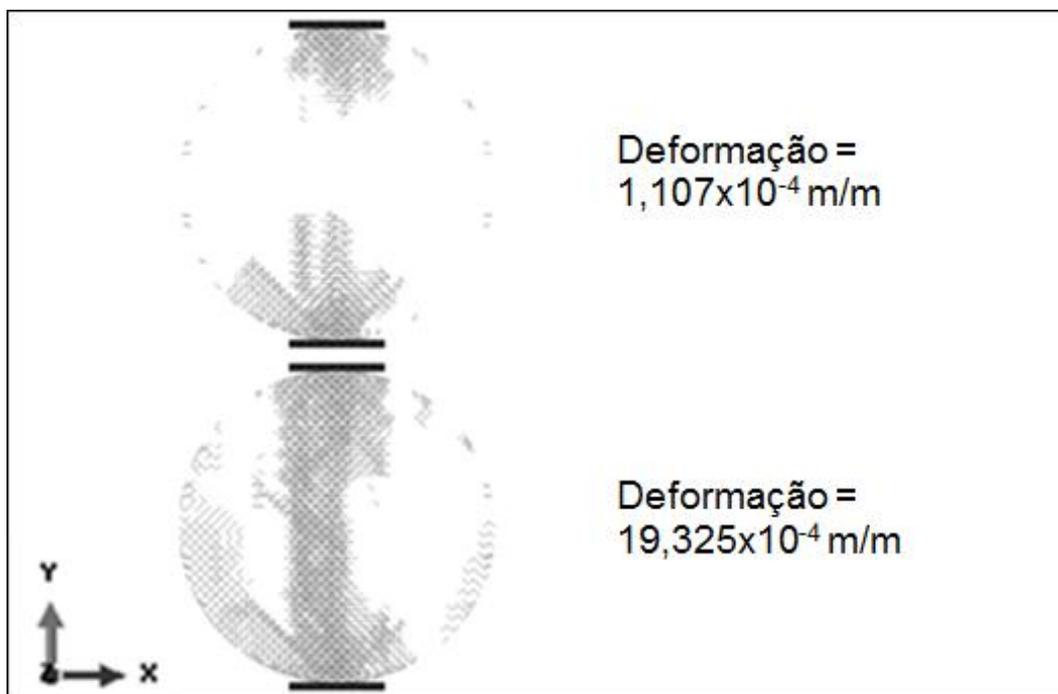


Fonte: Próprio autor

5.4.3 Caso III

Para o caso III, no momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $1,107 \times 10^{-4}$ m/m para $19,325 \times 10^{-4}$ m/m. Na Figura 22, pode-se observar os nós rompidos em vista transversal, as fissuras iniciaram da região em contato com as tiras de madeira para o meio do diâmetro do corpo de prova. A Figura 23 mostra a vista transversal dos nós rompidos do corpo de prova, ao analisar a mesma, observa-se que as fissuras iniciaram nas superfícies em contato com as tiras de madeira distribuído a longo do corpo de prova, posteriormente as fissuras tenderam para o centro do corpo ocorrendo assim a ruptura.

Figura 22 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso III



Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso III

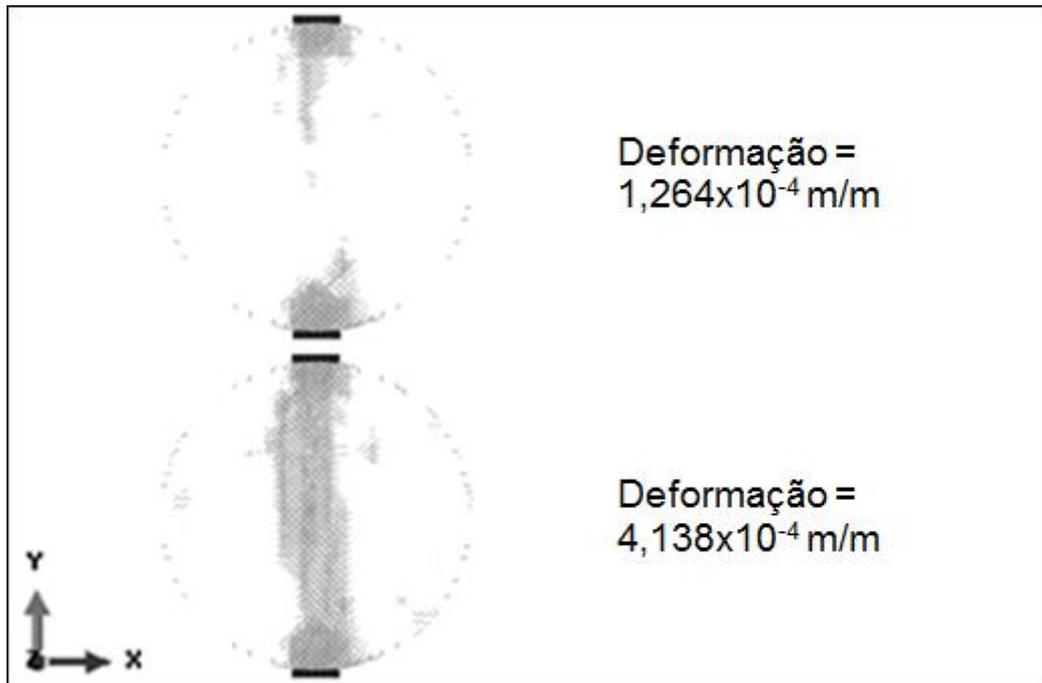


Fonte: Próprio autor

5.4.4 Caso IV

No caso IV, as fissuras ocorreram das superfícies em contato com as tiras de madeiras para o centro como pode-se observar na Figura 24. Ao analisar a Figura 25, observa-se que as fissuras iniciaram mais intensamente nas partes à esquerda na superfície inferior e a à direita na superfície superior do corpo de prova até ocorrer a ruptura. No momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $1,264 \times 10^{-4} \text{ m/m}$ para $4,138 \times 10^{-4} \text{ m/m}$.

Figura 24 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso IV



Fonte: Próprio autor

Figura 25 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso IV

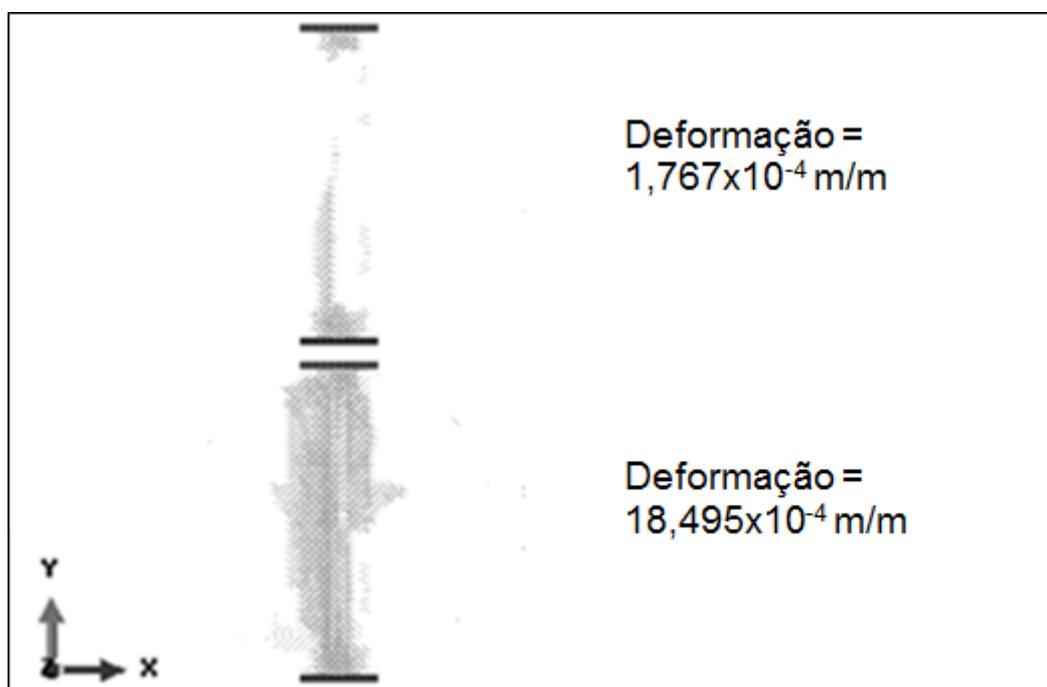


Fonte: Próprio autor

5.4.5 Caso V

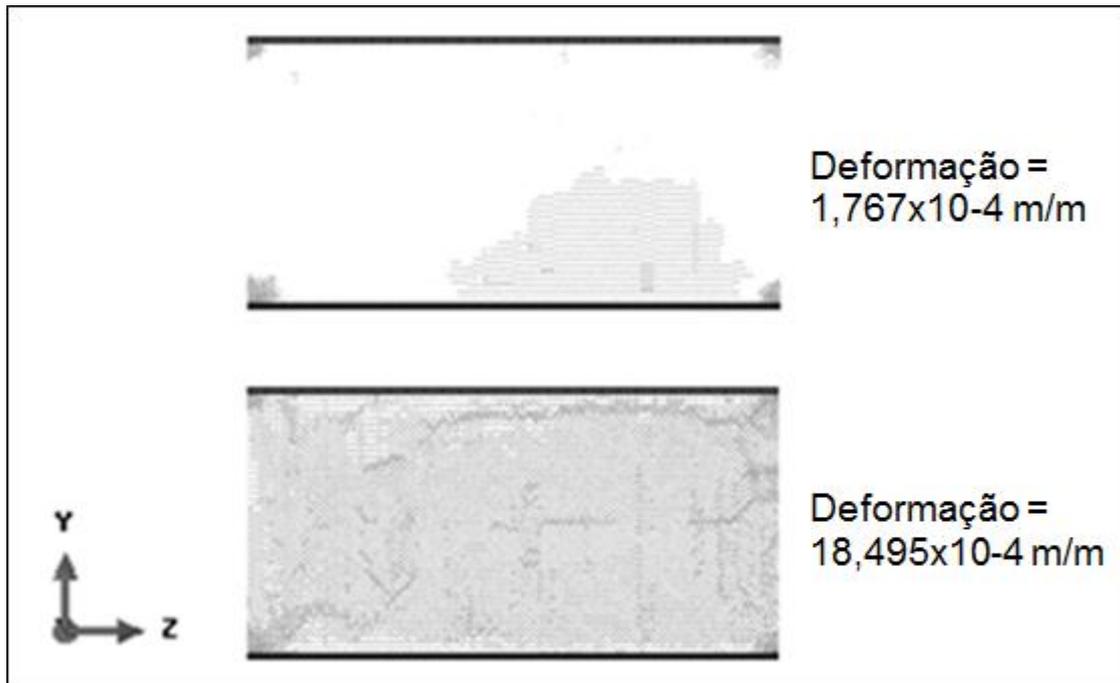
Para o caso V, no momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $1,767 \times 10^{-4}$ m/m para $18,495 \times 10^{-4}$ m/m. A Figura 26 mostra o modo como ocorreu a ruptura dos nós do corpo de prova, pode-se observar que as fissuras iniciaram das superfícies em contato com as tiras de madeira, porém a ruptura ocorreu de baixo para cima. Pode-se observar esse mesmo processo na Figura 27, que demonstra a vista longitudinal do corpo de prova com os nós rompidos.

Figura 26 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso V



Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso V

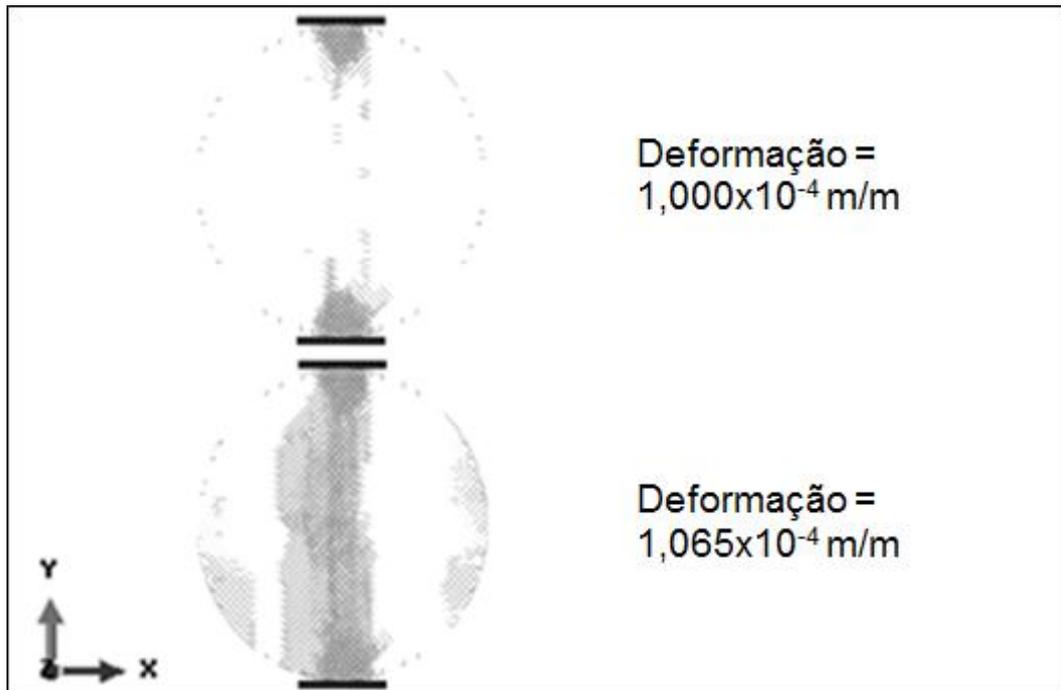


Fonte: Próprio autor

5.4.6 Caso VI

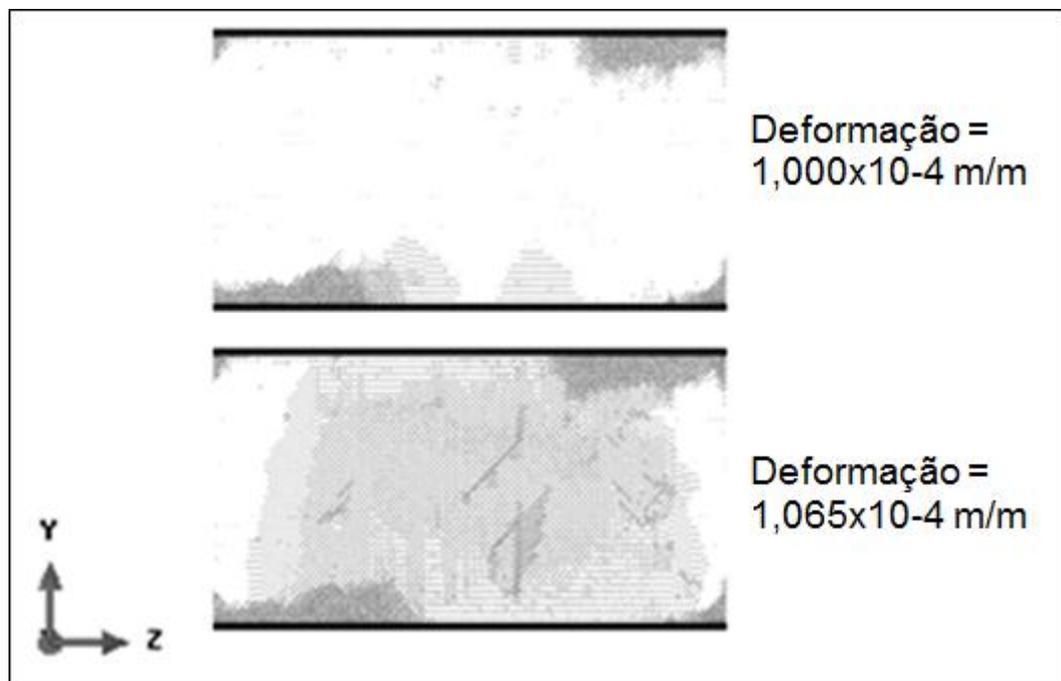
Como pode-se observar na Figura 28, as fissuras se propagaram das extremidades em contato com as tiras até chegar ao centro do corpo de prova ocorrendo assim a ruptura. Na Figura 29 observa-se longitudinalmente o corpo de prova, podendo assim notar que as fissuras ocorreram nas partes inferior e superior das extremidades esquerda e direita, posteriormente no momento da ruptura as fissuras ocorreram ao longo de todo o corpo de prova. No momento da ruptura a deformação do modelo de corpo de prova passou de $1,000 \times 10^{-4} \text{ m/m}$ para $1,065 \times 10^{-4} \text{ m/m}$.

Figura 28 - Plano x-y da modelagem com nós rompidos do Caso VI



Fonte: Próprio autor

Figura 29 - Plano z-y da modelagem com nós rompidos do Caso VI



Fonte: Próprio autor

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

No estudo, simulou-se corpos de prova de concreto através do ensaio brasileiro de tração para analisar os resultados de tração indireta do concreto, influência da mudança do tamanho do módulo, comportamento da resistência à tração indireta com a alteração na largura da tira de madeira utilizada no ensaio e o modo de ruptura dos corpos de prova.

Os valores de resistência à tração indireta neste trabalho foram próximos aos resultados encontrados por Marques (2015). No estudo de Riera, Miguel e Iturrioz (2014), foram encontrados valores bem superiores em relação a este trabalho, o que não condiz, já que os dados dos materiais são os mesmos para ambas pesquisas.

Os resultados de tração por compressão diametral para diferentes tamanhos de módulos foram bastante aleatórios, os distintos valores encontrados podem tanto ser pelos diferentes tamanhos de módulos quanto pela aleatoriedade de cada corpo de prova.

O estudo das tiras de madeira utilizadas nas partes superior e inferior do corpo de prova influenciaram diretamente nos resultados de resistência à tração por compressão diametral encontrados. A tendência dos valores encontrados foi que a tração indireta possui aumento do $\beta= 0,15$ para $\beta= 0,25$ e uma brusca diminuição do $\beta= 0,25$ para $\beta= 0,30$. Assim através dos resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que a relação β ideal para o ensaio é 0,25. No estudo de Marques (2015), houve semelhança com este estudo, pois a resistência à tração indireta teve um aumento do $\beta= 0,15$ para $\beta= 0,25$ e uma diminuição do $\beta= 0,25$ para $\beta= 0,30$; porém a redução de resistência foi menor. Na pesquisa de Riera, Miguel e Iturrioz (2014), a tendência dos resultados foram similares no início do $\beta= 0,15$ para $\beta= 0,25$ e nas relações $\beta= 0,25$ para $\beta= 0,30$ continuou aumentando os valores de resistência. Rocco et al (1999), estudaram relações diferentes com materiais diferente, porém concluíram que do $\beta= 0,04$ para $\beta= 0,16$ houve um aumento no resultado de resistência à tração por compressão diametral.

A forma de como propagaram-se as fissuras forma muito parecidas para todos os casos estudados. Analisando os corpos de prova vistos transversalmente e longitudinalmente, verifica-se que as fissuras começam nas regiões onde estão as

tiras de madeira, onde então se propagam na direção vertical, sempre de fora para dentro. Estas fissuras se encontram no centro do diâmetro, ocorrendo assim a ruptura dos corpos de prova. Na pesquisa de Marques (2015), as fissuras também iniciaram nas superfícies em contato com as tiras e convergem para o centro do corpo de prova. Cabe salientar que segundo Falcão e Soares (2002), esse efeito aparentemente não ocorre nos ensaios experimentais, no qual as fissuras se originam no centro do cilindro do corpo de prova.

6.2 Trabalhos Futuros

Para a obtenção de resultados mais precisos, deve-se comparar com maior número de corpos de prova e menor velocidade de ensaio através de simulações numéricas.

A seguir serão apresentadas as sugestões para futuros trabalhos:

- Influência do fator escala de corpos de provas no ensaio brasileiro de tração;
- Estudar relações entre resistência à tração direta e resistência a tração por compressão diametral;
- Ensaier experimentalmente a influência da tira de madeira na resistência à tração por compressão diametral.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **Estruturas de concreto: a resistência à tração e energia de fratura do concreto**. Rio Grande. Editora Dunas, 2001. 27 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da Resistência à Compressão**. Rio de Janeiro, 1996. 8 p. .

_____. **NBR 5739: Concreto — Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. **NBR 12142: Concreto — Determinação da Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.

_____. **NBR 7222: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_____. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral Sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 159 p.

CONTERATO, L. **Rochas Basálticas: Obtenção de Parâmetros Elásticos pelo Ensaio de Tração Indireta**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. 60 p.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Não paginado. **Anais...** Natal, 2002.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, Vol.1, 2005, 1600 p.

KOSTESKI, L.; PINTO, O.; ITURRIOZ, I. Combinação Entre o Método Dos Elementos Discretos Compostos por Barras e o Método dos Elementos Finitos no Ambiente Abaqus. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. **Anais...** Vol XXIX, p. 5259-5283, 2010.

KOSTESKI, L. E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos Formado por Barras no Estudo do Colapso de Estruturas**. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 177 p.

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

MARQUES, J. R. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos (DEM) Associado com o Método dos Elementos Finitos no Ensaio Brasileiro de Tração**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015. 89 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 3.ed., 2008, 674 p.

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

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação da redução de armadura mínima de flexão em vigas de concreto armado com adição de fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007. 28 p.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2007.

PINTO, O. T. **Interação do método dos elementos discretos (MED) e do método dos elementos finitos (MEF) implementado no ambiente do sistema Abaqus**. 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: 05 de junho de 2015

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

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.; Miguel L. F. F.; Iturrioz I. Assessment of Brazilian tensile test by means of the truss-like Discrete Element Method (DEM) with Imperfect Mesh. Int: **Engineering Structures**. Editora: Elsevier, p. 10–21, 2014.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: Experimental verification. Int: **Materials and Structures**. Volume XXXII. Editora: Folker Witmann 201–217, 1999.

SENA, L. V. T. **Análise Do Comportamento Mecânico do Concreto Submetido ao Ensaio de Compressão Diametral: Análise Experimental com o Uso da Técnica da Correlação de Imagens**. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013. 76p.