



ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO BRASILEIRO

Francisco Junior Keche Santos

Jeferson Resende Marques

Matthews Vargas Vaucher Bandeira

Raquel Caroline Zydeck

Luis Eduardo Kostascki

Ederli Marangon

franciscojr.keche@gmail.com; jefersonresende_7@hotmail.com;
matthews_vaucher@hotmail.com; raquel.zydeck@gmail.com;
luiskostascki@unipampa.edu.br; ederlimarangon@unipampa.edu.br

Grupo MAEC - Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Alegrete – Curso:
Engenharia Civil. Av. Tiaraju, Nº 810 – Ibirapuitã, Alegrete – RS – Brasil, CEP 97546-550.

Abstract. *O presente trabalho consiste no estudo da influência causada por diferentes larguras da tira de madeira utilizada para a distribuição do carregamento na determinação da resistência à tração por compressão diametral no concreto, conhecido como o Ensaio Brasileiro. Os ensaios experimentais foram conduzidos com a utilização de um concreto de resistência à compressão de 25 MPa, na idade padrão de 28 dias de cura, e com tiras de madeira possuindo larguras nas proporções de 0.10, 0.25 e 0.30 em relação ao diâmetro do espécime, sendo executada a aquisição de imagens dos ensaios experimentais. Para a modelagem numérica do caso em estudo, foi utilizado o método dos elementos discretos formado por barras (do inglês LDEM). Uma vez que o concreto é um material com comportamento quase-frágil, este método é vantajoso pois possibilita a desativação das barras que constituem o modelo quando estas atingem seu limite de resistência. Para resolver este problema foi utilizado o LDEM introduzido no ambiente Abaqus/Explicit o que permite a interação entre o modelo discreto e os elementos finitos. A partir dos resultados obtidos nas duas abordagens, experimental e numérica, é concluído que, para uma proporção largura da tira/diâmetro do espécime igual à 0.15, a ruptura resultante no cilindro apresenta uma maior regularidade, o que é ideal pois indica uma fissura por tração. Para relações superiores são*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC,
Brazil, November 5-8, 2017.

observadas, fissuras irregulares que indicam ruptura por cisalhamento. Ambas as abordagens também apontam que a fissura inicia-se na região próxima à borda de carregamento do espécime e se propagam para o seu centro, o que difere da teoria que dá embasamento ao ensaio, a qual admite uma fissura centralizada. Assim, com a coerência obtida entre os resultados, é possível assumir que os métodos numéricos estudados são aplicáveis para caracterização do comportamento de materiais como o concreto, de maneira que seu estudo e aperfeiçoamento proporciona uma ferramenta de apoio confiável para a engenharia.

Palavras-chave: Resistência à tração do concreto, Método dos Elementos Discretos formados por Barras, Largura da tira de madeira.

1 INTRODUÇÃO

O intenso desenvolvimento da tecnologia, o qual proporciona uma gama de recursos computacionais em constante evolução e o crescente uso destes recursos como ferramentas de apoio nas diversas áreas da engenharia, ajuda a explicar a popularização da implementação de modelos numéricos para a resolução de inúmeros problemas de grande complexidade e interesse dos pesquisadores, especialmente na área de comportamento dos materiais. A adoção de um modelo matemático com parâmetros que apresentem boa representatividade dos casos estudados é o maior desafio para a validação dos resultados obtidos, sendo que sua confiabilidade geralmente depende da execução de ensaios experimentais que apresentem dados coerentes com os fornecidos pelas modelagens.

Com base nesse cenário, este trabalho traz a proposta de um estudo experimental e numérico sobre o ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro, o qual é um método de ensaio experimental muito utilizado para caracterização da resistência indireta à tração de diversos materiais, tendo como a finalidade a verificação da influência causada pela variação na largura de um elemento utilizado para uniformização das tensões na borda de aplicação de carregamento nos corpos de prova utilizados, conforme recomendações normativas.

Para tanto, é realizada uma análise deste método de ensaio aplicado à caracterização do concreto com a execução de testes experimentais, com a coleta de imagens, e através da abordagem numérica, utilizando-se do Método dos Elementos Discretos formado por barras (LDEM), sendo este de grande vantagem no estudo da ruptura de materiais de comportamento frágil e quase-frágil, assim como o concreto, e o qual é aplicado ao ambiente do *software* Abaqus/Explicit promovendo assim uma interação do modelo com o Método dos Elementos Finitos (FEM).

2 O ENSAIO BRASILEIRO

2.1 Procedimentos do ensaio

O estudo das propriedades mecânicas do concreto é de grande importância para a engenharia civil pois possibilita que os elementos estruturais constituídos por este material, os

quais são submetidos à diferentes tipos de solicitação, sejam dimensionados de maneira segura e possam ter seu comportamento corretamente previsto. Uma destas propriedades é a resistência à tração (f_{ct}), com valor geralmente em torno de 10% de sua resistência à compressão (Fusco, 2008), e a qual, embora ligeiramente inferior e por isso desprezada no dimensionamento do concreto armado (Mehta; Monteiro, 2008), é de grande relevância pois influencia diretamente no surgimento e propagação de fissuras nas idades iniciais de cura e assim pode afetar negativamente na durabilidade e, conseqüentemente, na segurança das estruturas.

Para a caracterização da resistência à tração, um dos métodos mais utilizados é o ensaio brasileiro, cujo método consiste basicamente na aplicação de um carregamento distribuído ao longo de duas linhas diretrizes alinhadas nos dois extremos opostos de um cilindro constituído do material a ser estudado, no presente caso o concreto, até a ruptura do espécime ao longo de uma fissura que interliga as duas extremidades de carregamento. Nas duas regiões de contato devem ser utilizados elementos de uniformização das tensões, os quais variam de acordo com as indicações normativas para o material estudado. Na Figura 1 em (a) é ilustrado o procedimento do ensaio brasileiro e em (b) a ruptura típica obtida experimentalmente no concreto.

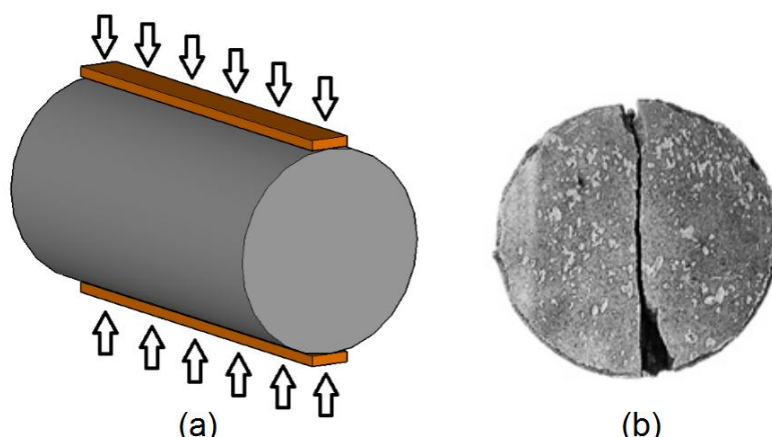


Figura 1. Ensaio brasileiro: a) Procedimento experimental; b) Ruptura típica

A popularidade deste método experimental se dá pela sua facilidade de execução em comparação com os demais métodos existentes, a tração direta e a tração na flexão, sendo seu resultado intermediário entre eles, somado ao fato de que o procedimento é praticamente o mesmo desde sua criação pelo notável engenheiro brasileiro popularmente conhecido como Lobo Carneiro, no ano de 1943, quando apresentou-o durante a 5ª reunião da ABNT (Carneiro, 1943), sendo posteriormente, em 1947, reconhecido internacionalmente após sua apresentação na reunião internacional de laboratórios de testes de materiais, na cidade de Paris, quando da fundação da RILEM (Carneiro, 1947), sendo este principal motivo para a alcunha do ensaio (Fairbairn; Ulm, 2002), o qual também é utilizado na caracterização de materiais rochosos e cerâmicos, solos, misturas betuminosas para pavimentos flexíveis, etc.

No Brasil, o ensaio brasileiro para concretos e argamassas é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), a qual determina que os elementos colocados na superfície de contato devem ser planos e constituídos de madeira de consistência dura e com largura de $15 \pm 1\%$ em

relação ao diâmetro do espécime a ser ensaiado. Entretanto, a importância deste elemento e a influência por ele causada não é totalmente conhecida, sendo que para que as modelagens numéricas do ensaio sejam confiáveis é necessário estudar o seu comportamento. Dito isto, e em acréscimo ao fato de este ser um método de ensaio de grande popularidade, é totalmente justificável o seu estudo.

2.2 Embasamento teórico e distribuição da tensão

A ruptura do cilíndrico comprimido diametralmente ao longo do plano central vertical é resultante de uma tensão de tração normal à este, e assim perpendicular à aplicação do carregamento. Segundo a teoria da elasticidade a distribuição da componente de tensão normal ao plano central (σ_{xx}) de um cilindro comprimido é praticamente uniforme na parte central do espécime, e exerce tração em sua maior parte, com exceção das extremidades, como observado na Figura 2.

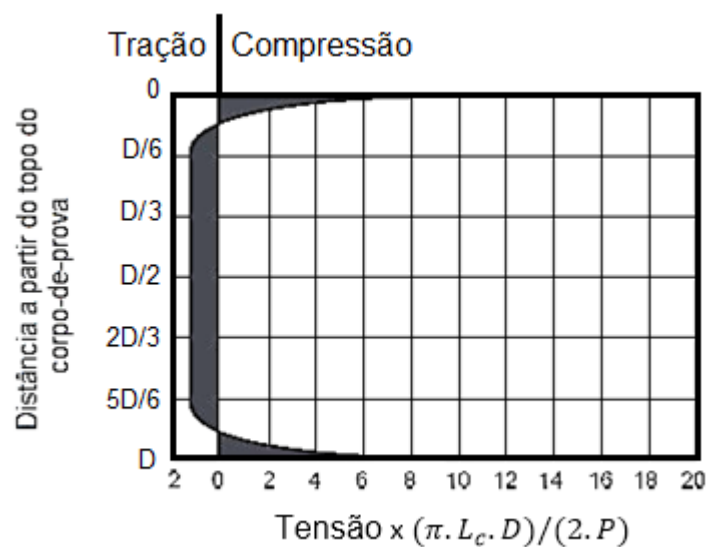


Figura 2. Distribuição da tensão no eixo vertical. Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008, p. 73)

Como observado no gráfico da Figura 2, o valor da tensão de tração máxima resultante é equivalente ao valor dado pela Equação 1, onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração indireta na compressão diametral, P é o carregamento máximo aplicado até a ruptura, D é o diâmetro e L_c o comprimento do cilindro.

$$f_{ct,sp} = \frac{2P}{D.L_c.\pi} \quad (1)$$

Entretanto, a distribuição de tensões observada, a qual foi obtida primeiramente pelo estudo de Hondros (1959), considera um ângulo resultante do arco de contato de aplicação do carregamento extremamente pequeno ($2\alpha < 3^\circ$). Com a utilização de elementos uniformizadores de madeira, no caso do concreto, pode ser observada uma deformação destes ao longo da execução do ensaio e, portanto, pode resultar em uma modificação na distribuição das tensões e afastando-se do valor dado pela Equação 1.

Na Figura 3 é exemplificada a diferença entre a largura do elemento uniformizador (b) e a largura efetiva de contato devido à deformação ($2t$), e o ângulo central resultante (2α).

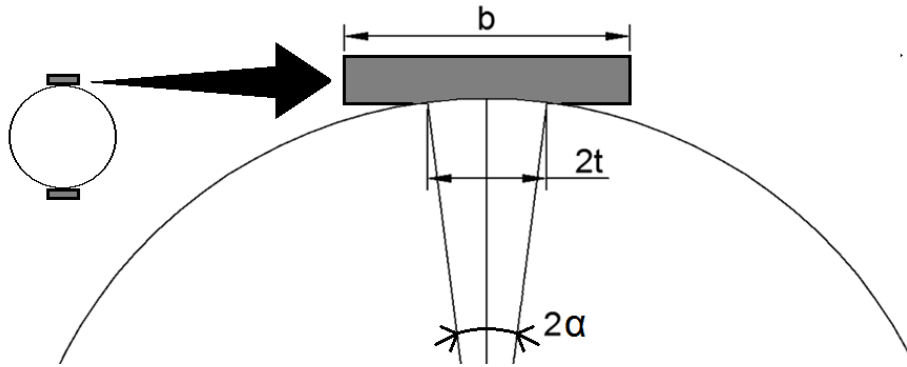


Figura 3. Diferença entre largura da tira, largura efetiva e ângulo central

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 O Método dos Elementos Discretos formados por Barras

O método dos elementos discretos formado por barras (LDEM) consiste na representação do elemento sólido em estudo por um modelo de treliça espacial constituída por uma sucessão uniforme de formas cúbicas idênticas denominadas módulos básicos, os quais são compostos por elementos uniaxiais (barras) interconectados em nós e possuem um comprimento finito pré-determinado (L). Sua utilização é de grande utilidade para a modelagem de casos que resultem em fraturas de materiais frágeis, pois, segundo Rios (2002), permite a desativação isoladamente das barras que ultrapassam o limite de resistência do material simplificando a operação.

As barras são capazes de resistir apenas à solicitação de cargas axiais, tração ou compressão, e os nós de interligação concentram as massas do elemento e apresentam três graus de liberdade representando assim as componentes ortogonais do vetor deslocamento em um sistema de referência global (Kostas, 2012). Cada módulo básico individual é formado por 20 barras e 9 nós, sendo um dos nós posicionado no centro do cubo e os demais em suas arestas, como representado na Figura 4, onde em (a) é observado o módulo básico e em (b) a treliça espacial formada.

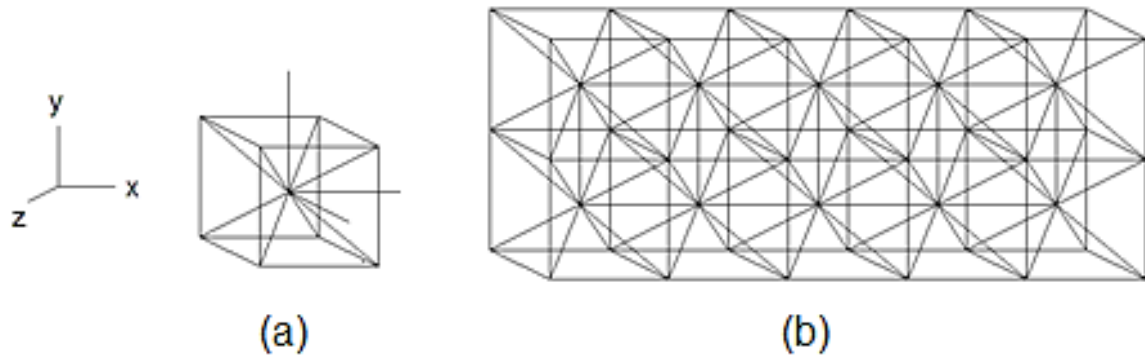


Figura 4. LDEM: a) Módulo básico; b) Treliza espacial final

As áreas das seções transversais dos elementos longitudinais e diagonais, conforme evidenciado no trabalho de (Nayfeh; Hefzy, 1978), são determinadas com a aplicação das Equações 2 e 3, respectivamente, considerando o material de comportamento elástico isotrópico.

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

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

Os coeficientes δ e ϕ , tratando-se de sólidos isotrópicos, são obtidos de acordo com as Equações 4 e 5, respectivamente, sendo que o coeficiente ν corresponde ao valor do coeficiente de Poisson do material, o qual resulta numa total equivalência com um contínuo isotrópico se igualado a 0,25, ou então, conforme Kostas (2012), promove uma modificação nos termos de cisalhamento quando difere de 0,25.

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

$$\phi = \frac{9 + 8\delta}{18 + 24\delta} \quad (5)$$

A equação do movimento, relacionada com a distribuição das massas nodais do modelo baseando-se na segunda Lei de Newton, é expressa pela Equação 6, onde $\ddot{x}$, $\dot{x}$ e x representam os vetores deslocamento, velocidade e aceleração, e M e C correspondem as matrizes de massa e de amortecimento. Os vetores $F(t)$ e $P(t)$, nesta ordem, representam as forças internas e externas atuantes sobre as massas nodais.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) - P(t) = 0 \quad (6)$$

A integração da Equação 6 no domínio do tempo é realizada no esquema de integração explícita de diferenças finitas, sendo que, conforme Miguel, Iturrioz e Riera (2014), a sua estabilidade depende da limitação do incremento de tempo de acordo com a Equação 7.

$$\Delta t \leq \frac{0,6L}{C_p} \quad (7)$$

3.2 Lei Constitutiva Bilinear

A utilização da Lei Bilinear, proposta inicialmente por Hillerborg (1978), na modelagem de materiais quase-frágeis é explicada pela possibilidade de acompanhar os efeitos de nucleação e de propagação de fissuras e, conseqüentemente, da redução da carga máxima resistida pelo elemento (Riera e Iturrioz, 1995). No modelo discreto, quando um elemento rompe é gerada uma área de fratura equivalente, e então libera-se uma energia de fratura correspondente à área e à equação constitutiva do material (Kostascki, 2012), sendo que a condição para validação da representatividade do modelo é de que a energia dissipada na fratura deste seja equivalente à do elemento contínuo (Maders et al. 2012).

Na Figura 5, pode ser observada (a) a representação da área de fratura de um espécime sólido e (b) a contribuição dos elementos axiais (5 longitudinais e 4 diagonais) a ser considerada na ruptura no modelo discreto.

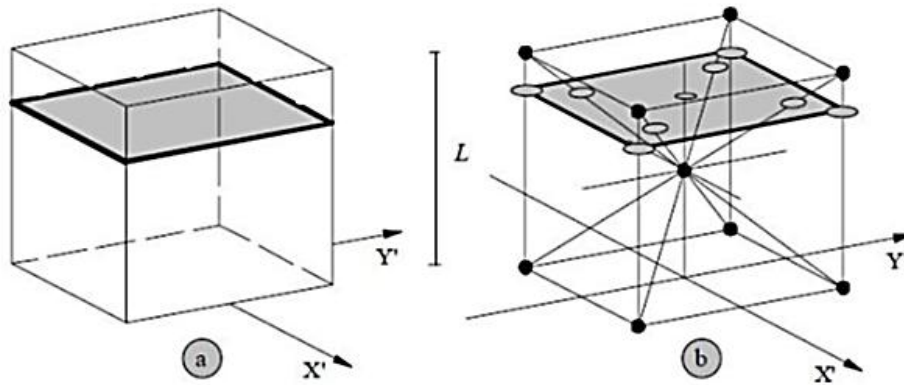


Figura 5. a) Sólido contínuo; b) Módulo básico do LDEM

A relação constitutiva bilinear é representada através do gráfico da Figura 6, sendo que a área definida pelo triângulo OAB representa a densidade de energia requerida para a ruptura da área de influência do elemento, pelo triângulo OPC a densidade de energia elástica armazenada no elemento e pelo triângulo definido por OAP a densidade de energia por fratura (Kostascki; Pinto; Iturrioz, 2010).

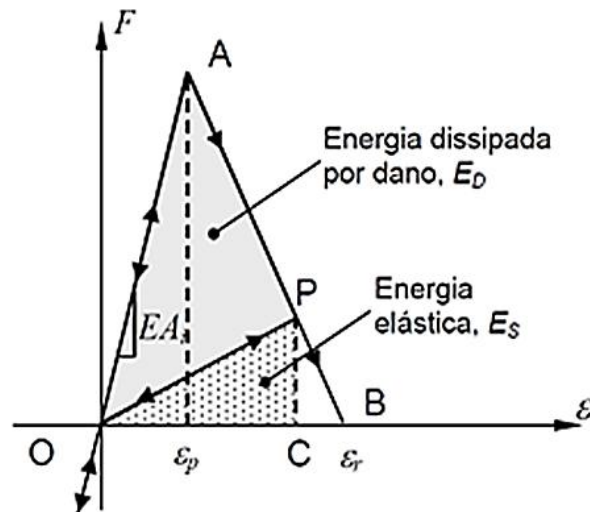


Figura 6. Modelo de Hilleborg

Na Figura 6 é possível observar alguns parâmetros que são definidos como: o eixo vertical F é referente a força axial atuante no elemento; o eixo horizontal ε é relacionado com a deformação específica, sendo ε_p a deformação crítica de falha e ε_r o limite máximo da deformação de falha, quando a estrutura perde toda sua capacidade de carregamento; E é o módulo de elasticidade do material; A é a área da seção transversal do elemento; L é o comprimento do módulo básico; A_l e A_d são, respectivamente, as áreas dos elementos longitudinais e diagonais.

Neste método, é admitido que a ruptura dos elementos ocorra apenas por tração, levando em consideração que a área sob a curva força/deformação deverá ser equivalente à densidade de energia requerida para fraturar a área de influência do elemento. No caso dos elementos solicitados por esforços compressivos, o comportamento exibido é linear-elástico e, portanto, a ruptura ocorre pela indução de esforços de tração indiretamente.

3.3 Modelagem da treliça

Segundo Kostas et al. (2010) o LDEM apresenta limitações na criação de elementos geometricamente complexos e na consideração de não linearidades resultantes de condições de borda e relações constitutivas. Com a integração do LDEM com o método dos elementos finitos (FEM), através da utilização do software Abaqus/Explicit, tais limitações podem ser evitadas (Pinto, 2010), sendo este eficaz em análise não-linear, transiente e dinâmico de sólidos e também para problemas quase estáticos (Kostas, 2012).

O modelo é construído com a superposição de módulos básicos e inserido no ambiente Abaqus /Explicit, utilizando-se do FEM de barras tridimensionais com 2 nós (T3D2), onde as barras das arestas, das faces, internas e diagonais, são representadas na Figura 7, respectivamente, pelas barras de cor vermelha, verde, azul e roxa, sendo que para cada grupo de barras é determinada uma área de seção transversal (S).

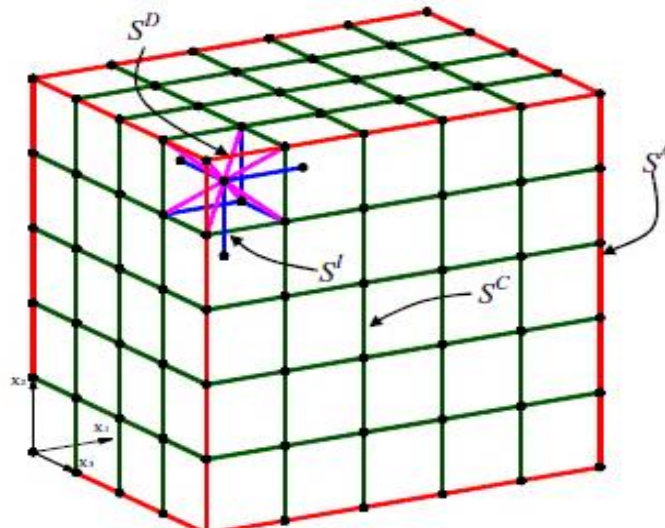


Figura 7. Prisma do LDEM e as barras de diferentes seções

3.4 Distribuição das massas

As massas encontram-se concentradas nos nós da treliça espacial formada, sendo que o valor destas dependem do volume de influência de cada nó individualmente. O cubo básico possui um volume equivalente a L^3 , estando contido nele o nó central mais o somatório da oitava parte daqueles localizados nos vértices, sendo que a massa deve ser igual à multiplicação $\rho \cdot L^3$, onde ρ é a massa específica do material constituinte. Dessa maneira, o nó central colabora com toda sua massa e os oito nós dos vértices contribuem com um oitavo cada e, portanto, os nós dos vértices (azul), arestas (vermelho) e faces (verde) possuem, respectivamente, um oitavo, um quarto e metade da massa integral do nó, como representado na Figura 8.

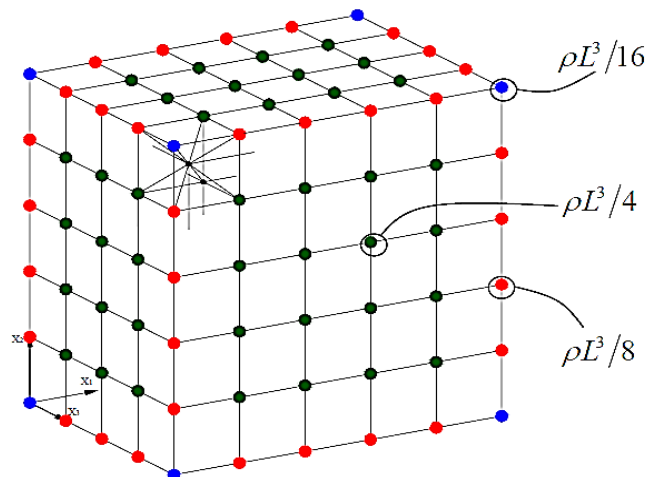


Figura 8. Discretização das massas na treliça

Entretanto, a concentração da massa apenas nos nós da treliça resultaria em erros de cálculo no software Abaqus/Explicit. Assim, são atribuídas às barras densidades de massas

equivalentes as massas nodais (Kosteski, 2012), sendo uma específica para as longitudinais e outra para as diagonais.

3.5 Introdução no Abaqus

Na modelagem da ruptura do concreto no ambiente Abaqus/Explicit, o comportamento à compressão é assumido como elástico linear até o dano total das barras, quando estas então podem ser eliminadas (Kosteski; Pinto; Iturrioz, 2010). Para representar as descontinuidades características ao comportamento frágil, o software utiliza-se do modelo de fissuras distribuídas (smeared crack model), de acordo com o critério de fratura proposto por Hillerborg (1978), segundo o qual a transmissão de tensão após a falha diminui com o acréscimo do deslocamento, como observado no gráfico da Figura 9, até atingido o valor correspondente à deformação limite.

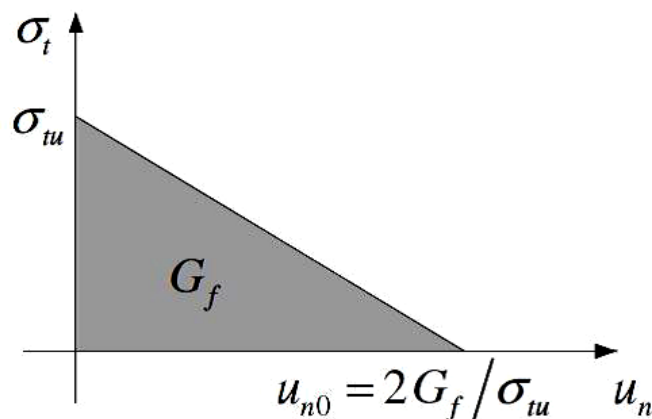


Figura 9. Tensão por deslocamento vinculado à energia de fratura

3.6 Aleatoriedade

A consideração de aleatoriedade no modelo LDEM introduzido no Abaqus/Explicit é baseada na tenacidade do material e numa distribuição de probabilidades do tipo Weibull de dois parâmetros (Rocha, 1989). Assim, é determinada uma quantidade x de conjuntos de propriedades de material, sendo gerada quatro vezes, ou seja, para cada uma das seções de arestas, faces, internas e diagonais.

Os tamanhos dos intervalos x são determinados em função da densidade de probabilidade da deformação crítica de falha, considerando que a probabilidade dentro destes seja igual, ou seja, de maneira que a área encerrada nos intervalos seja constante e equivalente à $1/x$ (Kosteski, Pinto, Iturrioz, 2010). Na Figura 10, é observada a função densidade de probabilidade com intervalos de probabilidade de ocorrência equivalente.

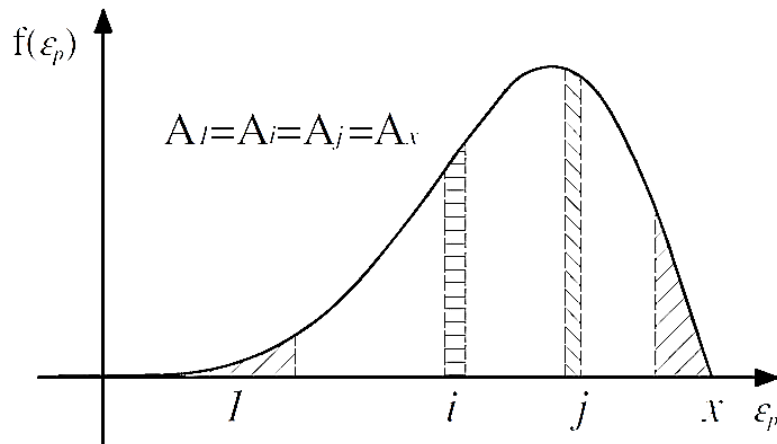


Figura 10. Curva de densidade de probabilidade

Para os conjuntos de propriedades de material criados é atribuído um valor médio para a deformação crítica ϵ_p , e, como a área de distribuição de probabilidade é equivalente, a probabilidade de um valor de ϵ_p ficar nestes intervalos faz-se constante. A aleatoriedade do elemento é obtida pelo sorteio de um número pertencente ao intervalo $[1; x]$ e da atribuição deste material ao elemento, obtendo-se assim a distribuição do tipo Weibull de ϵ_p e G_f .

4 METODOLOGIA

4.1 Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais para posterior comparação com as modelagens numéricas foram executados com corpos de prova de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, moldados com um concreto sem adições minerais, produzido com cimento CPV-ARI, água potável, agregados graúdos britados e miúdos de origem natural, o qual obteve a resistência à compressão (f_c) de 25,0 MPa aos 28 dias de idade padrão, caracterizado de acordo com o ensaio de compressão axial. Na Figura 11, em (a) é mostrado o procedimento do ensaio de compressão axial e em (b) a curva tensão *versus* deformação de um ensaio executado, da qual também é determinado o módulo de elasticidade do concreto (E) de aproximadamente 29,50 GPa.

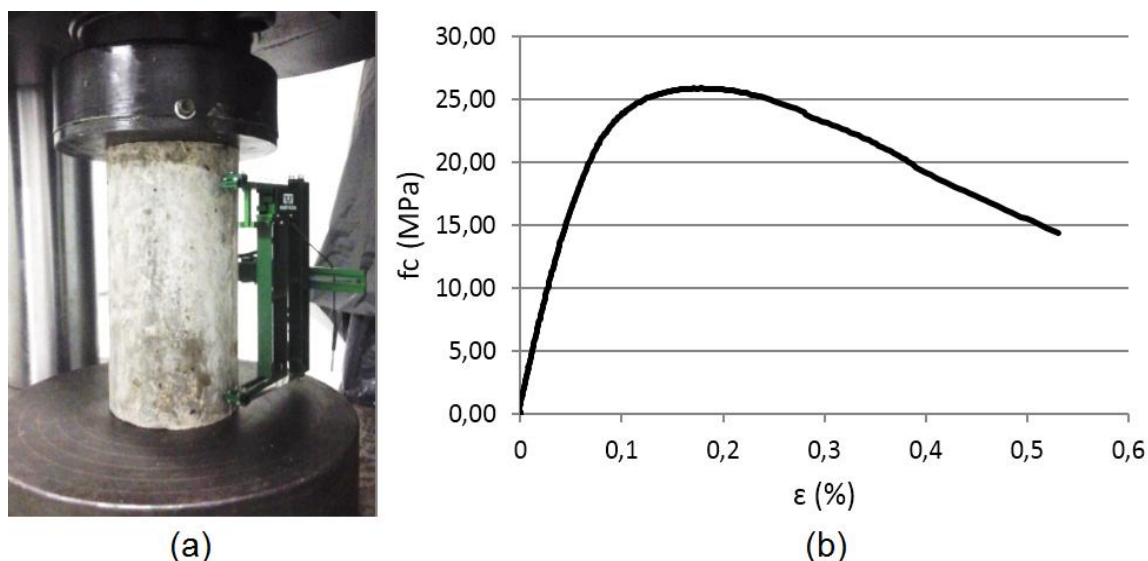


Figura 11. Compressão axial: (a) Procedimento do ensaio; (b) Curva tensão por deformação

Nos ensaios de compressão diametral foram executados os procedimentos de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo utilizados elementos uniformizadores planos feitos de madeira de consistência dura assim como recomendado pela normativa, no caso adotando-se a madeira de nome científico “*Dipteryx odorata*” ou popularmente conhecida como “Cumaru”, possuindo larguras (b) que perfaziam as proporções de 0.15, 0.25 e 0.30 em relação ao diâmetro (D) do espécime de concreto. O método de ensaio brasileiro é ilustrado na Figura 12 em (a) e em (b) são apresentadas as tiras de madeiras.

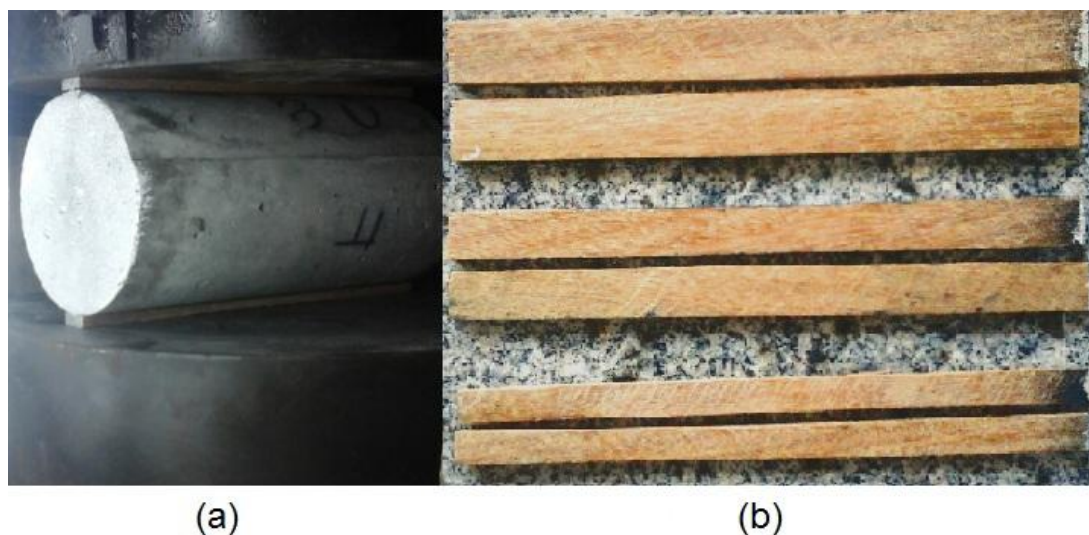


Figura 12. Ensaio brasileiro: (a) Procedimento do ensaio; (b) Tiras de madeira

Para uma melhor interpretação dos resultados da abordagem experimental, também foi realizada a coleta de imagens de diferentes ângulos dos cilindros ensaiados, de maneira que a forma e o local de origem das fissuras possam ser identificados, possibilitando assim uma

análise subjetiva da validade do ensaio através da verificação do comportamento da ruptura e se esta é coerente com os princípios teóricos.

4.2 Modelagens Numéricas

Neste trabalho, foram modelados corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, constituídos por um tamanho do comprimento L do módulo igual à 7,5 mm, resultando assim em malhas de 21x21 módulos básicos, respectivamente, nas direções x e y e com aproximadamente o dobro na direção z , ou seja, 41 módulos cada.

As propriedades escolhidas para o material dos cilindros foram adotadas de acordo com os dados utilizados no estudo de Riera, Miguel e Iturrioz (2014), e encontram-se elencadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades adotadas para o material da malha.

Gf (N/m)	130,00	CV (Gf)	50%
E (GPa)	29,43	ρ (kg/m ³)	2266,70
Rfc	3	Ic	$4L$

Fonte: Riera, Miguel e Iturrioz (2014)

As malhas criadas no *software* Matlab foram então introduzidas no ambiente Abaqus/Explicit, onde foram confeccionados os elementos uniformizadores de tensão, através de Elementos Finitos (FEM) e considerados de comportamento elástico, sendo a estes atribuídas as propriedades de uma madeira de classe de resistência C60, com densidade de 800 kg/m³, módulo de elasticidade (E) perpendicular às fibras de 1,225 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3. Em seguida, foram posicionados acima e abaixo dos cilindros, como é observado na Figura 13, sendo então adicionada a interação entre os dois modelos afim de considerar o atrito.

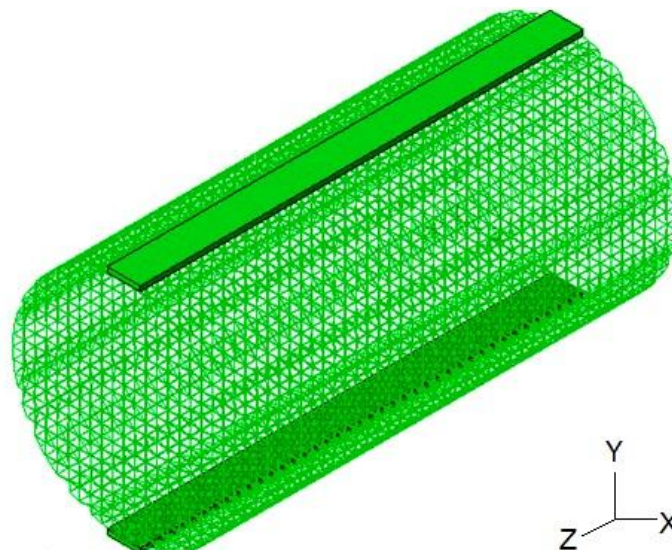
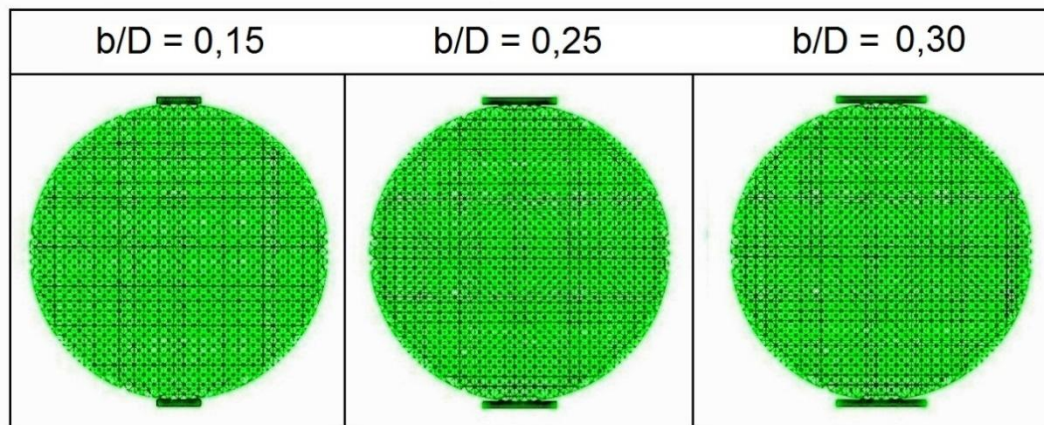


Figura 13. Modelo final integrando LDEM e FEM

Os elementos de madeira foram criados com 3 diferentes geometrias, sendo que todos possuem mesma espessura de 3,50 mm e comprimento de 300 mm, sendo alteradas apenas as suas larguras (b) resultando nas proporções de 0.15, 0.25 e 0.30 em relação ao diâmetro (D) do espécime. Dessa maneira, com as três larguras definidas, foram modelados 3 diferentes casos neste estudo, os quais são mostrados na Figura 14.

**Figura 14. Casos modelados no estudo**

Aos nós do elemento de contato superior foram aplicados deslocamentos gradualmente ao longo do ensaio, atendendo à velocidade de aplicação de carregamento definida pela NBR 7222 (ABNT, 2011) de $0,05 \pm 0,002$ MPa/s, enquanto que aos nós do elemento inferior foi atribuída a função de apoio e estes, portanto, resistem à solicitação imposta ao cilindro e permitem a determinação da carga total aplicada no ensaio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Tensão de tração indireta nos ensaios experimentais

Experimentalmente, foram utilizados 4 corpos de prova para cada proporção b/D adotada, resultando num total de 12 corpos de prova ensaiados no ensaio brasileiro. Os resultados obtidos em cada teste são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resistências máximas na tração por compressão diametral

b/D	Tensão máx. tração (MPa)				Média (MPa)	D. Pad. (MPa)	CV
	CP01	CP02	CP03	CP04			
0,15	2,70	3,00	2,88	2,63	2,80	0,17	5,96%
0,25	3,32	2,29	2,23	3,53	2,84	0,68	23,79%
0,30	3,08	3,08	3,07	3,66	3,22	0,29	9,14%

Nos resultados observados, é possível notar um alto coeficiente de variação, o que é um dos aspectos negativos atribuído ao ensaio brasileiro e que, devido aos baixos valores de resistência à tração dos materiais submetidos ao método, é bastante expressivo. Os resultados médios obtidos também são apresentados no gráfico da Figura 15.

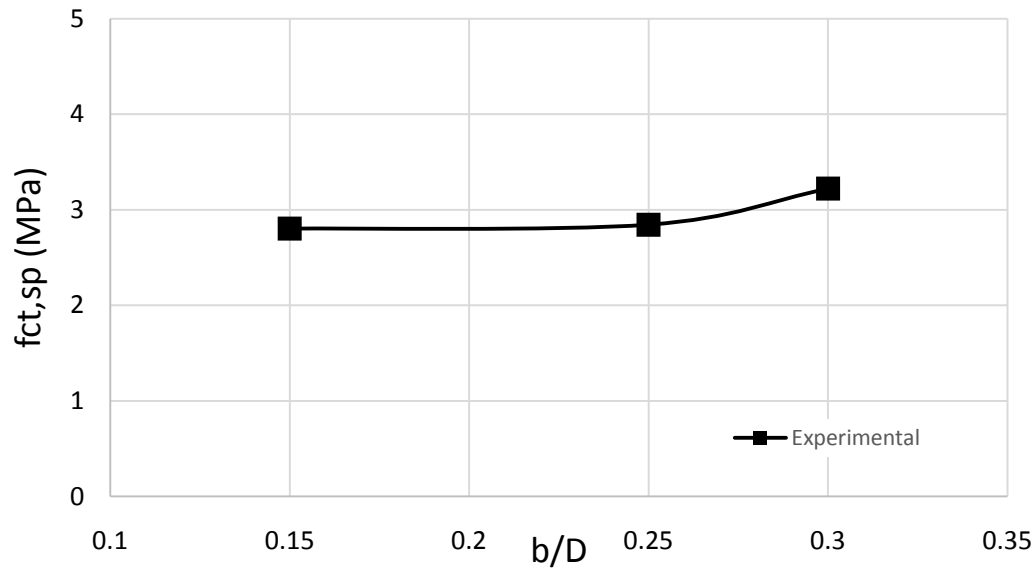


Figura 15. Gráfico das médias obtidas no ensaio brasileiro

5.2 Tensão de tração indireta nas modelagens numéricas

Os resultados obtidos para os carregamentos máximos nos 3 casos simulados numericamente foram aplicados à Equação 1, determinando assim a máxima resistência à tração dos espécimes. Os valores calculados são apresentados no gráfico da Figura 16.

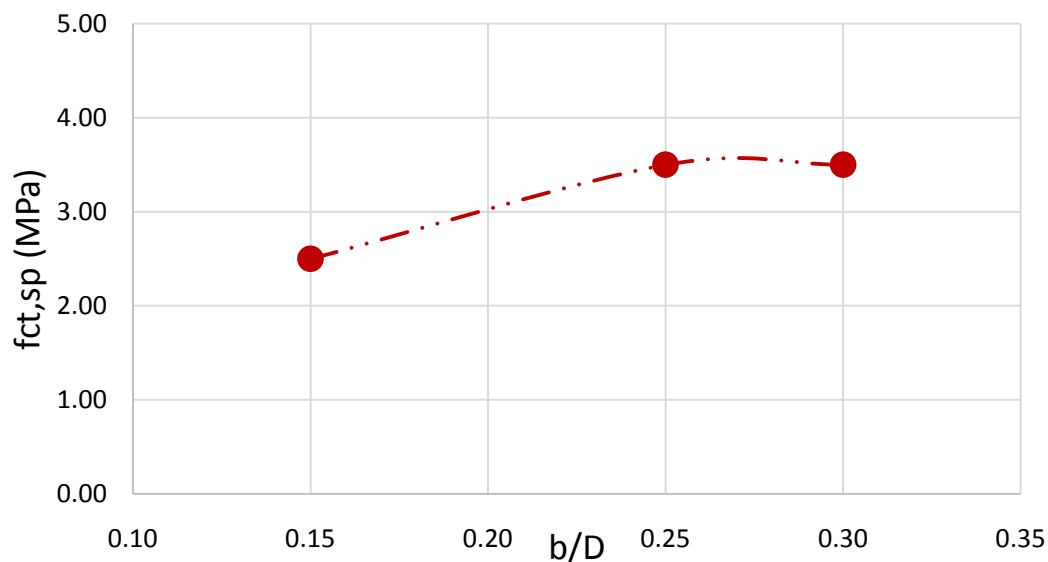


Figura 16. Gráfico das médias obtidas no ensaio brasileiro

É possível observar que com o aumento na proporção b/D de 0.15, relação esta adotada pela NBR 7222 (ABNT, 2011), para 0.25, o valor da carga de ruptura também aumentou e permaneceu praticamente inalterado para a proporção b/D de 0.30.

5.3 Comparação entre resultados experimentais e das modelagens

A fim de uma melhor comparação entre as resistências obtidas numérica e experimentalmente, foi elaborado o gráfico ilustrado na Figura 17, no qual é possível visualizar que os comportamentos foram distintos, embora os valores se mostrem próximos.

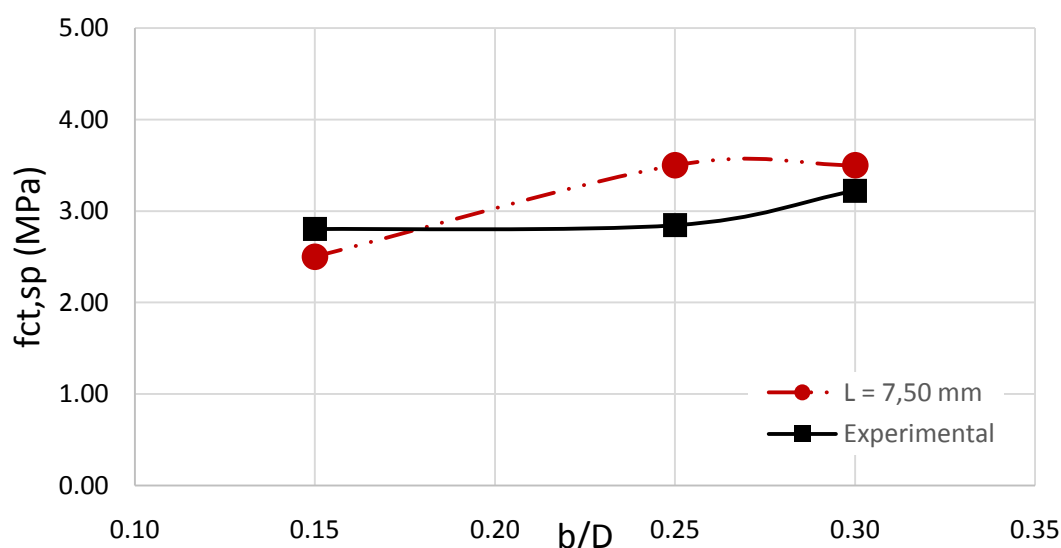


Figura 17. Gráfico das médias obtidas no ensaio brasileiro

Como pode ser verificado, para a proporção b/D igual à 0,25, o resultado obtido numericamente e a média dos resultados experimentais apresentaram uma diferença de aproximadamente 20%. Todavia, a representatividade dos resultados experimentais para esta proporção é prejudicada pelo expressivo CV de 23,79% obtido e, portanto, mais ensaios deveriam ser executados. Isto também pode explicar por que o acréscimo no carregamento máximo obtido com o aumento na proporção b/D ocorreu experimentalmente apenas para a relação b/D igual à 0,30, embora com uma variação menos expressiva, de cerca de 12%, enquanto que o aumento foi de praticamente o dobro deste valor nas modelagens numéricas.

Ainda é possível afirmar que, das três proporções b/D estudadas, a relação de 0.15 recomendada pela NBR 7222 (ABNT, 2011) resultou no menor CV entre todos os ensaios experimentais, num valor de 5,96%, o que indica que sua adoção é coerente e, além disso, para esta largura a resistência obtida foi de 2,80 MPa, ou de 2,50 MPa no caso das modelagens, sendo que estes valores são próximos ao esperado para um concreto de resistência à compressão de 25 MPa, como o adotado neste estudo.

5.4 Rupturas típicas experimentais e das simulações

Outra maneira de se realizar a comparação dos resultados numéricos e experimentais é a avaliação da forma de ruptura exibida pelos espécimes ensaiados e modelados. Na Figura 18 são ilustradas as rupturas obtidas para a proporção $b/D = 0,15$, para (a) a modelagem

numérica em dois estágios da evolução da fissura, sendo t_0 o inicial e t_1 o estágio mais avançado, e para (b) um ensaio experimental.

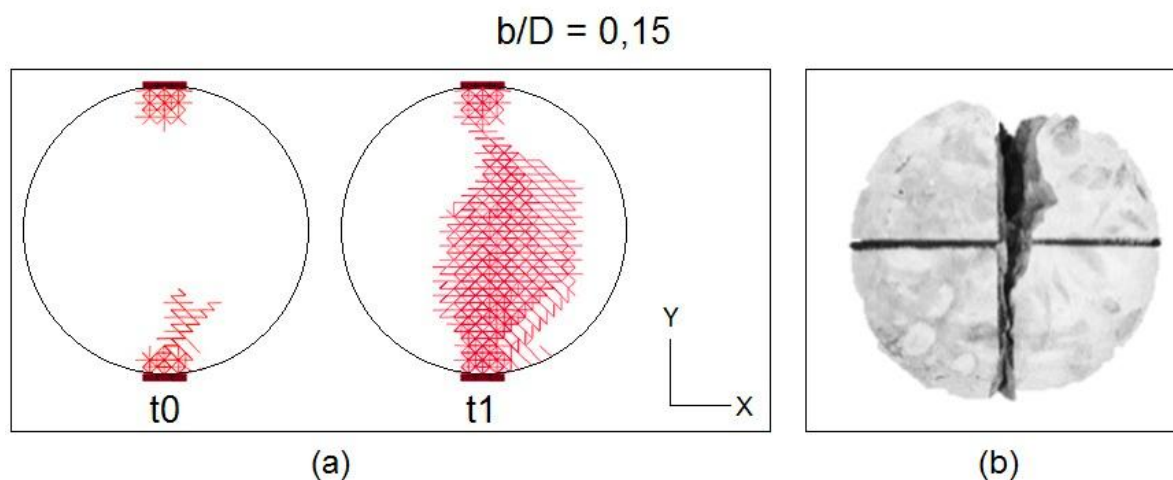


Figura 18. Fissura obtida com $b/D = 0.15$: (a) modelagem; (b) experimental

Como é possível verificar, a fissura obtida experimentalmente para a proporção apresentada foi bastante regular, como é previsto pela teoria, embora a parte superior exiba uma fragmentação elevada que indica que esta se iniciou na borda e não no centro. De modo semelhante, a fissura obtida na simulação também se iniciou na borda, propagando-se em direção ao centro do espécime, mas a fissuração neste caso foi mais irregular.

Nas Figuras 19 e 20, de maneira análoga à Figura 18, são apresentadas as fissuras obtidas experimental e numericamente para as proporções $b/D = 0.25$ e 0.30 , respectivamente.

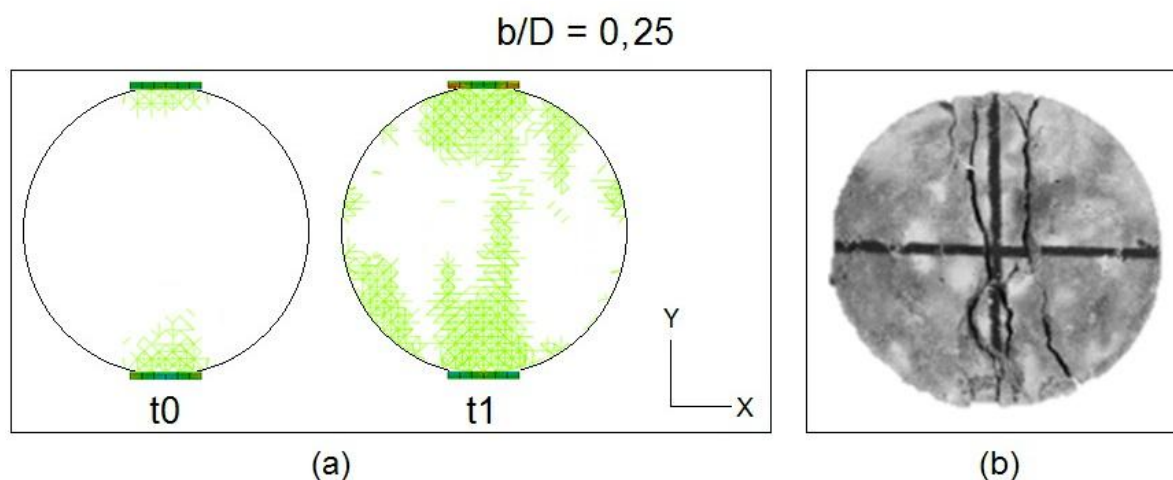


Figura 19. Fissura obtida com $b/D = 0.25$: (a) modelagem; (b) experimental

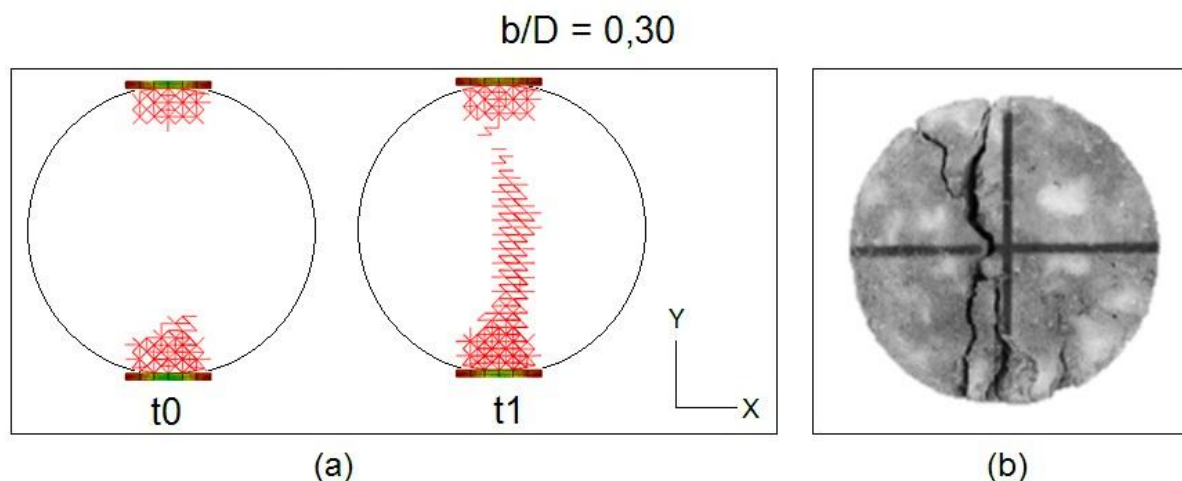


Figura 20. Fissura obtida com $b/D = 0,30$: (a) modelagem; (b) experimental

A forma de ruptura observada experimentalmente para as proporções 0.25 e 0.30 foi semelhante, o que parece indicar que a largura maior da tira não é totalmente efetiva, ou seja, a largura de contato final após a deformação da madeira é equivalente para os dois casos, embora os resultados médios tenham sido diferentes devido à variação elevada. Entretanto, nas simulações as formas de ruptura foram distintas entre si, sendo que o caso de $b/D = 0.25$ foi mais representativo da ruptura experimental, apresentando uma fragmentação elevada do espécime, enquanto que para $b/D = 0.30$ a fissura foi mais uniforme, o que é ideal na determinação da resistência à tração, mas não foi obtido para esta largura experimentalmente.

Visualizando a fissura de uma vista superior, é possível perceber mais claramente a diferença entre a irregularidade apresentada nos ensaios experimentais com o aumento na largura das tiras de madeira utilizadas nos ensaios experimentais, como mostrado na Figura 21,

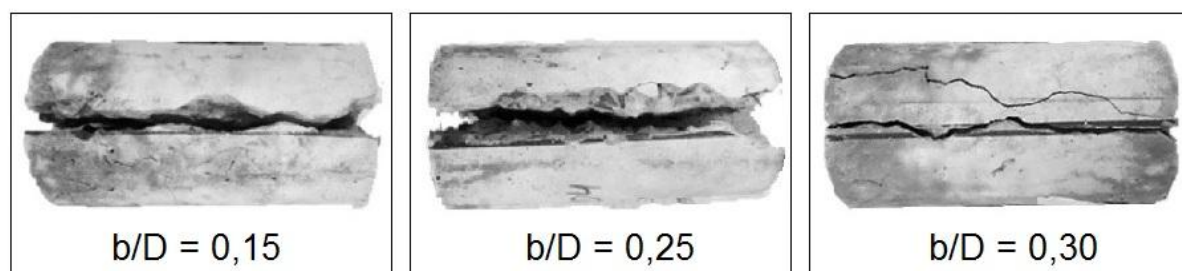


Figura 21. Vista superior das fissuras obtidas experimentalmente

6 CONCLUSÃO

As modelagens numéricas executadas neste trabalho permitiram acompanhar a evolução das fissuras de maneira mais clara do que na abordagem experimental, entretanto, analisando as imagens dos corpos de prova de concreto ensaiados e a aparência de sua ruptura, é possível concluir que em ambos os casos as fissuras se originam na região de proximidade das bordas

de aplicação de carregamento sob as tiras. Tal comportamento não é coerente com os modelos teóricos que dão embasamento ao ensaio, pois estes atribuem a ruptura na compressão diametral à tensão máxima de tração que localiza-se na parcela central do plano central do cilindro, onde pressupõe-se que deveria ser o local da fissura inicial.

Além disso, o comportamento sugerido pelos resultados, de aumento no carregamento máximo suportado pelos espécimes tanto numericamente como experimentalmente, leva à interpretação incorreta de que a resistência à tração também aumenta, o que certamente não corresponde à realidade, pois as propriedades do material são as mesmas em todos os ensaios, tolerando-se apenas uma pequena variação devido à natureza não homogênea do concreto. O que isso indica na verdade é que a expressão matemática aqui apresentada como Equação 1, utilizada para o cálculo da máxima tensão, não leva em consideração a largura de distribuição da carga, ou seja, representa um caso ideal com uma carga concentrada em uma linha ao longo do comprimento do cilindro.

Dessa maneira, é evidenciada a influência da largura do elemento de madeira na distribuição das tensões no espécime, sendo que por apresentar uma variação considerável entre os resultados de testes experimentais para um mesmo caso, é preciso admitir que o ajuste do corpo de prova no equipamento de ensaios mecânicos também é um fator importante a ser considerado. Assim, para a determinação de um resultado mais representativo da resistência à tração do concreto seria necessário um número grande de amostras e, preferencialmente, da comparação destes resultados com os obtidos por outros métodos de ensaio.

Tal conclusão enfatiza a necessidade de métodos mais simples para a caracterização do concreto, sendo que a alternativa mais racional existente é a modelagem numérica, de maneira que a investigação destes fatores de influência permite uma melhor representatividade dos casos estudados. Assim, é recomendado que em estudos futuros sobre o ensaio brasileiro sejam investigadas mais proporções de b/D , a remoção das tiras, e também a adoção de outros parâmetros do material, pois cabe salientar que os parâmetros adotados neste estudo, utilizados no trabalho de Riera, Miguel e Iturrioz (2014), resultaram em valores de resistência inferiores aos esperados, embora, a forma de ruptura e o comportamento observado sejam semelhantes.

Agradecimentos:

Os autores agradecem o apoio da UNIPAMPA da FAPERGS e da CNPQ que fizeram e fazem o possível para a realização de nossas pesquisas.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

Carneiro, F. L. L. B. *Um novo método para determinar a resistência à tração do concreto*. Anais da 5ª reunião da ABNT. 3a. seção, p. 126-129, Set. 1943.

Carneiro, F. L. L. B. *Résistance à la traction des bétons-Une nouvelle méthode pour la détermination de la résistance à la traction des bétons*. Réunion Internationale des Laboratoires d'Essai - Foundation of RILEM. Jun.1947.

Fairbairn, 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*, v. 35, p. 195-196, Abr. 2002.

Fusco, P. B. *Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados*. 1ª Ed. São Paulo: PINI, 2008.

Hillerborg, A. A model for fracture analysis. *Cod LUTVDG/TV BM-3005*, p.1-8, 1978.

Hondros, G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. *Australian Journal of Applied Science*, Melbourne, v. 10, n. 3, p. 243-268, 1959.

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 Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

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*, Associação Argentina de Mecânica Computacional Vol. XXIX, Buenos Aires, p. 5259-5283, 2010.

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.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3º ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, 2008.

Nayfeh, H., Hefzy, S. Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. *AIAA Journal*, v. 16(8), p. 779-787, 1978.

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*. *Eng. Struc.*, v. 81, p. 10-21, 2014.

Rios, R. D. *Aplicações do Método dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto*. 2002. 151 f. Tese (Doutorado) - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

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