

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FRANCISCO JUNIOR KECHE DOS SANTOS

ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA CONCRETOS

**Alegrete
2017**

FRANCISCO JUNIOR KECHE DOS SANTOS

ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA CONCRETOS

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
2017**

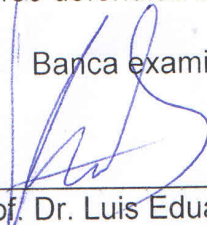
FRANCISCO JUNIOR KECHE DOS SANTOS

ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA CONCRETOS

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: 30 de Novembro de 2017

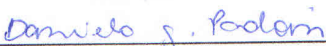
Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno
(UNIPAMPA)



Me. Eng^a. Daniela Galiotto Padoin
(UNIPAMPA)

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha mãe Maria Helena por sempre me apoiar na busca de meus objetivos e por me ensinar a valorizar o que realmente é importante na vida.

Ao meu pai Francisco por nunca deixar que nada me faltasse e por torcer pela minha felicidade sem precisar usar muitas palavras para demonstrar isso.

Ao meu irmão Cleiton pela amizade, parceria, confiança e por me ensinar que música boa nem sempre toca em todas as rádios.

As demais pessoas de minha família que me apoiaram nesta empreitada, em especial as minhas tias Marlene e Tere.

A minha amiga Laísa por me dar uma passagem de saída da ilha deserta em que eu vivia e por me acompanhar nessa jornada na estrada das galáxias.

Ao meu amigo Matthews pela ajuda na execução deste trabalho em laboratório, bem como pela parceria nas horas dispendidas em partidas de pebolim.

Aos meus amigos Camila, Natália, Felipe, Caio, Bárbara, Hianna, Gabriella, Paulo, Júlia, Emanuele, Raquel, Marcos Paulo, Nadine, Mônica, Ismael, Alan, Lucas, e tantos outros com quem compartilhei momentos de alegria, estresse, festa, cansaço, desespero e alívio durante estes 5 anos de minha vida.

Ao Mateus e a Ana Paula pela ótima companhia durante as madrugadas passadas em claro.

Ao meu orientador Luis Eduardo Kostaski pela confiança, paciência e por me oferecer a oportunidade de adquirir conhecimentos que ajudaram a me tornar um profissional mais completo e preparado para as adversidades.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

A Deus, ou seja lá qual for o nome dessa vontade de fazer o mundo um lugar melhor.

“We can judge our progress by the courage of our questions and the depth of our answers, our willingness to embrace what is true rather than what feels good.”

Carl Sagan

RESUMO

O ensaio de compressão diametral, ou o ensaio brasileiro como também é conhecido, é um método de ensaio experimental para a determinação da resistência mecânica aos esforços de tração de grande popularidade na área de caracterização de materiais, sendo aplicado ao concreto, argamassas, misturas asfálticas, rochas, solos, entre outros. Entretanto, o método de aplicação de carregamento no espécime cilíndrico varia de acordo com o material caracterizado, embora a formulação utilizada para o cálculo da resistência máxima no ensaio seja a mesma em todos os casos, pois a teoria que embasa o método despreza a influência do elemento utilizado na borda do cilindro ao considerar um carregamento linear. Os principais objetivos deste estudo são a verificação experimental da existência de influência nos resultados causada por modificações nestes elementos auxiliares, sendo também realizada a gravação dos ensaios e a correlação digital de imagens para determinação das variações no comportamento das fissuras e, indiretamente, da distribuição das tensões resultantes nos espécimes. Com o estudo, foi possível identificar que a mudança na largura dos elementos, quando constituídos por madeira, não resulta em grandes alterações nos resultados, devido à deformação do material, enquanto que, para elementos metálicos, a largura mostra-se um fator de grande influência, principalmente devido ao cisalhamento nas extremidades de contato. Também foi possível concluir que o local de origem da fissura não coincide com o centro do cilindro em diversos ensaios, o que indica que a ruptura não ocorreu conforme prevê a teoria que dá embasamento ao método. Dessa maneira, é evidenciado que a formulação utilizada para o cálculo da resistência à tração pode ser considerada apenas uma aproximação do real valor característico do concreto.

Palavras-chave: Ensaio brasileiro, tiras de madeira, correlação digital de imagens.

ABSTRACT

The splitting tensile test, or the Brazilian test as it is also known, is an experimental test method for the determination of the mechanical tensile strength, which is very popular in the area of materials characterization, being applied to concrete, mortars, asphalt mixtures, rocks, soils, among others. However, the loading application method in the cylindrical specimen varies according to the characterized material, although the formulation used for the calculation of the maximum tensile strength in the test is the same in all cases, since the theory that supports the method disregards the influence of the element used at the edge of the cylinder by considering a linear load. This study aims the experimental verification of the existence of influence on the results caused by modifications in these auxiliary elements, and the recording of the tests and the digital image correlation to determine the variations in the behavior of the fissures and, indirectly, the distribution of the resulting stresses on the specimens. With the study, it was possible to identify that the change in the width of the elements, when constituted by wood, does not result in large changes in the results, due to the deformation of the material, whereas for metallic elements, the width is a great factor of influence, mainly due to shearing at the contact ends. It was also possible to conclude that the origin of the crack does not coincide with the center of the cylinder in several tests, which indicates that the rupture did not occur as predicted by the theory underlying the method. Thus, it is evidenced that the formulation used to calculate the tensile strength can be considered only an approximation of the real characteristic value of the concrete.

Key words: Brazilian test, strips of wood, digital image correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corpos de prova utilizados em cada método de ensaio de tração.....	19
Figura 2 - (a) Cilindro comprimido e eixo de carregamento; (b) Ruptura obtida em um ensaio experimental	21
Figura 3 - Arranjo do ensaio de compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011)	22
Figura 4 - Largura da tira e largura efetiva de contato	23
Figura 5 - Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro, ou mais conhecido como Lobo Carneiro, preparando um ensaio de compressão diametral de concreto	24
Figura 6 - (a) Método sugerido pela ISRM (1978); (b) Método normatizado pela D3967 (ASTM, 2016)	26
Figura 7 - (a) Friso metálico da ME 138 (DNER, 1994); (b) Aparato metálico da D6931 (ASTM, 2012)	27
Figura 8 - Caso idealizado de compressão diametral	28
Figura 9 - Modelo de carga distribuída em arco	29
Figura 10 - Carga distribuída em arco e ângulo resultante	31
Figura 11 - Distribuição do fator de severidade de tensão	32
Figura 12 - Largura efetiva $2t$ do arco de carregamento distribuído	33
Figura 13 - Variação da relação entre o valor de tensão de tração real e o valor obtido com a aplicação da Equação 3	34
Figura 14 - Resultados da análise numérica de elementos finitos e comparação com os resultados obtidos com a aplicação da Equação 10	35
Figura 15 - Resultados obtidos para diferentes larguras efetivas de contato	36
Figura 16 - Resultados obtidos para diferentes dimensões de corpos de prova	37
Figura 17 - Resultados obtidos experimentalmente	38
Figura 18 - Resultados obtidos experimentalmente	38
Figura 19 - Resultados obtidos para diferentes dimensões de corpos de prova	39
Figura 20 - (a) Tensões e deformações na região mediana; (b) Na extremidade ..	40
Figura 21 - Distribuição das tensões principais no eixo vertical no meio e na extremidade do cilindro comprimido	41

Figura 22 - (a) Distribuição das componentes de tensão e de deformação normais ao plano vertical do cilindro comprimido por carga pontual; (b) Por carga distribuída	42
Figura 23 - Esquema simplificado para captação de imagens	43
Figura 24 - Padrão estocástico produzido com tinta branca PVA e tinta preta em aerossol	44
Figura 25 - Subconjunto identificado e seu deslocamento relativo	44
Figura 26 - Diferentes padrões estocásticos analisados por Pan et. al (2008)	45
Figura 27 - (a) Campos de tensões e deslocamentos normais ao eixo vertical; (b) Validação experimental; (c) Paralelos ao eixo vertical; (d) Validação experimental	46
Figura 28 - Deformações horizontal, vertical e de cisalhamento	46
Figura 29 - Esquema de atividades executadas	47
Figura 30 - (a) Agregado graúdo; (b) Agregado miúdo	48
Figura 31 - Curvas das composições granulométricas dos agregados	49
Figura 32 - Curva da composição granulométrica do cimento CPV-ARI	50
Figura 33 - (a) Moldes para confecção dos corpos de prova; (b) moldes concretados; (c) desmoldados	52
Figura 34 - Equipamento para os ensaios mecânicos e aquisição dos dados	53
Figura 35 - (a) Ensaio brasileiro; (b) Taliscas a serem utilizadas	54
Figura 36 - (a) Fundo branco; (b) Padrão estocástico	55
Figura 37 - (a) Ensaio de compressão axial; (b) Extensômetro	56
Figura 38 - Detalhe da fixação da câmera e da iluminação	56
Figura 39 - Interface do software GOM Correlate	57
Figura 40 - Curvas tensão versus deformação do concreto	58
Figura 41 - (a) Fissuras na borda; (b) Ruptura prematura resultante	59
Figura 42 - Resultados do ensaio brasileiro e do ensaio de compressão axial	60
Figura 43 - Curvas tensão versus tempo de ensaio com tiras de madeira	61
Figura 44 - Curvas tensão versus tempo de ensaio com tiras metálicas	62
Figura 45 - Deformação das tiras de madeira	64
Figura 46 - Deslocamento relativo das faces das tiras de madeira	64
Figura 47 - Ângulos centrais α resultantes para diferentes larguras de b	65

Figura 48 - Tensão de tração segundo diferentes formulações	66
Figura 49 - Variação na distribuição das tensões para diferentes ângulos α	67
Figura 50 - Mapeamento da deformação do CP01 com tira de madeira e $b/d=0,10$	68
Figura 51 - Mapeamento da deformação do CP05 com tira de madeira e $b/d=0,10$	68
Figura 52 - Mapeamento da deformação do CP02 para tira de madeira e $b/d=0,10$	69
Figura 53 - Mapeamento da deformação do CP02 para tira de madeira e $b/d=0,15$	69
Figura 54 - Mapeamento da deformação do CP01 para tira de madeira e $b/d=0,15$	70
Figura 55 - Mapeamento da deformação do CP05 para tira de madeira e $b/d=0,15$	70
Figura 56 - Mapeamento da deformação do CP01 para tira de madeira e $b/d=0,20$	71
Figura 57 - Mapeamento da deformação do CP04 para tira de madeira e $b/d=0,20$	71
Figura 58 - Mapeamento das deformações do CP01 para tira metálica e $b/d=0,10$	72
Figura 59 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,10$	72
Figura 60 - Mapeamento das deformações do CP02 para tira metálica e $b/d=0,15$	72
Figura 61 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,15$	73
Figura 62 - Mapeamento das deformações do CP01 para tira metálica e $b/d=0,20$	73
Figura 63 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,20$	73
Figura 64 - (a) Linhas na superfície do espécime CP04; (b) Deslocamento relativo	74

Figura 65 - (a) Linhas na superfície do espécime CP01; (b) Deslocamento relativo	75
Figura 66 - (a) Deslocamento relativo para $b/d = 0,10$; (b) Para $b/d = 0,20$	75
Figura 67 - Resultados obtidos e resultados de Riera, Miguel e Iturrioz (2014)	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos agregados	48
Tabela 2 - Massas específicas da brita	49
Tabela 3 - Massa específica da areia.....	49
Tabela 4 - Massa específica	50
Tabela 5 - Traço de materiais para confecção do concreto	51
Tabela 6 - Dimensões das taliscas.....	54
Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio brasileiro para tiras de madeira	59
Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio brasileiro para tiras de metal	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO	17
2.1.1 Conceitos básicos sobre o concreto.....	17
2.1.2 Resistência à compressão axial, correlação empírica com a resistência à tração e métodos dos ensaios experimentais	18
2.2 O ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	20
2.2.1 Método de ensaio de tração na compressão diametral do concreto	20
2.2.2 Histórico do ensaio	23
2.2.3 Demais aplicações do ensaio	25
2.2.4 Embasamento teórico do ensaio com carga pontual.....	27
2.2.5 A distribuição das tensões para carga distribuída em arco	29
2.2.6 A validade do ensaio, ângulo do arco de contato e atrito	32
2.2.7 A largura efetiva de contato.....	33
2.2.8 O efeito escala e sua relação com a largura efetiva de contato	36
2.2.9 Local de origem da fissura	40
2.3 CORRELAÇÃO DIGITAL POR IMAGEM	42
2.3.1 Conceituação da técnica e parâmetros envolvidos	42
2.3.2 Aplicação do método para o estudo do ensaio brasileiro	45
3 METODOLOGIA	47
3.1 Descrição dos procedimentos do estudo.....	47
3.2 Caracterização dos materiais	48
3.2.1 Agregados	48
3.2.2 Cimento Portland.....	50
3.2.3 Superplastificante	51
3.2.4 Água	51
3.2.5 Tiras de carregamento	51
3.3 Concreto.....	51
3.3.1 Moldagem e cura do concreto	52

3.4 Ensaio para caracterização mecânica.....	53
3.4.1 Ensaio de tração por compressão diametral	54
3.4.2 Ensaio de compressão axial.....	55
3.5 Procedimentos para a correlação digital por imagem	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 Resistência à compressão e resistência à tração empírica.....	58
4.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	58
4.3 Velocidade de execução do ensaio brasileiro	61
4.4 Largura efetiva e ângulo central resultante	63
4.5 Tensões de tração de acordo com diferentes formulações, distribuição das tensões e comparação com outros trabalhos.....	65
4.6 Origem das fissuras, propagação e forma de ruptura	68
4.7 Comparação com os resultados de Riera, Miguel e Iturrioz (2014).....	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1 Conclusões.....	77
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de tração através da compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, internacionalmente conhecido como ensaio brasileiro ("*Brazilian Test*" em inglês) devido à nacionalidade de seu criador, o engenheiro Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro, é amplamente utilizado para obtenção de maneira indireta da resistência mecânica à tração do concreto e argamassas, conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), e também de outros materiais, devido principalmente à simplicidade de sua execução em comparação com outros métodos existentes, além da utilização dos mesmos equipamentos usualmente utilizados na caracterização da resistência à compressão axial do concreto, por exemplo.

Entretanto, mesmo sendo um ensaio bem estabelecido e cujo método de execução praticamente não foi alterado desde sua criação, o ensaio brasileiro ainda é objeto de estudo recorrente no campo de pesquisa do comportamento dos materiais, pois, dentre uma de suas deficiências, destaca-se a utilização de uma formulação baseada num modelo teórico que obtém o máximo valor de tensão a partir da aplicação de uma carga concentrada em um cilindro constituído por um material isotrópico linear-elástico, de maneira que a representatividade de tal caso idealizado é questionada para os materiais e métodos usualmente empregados, sendo que este valor obtido pode ser considerado próximo mas não exatamente equivalente ao da resistência real à tração (ROCCO et al., 1999a).

Além disso, as condições de aplicação do carregamento nos cilindros ensaiados variam em função dos materiais analisados, de acordo com as normativas competentes, podendo ou não serem utilizados elementos que possuem diferentes composições (madeira ou metal) e diferentes formatos (côncavo ou plano), tendo estes a finalidade de distribuir as tensões no espécime ensaiado e assim resultando em uma força distribuída distinta da carga pontual usada no modelo teórico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Neste estudo, é dada ênfase à análise da influência causada pela tira de madeira posicionada ao longo da superfície de contato entre a base de aplicação do carregamento e a lateral do corpo de prova cilíndrico, conforme indicação da NBR 7222 (ABNT, 2011) para o caso do concreto. Para tanto, será realizada a caracterização mecânica de um concreto convencional, observando-se as respectivas variações causadas nas resistências máximas à tração no ensaio brasileiro, de acordo com as modificações realizadas na geometria e material da tira, sendo aplicada a técnica de captação de dados pela correlação digital por imagem ("*Digital Image Correlation*", em inglês), a qual permite determinar os campos de deslocamento e deformação originados pelos esforços atuantes no material ao longo da execução dos ensaios experimentais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Realizar a caracterização mecânica do concreto através de ensaios experimentais de compressão axial e compressão diametral.
- b) Verificar a variação apresentada na resistência à tração indireta com a execução dos ensaios de compressão diametral com taliscas de madeira com diferentes larguras e com taliscas metálicas com uma concavidade equivalente à curvatura dos cilindros utilizados e com as mesmas larguras.
- c) Determinar o comprimento de contato efetivo e ângulo central resultante.
- d) Determinar o local de origem e a evolução das fissuras no concreto através da correlação digital por imagem.
- e) Confrontar as informações obtidas experimentalmente com os pressupostos baseados na teoria que fornece o embasamento para o ensaio.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, primeiramente são apresentados alguns conceitos básicos sobre o concreto e os métodos empíricos e experimentais utilizados para caracterização de suas resistências à compressão e à tração, e em seguida são apresentados o método experimental do ensaio de compressão diametral para concreto, seu histórico, as aplicações deste ensaio para demais materiais, os modelos utilizados para embasamento teórico e a revisão dos estudos presentes na literatura, os quais investigam a coerência destes modelos e se os parâmetros envolvidos são devidamente considerados.

2.1 Caracterização no estado endurecido do concreto

2.1.1 Conceitos básicos sobre o concreto

O concreto simples convencional produzido atualmente pode facilmente alcançar a resistência à compressão de 40 à 50 Mpa, sendo que a resistência à tração é usualmente inferior à 10 % deste valor (FUSCO, 2008). Assim sendo, como elemento estrutural, o concreto simples não é capaz de resistir por si só aos esforços atuantes quando submetido à flexão, por exemplo, onde numa mesma seção estão presentes tanto as tensões de compressão como tração (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014).

Com a finalidade de contornar a baixa resistência à tração do concreto, este pode ser utilizado em associação com barras de aço, as quais absorvem os esforços de tração, formando assim um material composto que é conhecido como concreto armado (ARAÚJO, 2010). Para que o concreto armado seja efetivo, as barras são posicionadas longitudinalmente na região tracionada do elemento e, através da aderência, os dois materiais, aço e concreto, trabalham solidariamente (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014).

Dessa maneira, com o uso sistemático do concreto armado no mercado da construção civil atual, os engenheiros passaram a desprezar a resistência à tração do concreto simples (METHA; MONTEIRO, 2008). Entretanto, segundo Balbo (2013), é importante investigar a resistência à tração do concreto, posto que são campos de

tensões de tração os responsáveis pela retração por secagem e consequente fissuração nas idades iniciais de cura deste.

Além disso, a baixa resistência à tração do concreto simples, pode interferir negativamente na sua durabilidade devido à exposição às intempéries do aço estrutural utilizado em elementos de concreto armado, sendo então estabelecidos limites máximos de abertura de fissuras de acordo com as classes de agressividade ambiental definidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), mostrando a importância deste parâmetro.

2.1.2 Resistência à compressão axial, correlação empírica com a resistência à tração e métodos dos ensaios experimentais

Os elementos feitos de concreto, mesmo estando na prática submetidos simultaneamente às tensões de compressão, tração e também cisalhamento em duas ou mais direções, são projetados de maneira a tirar vantagem principalmente de sua maior resistência à compressão. Isso é explicado pelo fato de que o ensaio de compressão axial do concreto é de fácil execução e fornece um índice geral de resistência através do qual podem ser deduzidas outras características como o módulo de elasticidade, impermeabilidade e resistência às intempéries e a sua resistência à tração (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O ensaio de compressão axial do concreto é regido pela NBR 5739 (ABNT, 2007) e consiste na aplicação de um carregamento crescente, à taxa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s em um corpo de prova cilíndrico moldado e curado segundo as especificações estabelecidas pela NBR 5738 (ABNT, 2007), até ocorrência da ruptura do mesmo, e a partir da relação entre a força máxima aplicada e a área da superfície submetida à aplicação da carga, é determinada a tensão máxima de compressão resistida pelo concreto, definida como sua resistência máxima à compressão (f_c).

Com este ensaio e baseando-se no estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), podem ser utilizadas equações por esta definidas através das quais se obtêm, empiricamente, um valor médio da resistência à tração, por meio do valor da resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}), que é obtida através do resultado obtido na compressão axial (f_c) e considerando-se o desvio padrão e a amostragem necessária.

Para concretos de classe de resistência até 50 Mpa, é utilizada a Equação 1:

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

Para concretos de classe de resistência superior à 50 Mpa, é utilizada a Equação 2:

$$f_{ct,m} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,11 \cdot f_{ck}) \quad \dots(2)$$

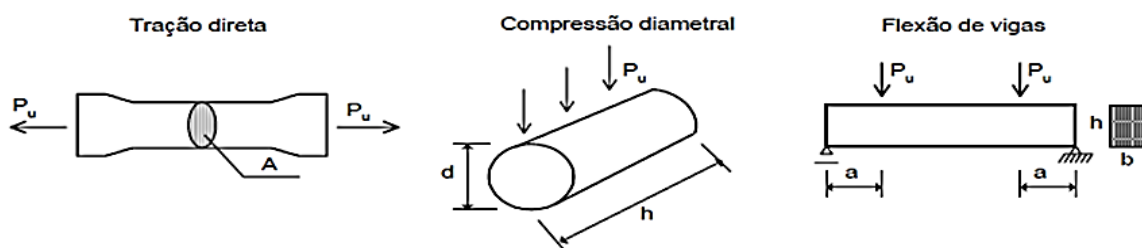
Sendo:

$f_{ct,m}$ – resistência à tração média, expressa em megapascals (MPa);

f_{ck} – resistência à compressão característica, em megapascals (MPa).

Estas formulas empíricas se explicam pelo fato de que o procedimento experimental mais adequado para a quantificação do valor mais representativo da resistência à tração do concreto ainda é motivo para estudos mais aprofundados, pois os três principais métodos de ensaio existentes na atualidade, os quais são a tração axial direta e os métodos indiretos de tração na flexão e por compressão diametral, como mostram os esquemas indicados na Figura 1, apresentam resultados que divergem entre si.

Figura 1 - Corpos de prova utilizados em cada método de ensaio de tração



Fonte: Adaptado de Araújo (2001, p. 1)

Dos três métodos, o ensaio de resistência à tração axial direta do concreto é o caso ideal, porém não possui norma brasileira que especifique o método de sua execução ou padronize o formato e dimensões dos corpos de prova ensaiados, sendo que os pesquisadores estabelecem seus próprios métodos, mas na maioria dos casos

o ensaio apresenta uma baixa reprodutibilidade pois o método de ancoragem do espécime ao dispositivo para a tração pode gerar campos de tensão que não podem ser desprezados, segundo Mehta e Monteiro (2008), e os quais podem causar a ruptura localizada nas extremidades, tornando-o inválido.

No caso do ensaio de tração indireta na flexão, conforme o método estabelecido pela NBR 12142 (ABNT, 2010), e com a utilização de corpos de prova prismáticos com dimensões definidas pela NBR 5738 (ABNT, 2007), é realizada a aplicação de duas cargas pontuais dispostas de maneira a coincidir com os dois terços de uma viga simplesmente apoiada e, dessa maneira, resultando em um trecho solicitado apenas pelo momento fletor positivo que provoca a ruptura do testemunho pela tração do concreto na parte inferior do elemento.

Entretanto, para que o resultado do ensaio de flexão seja válido é necessário que a ruptura ocorra à uma distância do terço médio de no máximo 5% do comprimento total da viga, sendo que o valor obtido pode ser de 50% até 100% maior que na tração axial, principalmente, por que as fórmulas estabelecidas pela NBR 12142 (ABNT, 2010) para a determinação da resistência máxima consideram uma relação linear entre as deformações e as tensões em toda a extensão da seção transversal da viga (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Dessa maneira, o ensaio de tração indireta pela compressão diametral de cilindros é o mais popular dos três métodos experimentais de caracterização, por ser de execução mais simples em relação à tração axial e por fornecer um valor mais confiável do que o ensaio à flexão, assim como afirma a NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual estabelece que a resistência à tração do concreto pode ser considerada equivalente à 90% e 70% dos resultados obtidos no ensaio brasileiro e no ensaio de tração na flexão, respectivamente.

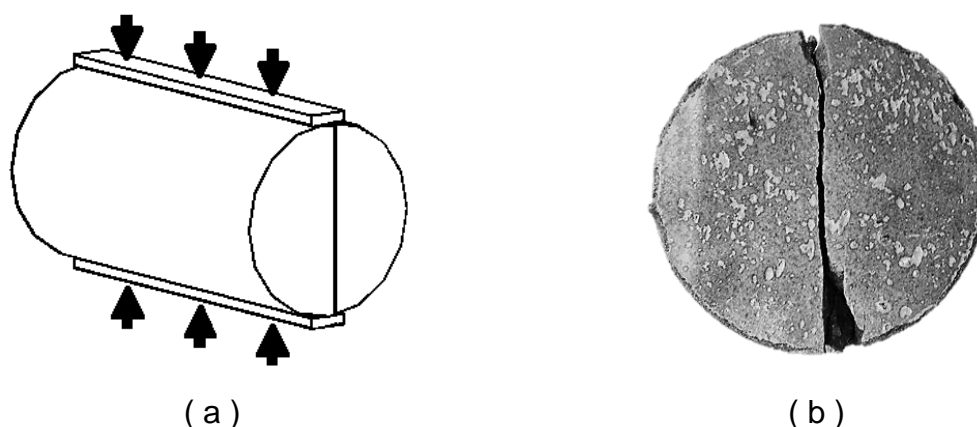
2.2 O ensaio de compressão diametral

2.2.1 Método de ensaio de tração na compressão diametral do concreto

O ensaio de tração por compressão diametral é um método indireto de se obter o valor da resistência do concreto ou argamassas, executado de acordo com as prescrições da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), com a utilização de corpos de prova cilíndricos idênticos aos utilizados no ensaio de compressão axial para o concreto,

conforme NBR 5738 (ABNT, 2007), os quais são comprimidos de modo que o contato entre este e as superfícies de aplicação de carga se dê em duas linhas geratrizes diametralmente opostas ao longo do comprimento do espécime, as quais devem formar um plano axial de ruptura que coincida com o eixo de aplicação de carga, como observado na Figura 2.

Figura 2 - (a) Cilindro comprimido e eixo de carregamento; (b) Ruptura obtida em um ensaio experimental

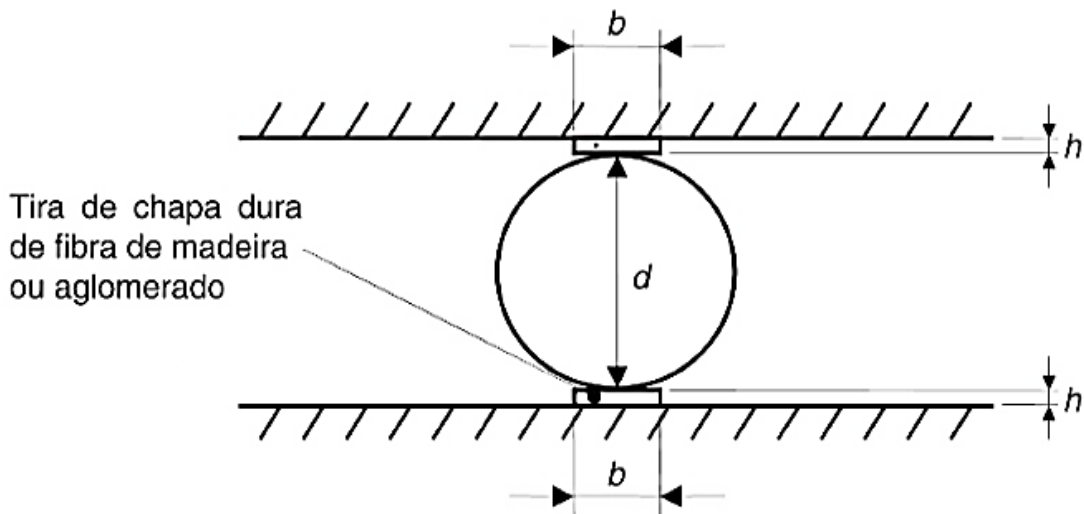


Fonte: Adaptado de Santos, Moreira e Bandeira (2016, p. 1)

A ruptura e consequente separação em duas partes do corpo de prova ocorre ao longo do plano formado pelas geratrizes de contato, causada pela tensão de tração normal à neste plano, ou seja, no sentido perpendicular à aplicação do carregamento, tensão esta que conforme a teoria da elasticidade, segundo Mehta e Monteiro (2008), resulta em uma fissura que se inicia no centro do cilindro, onde a tensão é máxima e é teoricamente uniforme, se propagando então para as extremidades de contato.

Para a correta execução do ensaio, devem ser utilizados dois elementos que atuam para melhor distribuição do carregamento ao longo das duas linhas de contato com os pratos do dispositivo de ensaio, sendo que, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), os elementos utilizados devem ser tiras de chapa dura de madeira ou aglomerado, também denominadas “taliscas”, isentas de defeitos e com comprimento igual ou superior à geratriz de contato, sendo as dimensões de sua seção transversal estabelecidas em uma largura (b) igual à 15 ± 1 % em relação ao diâmetro (d) do corpo de prova e com uma espessura h de $3,5 \pm 0,5$ milímetros, como indicado na Figura 3.

Figura 3 - Arranjo do ensaio de compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011)



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

Depois de realizado o alinhamento entre as taliscas e o corpo de prova, ajusta-se a posição dos pratos da máquina de ensaio gerando uma leve pressão que garante o correto posicionamento do conjunto. Após isso, inicia-se o ensaio, aplicando-se o carregamento continuamente e sem choques, com aumento constante da tensão de tração, a uma velocidade de ensaio de $0,05 \pm 0,002$ MPa/s até a ruptura do testemunho.

A resistência à tração indireta por compressão diametral é calculada com a utilização da Equação 3.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \dots(3)$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$ - resistência à tração por compressão diametral, expressa em megapascals (MPa);

P - força máxima obtida no ensaio, expressa em newtons (N);

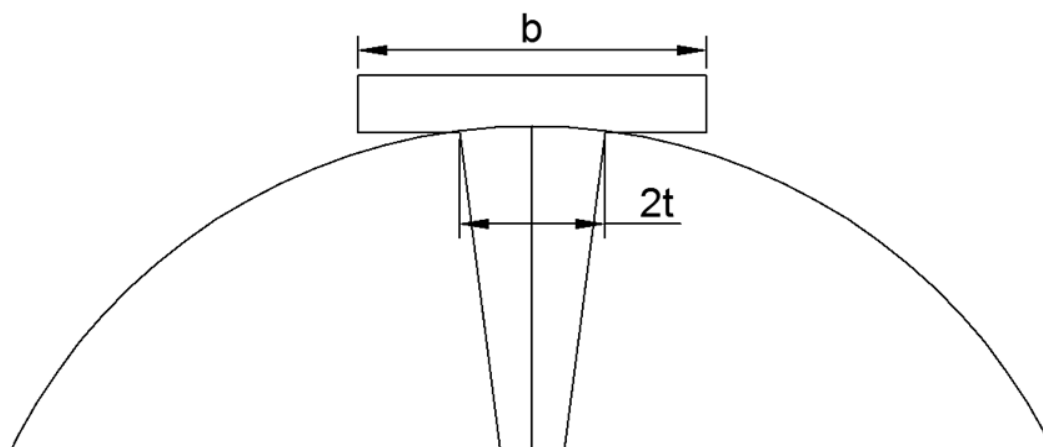
d - diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l - comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

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

Neste trabalho, é preciso diferenciar a largura (b) das tiras utilizadas, como recomendam as normativas, e a largura efetiva de contato e aplicação do carregamento ($2t$), de acordo com a ilustração da Figura 4, diferença que é explicada pela deformação deste elemento e a qual é significativa no caso da madeira e minimizada no uso de uma tira metálica, a fim de facilitar a posterior interpretação dos resultados.

Figura 4 - Largura da tira e largura efetiva de contato



Fonte: Elaboração própria

2.2.2 Histórico do ensaio

A origem deste método de ensaio data do ano de 1943, quando a cidade do Rio de Janeiro passava por intensa urbanização, destacando-se a construção da Avenida Getúlio Vargas na região central da cidade, obra esta que exigia a remoção das edificações que ocupavam seu futuro local de implementação, estando entre elas a capela de São Pedro do Clérigos, construção barroca do século XVII. Assim, com o desejo de se preservar a edificação histórica, foi incumbido à Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro (1913-2001), então engenheiro do Instituto Nacional de Tecnologia

e especialista em concreto, o estudo sobre a possibilidade de se deslocar a robusta edificação com o uso de cilindros de concreto (INT, 2005).

Feito semelhante já havia sido realizado com sucesso na Europa com rolos de aço, entretanto, a partir do estudo de cilindros de diâmetro de 600 mm, Lobo Carneiro constatou que o concreto rompia-se quase perfeitamente ao longo de um plano que conectava os dois pontos de aplicação do carregamento, impossibilitando assim a sua aplicação no caso designado (INT, 2005).

Na mesma época destes acontecimentos, transcorria a Segunda Guerra Mundial, na qual o Brasil também estava envolvido, e, devido à aplicação de concreto para a pavimentação de pistas de aeroportos, havia uma crescente necessidade por se determinar a resistência à tração do material de maneira mais prática em relação aos métodos existentes (tração direta e tração na flexão). Tal necessidade, coincidiu com os estudos conduzidos por Lobo Carneiro, o qual pode ser observado na Figura 5, e o levaram a desenvolver um método para o ensaio à tração do concreto pela compressão diametral de cilindros, sendo que a Equação 3 que representa o valor da tensão uniforme de tração, foi obtida por Carneiro a partir de simples deduções baseadas na teoria da elasticidade (FAIRBARN; ULM, 2002).

Figura 5 - Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro, ou mais conhecido como Lobo Carneiro, preparando um ensaio de compressão diametral de concreto



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

O método de ensaio foi proposto durante o 5º Encontro da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ainda no ano de 1943, tendo Lobo Carneiro recomendado o uso das duas tiras de madeira para evitar a possibilidade de falha localizada nos pontos de aplicação de carga. Mais tarde, em 1947, Lobo Carneiro leva o método à Paris na França, durante o “International Meeting of Materials Testing Laboratories”, quando da fundação da RILEM, e desde então este ensaio passou a ser reconhecido internacionalmente como “Brazilian Test” ou ainda como “Splitting Tensile Test”, o qual foi amplamente aceito e incluído em diversas normativas (FAIRBARN; ULM, 2002).

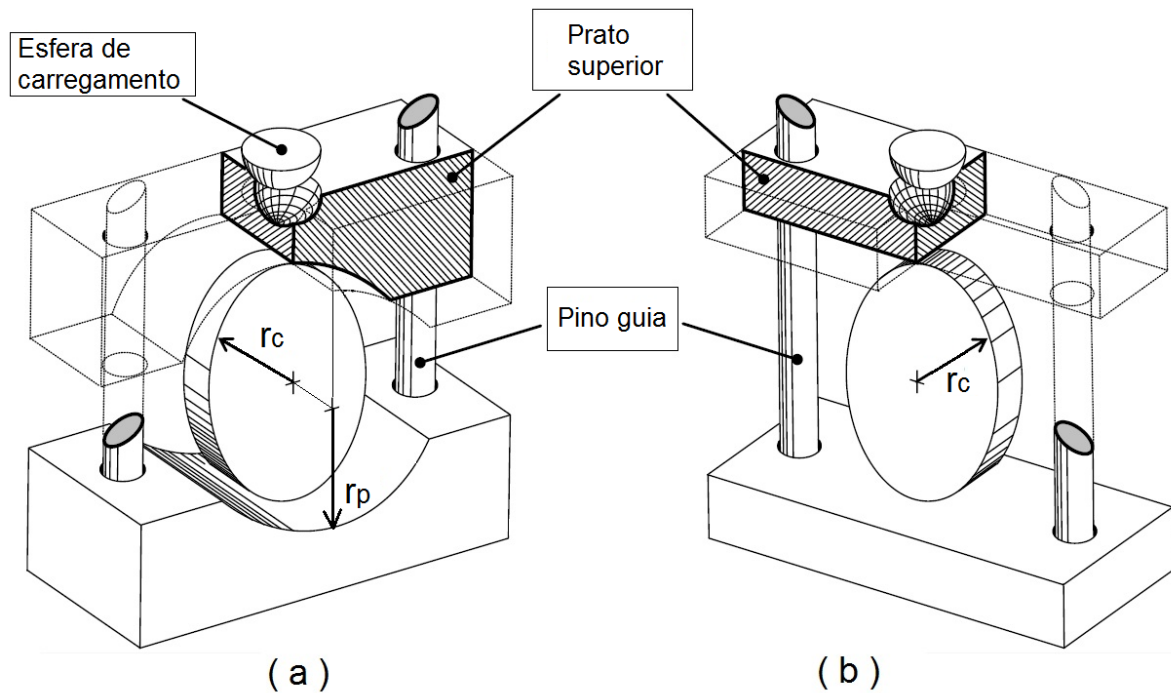
2.2.3 Demais aplicações do ensaio

Além do concreto, para o qual foi desenvolvido originalmente, o ensaio de compressão diametral também é usado para determinar a resistência à tração de outros materiais com diversos comportamentos mecânicos, como rochas, materiais cerâmicos, concreto asfáltico e solos.

No Brasil, entretanto, não existe uma normativa que padronize o método do ensaio brasileiro para a caracterização da resistência à tração de rochas, sendo que o ensaio geralmente é executado de acordo com as indicações do método sugerido pela ISRM (1978) ou então, excepcionalmente, de acordo com a norma D3967 (ASTM, 2011).

Os dois métodos diferem, principalmente, pelo meio de aplicação do carregamento nos espécimes, como pode ser observado na Figura 6, de maneira que o método da D3967 (ASTM, 2016) é semelhante ao ensaio normatizado para a caracterização de concreto e argamassas, utilizando pratos de aplicação planos, enquanto que o método sugerido pela ISRM (1978) recomenda a utilização de pratos curvados formando um raio de circunferência (rp) igual à 1,5 vezes, no mínimo, o raio do espécime ensaiado (rc).

Figura 6 - (a) Método sugerido pela ISRM (1978); (b) Método normatizado pela D3967 (ASTM, 2016)

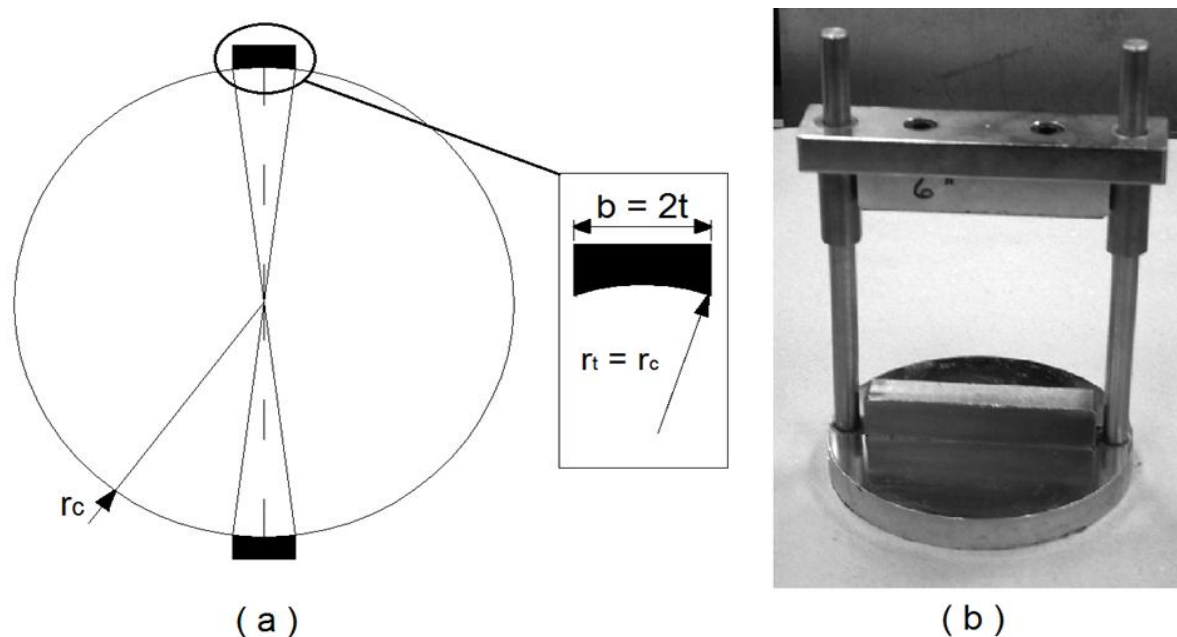


Fonte: Adaptado de Markides e Kourkoulis (2016, p. 145)

Segundo Mellor e Hawkes (1971), o método sugerido pela ISRM (1978), é eficiente em amenizar as tensões induzidas na borda de aplicação do carregamento e tem a finalidade de garantir uma ruptura ideal centralizada, contudo, sem confinar o material, além de que desta maneira o posicionamento do corpo de prova é facilitado e torna a execução do ensaio mais prática.

No caso de misturas betuminosas de agregados e ligantes hidráulicos viscosos, como o concreto asfáltico utilizado na execução de pavimentos flexíveis, a norma de referência no Brasil é a ME 138 (DNER, 1994), praticamente idêntica ao método proposto pela D6931 (ASTM, 2012), diferenciando-se dos métodos para concreto e rochas principalmente pela aplicação de carga através de um friso metálico côncavo com raio de curvatura (r_t) igual ao raio do espécime ensaiado (r_c), como observado na Figura 7.

Figura 7 - (a) Friso metálico da ME 138 (DNER, 1994); (b) Aparato metálico da D6931 (ASTM, 2012)



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

Ambas as normas, recomendam a utilização de um friso metálico com largura ($b \cong 2t$) de 12,70 mm para o ensaio de corpos de prova com 101,6 mm de diâmetro, ou então, no caso da norma americana, também são recomendados espécimes com 150 mm de diâmetro e frisos de 19,05 mm de largura.

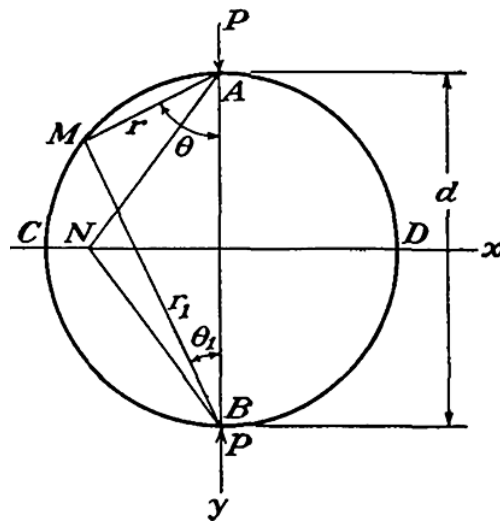
Assim sendo, é possível observar que o método empregado no ensaio de tração por compressão diametral pode diferir dependendo do material estudado e respectiva norma técnica, o que indica que este pode ser muito versátil, mas ao mesmo tempo levanta dúvidas quanto às influências causadas por tais modificações e se a Equação 3 é válida para todos os casos em que é aplicado.

2.2.4 Embasamento teórico do ensaio com carga pontual

Embora seja um ensaio mundialmente aceito, a Equação 3 utilizada para o cálculo da máxima tensão produzida durante a execução do ensaio de compressão diametral, ou ensaio brasileiro como também é conhecido, e considerada como a responsável pela ruptura, é obtida a partir da análise de um disco, constituído de material isotrópico, homogêneo e de comportamento linear elástico, comprimido por duas cargas pontuais, o que representa um caso idealizado.

O problema em questão, segundo Timoshenko e Goodier (1951), de uma força compressiva concentrada P aplicada à borda de um disco com diâmetro d , como representado pela Figura 8, considerando uma distribuição radial simples em um estado plano de tensões, resulta, em um ponto qualquer M da borda da circunferência, em duas componentes de tensão principais compressivas com intensidade calculada de acordo com a Equação 4.

Figura 8 - Caso idealizado de compressão diametral



Fonte: Timoshenko e Goodier (1951, p. 107)

$$\sigma_{1,3} = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d} \quad \dots(4)$$

Sendo:

$\sigma_{1,3}$ - Componentes principais de tensão.

Para manter a distribuição radial das tensões e como a circunferência do disco encontra-se livre de forças externas, Timoshenko e Goodier (1951) afirmam que se faz necessária a superposição de um esforço de tração, com a mesma intensidade das tensões principais compressivas na borda, na direção normal e uniforme ao longo de todo o plano do eixo vertical do disco, de maneira que o valor absoluto dado pela Equação 4 corresponde ao valor deste esforço.

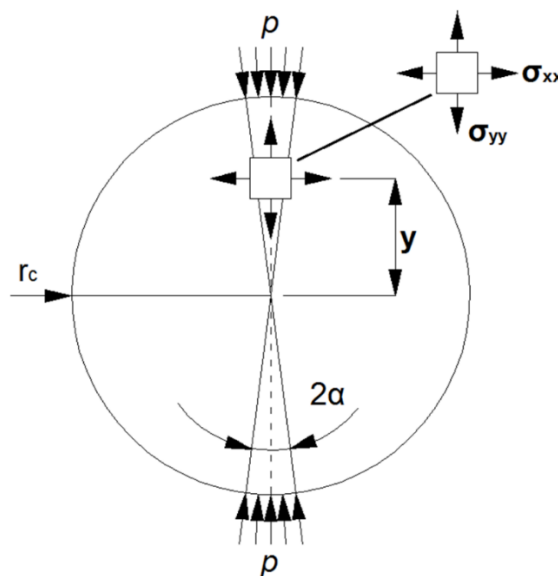
Assim, considerando que a solução para a carga pontual P na análise do disco é equivalente à uma carga P distribuída ao longo do comprimento L de um cilindro, (P/L) , e mudando o sinal para positivo, a Equação 4 torna-se a Equação 3.

Ainda, de acordo com Timoshenko e Goodier (1951), o ponto de aplicação do carregamento no espécime cilíndrico, teoricamente, estaria submetido à uma tensão de compressão de infinita grandeza, resultado de uma força pontual de intensidade finita sobre uma área infinitamente pequena, porém na prática o material do cilindro apresenta uma deformação quando comprimido e assim a área de contato é finita e, portanto, a carga não é pontual como no caso idealizado.

2.2.5 A distribuição das tensões para carga distribuída em arco

Com a finalidade de aperfeiçoar a análise do problema da distribuição das tensões num disco comprimido diametralmente, o estudo realizado por Hondros (1959), apud Fairhurst (1964), levou em consideração um carregamento uniforme (p) distribuído em um arco finito, formando um ângulo central (2α), como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo de carga distribuída em arco



Fonte: Adaptado de Fairhurst (1964, p. 535)

A partir desta abordagem, Hondros (1959), apud Fairhurst (1964), deduziu expressões analíticas para a distribuição das tensões neste caso, dentre elas as

Equações 5 e 6, as quais expressam o valor das componentes de tensões principais normal e paralela, respectivamente, ao longo do plano formado pelo eixo vertical central do disco comprimido.

$$\sigma_{xx}(0, y) = + \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot \left[\frac{(1 - y^2/r_c^2) \cdot \text{sen } 2\alpha}{1 - 2 \cdot y^2/r_c^2 \cdot \cos 2\alpha + y^4/r_c^4} - \tan^{-1} \left(\frac{1 + y^2/r_c^2}{1 - y^2/r_c^2} \cdot \tan \alpha \right) \right] \quad \dots(5)$$

$$\sigma_{yy}(0, y) = - \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot \left[\frac{(1 - y^2/r_c^2) \cdot \text{sen } 2\alpha}{1 - 2 \cdot y^2/r_c^2 \cdot \cos 2\alpha + y^4/r_c^4} + \tan^{-1} \left(\frac{1 + y^2/r_c^2}{1 - y^2/r_c^2} \cdot \tan \alpha \right) \right] \quad \dots(6)$$

Sendo:

y - Distância do centro do espécime;

r_c - Raio do disco.

A Equação 5, relativa à tensão normal ao eixo vertical, é de especial interesse no caso do ensaio brasileiro, principalmente no centro do espécime onde $y = 0$, sendo assim deduzida a relação demonstrada pela Equação 7, assumindo-se que esta semi-igualdade é válida para pequenos valores do ângulo central (2α).

$$\sigma_{xx} = + \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot (\text{sen } 2\alpha - \alpha) \cong \frac{2 \cdot p \cdot \alpha}{\pi} \quad \dots(7)$$

Considerando que o carregamento uniforme p usado para a análise do disco é equivalente à uma carga pontual P distribuída ao longo do comprimento do arco formado pelo ângulo 2α e da altura L de um cilindro, como mostra a igualdade descrita pela Equação 8, é então obtida a expressão indicada pela Equação 9.

$$p = + \frac{P}{2 \cdot \alpha \cdot r \cdot l} \rightarrow p \cdot \alpha = + \frac{P}{2 \cdot r \cdot l} = + \frac{P}{d \cdot l} \quad \dots(8)$$

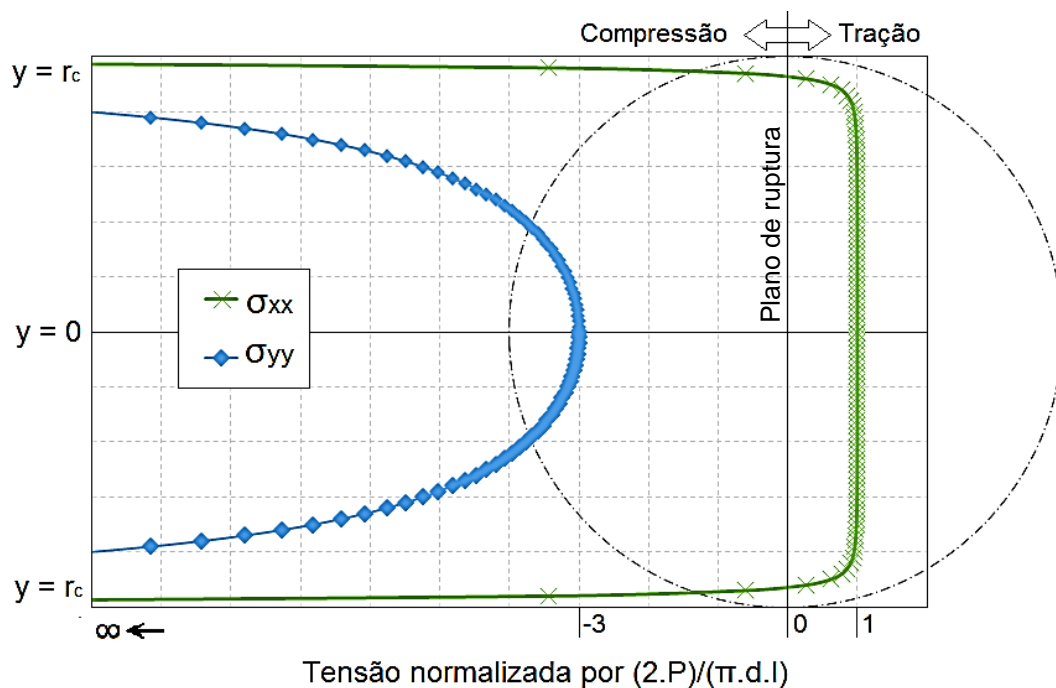
Logo,

$$\sigma_{xx} = + \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \dots(9)$$

Assim é possível afirmar que, para valores pequenos do ângulo central (2α) formado pelo arco de contato e aplicação de carregamento, a tensão calculada pela Equação 3, obtida de acordo com a análise do disco comprimido por cargas pontuais, é aproximadamente equivalente à tensão obtida pela análise de cargas distribuídas em arco e também causa a tração no plano perpendicular ao carregamento, mas não em sua totalidade.

A partir desta conclusão, e com a análise da distribuição da tensão principal paralela ao carregamento, a qual é compressiva e tem uma magnitude aproximadamente 3 vezes superior à tração, Hondros (1959), apud Fairhurst (1964), chegou a distribuição de tensões principais no eixo vertical ilustrada na Figura 10, para um ângulo $\alpha = \tan^{-1} 1/12$.

Figura 10 - Carga distribuída em arco e ângulo resultante



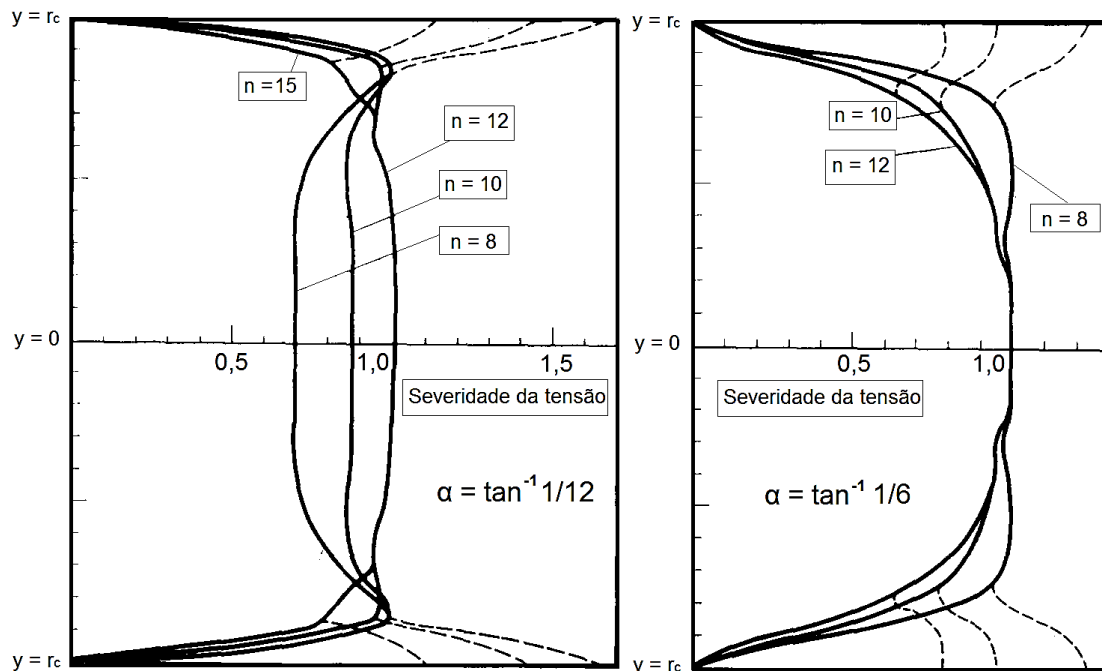
Fonte: Adaptado de Fairhurst (1964, p. 536)

Assim pode-se concluir que a principal diferença entre a análise teórica pelos modelos de cargas pontuais e de cargas distribuídas é de que a tensão de tração, neste último, é considerada uniforme apenas em uma parcela do plano vertical central, além de que, mesmo obtendo expressões que validam a Equação 3 utilizada para o cálculo da resistência à tração dos materiais ensaiados à compressão diametral, ambos os modelos baseiam-se no caso de discos comprimidos e não de cilindros.

2.2.6 A validade do ensaio, ângulo do arco de contato e atrito

A fim de verificar a aplicabilidade prática do ensaio para materiais de comportamento frágil, uma vez que este é embasado em modelos teóricos ideais, Fairhurst (1964) realiza o estudo do ensaio brasileiro através de um critério de ruptura que assume que a fratura ocorre pelo rápido crescimento de fissuras pré-existentes dispostas aleatoriamente na matriz do material, obtendo a distribuição de um parâmetro representativo da severidade das tensões observada na Figura 11, onde n é proporção entre as resistências à compressão e à tração do material e α o ângulo de contato de carregamento.

Figura 11 - Distribuição do fator de severidade de tensão



Fonte: Fairhurst (1964, p. 543)

Com o observado, a dependência da resistência à tensão de tração devido ao ângulo α é reduzida com o aumento na proporção n do material, entretanto, uma região maior é criticamente tensionada com um ângulo maior, de maneira que o resultado obtido para a resistência é mais representativo do corpo de prova como um todo do que apenas de um ponto concentrado (FAIRHURST, 1964).

Isso indica que para garantir que o início da fissura ocorra na região central, o ângulo α ideal estaria na ordem de $\tan^{-1} 1/8$ sendo que, segundo Fairhurst (1964),

também é necessário minimizar a tensão tangencial devida ao atrito no ponto de aplicação do carregamento, pois esta pode alterar significativamente a distribuição das tensões no disco.

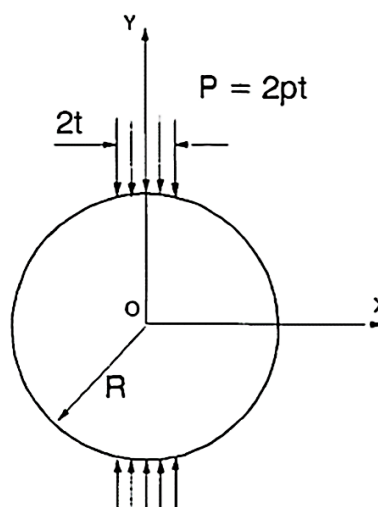
Conclusão semelhante é obtida por Mellor e Hawkes (1971), os quais afirmam que, embora não seja uma substituição definitiva para um ensaio de tração uniaxial direta idealizado, o ensaio brasileiro é uma opção viável para medida da resistência à tração, recomendando que sejam utilizadas tiras de compensado na região da borda do cilindro e assim reduzindo as tensões induzidas pelo atrito.

Entretanto, os trabalhos de Lavrov e Vervoort (2002) e Markides e Kourkoulis (2012) afirmam que a influência da fricção é significativa apenas na vizinhança da borda de contato, de maneira que o resultado do ensaio de compressão diametral pode ser considerado representativo na maioria dos casos, desde que seja assegurado que a fissura inicie no centro do disco.

2.2.7 A largura efetiva de contato

Com a finalidade de introduzir um parâmetro representativo da largura efetiva de aplicação de carregamento, denotada por $2t$, na expressão utilizada para a determinação da tensão de tração máxima no ensaio de compressão diametral, Tang (1994) estuda a distribuição de uma pressão uniforme ao longo de um arco finito de contato, semelhante à estudada por Hondros (1959), como é observado na Figura 12.

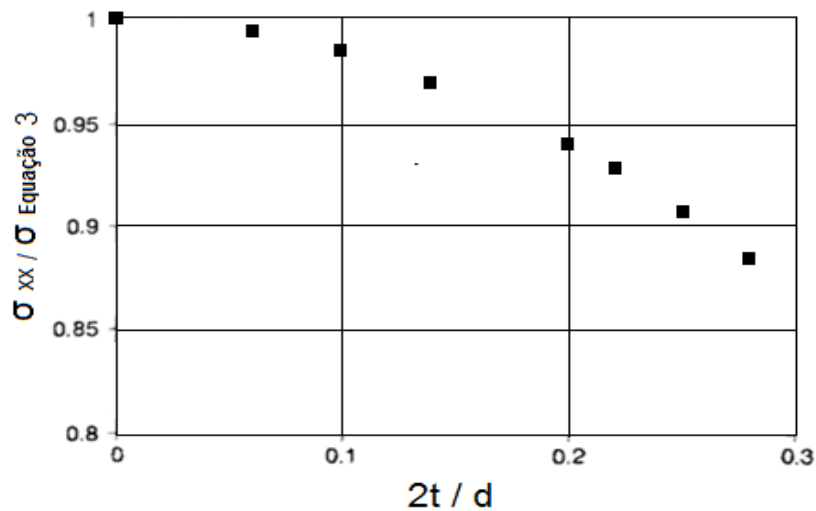
Figura 12 - Largura efetiva $2t$ do arco de carregamento distribuído



Fonte: Tang (1994, p. 402)

Entretanto, conforme os resultados de simulações numéricas apresentados no gráfico da Figura 13, Tang (1994) afirma que o erro obtido com a utilização da Equação 3 ($f_{ct,sp}$) para a largura de aplicação normalizada é da ordem de 4% e não deveria ser desprezado pois superestima a resistência do material.

Figura 13 - Variação da relação entre o valor de tensão de tração real e o valor obtido com a aplicação da Equação 3



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

Dessa maneira, Tang (1994) propõe utilização da Equação 10 para a determinação da real tensão de tração no ensaio de compressão diametral, expressão esta que foi obtida por meio de soluções analíticas considerando a largura de distribuição do carregamento.

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot p \cdot t}{\pi \cdot r_c} \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{r_c} \right)^2 \right]^{3/2} \quad \dots(10)$$

Sendo:

σ_{xx} - Componente de tensão normal ao eixo vertical central;

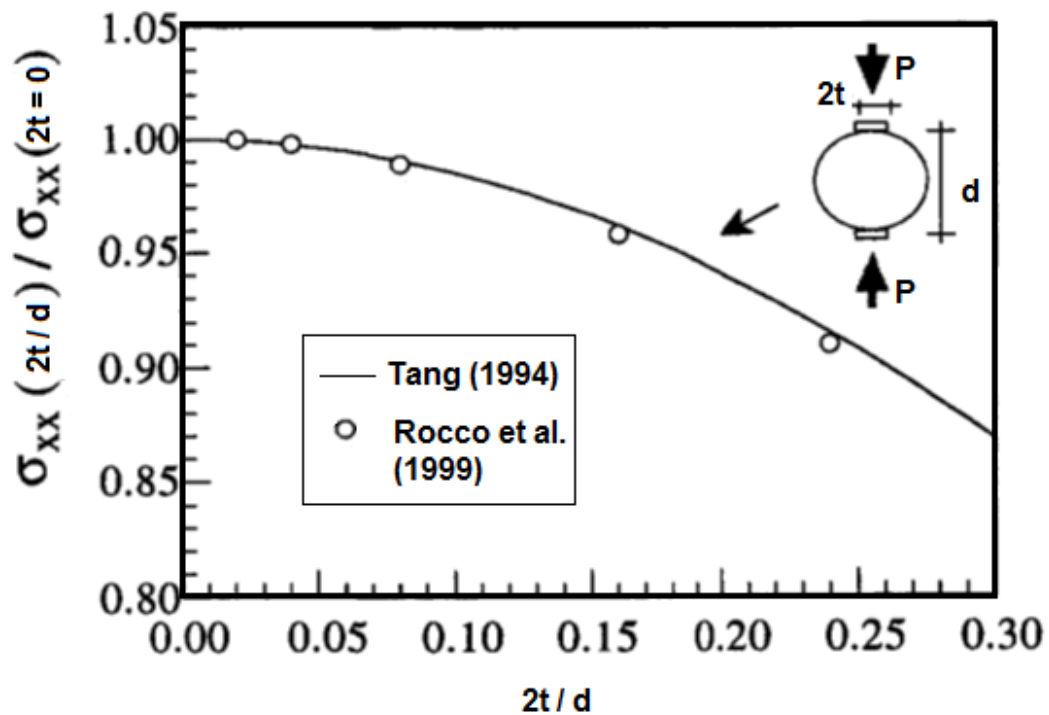
p - Carregamento uniforme distribuído ao longo da largura efetiva e da altura do espécime ($P/(2t * l)$), expresso em Newtons por milímetro (N/mm);

t - Metade da largura de contato efetiva, expressa em milímetros (mm);

r_c - Raio de circunferência do cilindro, expresso em milímetros (mm).

Esta solução também é utilizada por Rocco et al. (1999a) para o estudo do ensaio brasileiro e sua validade é comprovada através de modelagens numéricas de elementos finitos, de acordo com os resultados apresentados no gráfico ilustrado na Figura 14.

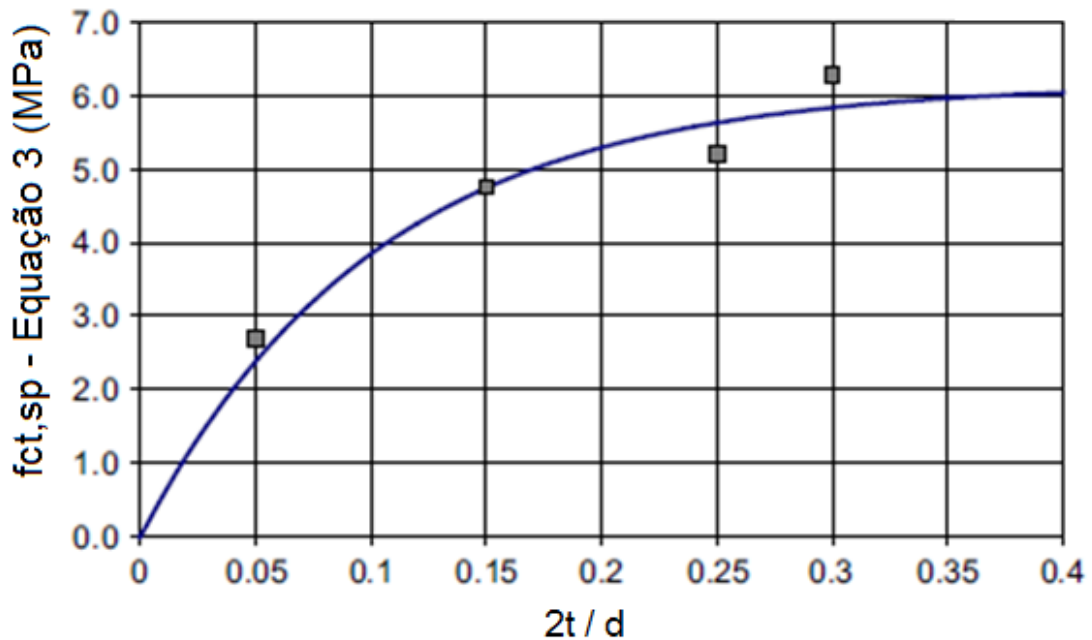
Figura 14 - Resultados da análise numérica de elementos finitos e comparação com os resultados obtidos com a aplicação da Equação 10



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

Riera, Miguel e Iturrioz (2014) também investiga o ensaio brasileiro sob a influência da largura de aplicação de carregamento em arco, semelhante aos estudos de Tang (1994), utilizando-se de modelos numéricos de elementos finitos e discretos, obtendo uma variação no valor da carga de ruptura que ao ser aplicado à Equação 3 resulta em uma tensão que cresce de acordo com o aumento na largura efetiva de contato, o que não é coerente pois trata-se de um único material e, portanto, evidencia a superestimação da resistência real à tração do mesmo ao se desconsiderar o parâmetro $2t$, como se observa no gráfico da Figura 15.

Figura 15 - Resultados obtidos para diferentes larguras efetivas de contato



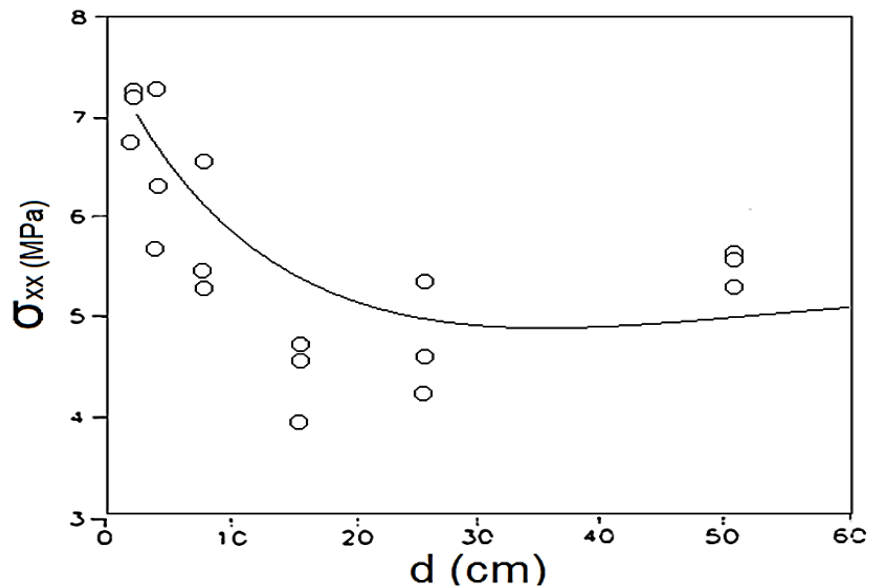
Fonte: Adaptado de Riera, Miguel e Iturrioz (2014, p. 20)

2.2.8 O efeito escala e sua relação com a largura efetiva de contato

Uma outra questão importante no estudo do ensaio de compressão diametral, diz respeito ao tamanho dos corpos de prova utilizados e a variação causada pela sua modificação nos resultados obtidos para um mesmo material, afastando-se assim do real valor da resistência à tração deste, pois tanto a NBR 7222 (ABNT, 2011) como a C496 (ASTM, 2011) não estabelecem as dimensões dos corpos de prova, embora os estudos brasileiros tendam a utilizar espécimes de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, enquanto os americanos geralmente optem pelos de 150 mm por 300 mm.

No estudo de Bažant et al. (1991), tal influência foi evidenciada experimentalmente através de ensaios de cilindros com diâmetros que variavam de 19 mm até 508 mm e com mesma altura, executados com concreto de $f_c = 51,4$ MPa, os quais apresentaram os resultados expressos no gráfico da Figura 16.

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



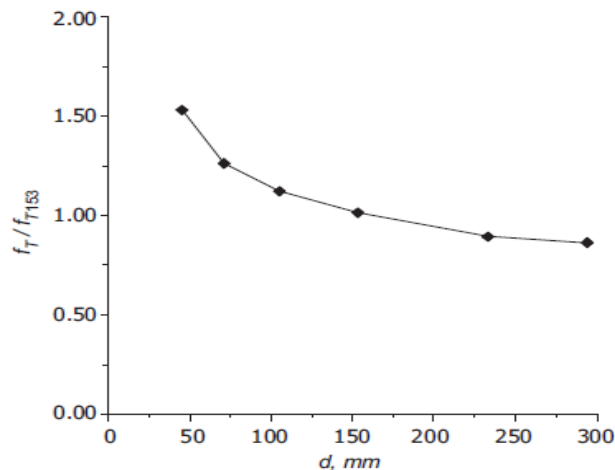
Fonte: Adaptado de Bažant et al. (1991, p. 329)

Como é demonstrado no gráfico, os resultados para cilindros com menores diâmetros, isto é, $d < 100$ mm, foram significativamente maiores, além de que é possível observar que é atingido um patamar estável para os valores da resistência obtidos com o aumento no diâmetro, indicando o desaparecimento do efeito escala. Ainda, segundo Bažant et al. (1991), a explicação para essa influência estaria correlacionada ao aumento na extensão da fissura com o diâmetro do corpo de prova, o que resultaria em uma mesma liberação de energia na fratura com uma tensão menor.

Esse comportamento também foi observado por Carmona (2009), principalmente quando o contato entre o espécime e o prato de aplicação de carregamento é direto, ou seja, sem a delimitação de uma largura finita de distribuição da carga ($2t \approx 0$) e sem a tira de madeira recomendada por ambas as normas C496 (ASTM, 2011) e NBR 7222 (ABNT, 2011), além de que o efeito também foi mais extremo para corpos de prova de diâmetros inferiores à 150 mm.

Os resultados para este caso são apresentados pelo gráfico da Figura 17, onde f_t é a resistência dos cilindros de diferentes diâmetros e f_{t150} é a resistência do cilindro ensaiado de acordo com o diâmetro e método padronizado pela norma C496 (ASTM, 2011) e com a utilização da Equação 3.

Figura 17 - Resultados obtidos experimentalmente

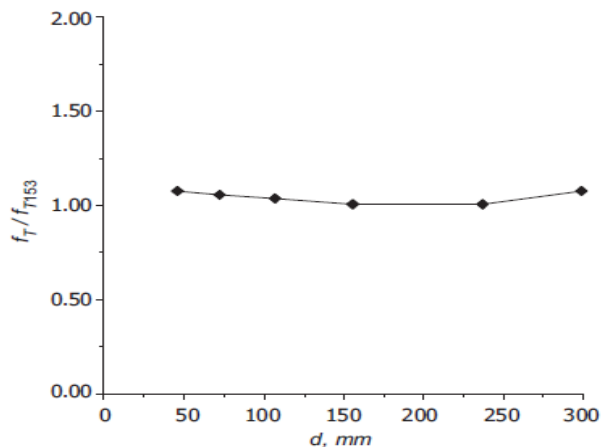


Fonte: Carmona (2009, p. 15)

Carmona (2009) também investiga o efeito escala em função do comportamento da tira de madeira colocada na região de contato, segundo o método normalizado, chegando à conclusão de que, devido à sua ligeira deformação quando da aplicação do carregamento, esta apresenta uma superfície de contato com largura média efetiva $2t \approx d/6$ para todos os diâmetros estudados.

Com a largura efetiva $2t$ determinada, Carmona (2009) realiza novos ensaios com a utilização de tiras com largura total b igual à $d/6$, entretanto, ao invés de aplicar o carregamento diretamente através dos pratos de ensaio relativamente grandes, emprega duas barras rígidas suplementares de mesma largura das tiras, sendo os resultados obtidos plotados no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Resultados obtidos experimentalmente



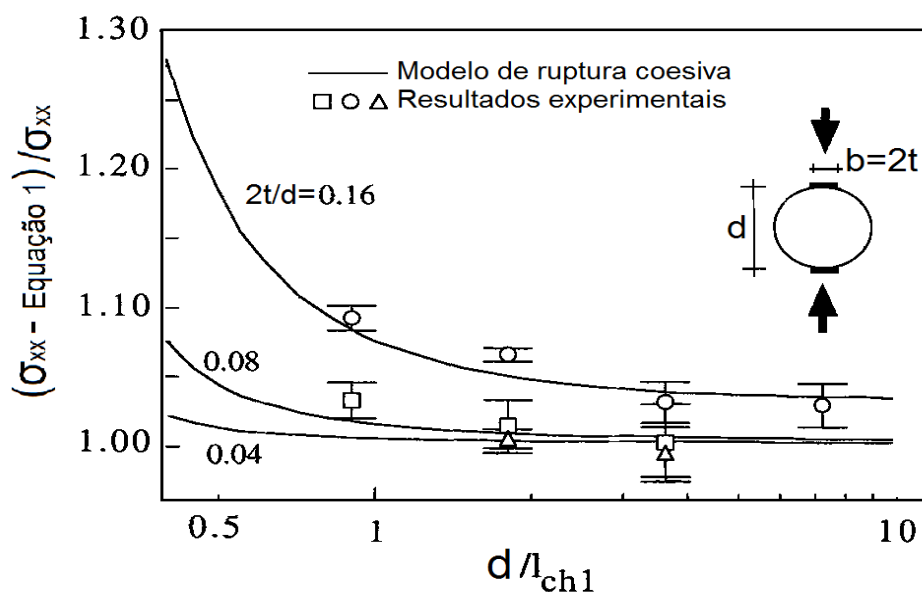
Fonte: Carmona (2009, p. 15)

Assim, Carmona (2009) conclui que a utilização de duas barras rígidas de aplicação de carregamento, em conjunto com a talisca de madeira, sendo ambas de largura de aproximadamente 17% da dimensão do diâmetro do cilindro, praticamente anulam a influência causada pela modificação da escala no ensaio brasileiro. Isso indica que as larguras da talisca recomendadas tanto pela norma NBR 7222 (2011) como pela C496 (ASTM, 2011) são coerentes, pois estas são equivalentes à 15% e 16,6%, respectivamente, em relação ao diâmetro do espécime utilizado.

Comportamento semelhante também foi observado nos estudos de Rocco et al. (1999a), utilizando-se de um modelo não-linear baseado no conceito de fratura coesiva, o qual estabelece que mesmo após o surgimento de uma fissura, esta continua a transmitir as tensões de uma face à outra na sua direção normal, sendo este esforço transmitido denominado tensão coesiva e uma função única da abertura das fissuras. Com este modelo teórico, Rocco et al. (1999a) busca uma melhor representatividade do comportamento do concreto, sendo que a tensão coesiva, considerada intrínseca ao material e, portanto, independente do fator escala,

Assim, com a realização da análise numérica com a utilização do modelo proposto por Rocco et al. (1999a), e com sua validação através de ensaios experimentais por Rocco et al. (1999b), foram obtidos os resultados apresentados nos gráficos da Figura 19.

Figura 19 - Resultados obtidos para diferentes dimensões de corpos de prova



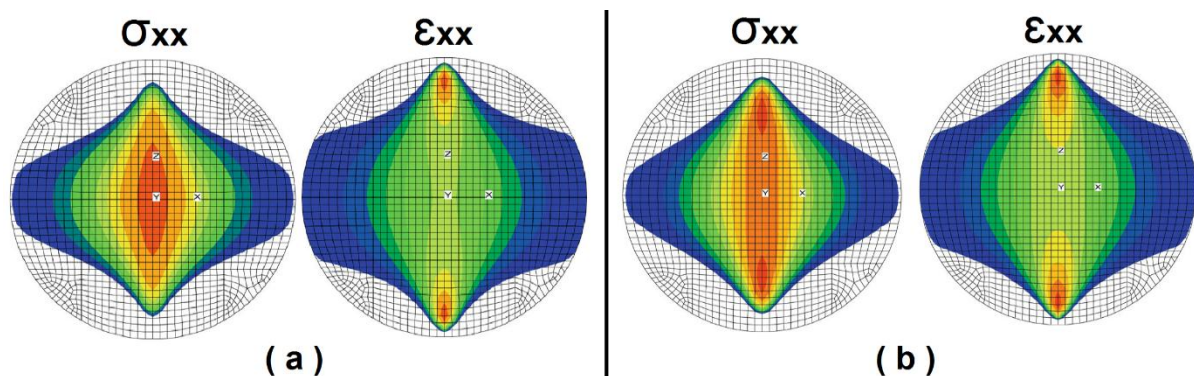
Fonte: Adaptado de Rocco et al. (1999b, p. 216)

A relação entre a tensão calculada de acordo com a Equação 3 e a tensão real obtida nas simulações apresentam variação de até 25% de acordo com o aumento no diâmetro dos corpos de prova cilíndricos, sendo que, para tiras com relação $2t/d$ inferior à 4%, o efeito escala é praticamente nulo, enquanto que, para tiras de maiores dimensões, a influência mostra-se mais significativa. Também é possível afirmar que, com a redução da largura de carregamento, o resultado da resistência à tração indireta obtido no ensaio de compressão diametral torna-se mais representativo, pois aproxima-se do valor da resistência à tração real do material (ROCCO et al., 1999b).

2.2.9 Local de origem da fissura

Li e Wong (2013) afirmam que nos estudos recorrentes sobre o ensaio brasileiro aplicado, principalmente, na área de interesse de mecânica das rochas, o tema do local de início da fissura é frequentemente investigado através da análise apenas da distribuição das tensões principais, ignorando-se a distribuição das deformações resultantes. Assim, Li e Wong (2013) realizam a modelagem numérica do ensaio com a utilização de corpos de prova tridimensionais, com aplicação de carregamento de acordo com o modelo estudado por Tang (1994), constituídos por um material homogêneo, de comportamento linear elástico e com módulo de elasticidade de 50 GPa, realizando a análise da distribuição tanto das tensões como das deformações normais ao eixo vertical, na região mediana do corpo de prova e também nas suas extremidades, obtendo os resultados exibidos na Figura 20.

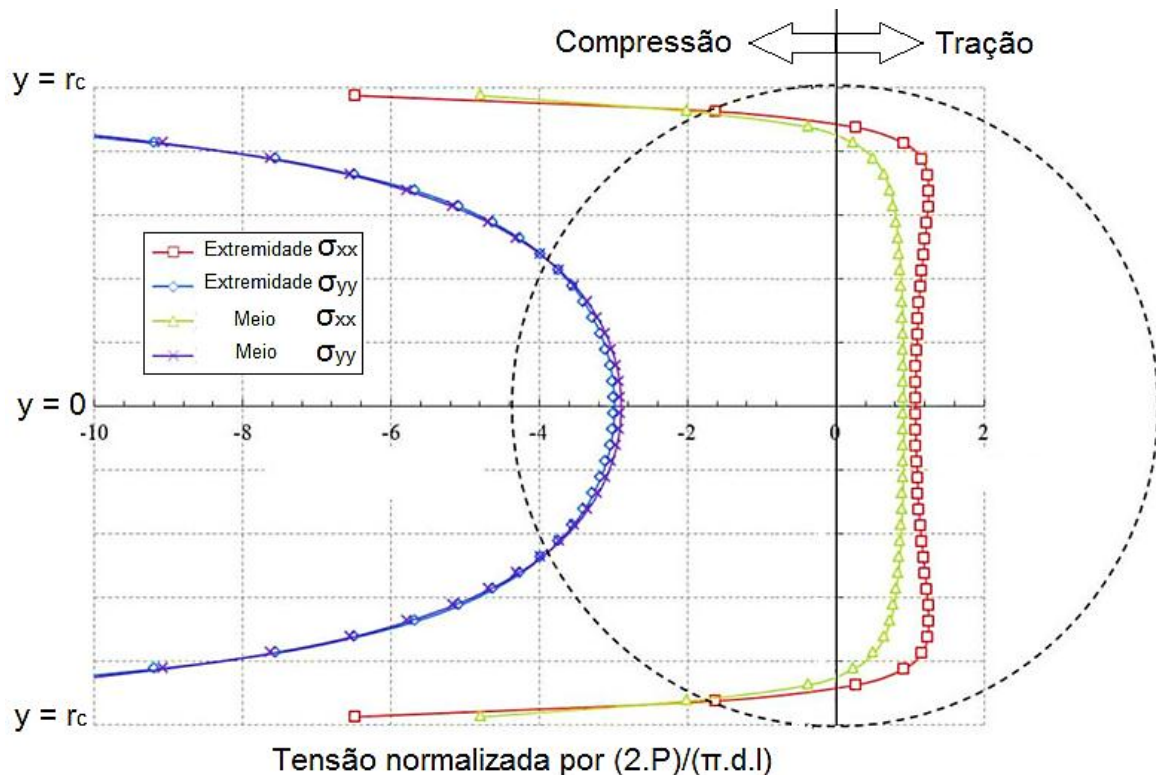
Figura 20 - (a) Tensões e deformações na região mediana; (b) Na extremidade



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

Com os resultados observados, Li e Wong (2013) concluem que ambos os valores de tensão e deformação máximos encontram-se afastados do centro do cilindro submetido à compressão diametral, à uma distância de cerca de 10% do diâmetro da borda carregada e na superfície da extremidade do corpo de prova, de maneira que o início da fissura pode ocorrer próximo à extremidade e da borda do espécime quando a deformação atinge o critério de máxima deformação, ao invés de ocorrer no centro do eixo vertical. No gráfico da Figura 21 é ainda mais visível a variação entre as tensões obtidas nas simulações, principalmente a tensão de tração, no meio do espécime e na extremidade livre.

Figura 21 - Distribuição das tensões principais no eixo vertical no meio e na extremidade do cilindro comprimido

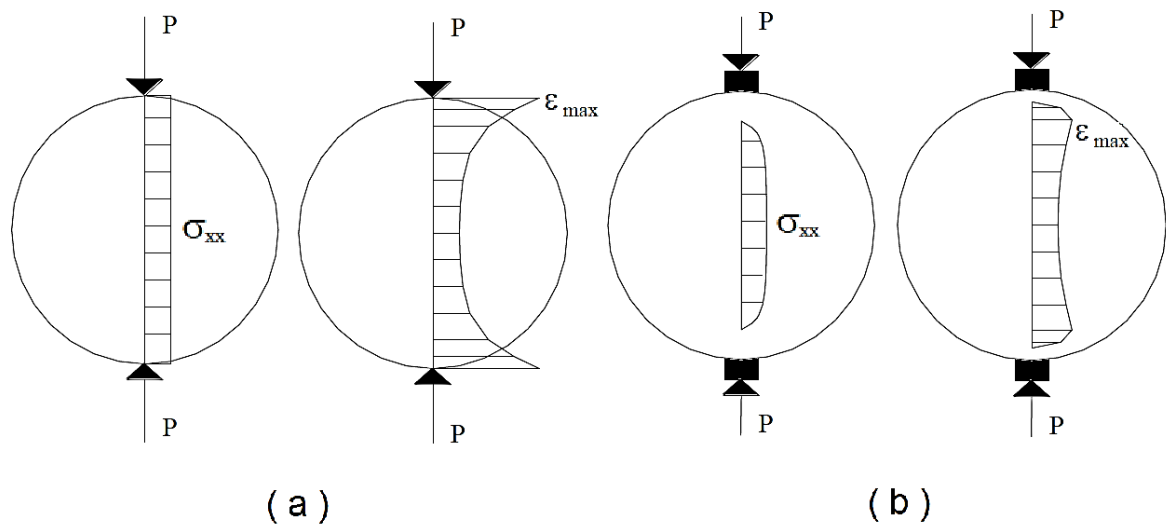


Fonte: Li e Wong (2013, p. 280)

Afirmção parecida também é defendida por Falcão e Soares (2002), que ao analisar o ensaio de compressão diametral aplicado à misturas asfálticas, misturas de solo-cimento e concreto-cimento, com a alteração da largura do friso metálico utilizado de acordo com a ME (DNER, 1994) para misturas betuminosas, chegaram à conclusão de que o início da fissura para materiais elásticos não se dá

necessariamente no ponto com tensão de tração máxima, mas sim no local onde as deformações máximas atingem um valor crítico, como mostrado na Figura 22, pois este é resultante da combinação entre a tensão de tração e a tensão de compressão perpendicular à esta, e é ligeiramente influenciado pela largura do carregamento.

Figura 22 - (a) Distribuição das componentes de tensão e de deformação normais ao plano vertical do cilindro comprimido por carga pontual; (b) Por carga distribuída



Fonte: Adaptado de Falcão e Soares (2002, não paginado)

2.3 Correlação Digital por Imagem

2.3.1 Conceituação da técnica e parâmetros envolvidos

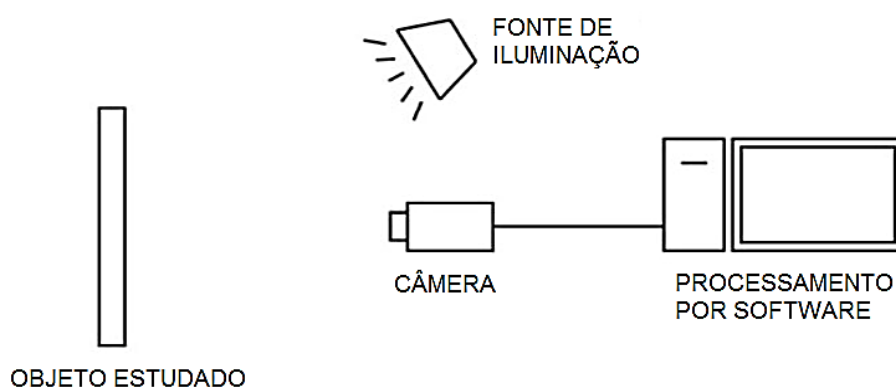
A correlação digital por imagem, numa tradução livre para o português do termo inglês “Digital Image Correlation”, é uma técnica de metrologia experimental sem o contato direto com o objeto a ser examinado, através da qual é possível obter uma medida precisa de deslocamentos e deformações de pequena escala, com equipamentos de fácil acesso e custo relativamente baixo (MCCORMICK; LORD, 2010). As medidas podem ser realizadas em relação à um único plano de deformação, possibilitando uma análise bidimensional do caso, e também tridimensionalmente.

Esta técnica caracteriza-se, primeiramente, pela captação de imagens (vídeo ou fotografia) do material em estudo através do uso de câmeras fotográficas (uma no caso de análise bidimensional e, pelo menos, duas no caso de análise tridimensional),

podendo estas serem câmeras comerciais comuns, câmeras de alta-velocidade ou até mesmo câmeras de telefones celulares, embora seja indicado o uso de altas resoluções a fim de se obter uma maior quantidade de pixels e conseqüente maior representatividade. Posteriormente à coleta das imagens, estas seguem para o processamento digital através de um software que identifica os deslocamentos relativos entre detalhes previamente aplicados na superfície do objeto analisado.

Na Figura 23 é apresentado um esquema simplificado da instalação dos equipamentos utilizados para captação das imagens, sendo possível observar outro fator importante que é a iluminação do corpo de prova em estudo pois é fundamental que não ocorra variação na luminosidade ambiente durante a execução do ensaio.

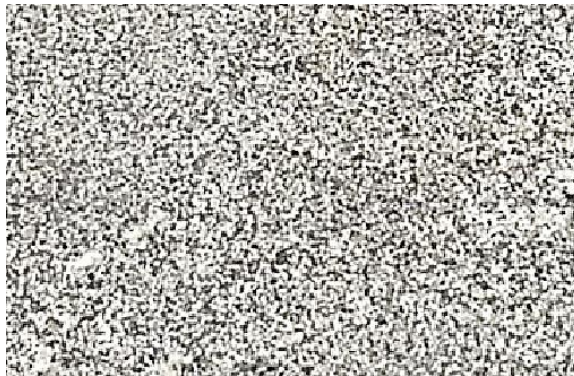
Figura 23 - Esquema simplificado para captação de imagens



Fonte: Adaptado de Yoneyama e Murasaw (2009, não paginado)

Para produzir os detalhes mencionados, é necessário que a superfície do objeto seja previamente preparada com a aplicação de tinta branca, por exemplo, e deve ser criado um padrão estocástico com alto contraste em relação ao fundo, podendo este ser produzido através da aplicação dispersa de tinta preta em aerossol, como na Figura 24, onde pode ser observado que as gotículas de tinta se distribuem de maneira relativamente uniforme mas aleatória.

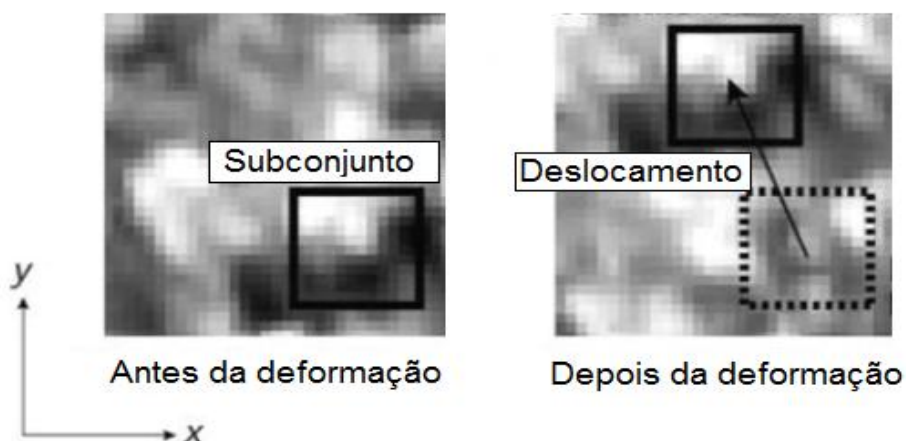
Figura 24 - Padrão estocástico produzido com tinta branca PVA e tinta preta em aerossol



Fonte: Elaboração própria

O funcionamento dos softwares que utilizam esta técnica, resumidamente, segundo (YONEYAMA; MURASAWA, 2009), baseia-se na identificação de subconjuntos individuais de pixels (quadriláteros de n pixels por n pixels), através de sua distribuição única de intensidade luminosa ou nível de cinza, fator este considerado imutável mesmo com a deformação, e pelo padrão distinto apresentado pela distribuição destes pixels, os quais tem sua posição e orientação comparados entre uma imagem e outra, possibilitando assim a determinação de seu deslocamento relativo, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Subconjunto identificado e seu deslocamento relativo

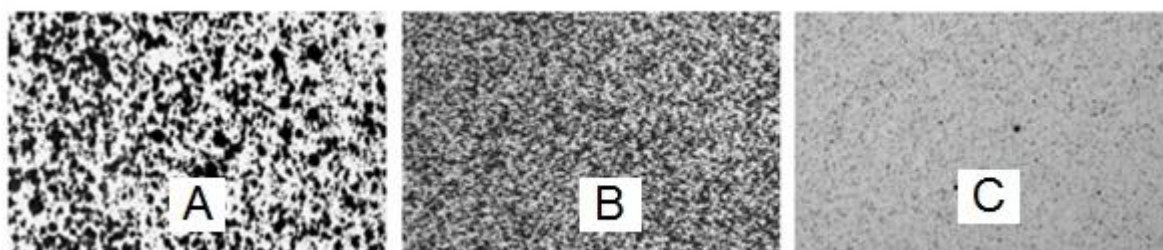


Fonte: Adaptado de Yoneyama e Murasaw (2009, não paginado)

Nos softwares atuais, o tamanho do subconjunto de pixels é geralmente definido manualmente pelo usuário, entretanto, Pan et. al (2008) indicam que o

tamanho do subconjunto de pixels é um parâmetro crítico tratando-se da precisão das medições, sendo que este não deve ser pequeno demais, de maneira que seja impossível reconhecer um padrão distinto dos demais subconjuntos, e nem grande demais, o que também diminuiria a precisão dos resultados. Ainda, segundo os resultados do estudo de Pan et. al (2008), a quantidade ideal n de pixels do subconjunto para o processamento digital por imagem varia de acordo com a dimensão das partículas do padrão estocástico, como indicado na Figura 26, sendo os tamanhos 12, 14 e 36 pixels, respectivamente, os recomendados para os padrões A, B e C.

Figura 26 - Diferentes padrões estocásticos analisados por Pan et. al (2008)



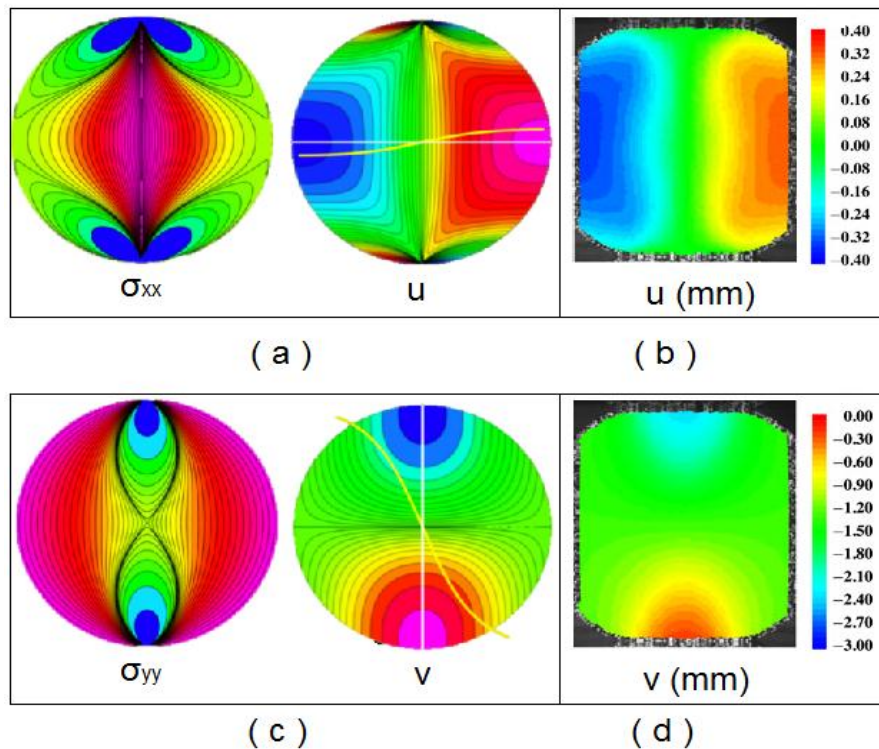
Fonte: Pan et. al (2008, p. 7044)

Contudo, mesmo sendo um método inovador e seu uso cada vez mais crescente, tanto no meio acadêmico como no comercial, segundo (YONEYAMA; MURASAWA, 2009), existem obstáculos inerentes à esta técnica, como em regiões de borda e em regiões de deformações excessivas, após o surgimento de abertura de fissuras por exemplo, onde as medidas não são possíveis devido a modificação no nível de cinza e conseqüente descaracterização dos subconjuntos de pixels.

2.3.2 Aplicação do método para o estudo do ensaio brasileiro

Aplicando a técnica de correlação digital por imagem experimentalmente, Liu (2010) observa a distribuição dos deslocamentos num cilindro composto de resina epóxi comprimido diametralmente, obtendo resultados semelhantes aos deslocamentos resultantes da distribuição das tensões fornecidas pelas soluções analíticas, atribuídas ao estudo pioneiro por Hondros (1959), apud Fairhurst (1964), como pode ser observado na Figura 27.

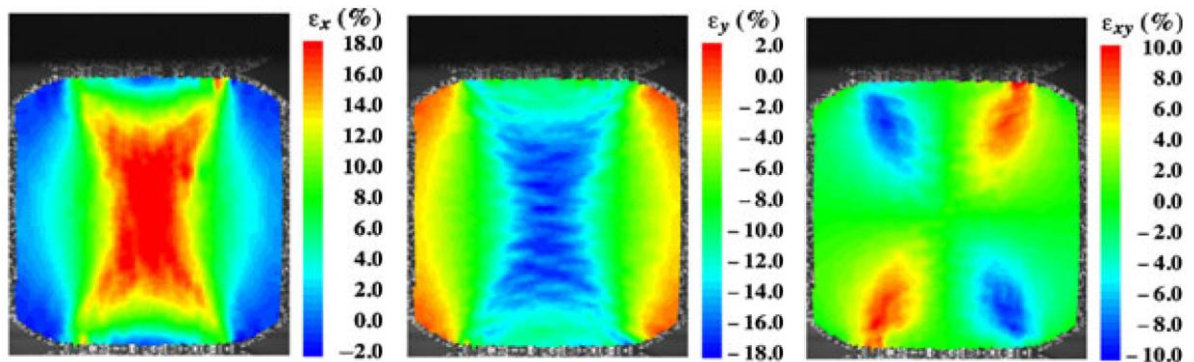
Figura 27 - (a) Campos de tensões e deslocamentos normais ao eixo vertical; (b) Validação experimental; (c) Paralelos ao eixo vertical; (d) Validação experimental



Fonte: Adaptado de Liu (2010, p. 1026 e 1033)

Dessa maneira, Liu (2010) pôde determinar as distribuições das componentes horizontal e vertical de deformação, e a componente de deformações por cisalhamento, sendo que esta última é especialmente útil em determinar a largura de contato deformada do espécime, assim como pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 - Deformações horizontal, vertical e de cisalhamento



Fonte: Liu (2010, p. 1033)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e as normas de referência para os procedimentos e equipamentos necessários para caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas, e para a captura de imagens dos ensaios para processamento.

3.1 Descrição dos procedimentos do estudo

O esquema apresentado pela Figura 29 representa resumidamente as etapas do presente estudo.

Figura 29 - Esquema de atividades executadas



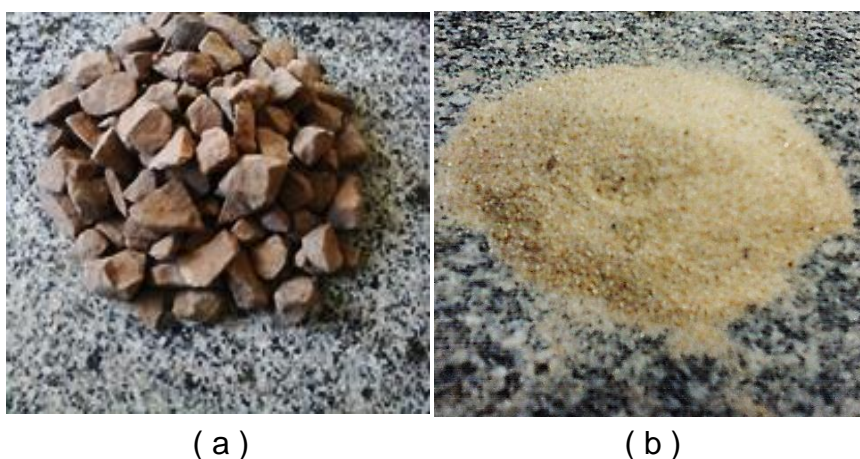
Fonte: Elaboração própria

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Agregados

Foram utilizados como o agregado graúdo a pedra britada de origem basáltica do município de Alegrete, Rio Grande do Sul, classificada como “brita 1”, ou seja, com dimensão máxima nominal de 19 mm e com formato dos grãos predominante cúbico, e como agregado miúdo uma areia de rio do município de Manuel Viana, Rio Grande do Sul, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - (a) Agregado graúdo; (b) Agregado miúdo



Fonte: Elaboração própria

Os agregados tiveram sua dimensão máxima característica, módulo de finura e gráfico de sua composição granulométrica determinados com o uso de peneiras das séries normal e intermediária conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das dimensões características e dos módulos de finura.

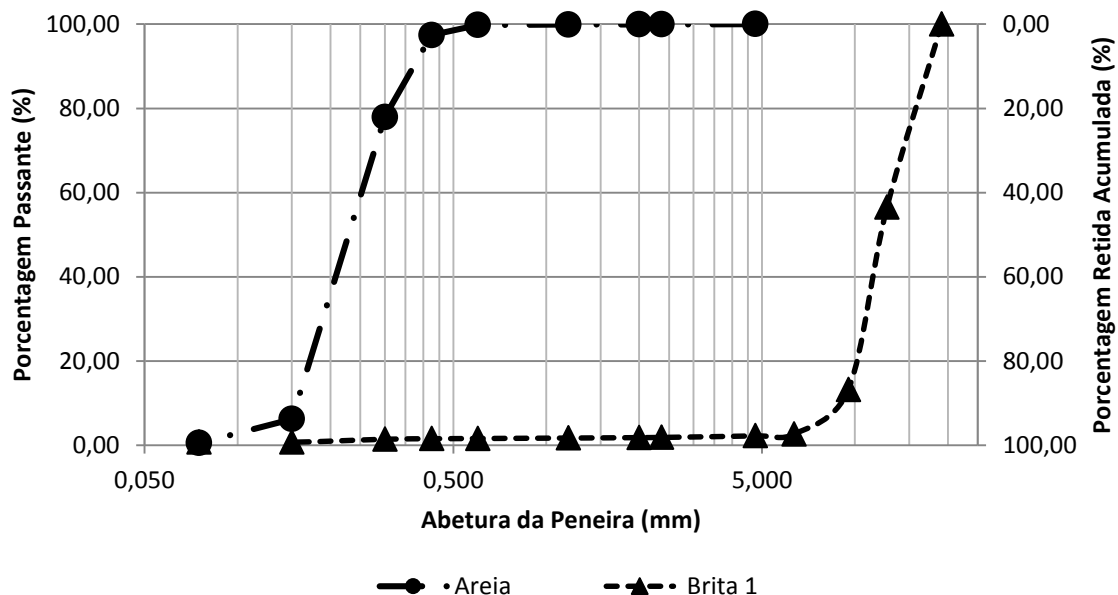
Tabela 1 - Propriedades dos agregados

Material	Dimensão característica (mm)	Módulo de finura
Areia	0,6	1,38
Brita	12,7	6,77

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 31 é ilustrado o gráfico da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos.

Figura 31 - Curvas das composições granulométricas dos agregados



Fonte: Elaboração própria

Também foram determinadas as massas específicas real, aparente e na condição saturada com superfície seca e absorção de água do agregado graúdo, determinadas de acordo com os procedimentos da NBR NM 53 (ABNT, 2009), e das massas específicas dos agregados miúdos de acordo com o método do frasco de Chapman, conforme NBR NM 9776 (ABNT, 1987), sendo os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Massas específicas da brita

Massa específica - Agregado Seco (g/cm ³)	2,90
Massa específica - SSS (g/cm ³)	2,80
Massa específica - Aparente (g/cm ³)	2,74
Absorção de água (%)	1,91

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 - Massa específica da areia

Massa específica (g/cm ³)	2,64
---------------------------------------	------

Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Cimento Portland

Para a confecção do concreto foi adotado o Cimento Portland do tipo CP V ARI (Alta Resistência Inicial), fornecido pela marca CAUÊ, o qual apresenta um mínimo de 95 % de sua composição de clínquer Portland, o qual é constituído por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, conforme estabelecido pela NBR 5733 (ABNT, 1991). Sua massa específica foi determinada de acordo com os procedimentos da NBR NM 23 (ABNT, 2001), e a caracterização de sua composição granulométrica foi realizada através de difração de raios laser com o analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000 TM, no Laboratório de Nanobiotecnologia aplicada à Farmácia e Ciências Farmacêuticas da Universidade Federal do Pampa, localizado no Campus de Uruguaiana.

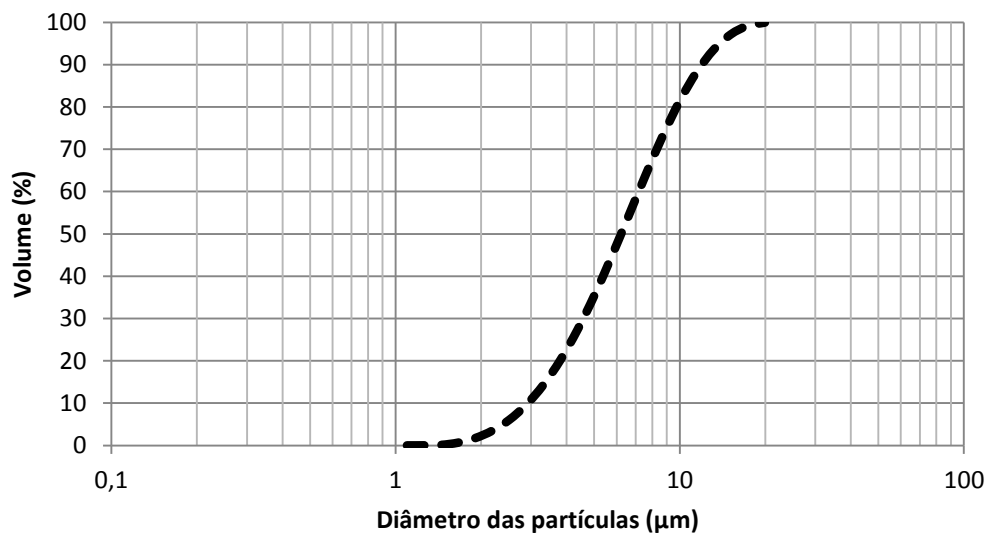
Na Tabela 4 é mostrado o valor da massa específica e na Figura 32 a curva da composição granulométrica.

Tabela 4 - Massa específica

Massa específica do cimento CPV-ARI (g/cm ³)	3,15
--	------

Fonte: Elaboração própria

Figura 32 - Curva da composição granulométrica do cimento CPV-ARI



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Superplastificante

O concreto produzido tem uma baixa relação água/cimento, o que requer a utilização de superplastificante a fim de garantir uma trabalhabilidade usual, sendo utilizado o aditivo MC-PowerFlow da empresa MC-BAUCHEMIE.

3.2.4 Água

Para a confecção do concreto foi utilizada água potável da rede de abastecimento da cidade de Alegrete.

3.2.5 Tiras de carregamento

Conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), os elementos utilizados no contato entre o corpo de prova e o dispositivo de ensaio devem ser tiras de chapa de fibra de madeira ou aglomerado, de consistência dura. Dessa maneira, para a confecção das tiras, conforme classificação da norma NBR 10024 (ABNT, 2012), foi escolhida a madeira da classe dicotiledônea com nome científico “*Dipteryx Odorata*”, ou com o nome popular de “Cumaru”, a qual apresenta densidade aparente igual a 1090 Kg/m³ e resistência à compressão paralela às suas fibras de 94,2 MPa (IPT, 2013).

As tiras metálicas utilizadas, foram confeccionadas em aço pela indústria de usinagem MULTFER, de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

3.3 Concreto

O traço a ser utilizado neste estudo, demonstrado na Tabela 5, foi dosado em laboratório para uma resistência à compressão axial (f_c) de 50 MPa.

Tabela 5 - Traço de materiais para confecção do concreto

Consumo de material (kg p/ m ³ de concreto)				Relação a/c	Teor de argamassa (%)	Superplastificante (% em relação à massa de cimento)
Cimento	Areia	Brita	Água			
445,59	753,49	1028,87	196,06	0,44	53,82	0,24

Fonte: Elaboração própria.

Para a preparação do concreto foi utilizada a betoneira do laboratório de Materiais de Construção Civil do Campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa, sendo os materiais quantificados de acordo com suas massas e a partir das proporções definidas pelo traço massa.

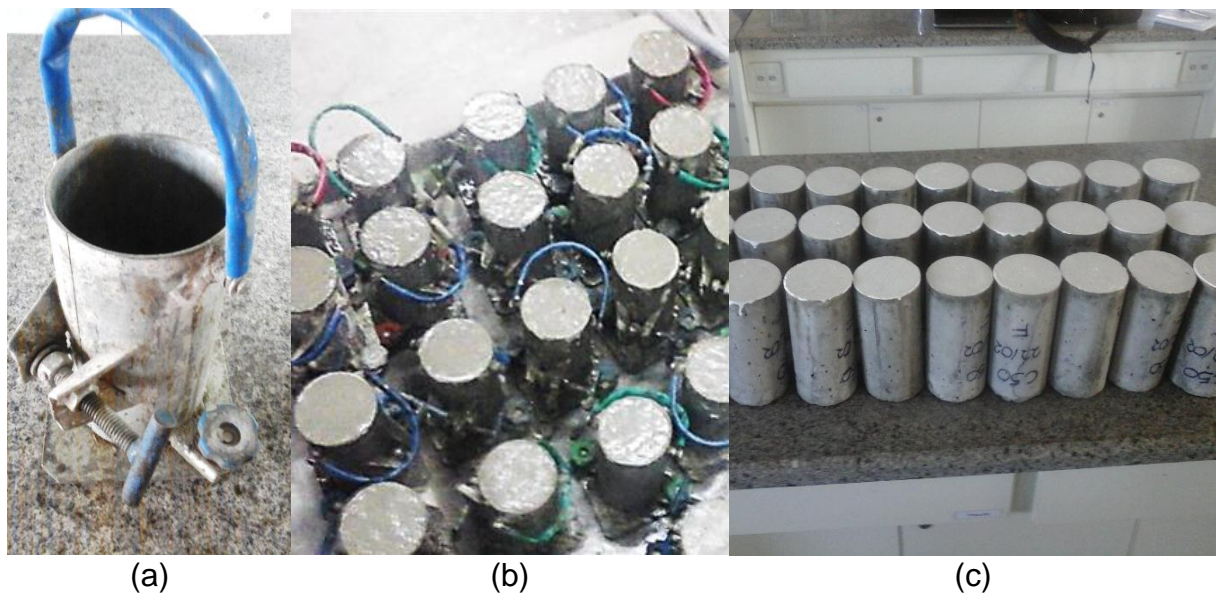
3.3.1 Moldagem e cura do concreto

Os corpos de prova a serem utilizados em todos os ensaios possuem formato cilíndrico e possuem a altura (l) de 200 mm e o diâmetro (d) de 100 mm, os quais foram moldados e adensados, conforme a normativa NBR 5738 (ABNT, 2007).

Após a moldagem, os espécimes foram colocados em repouso para endurecimento por 24 horas, sendo então desmoldados e postos para cura em câmara com temperatura e umidade controladas até a execução dos ensaios na idade padrão de 28 dias. Além disso, os corpos de prova foram regularizados através de uma máquina retificadora com disco de corte.

Na Figura 33 são mostrados os moldes utilizados e os espécimes produzidos e desmoldados após endurecimento.

Figura 33 - (a) Moldes para confecção dos corpos de prova; (b) moldes concretados; (c) desmoldados



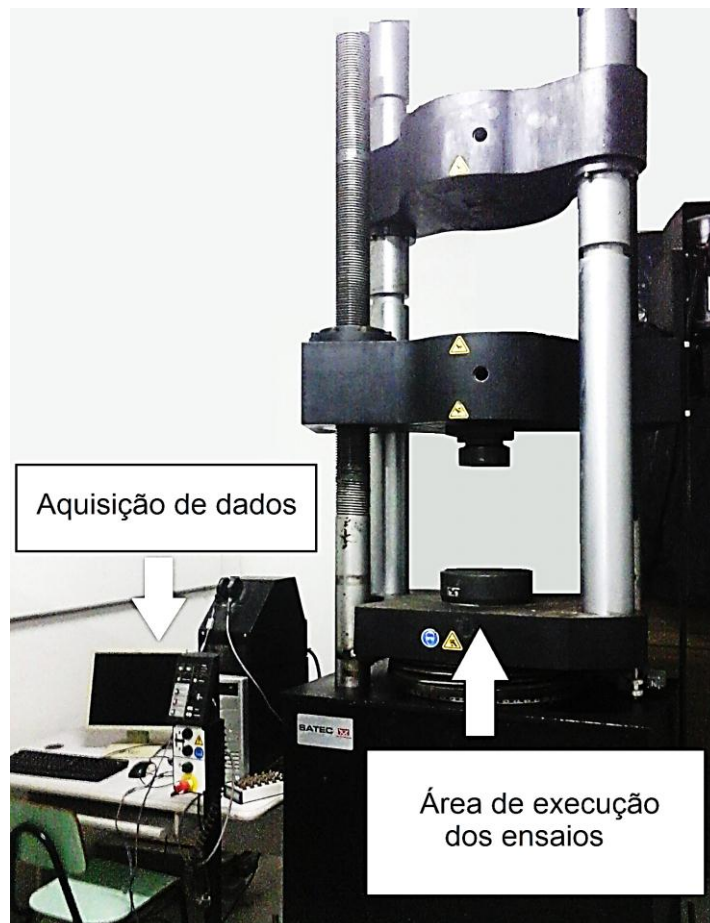
Fonte: Elaboração própria

3.4 Ensaios para caracterização mecânica

Os equipamentos utilizados para a execução dos ensaios mecânicos estão disponíveis no laboratório de Materiais de Construção Civil do Campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa.

Nos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral do concreto foi utilizado o Sistema Hidráulico Estático de Testes Universais, modelo SATEC™ 5590-HVL Series, da marca INSTRON®, com célula de carga de capacidade para ensaios de até 1500 KN, com leitura e armazenamento simultâneo dos dados referentes ao carregamento aplicado ao espécimen e ao deslocamento vertical do prato de aplicação da carga até a ruptura, como mostrado na Figura 34.

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

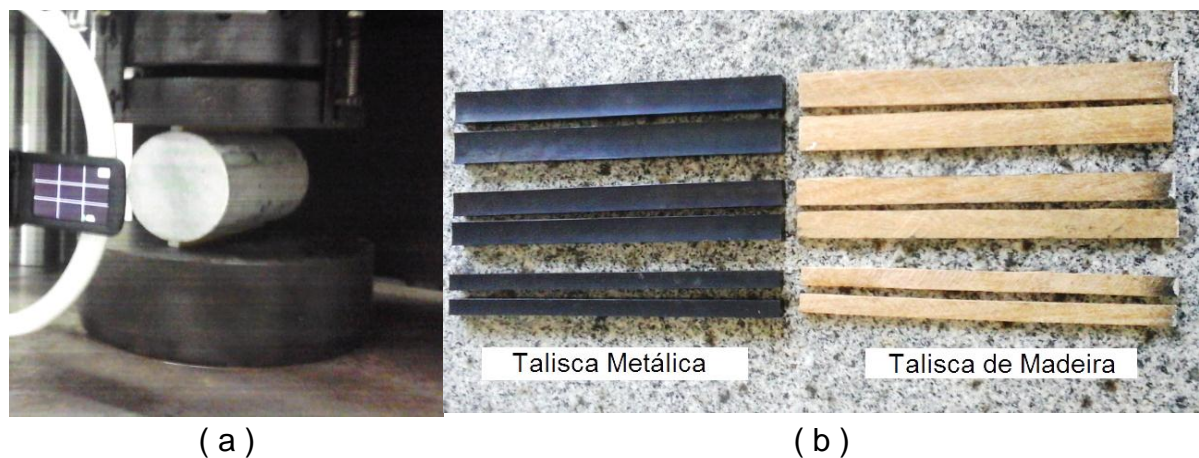


Fonte: Elaboração própria

3.4.1 Ensaio de tração por compressão diametral

O procedimento adotado para a execução do ensaio de tração indireta do concreto por compressão diametral seguiu as definições da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), entretanto, as taliscas utilizadas na região de contato entre os corpos de prova são deliberadamente de larguras distintas das estabelecidas pela normativa e de diferentes materiais, madeira e metal, como observado na Figura 35.

Figura 35 - (a) Ensaio brasileiro; (b) Taliscas a serem utilizadas



Fonte: Elaboração própria

As taliscas metálicas possuem concavidade com raio de curvatura igual ao dos espécimes, enquanto as taliscas de madeira são planas, e ambas possuem as dimensões elencadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões das taliscas

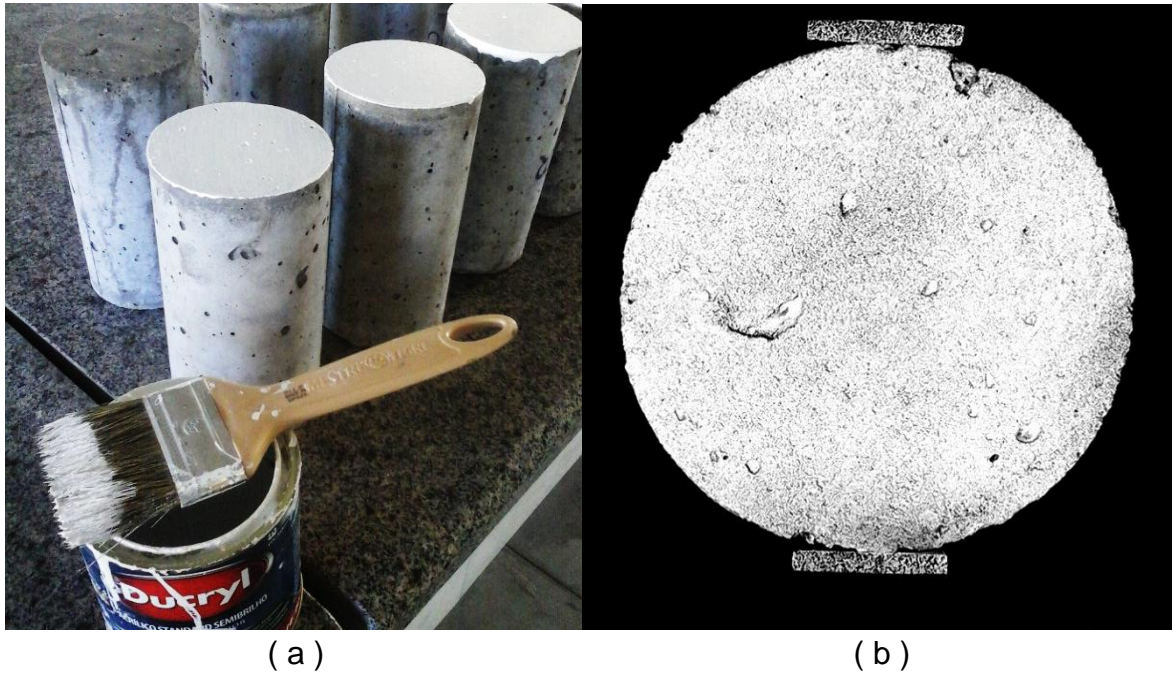
Material	Largura b (mm)	Proporção b/d	Largura efetiva $2t$ (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
Madeira *	10	0,10	A determinar	$3,0 \pm 0,5$ *	$\geq 200,0$ *
	15 *	0,15 *			
	20	0,20			
Metal	10	0,10	Indiferente		
	15	0,15			
	20	0,20			

* Conforme estabelecido pela NBR 7222 (ABNT, 2011)

Fonte: Elaboração própria

Para a execução destes ensaios, tanto os cilindros de concreto como as taliscas de madeira tiveram suas superfícies preparadas com a aplicação de um fundo branco com tinta PVA, Figura 36 (a), e, posteriormente a sua secagem, houve a aplicação de tinta preta em aerossol, produzindo o padrão estocástico desejado, como se observa na Figura 36 (b), para a utilização da correlação digital por imagem.

Figura 36 - (a) Fundo branco; (b) Padrão estocástico

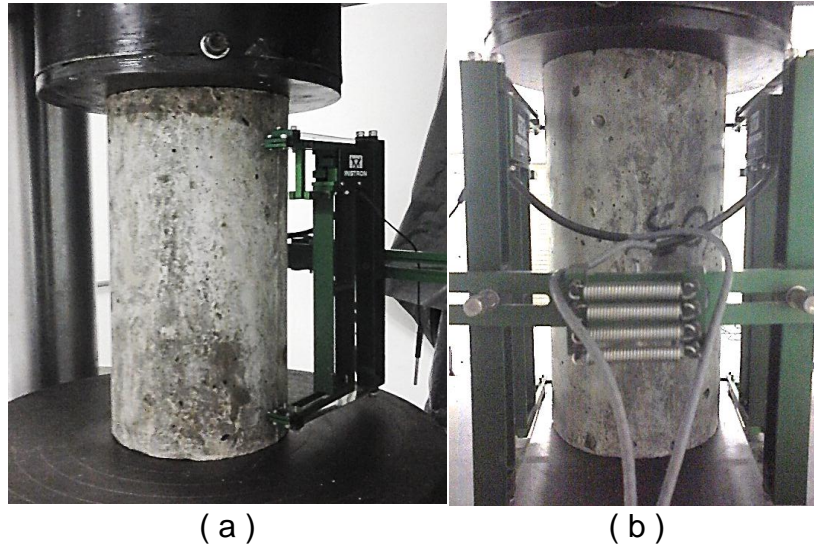


Fonte: Elaboração própria

3.4.2 Ensaio de compressão axial

A caracterização do concreto quanto à sua resistência à compressão de acordo com o ensaio de compressão axial, mostrado na Figura 37 (a), foi executada de acordo com os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo ainda utilizados aparelhos extensômetros de medição de deslocamento por contato fixados aos corpos de prova, Figura 37 (b), a fim de construir a curva tensão versus deformação característica do material estudado.

Figura 37 - (a) Ensaio de compressão axial; (b) Extensômetro

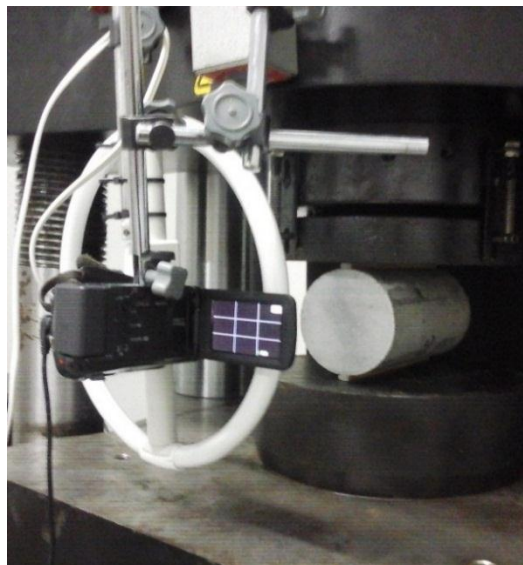


Fonte: Elaboração própria

3.5 Procedimentos para a correlação digital por imagem

Os ensaios de tração indireta foram filmados com a utilização de uma câmera digital de alta resolução (1920x1080 pixels), com taxa de captura de 30 quadros por segundo, fixada à parte imóvel do equipamento de ensaios mecânicos, com o auxílio de braços magnéticos ajustáveis, e os espécimes foram iluminados com a utilização de uma lâmpada circular fluorescente comum, como é mostrado na Figura 38.

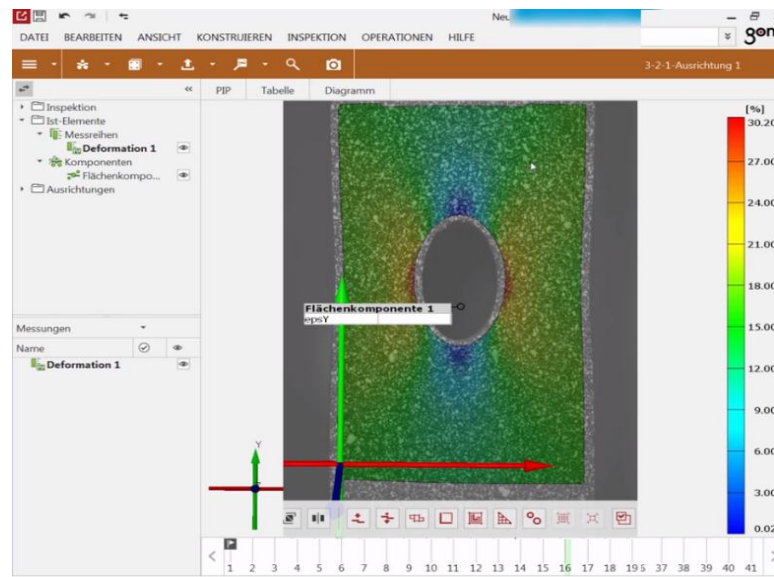
Figura 38 - Detalhe da fixação da câmera e da iluminação



Fonte: Elaboração própria

Dos arquivos de vídeo obtidos com as filmagens foram extraídas imagens estáticas na extensão jpeg, que então foram exportadas para o ambiente do *software GOM Correlate*, o qual é um programa fornecido pela empresa de metrologia industrial *GOM*, com sede na cidade de Braunschweig, na Alemanha, sendo que sua versão gratuita pode ser utilizada para a análise bidimensional de deslocamentos e de suas deformações resultantes, como pode ser observado na Figura 39.

Figura 39 - Interface do software *GOM Correlate*



Fonte: *GOM Correlate* (GOM, 2017)

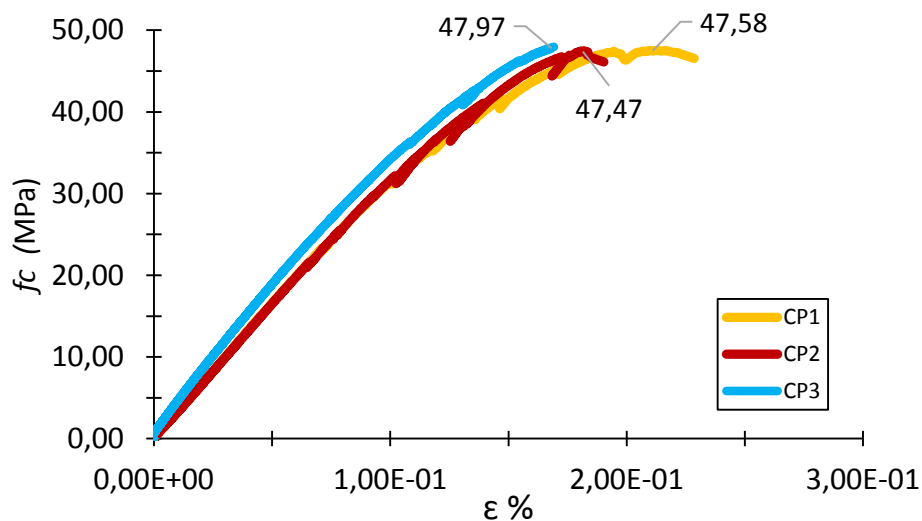
O parâmetro que define o tamanho dos subconjuntos de pixels da análise de correlação de imagens foi determinado a partir da qualidade dos resultados fornecidos pelo *software GOM Correlate*, sendo atribuído a este o valor de 12 pixels por 12 pixels.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão e resistência à tração empírica

O concreto utilizado neste estudo apresentou uma resistência média à compressão $f_c = 47,67$ MPa, obtido com o ensaio de compressão axial, sendo as curvas de tensão versus deformação obtidas são apresentadas na Figura 40.

Figura 40 - Curvas tensão versus deformação do concreto



Fonte: Elaboração própria.

Assim, aplicando a Equação 1, NBR 6118 (ABNT, 2014), foi possível determinar o valor empírico da resistência à tração do concreto, sendo que para fins práticos será considerado o valor da resistência à compressão média como resistência à compressão característica. Dessa maneira, o valor obtido para a resistência à tração deste concreto é de $f_{ct,m} = 3,94$ MPa, ou seja, cerca de 8,3% da resistência à compressão, o que é próximo da relação frequentemente estimada.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Com a execução dos ensaios brasileiros com as diferentes tiras utilizadas, e aplicando-se o valor das cargas máximas à Equação 3 foram determinados os diferentes valores de $f_{ct,sp}$ para cada caso, os quais são elencados nas Tabelas 7 e 8, embora na realidade estes valores representem o valor da tensão de tração

calculada podendo esta não corresponder à real tensão atuante no espécime e, conseqüentemente, à resistência à tração do concreto.

Tabela 7 - Resultados obtidos no ensaio brasileiro para tiras de madeira

b/d	$f_{ct, sp}$ (MPa)					Média	Des. Pad.	CV
	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05			
0,10	3,63	4,78	4,95	4,54	3,98	4,37	0,55	12,7%
0,15	4,01	3,96	4,89	4,23	4,59	4,34	0,40	9,2%
0,20	3,82	4,81	4,59	5,02	4,51	4,55	0,46	10,0%

Fonte: Elaboração própria

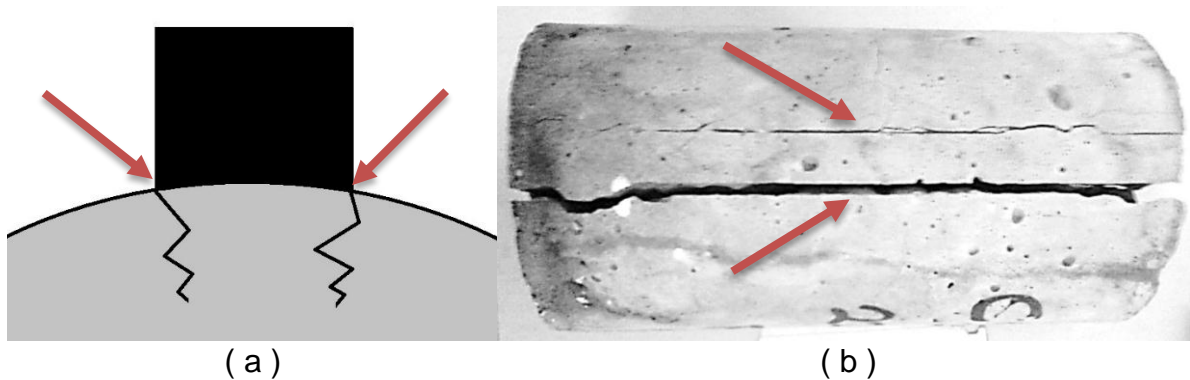
Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio brasileiro para tiras de metal

b/d	$f_{ct, sp}$ (MPa)					Média	Des. Pad.	CV
	CP01	CP02	CP03	CP04				
0,10	3,77	3,26	3,19	2,84	3,26	0,38	11,8%	
0,15	3,51	4,49	4,07	3,20	3,82	0,58	15,1%	
0,20	3,99	4,72	4,75	5,40	4,72	0,58	12,3%	

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado, no caso das tiras de metal houve uma variação elevada dos valores de resistência calculados, fato que sugere uma modificação significativa na distribuição das tensões no corpo de prova. Entretanto, foram observadas fissuras atribuídas ao cisalhamento na extremidade de contato entre as tiras de metal e o concreto, Figura 41 (a), principalmente nas mais estreitas, o que parece ser a causa principal da ruptura, como observado na Figura 41 (b) e responsável pela alta variação dos resultados.

Figura 41 - (a) Fissuras na borda; (b) Ruptura prematura resultante

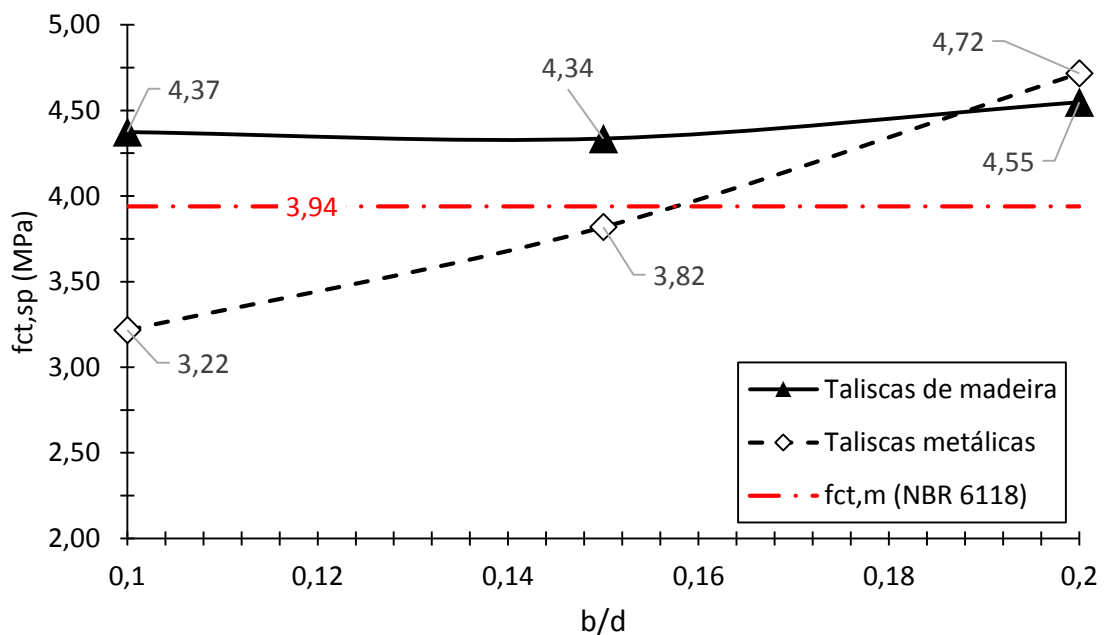


Fonte: Elaboração própria

Devido a este comportamento inesperado, foram executados 3 corpos de prova a menos para as tiras metálicas, os quais foram reservados para testes adicionais com tiras de madeira na proporção $b/d = 0,30$, com uma câmera de maior resolução, a fim de determinar a largura efetiva de contato ($2t$).

Com os resultados médios obtidos nos ensaios de compressão diametral foi construído o gráfico ilustrado na Figura 42, sendo os valores comparados com a resistência à tração calculada de acordo com a NBR 6118 (ABNT,2014).

Figura 42 - Resultados do ensaio brasileiro e do ensaio de compressão axial



Fonte: Elaboração própria

No gráfico é possível notar que a proporção com valor mais aproximado ao dado pela Equação 1 é $b/d = 0,15$, assim como é recomendado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo que a média obtida com as tiras metálicas é a mais aproximada, enquanto a média resultante dos ensaios com as tiras de madeira indica uma superestimação da resistência. Contudo, a proporção estabelecida pela normativa que rege o ensaio é coerente, assumindo-se que a Equação 1 seja válida.

Uma questão interessante sobre a superestimação da resistência observada no caso das tiras de madeira é de que a NBR 6118 (ABNT, 2014) já prevê este comportamento, pois esta estabelece o limite de 90% do valor obtido no ensaio de compressão diametral como a resistência à tração do concreto. Dessa maneira, o

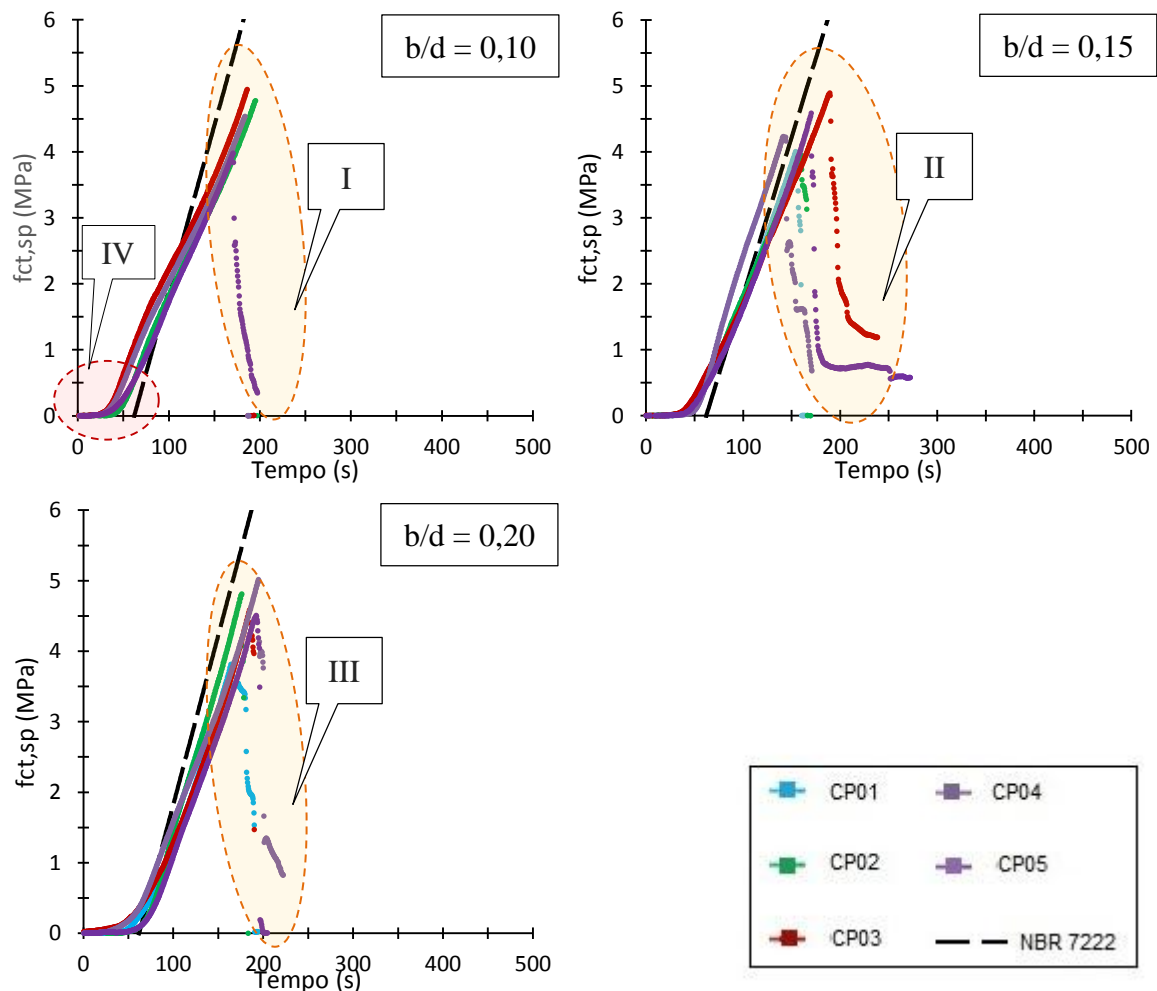
valor de $f_{ct,sp} = 4,34$ MPa obtido para $b/d = 0,15$ com a tira de madeira, o qual é 10,2% maior que $f_{ct,m}$, está de acordo com o previsto.

4.3 Velocidade de execução do ensaio brasileiro

Para a execução do ensaio brasileiro foi adotada como referência a taxa de carregamento de $0,05 \pm 0,002$ MPa/s, conforme recomendação da NBR 7222 (ABNT, 2011), a qual foi obtida ajustando-se a velocidade de deslocamento dos pratos de carregamento em 1,10 mm por minuto. Este parâmetro apresenta grande influência no que diz respeito ao comportamento exibido pela ruptura dos espécimes.

Na Figura 43 são ilustradas as curvas de tensão de tração $f_{ct,sp}$ em função do tempo de execução de ensaio com a utilização das tiras de madeira.

Figura 43 - Curvas tensão versus tempo de ensaio com tiras de madeira



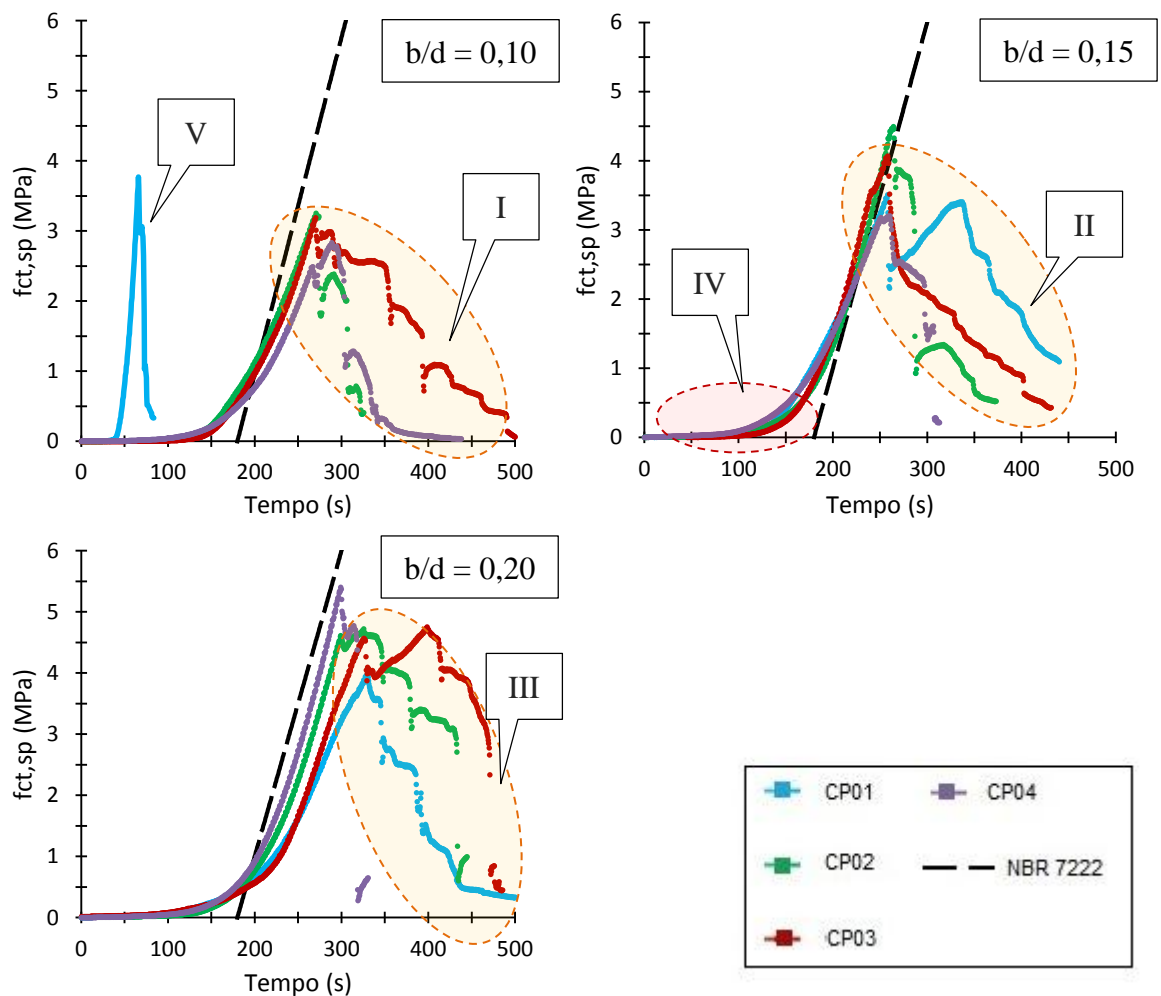
Fonte: Elaboração própria

Como observado, a inclinação das retas tracejadas representa a taxa de aplicação de carregamento normatizada, sendo possível verificar que os ensaios realizados seguiram este parâmetro com uma pequena diferença. Além disso, pode ser verificado que o comportamento exibido após a ruptura, indicado nos gráficos pelos algarismos I, II e III, varia suavemente com a alteração da largura das tiras, indicando uma variação na liberação de energia na fratura resultante, principalmente na tira de $b/d = 0,15$ (II) em relação as demais.

De maneira geral, pode-se afirmar que os ensaios apresentaram uma ruptura frágil, sendo que também é possível averiguar que no início dos ensaios ocorre uma acomodação do espécime e das tiras de carregamento, como indicado por IV.

Na Figura 44 são ilustrados os gráficos de $f_{ct,sp}$ em função do tempo para as tiras metálicas côncavas.

Figura 44 - Curvas tensão versus tempo de ensaio com tiras metálicas



Fonte: Elaboração própria

Analisando o primeiro gráfico, com $b/d = 0,10$, é possível observar que a inclinação da curva do ensaio do CP01, indicada por V, foi superior à estabelecida pela NBR 7222 (ABNT, 2011), sendo que a velocidade de deslocamento do prato da máquina de ensaio foi adotada de acordo com os ensaios com as tiras de madeira, ou seja, igual à 1,10 mm por minuto. Esse comportamento pode ser explicado pela diferente acomodação do espécime, pois neste caso a tira metálica aplica a carga no espécime logo após o início do ensaio devido à menor deformação deste elemento quando comparado à tira de madeira.

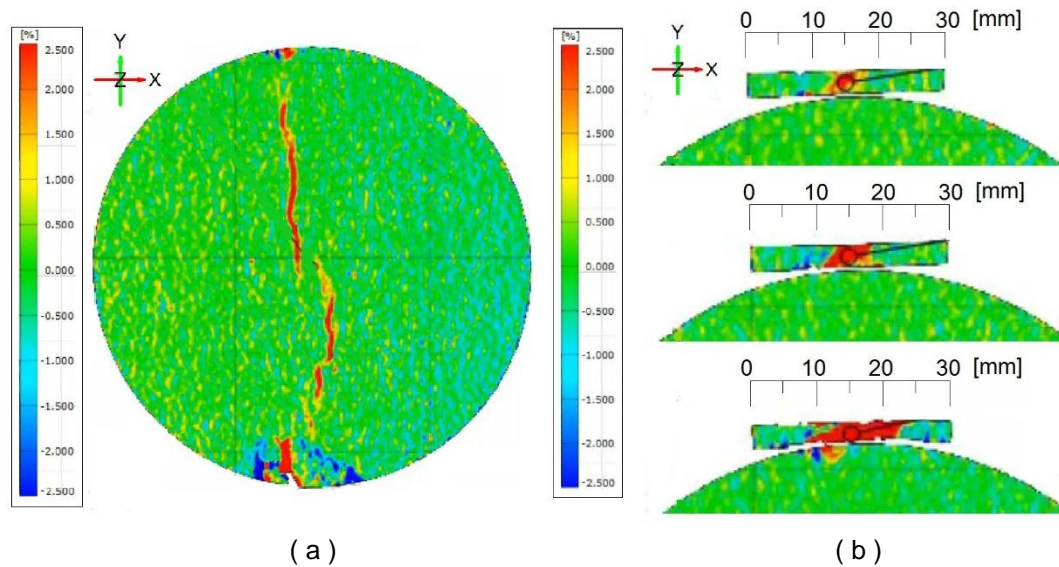
Com isso, foi necessário corrigir a velocidade de deslocamento dos pratos de ensaio, sendo esta definida em 0,20 mm por minuto. Dessa maneira, como observado nas demais curvas, foi adequada a taxa de carregamento do ensaio em relação ao estabelecido pelo procedimento normatizado.

Tal correção ocasionou, como indicado em I, II e III, em uma ruptura mais dúctil neste caso, ou seja, a liberação de energia na fratura foi mais suave quando comparada aos ensaios com as tiras de madeira. Além disso, como indicado por IV, a acomodação do espécime se prolongou mais do que nos ensaios anteriores.

4.4 Largura efetiva e ângulo central resultante

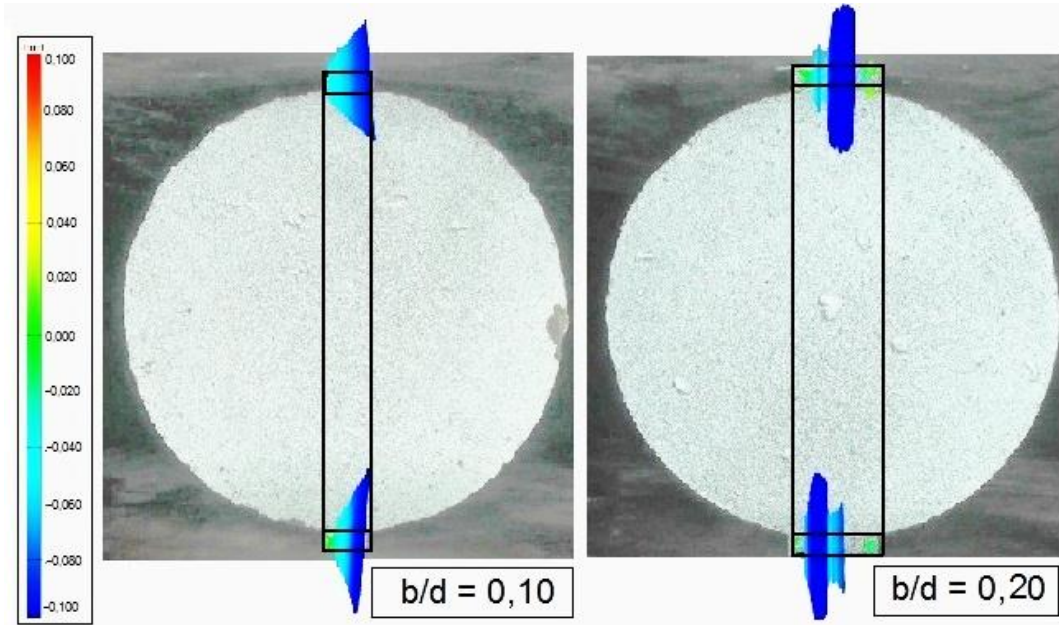
Com os 3 corpos de prova não executados com as tiras metálicas, foram realizados ensaios com uma câmera de resolução superior, 4160 x 2340 pixel, e com taxa de captura de 2 quadros por segundo, obtendo-se o mapeamento das deformações e fissuração do espécime, como pode ser observado na Figura 45 (a). Nestes ensaios, foram utilizadas tiras com largura de 30 mm com a finalidade de observar a deformação apresentada pela madeira, ilustrada nas Figuras 45 (b) e 46, e determinar a máxima largura efetiva de carregamento ($2t$) nestes casos.

Figura 45 - Deformação das tiras de madeira



Fonte: Elaboração própria

Figura 46 - Deslocamento relativo das faces das tiras de madeira



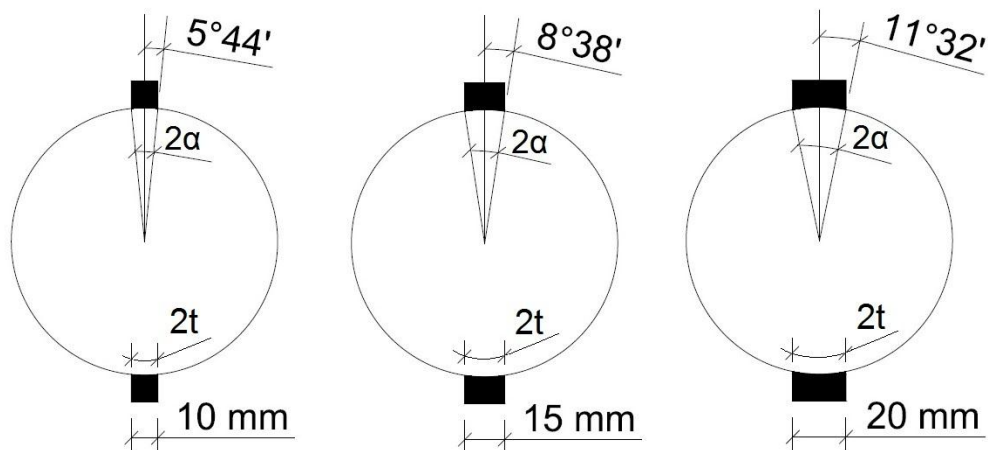
Fonte: Elaboração própria

Analisando estes resultados, os quais representam a maioria dos ensaios, é possível concluir que a largura efetiva para as tiras de madeira é de aproximadamente 10 mm. Além disso, como observado no caso de $b/d = 0,10$, a deformação pode se concentrar em um ponto não centralizado da tira assim como este ponto pode divergir entre a tira superior e a inferior, como no caso $b/d = 0,20$ ilustrado, de maneira que o carregamento não é aplicado simetricamente.

Uma hipótese para estes fatos é a de que o ajuste do corpo de prova nos pratos da máquina de ensaios mecânicos pelo operador, o qual é totalmente manual, também causa influência na distribuição do carregamento, podendo ser um dos fatores responsáveis pelo elevado coeficiente de variação dos resultados. Os resultados de $f_{ct,sp}$ nestes ensaios com $b/d = 0,30$ foram de 5,28, 4,77 e 5,09 MPa, resultando em uma média de 5,04 MPa.

No caso das tiras metálicas côncavas, a largura de carregamento ($2t$), a qual é definida pelo arco finito de contato com o cilindro, é praticamente a mesma largura da tira (b). Para b igual à 10 mm tem-se que $2t$ é igual à 10,01 mm, para b igual à 15 mm o valor de $2t$ é de 15,07 mm e para b igual à 20 mm tem-se $2t$ igual à 20,13 mm, sendo os respectivos ângulos centrais α formados mostrados na Figura 47.

Figura 47 - Ângulos centrais α resultantes para diferentes larguras de b



Fonte: Elaboração própria

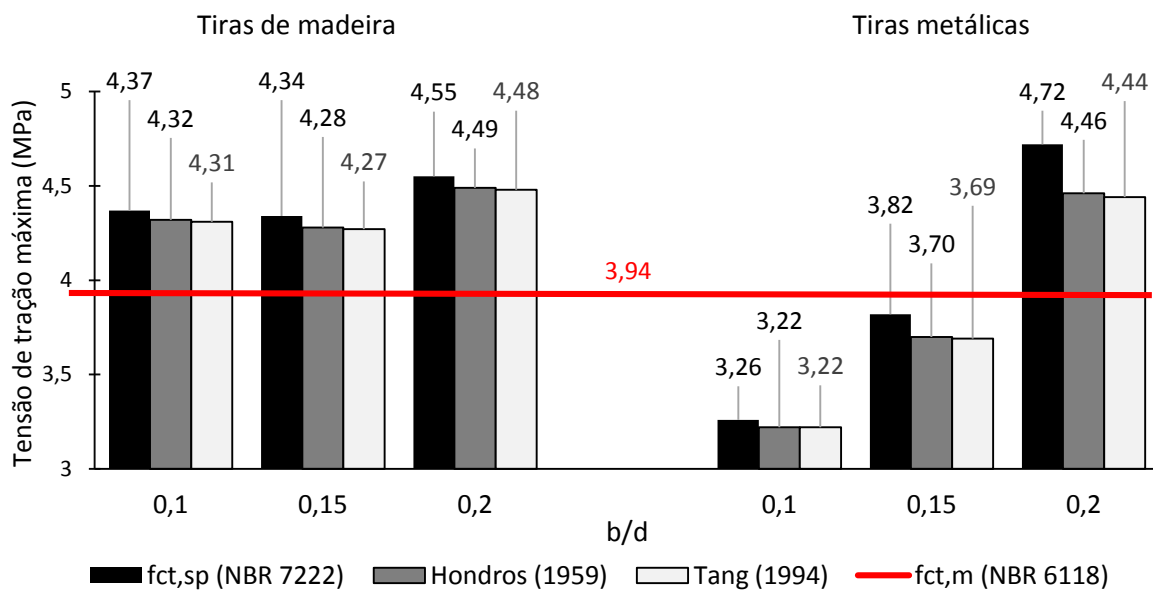
Também é possível concluir que o ângulo central α formado nos ensaios utilizando as tiras de madeira é igual ao obtido para a tira metálica com $b = 10$ mm, ou seja, $\alpha = 5^{\circ}44'$, uma vez que a largura de contato efetiva determinada para a madeira é de aproximadamente 10 mm.

4.5 Tensões de tração de acordo com diferentes formulações, distribuição das tensões e comparação com outros trabalhos

Com os valores dos ângulos e das larguras efetivas determinados foram então aplicadas as soluções dadas pela Equação 5 (Hondros, 1959) e pela Equação 10

(Tang, 1994) para o cálculo da tensão máxima de tração atuante nos cilindros. No gráfico da Figura 48 são ilustrados os resultados médios calculados para as tiras de madeira, sendo $\alpha = 5^\circ 44'$ para todas as proporções b/d , e para as tiras metálicas, com $\alpha = 5^\circ 44'$ para $b/d = 0,10$, $\alpha = 8^\circ 38'$ para $b/d = 0,15$ e $\alpha = 11^\circ 32'$ para $b/d = 0,20$, e a comparação com os valores de $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,m}$.

Figura 48 - Tensão de tração segundo diferentes formulações



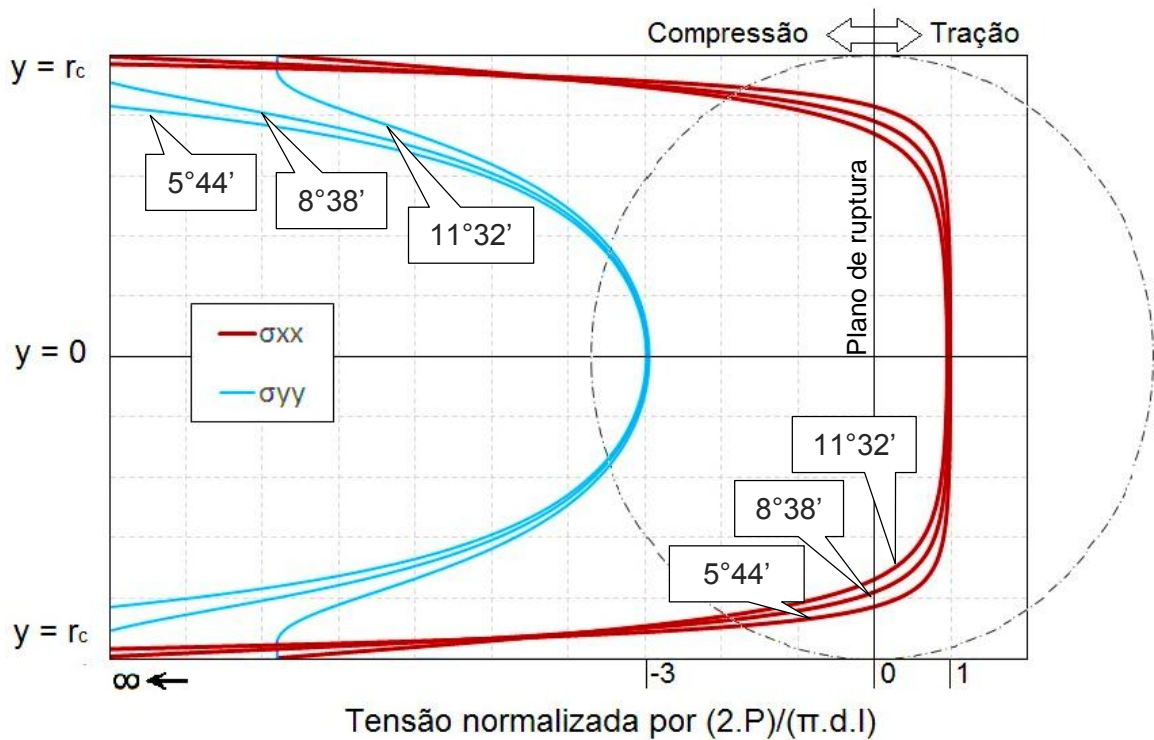
Fonte: Elaboração própria

Ao analisar este gráfico, é possível concluir que os resultados das tensões de ruptura obtidos pelas diferentes formulações são bastante próximos, sendo que para as tiras de madeira a diferença foi de apenas 1,33%, no caso da formulação de Hondros (1959) e 1,50%, na formulação de Tang (1994), em relação ao valor de $f_{ct,sp}$, enquanto que no caso das tiras metálicas as maiores diferenças se deram para $b/d = 0,20$, uma vez que esta proporção apresenta a maior largura de contato efetiva e ângulo central resultante, embora a variação tenha sido pouco expressiva, num valor de 5,36% por Hondros (1959) e de 5,94% por Tang (1994).

Também é possível observar que os resultados obtidos, segundo Hondros (1959) e Tang (1994), para as tiras dos dois materiais na proporção $b/d = 0,20$ foram bastante próximos, indicando que a correção da tensão calculada nestes dois casos foi a mais coerente.

Além das tensões máximas calculadas, foi determinada a distribuição das componentes de tensão no plano de ruptura, de acordo com as Equações 5 e 6 (Hondros, 1959), para os diferentes ângulos centrais estudados, como pode ser observado na Figura 49.

Figura 49 - Variação na distribuição das tensões para diferentes ângulos α



Fonte: Elaboração própria

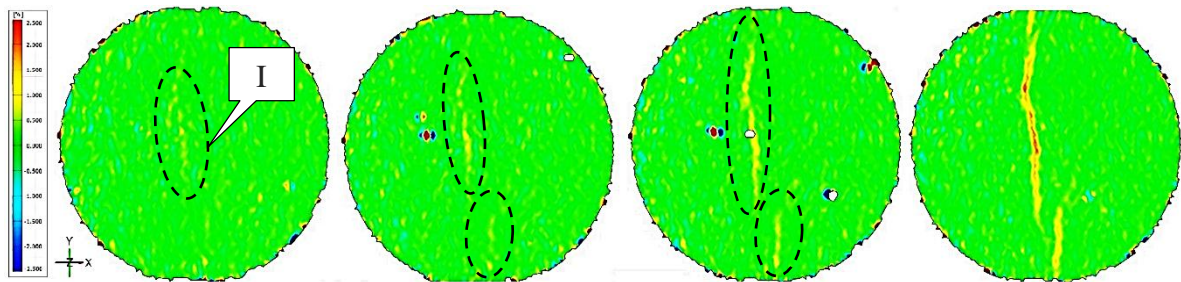
Como pode ser observado, a maior diferença entre os casos ocorre próximo à borda de carregamento, de maneira que quanto menor o ângulo, e conseqüentemente menor a largura de carregamento, maior a abrangência da tensão de tração ao longo do plano vertical de ruptura. Entretanto, este resultado também parece indicar que quanto maior o ângulo α , maior a probabilidade de que a fissura inicie no centro do cilindro, mas também é preciso considerar o efeito da diminuição no valor da componente de tensão vertical (σ_{yy}) compressiva próximo à borda.

4.6 Origem das fissuras, propagação e forma de ruptura

A análise de correlação de imagens realizada com o *software GOM Correlate* permitiu verificar a fissuração resultante da ruptura dos espécimes cilíndricos, sendo possível observar o local de início dessas fissuras e, então, realizar a comparação destes resultados com o comportamento previsto pela teoria que dá base ao ensaio. Nem todos os espécimes ensaiados são apresentados, sendo priorizada a análise dos casos mais distintos e avaliando diversos aspectos.

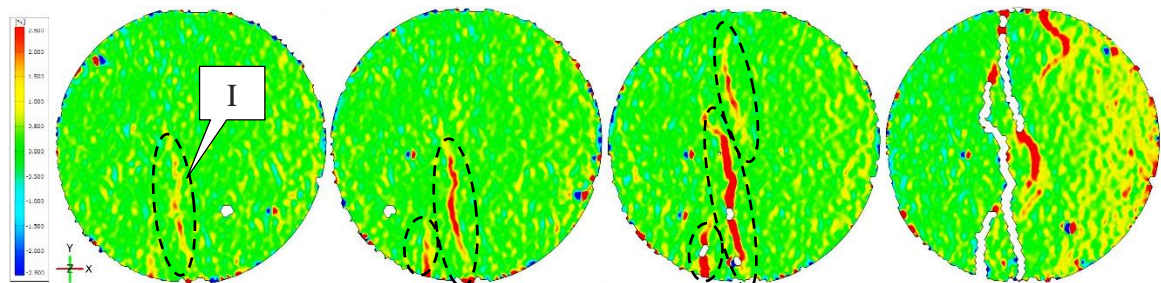
No caso das tiras de madeira de $b/d = 0,10$, foram observadas rupturas distintas para os espécimes identificados por CP01 e CP05, com resistência inferior, e para o espécime CP02, com carga máxima superior. Nas Figuras 50 e 51 são apresentados mapas de deformação de diferentes estágios subsequentes da execução dos ensaios, evidenciando a fissuração dos espécimes CP01 e CP05.

Figura 50 - Mapeamento da deformação do CP01 com tira de madeira e $b/d=0,10$



Fonte: Elaboração própria

Figura 51 - Mapeamento da deformação do CP05 com tira de madeira e $b/d=0,10$



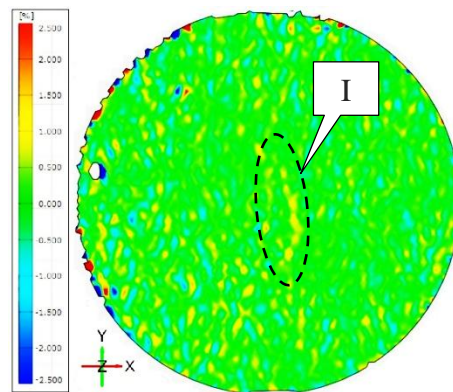
Fonte: Elaboração própria

Como observado, a fissura principal inicia-se verticalmente e próximo ao centro do cilindro, como indicado por I, embora um pouco deslocado em direção à uma das bordas, principalmente no CP05, e então propaga-se até a extremidade oposta com o

aparecimento de fissuras secundárias. Além disso, o plano de fratura do CP01 tem aspecto mais regular, o que atribui uma maior confiabilidade ao resultado, enquanto o CP05 apresenta uma fissuração maior, sendo que no primeiro ensaio o carregamento máximo resistido foi cerca de 10% inferior ao do segundo.

Já no ensaio de CP02, mostrado na Figura 52, houve uma ruptura frágil do espécime, com a separação brusca do concreto, sendo possível captar apenas o início da fissura, indicada por I, a qual é semelhante ao observado no ensaio de CP01, entretanto apresentou um carregamento máximo resistido com valor 32% superior.

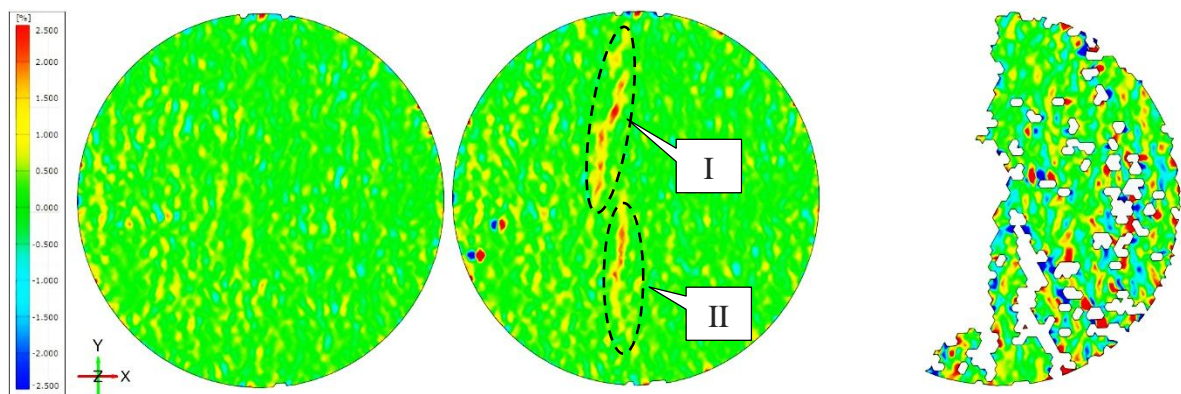
Figura 52 - Mapeamento da deformação do CP02 para tira de madeira e $b/d=0,10$



Fonte: Elaboração própria

Para o caso das tiras de madeira de $b/d = 0,15$, os comportamentos na ruptura foram mais similares, com uma liberação de energia na fratura amenizada pela maior distribuição das tensões na borda. Na Figura 53, é apresentado o ensaio de CP02.

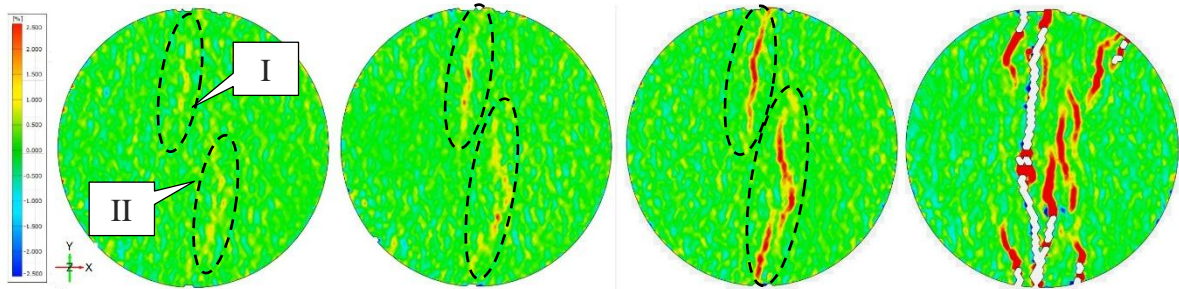
Figura 53 - Mapeamento da deformação do CP02 para tira de madeira e $b/d=0,15$



Fonte: Elaboração própria

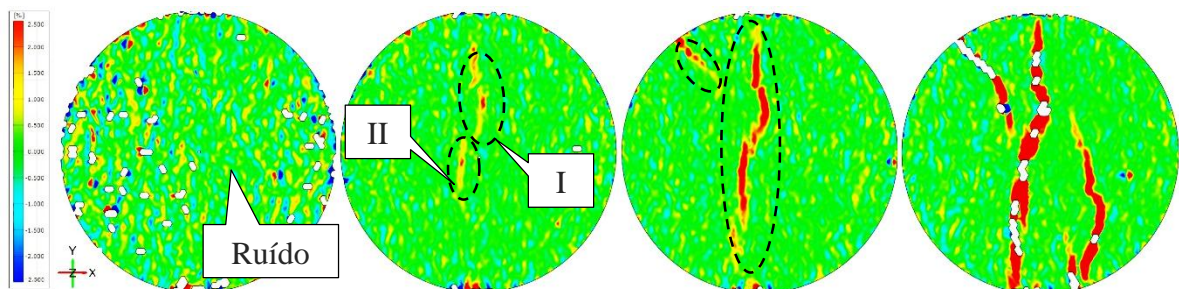
Neste ensaio, é possível verificar o surgimento de duas fissuras simultaneamente, indicadas por I e II, cada uma aproximadamente centralizada nas duas metades da face do corpo de prova e, logo após, a leitura da imagem pelo *software GOM Correlate* foi prejudicada pela vibração causada pela propagação rápida da fissura. Nas Figuras 54 e 55 são mostradas as fissuras obtidas no ensaio de CP01 e de CP05 (I e II), sendo que neste último é possível notar o ruído causado na imagem no primeiro instante, o qual, assim como no ensaio de CP02, foi causado por uma vibração de ruptura no espécime, indicando que neste caso a fissura não iniciou na face observada.

Figura 54 - Mapeamento da deformação do CP01 para tira de madeira e $b/d=0,15$



Fonte: Elaboração própria

Figura 55 - Mapeamento da deformação do CP05 para tira de madeira e $b/d=0,15$



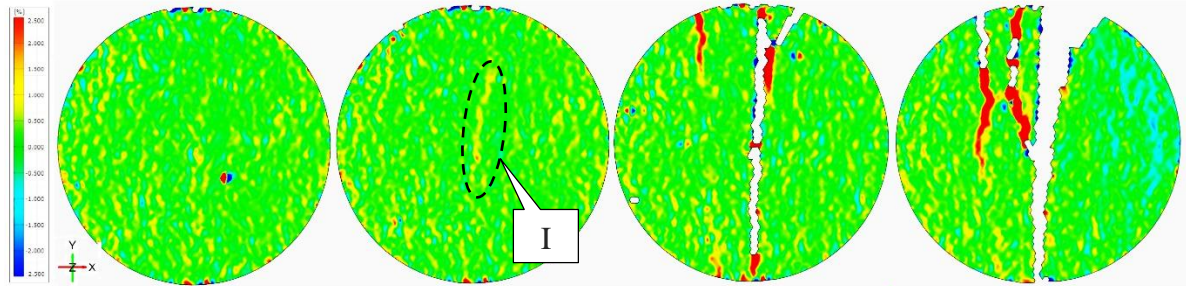
Fonte: Elaboração própria

Analisando a estado final dos espécimes para $b/d = 0,15$, é possível concluir que a fragmentação é mais ampla neste caso quando comparado aos ensaios com $b/d = 0,10$, o que também explica a redução na fragilidade da ruptura.

Na Figura 56, é possível observar o ensaio de CP01 para a proporção $b/d = 0,20$, o qual apresenta inicialmente apenas uma fissura (I) próxima ao centro do espécime, embora a fragmentação na extremidade superior seja maior que na

extremidade inferior, o que sugere uma propagação da ruptura a partir da borda e não do centro.

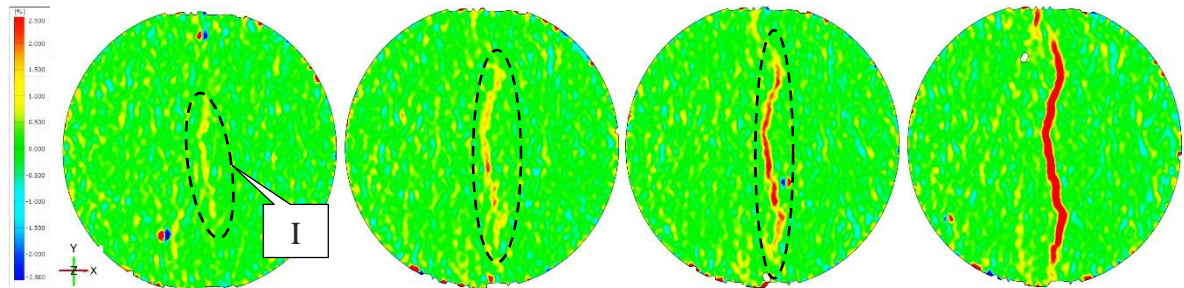
Figura 56 - Mapeamento da deformação do CP01 para tira de madeira e $b/d=0,20$



Fonte: Elaboração própria

Já no caso de CP04, ilustrado na Figura 57, a fissura, também centralizada (I), propaga-se claramente do meio em direção às duas extremidades, além de que a superfície de fratura obtida foi mais regular neste caso e a carga resistida teve um valor quase 32% maior que o valor obtido no ensaio de CP01.

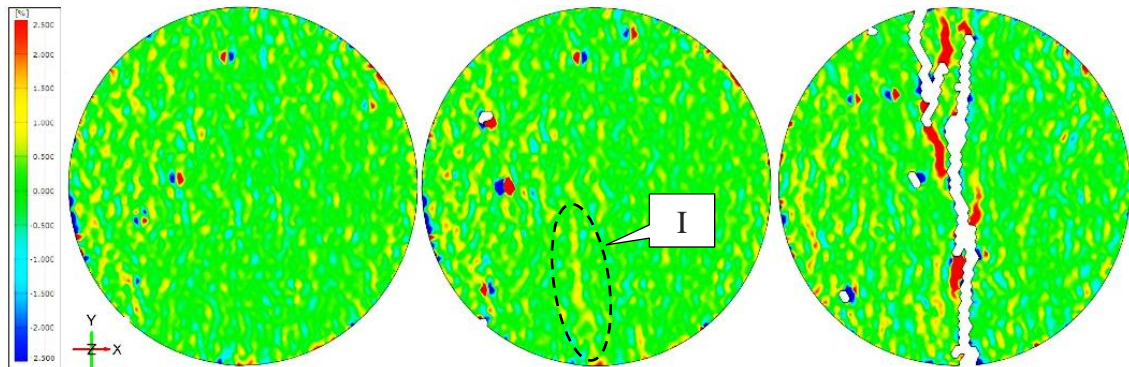
Figura 57 - Mapeamento da deformação do CP04 para tira de madeira e $b/d=0,20$



Fonte: Elaboração própria

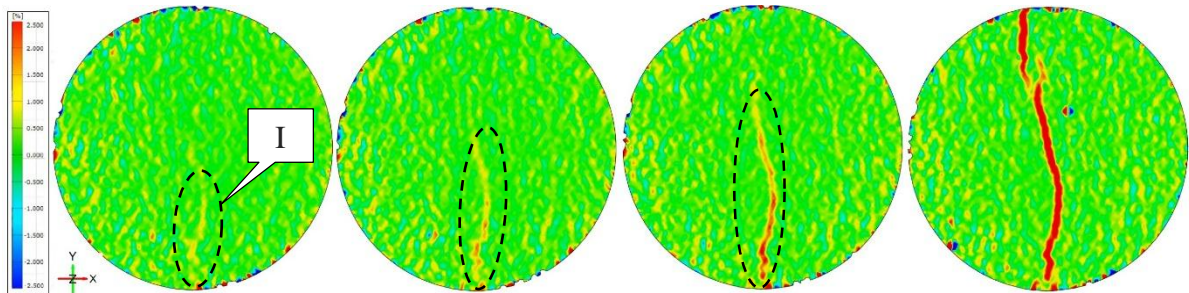
Nos ensaios executados com as tiras metálicas, as rupturas obtidas foram mais dúcteis, devido à correção na taxa de carregamento, sendo que para a proporção $b/d = 0,10$ as fissuras sugerem claramente a influência do cisalhamento observado na borda de carregamento, como pode ser observado nas Figuras 58 e 59, as quais ilustram os ensaios de CP01 e CP04, respectivamente.

Figura 58 - Mapeamento das deformações do CP01 para tira metálica e $b/d=0,10$



Fonte: Elaboração própria

Figura 59 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,10$

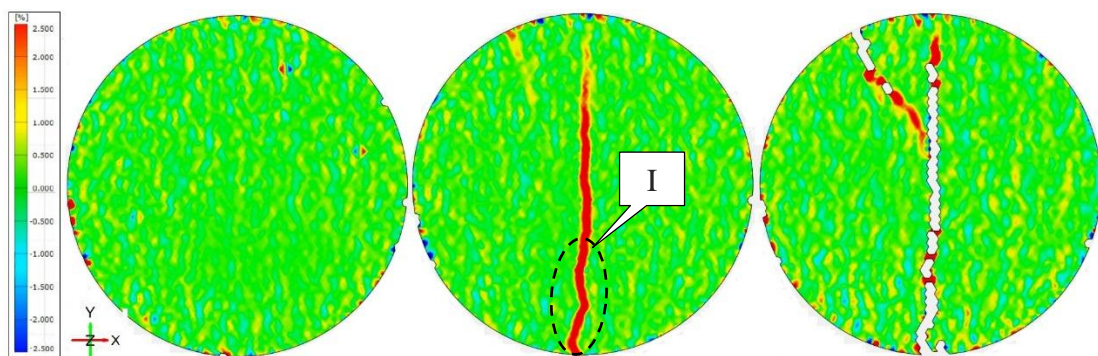


Fonte: Elaboração própria

A diferença entre os valores obtidos nestes dois ensaios é de 33%, sendo que o ensaio de CP01 apresentou uma maior fragmentação e uma maior carga resistida. Entretanto, a influência do cisalhamento não deve ser ignorada, de maneira que a ruptura não pode ser assumida como uma ruptura por tração neste caso.

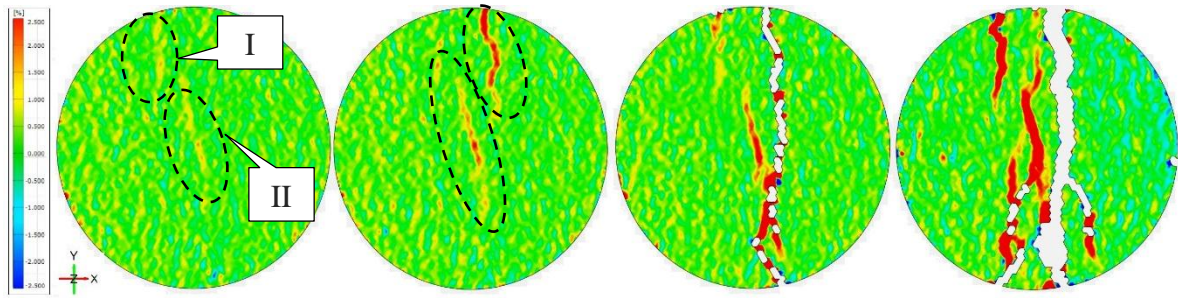
Nas Figuras 60 e 61 são apresentados dois dos ensaios para $b/d=0,15$.

Figura 60 - Mapeamento das deformações do CP02 para tira metálica e $b/d=0,15$



Fonte: Elaboração própria

Figura 61 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,15$

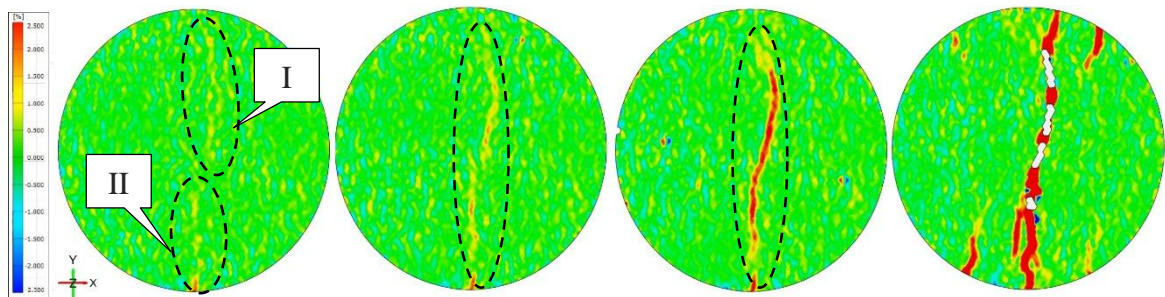


Fonte: Elaboração própria

No caso das tiras metálicas de proporção $b/d = 0,15$ a diferença entre o maior e menor valor, CP02 e CP04 respectivamente, também foi de quase 30% e, além disso, as rupturas foram bastante distintas, sendo que o mais resistente apresentou uma fissura bem regular, embora ambos os ensaios também sejam afetados pelo cisalhamento nas bordas, como é indicado pelas fissuras originadas nestes pontos (I).

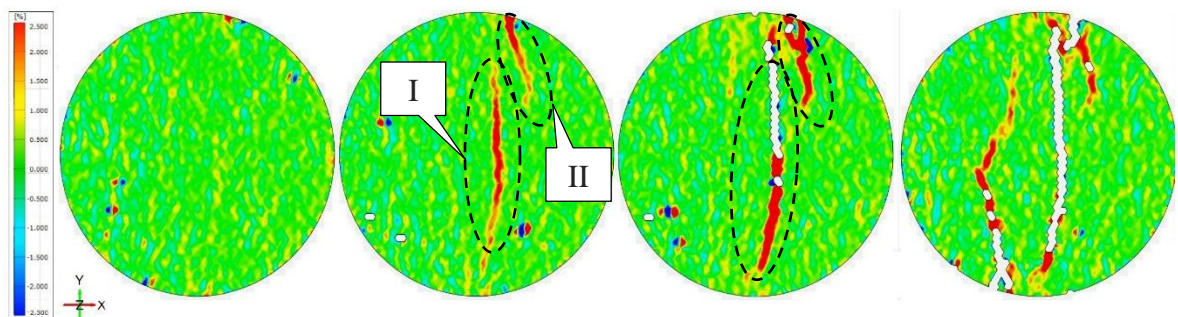
As Figuras 62 e 63 mostram os ensaios para a proporção $b/d = 0,20$.

Figura 62 - Mapeamento das deformações do CP01 para tira metálica e $b/d=0,20$



Fonte: Elaboração própria

Figura 63 - Mapeamento das deformações do CP04 para tira metálica e $b/d=0,20$

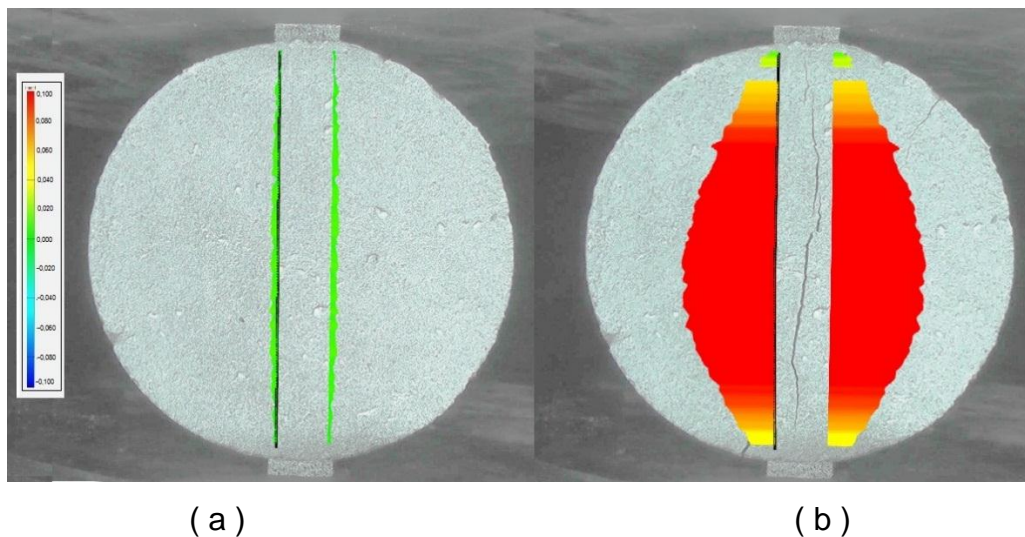


Fonte: Elaboração própria

Observando as fissuras iniciais no CP01 (I e II), é possível notar que as mesmas se assemelham com as obtidas para a tira de madeira na proporção $b/d = 0,15$, sendo que o resultado de $f_{ct,sp}$ também é aproximado. Já no ensaio de CP04, embora a fissura indicada por I seja centralizada e aparentemente responsável pela ruptura do espécime, a fissuração próxima à borda de carregamento (II) ainda parece ser causada pelo cisalhamento na borda de apoio.

Além da fissuração, também foi possível visualizar o deslocamento relativo entre duas linhas na superfície do espécime, o qual é causado pela ruptura do plano vertical, sendo que na Figura 64 é apresentado o resultado para o ensaio brasileiro de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), ou seja, com a tira de madeira na proporção b/d igual à 0,15.

Figura 64 - (a) Linhas na superfície do espécime CP04; (b) Deslocamento relativo

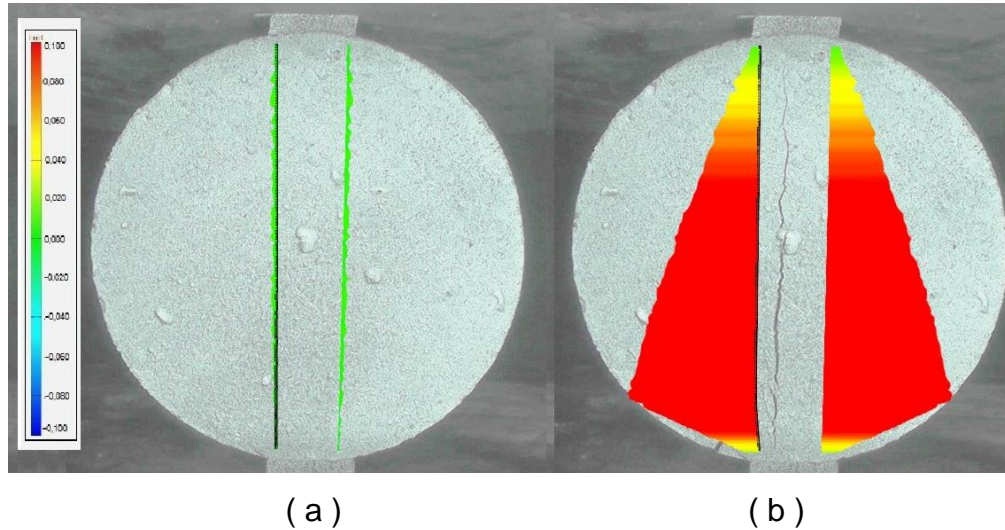


Fonte: Elaboração própria

O comportamento observado é exatamente o esperado para o ensaio de compressão diametral, pois representa uma fissura que inicia no centro do cilindro e se propaga até as extremidades de carregamento, e assim está de acordo com o caso ideal onde a tensão máxima de tração encontra-se no meio de espécime. Entretanto, a simetria ilustrada só foi obtida neste ensaio, o que revela que o procedimento de execução do ensaio interfere muito no resultado obtido.

Na Figura 65 é mostrada a mesma análise, mas para um ensaio com a tira de madeira na proporção b/d igual à 0,20, sendo possível concluir que neste caso a ruptura se iniciou próximo à borda inferior, ao invés do centro do corpo de prova.

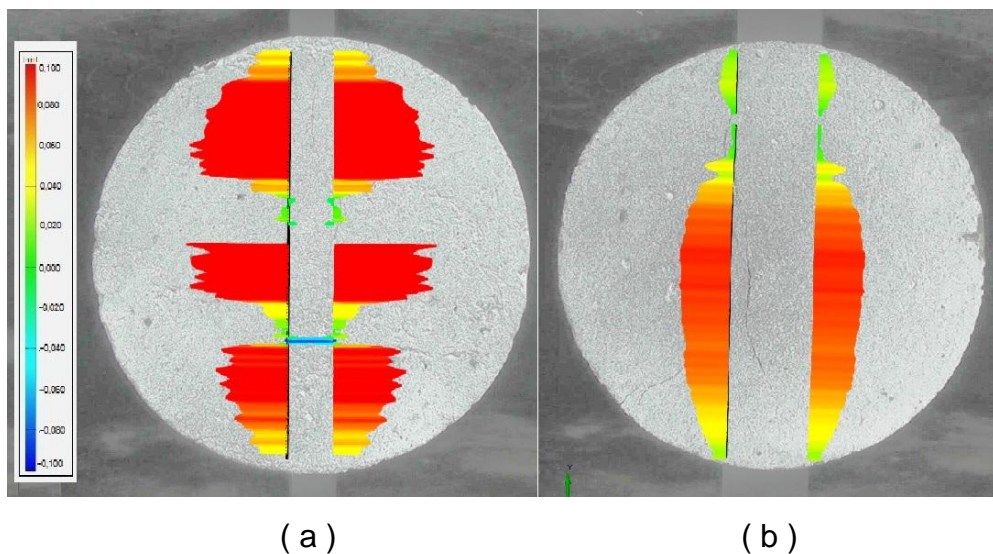
Figura 65 - (a) Linhas na superfície do espécime CP01; (b) Deslocamento relativo



Fonte: Elaboração própria

No caso das tiras metálicas, como mostrado na Figura 66, a fissura não se encontra totalmente no eixo de carregamento, apresentando desvios ao longo do plano de ruptura.

Figura 66 - (a) Deslocamento relativo para $b/d = 0,10$; (b) Para $b/d = 0,20$



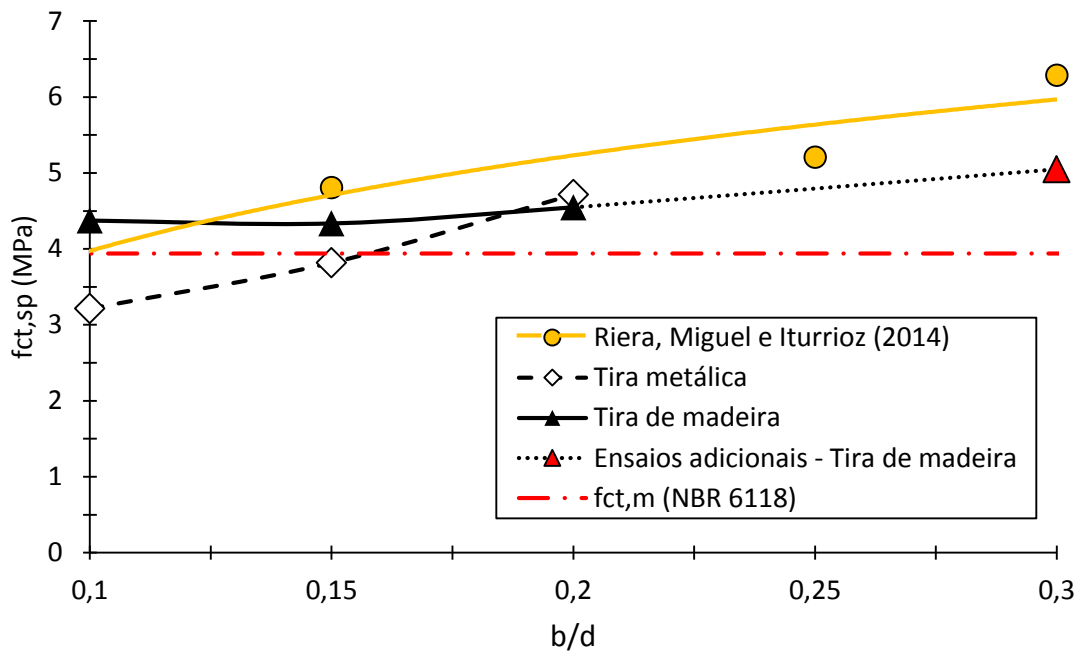
Fonte: Elaboração própria

4.7 Comparação com os resultados de Riera, Miguel e Iturrioz (2014)

O comportamento exibido pelo aumento na proporção b/d estudada neste trabalho, de um modo geral, foi de um leve aumento no carregamento máximo suportado pelos espécimes, tanto nas tiras de madeira como nas metálicas, o que incorretamente sugere um aumento na resistência à tração do concreto, sendo que todas as formulações aplicadas para o cálculo da tensão mostraram o mesmo.

No trabalho de Riera, Miguel e Iturrioz (2014), realizado através de modelagens numéricas, comportamento semelhante também foi identificado, como é mostrado no gráfico da Figura 67, ampliado para as proporções estudadas neste trabalho, incluindo os ensaios adicionais realizados com as tiras de madeira de $b/d = 0,30$.

Figura 67 - Resultados obtidos e resultados de Riera, Miguel e Iturrioz (2014)



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

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A variação dos valores máximos do carregamento aplicado até a ruptura foi superior para a utilização das tiras metálicas curvadas, entretanto, como observado nas imagens, na região de contato ocorreu um cisalhamento crítico devido ao contato da extremidade do elemento com a superfície de concreto, o que resultou numa ruptura prematura principalmente para as larguras inferiores devido à maior sollicitação por área de contato. Deste fato, é possível concluir que a utilização de tiras metálicas com concavidade igual à curvatura do espécime e com larguras nas proporções de b/d iguais à 0,10 e 0,15 não é aconselhável, pois a ruptura não ocorre apenas por tração. Entretanto, esta influência é reduzida para a proporção b/d igual à 0,20, a qual é sugerida para aplicação em trabalhos futuros.

Também é possível afirmar que mesmo com a utilização da mesma largura de tira de apoio, tanto com as metálicas como as de madeira, houve uma grande variação nos resultados, por exemplo no caso das tiras de proporção $b/d = 0,15$, recomendada pela NBR 7222 (ABNT, 2011), obteve-se um $CV = 9,22\%$. Isso pode ser explicado pelo fato de que o próprio ajuste do corpo de prova na máquina de ensaio também pode influenciar no resultado do ensaio, pois interfere na distribuição do carregamento na madeira, e é um inconveniente inerente ao procedimento.

Além disso, foi observado que a forma de ruptura do espécime e o seu grau de fragmentação também variam dentro de um mesmo caso estudado. Uma explicação para tal aleatoriedade pode ser a distribuição não uniforme dos agregados na matriz do concreto e a escala pequena dos espécimes utilizados.

Contudo, foi possível concluir que o local onde se origina a fissura não coincide com o centro exato do cilindro em inúmeros ensaios, além de que mais de uma fissura geralmente causa a ruptura, divergindo com a teoria que dá embasamento ao método. Dessa maneira, as formulações utilizadas para o cálculo da tensão de tração máxima, as quais não divergem significativamente, podem ser consideradas apenas aproximações do real valor característico da resistência à tração do concreto.

Nem todos os inícios de fissura puderam ser identificados pela correlação digital de imagens devido à ruptura frágil de alguns espécimes, entretanto, esta técnica mostra-se útil para a identificação da propagação das fissuras e

deslocamentos imperceptíveis ao olho nu, auxiliando no estudo do comportamento mecânico do concreto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

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

- Utilização de tiras metálicas côncavas, semelhante às empregadas neste estudo, entretanto com as bordas suavizadas (arredondadas) evitando assim o cisalhamento observado nos ensaios executados.
- Utilização de tiras metálicas côncavas, mas com concavidade de raio superior ao do cilindro, assim como recomendado para o ensaio de rochas.
- Redução na taxa de aplicação do carregamento a fim de facilitar a observação da propagação das fissuras no ensaio brasileiro, avaliando a influência deste parâmetro nos resultados.
- Utilização de câmeras com resolução superior, aumentando assim a precisão obtida.
- Uso de extensômetros em conjunto com a correlação de imagens.
- Execução deste estudo com concreto de resistências inferiores e estudo de outros materiais, como argamassas e rochas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 10024**: Chapa dura de fibra de madeira - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ARAÚJO, J. M. A resistência à tração e energia de fratura do concreto. **Série Estruturas de Concreto**, n. 2. Rio Grande: Dunas, Jul. 2001. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero_02.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2017, 18:30:30.

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 3ª Ed. Vol. 1. Rio Grande: Dunas, 2010.

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

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

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

BALBO, J.T. Relações entre resistências à tração indireta e a tração na flexão em concretos secos e plásticos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v. 6, n. 6, p. 854-874, 2013.

BAŽANT, Z. P.; KAZEMI, M. T.; HASEGAWA, T.; MAZARS, J. Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis. **ACI Materials Journal**, [s.l.] v. 88, n. 3, p. 325-332, Mai. 1991.

CARMONA, S. Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta. **Materiales de Construcción**, [s.l.] v. 59, p. 7-18. Abr. 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118/2014. 4ª Ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 138**: Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Brasília, 1994.

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

FAIRHURST, C. On the Validity of the 'Brazilian' Test for Brittle Materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, [s.l.] v. 1, n. 4, p. 535-546. Out. 1964.

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**, Natal, p. 169-181, 2002.

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

GOM. **GOM Correlate**, 2017, il. color. Disponível em <<http://www.gom.com/index.html>> Acesso em: 28 jun. 2017, 22:30:30.

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.

INT - INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. **Instituto Nacional de Tecnologia, desde 1921 gerando Tecnologia para o Brasil**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.int.gov.br/docman/informacoes-institucional/251-livro-do-int-80-anos/file>>. Acesso em: 28 jun. 2017, 10:30:30.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.ipt.br/download.php?filename=980-Catalogo_de_Madeiras_Brasileiras_para_a_Construcao_Civil.PDF>. Acesso em: 28 jun. 2017, 10:45:30.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, [s.l.] v. 15, n. 3, p. 99-103, 1978.

LAVROV, A.; VERVOORT, A. Theoretical treatment of tangential loading effects on the Brazilian test stress distribution. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [s.l.] v. 39, p. 275-283, Fev. 2002.

LI, D.; WONG, L. N. Y. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [s.l.] v. 46, n. 2, p. 269-287, Mar. 2013.

LIU, C. Elastic Constants Determination and Deformation Observation Using Brazilian Disk Geometry. **Experimental Mechanics**, [s.l.] v. 50, n. 7, p. 1025-1039, Set. 2010.

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

MARKIDES, Ch. F.; KOURKOULIS, S. K. The Stress Field in a Standardized Brazilian Disc: The Influence of the Loading Type Acting on the Actual Contact Length. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [s.l.] v. 45, n. 2, p. 145-158. Mar. 2012.

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

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

MELLOR, M.; HAWKES, I. Measurement Of Tensile Strength By Diametral Compression Of Discs And Annuli. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 173-225, Out. 1971.

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

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. **Engineering Structures**, [s.l.] v. 81, p. 10-21, Dez. 2014.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Size Effect and Boundary Conditions in the Brazilian Test: Theoretical Analysis. **Materials and Structures**, [s.l.] v. 32, p. 437-444, Jul. 1999a.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Size Effect and Boundary Conditions in the Brazilian Test: Experimental Verification. **Materials and Structures**, [s.l.] v. 32, p. 210-217, Abr. 1999b.

SANTOS, F.J.K.; MOREIRA, M.P.L.; BANDEIRA, M. V. V. Análise Da Influência da Largura dos Elementos Auxiliares no Ensaio de Tração Indireta do Concreto. In: 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. 2016. Uruguaiana. **Anais...** Disponível em: <<http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/18225>>. Acesso em: 28 jun. 2017, 22:15:30.

TANG, T. Effects of Load-Distributed Width on Split Tension of Unnotched and Notched Cylindrical Specimens. **Journal of Testing and Evaluation**, [s.l.] v. 22, n. 5, p. 401-409, Set. 1994.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. **Theory of elasticity**. 2ª Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1951.

YONEYAMA, S.; MURASAWA, G. Digital Image Correlation. **Experimental Mechanics**. Sample Chapters, In: Encyclopedia of Life Support Systems. [s.l.] 2009. Não paginado. Disponível em: <<http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-194-04.pdf>> Acesso em: 28 jun. 2017, 17:25:30.