



Análise da influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação da trinca em concreto

**Luzilene Souza Silva¹, José de Ribamar Mouta¹, Marília Cristina Barata da Costa¹,
Laércio Gouvêa Gomes¹**

¹ Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) - Belém - PA- Brasil

eng.luzilene@gmail.com, ribamar.mouta@gmail.com, mbcosta05@gmail.com,
laercio.gouvea@gmail.com

Resumo. *Este trabalho buscou averiguar a influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação de trinca em concreto e conseqüentemente, na carga máxima e energia de fratura quando esse material é submetido ao carregamento utilizando o método descrito pelo Comitê Técnico RILEM TC 162 (2003) - (União Internacional de Ensaios e Laboratórios de Pesquisa de Materiais e Estruturas). Foram moldados 9 corpos de prova com dimensões de 150mmx150mmx550mm, sendo que para cada três amostras foram feitos entalhes com espessura fixa de 2mm e profundidade variando em (7mm, 11mm e 15mm). Os resultados do ensaio de flexão em 3 pontos demonstraram que à medida que se aumenta a profundidade do entalhe ocorre à diminuição da área sob a curva. No entanto, para os corpos de prova com entalhe a partir de 11mm observou-se uma maior estabilidade na propagação da trinca, indicando que essas medidas seriam mais confiáveis para se obter o real valor da tenacidade à fratura do concreto.*

Palavras Chave: *Mecânica da Fratura. Tenacidade à Fratura. Concreto.*

Abstract. *This work has aimed at investigating the influence of notch depth on the stability of crack growth in concrete and, consequently, on the maximum load and strain energy when this material is submitted to its maximum load using the method describes by the Technical Committee RILEM TC 162(2003) – (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). Nine specimens were produced with dimensions of 150mmx150mmx550mm. The specimens were divided in groups of 3, all of them having been given a 2mm-wide notch, but the depth of the notches varied for each group (7mm, 11mm, 15mm). The results of the tensile testing in 3-points flexure demonstrated that the area under the curve decreases as the notch depth increases. However, for specimens with notches more than 11-mm deep, the stability of crack growth increased, indicating that those dimensions could more reliable in order to obtain the true value of concrete's crack resistance.*

Key words: *Fracture Mechanics. Fracture Toughness. Concrete.*



1. Introdução

O concreto é composto por uma mistura de cimento, agregados graúdos e miúdos e água, além de outros materiais eventuais, adições e os aditivos. O concreto convencional, não armado, tem vasta aplicação, devido a características peculiares como: facilidade de ser moldado, resistência à compressão, e materiais disponíveis em variadas regiões do planeta (MEHTA e MONTEIRO, 2008). É o material mais comumente usado na construção civil no mundo inteiro, daí a necessidade crescente do entendimento do seu comportamento mecânico, das propriedades de seus componentes e, particularmente, de sua resistência à fratura.

Sob o ponto de vista da engenharia, a resistência à compressão axial é um dos aspectos mais importantes do concreto estrutural. Porém, a energia de fratura (γ_{wof}) é relevante para o projeto de grandes estruturas de concreto porque é uma propriedade que avalia a resistência à propagação de trincas (RIBEIRO e RODRIGUES, 2009). A energia de fratura pode ser definida como o trabalho médio por unidade de área projetada de fratura para propagar uma trinca, representada pela soma de energias associadas a diferentes mecanismos de absorção ou dissipação durante o processo de fratura. O seu valor pode ser determinado a partir da curva carga-deslocamento gerada por um ensaio de propagação estável de trinca (ASHBY *et al.*, 2012).

Existem diversos métodos para avaliar a tenacidade à fratura dos materiais, que são aplicados a corpos de prova com uma trinca aguda na raiz do entalhe para garantir, dentro de certos limites, a máxima severidade possível de tensões nesse ponto. Esses ensaios são: tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}), deslocamento de abertura da ponta da trinca crítico (C_{TOD}) e o parâmetro crítico em termos da integral J (J_{IC}). Os ensaios de tenacidade à fratura do tipo K_{IC} são mais indicados para materiais frágeis e quase-frágeis, de elevada resistência mecânica, como é o caso do concreto. Já os ensaios C_{TOD} e integral J_{IC} permitem estabelecer parâmetros de tenacidade à fratura para materiais dúcteis de menor resistência mecânica, em condições elastoplásticas de deformação.

O ensaio K_{IC} é empregado para materiais frágeis e quase-frágeis em que a condição de comportamento linear elástico até a ruptura é válido. As formas geométricas comumente usadas na realização de ensaios de fratura são prismáticas, utilizando vigas sob flexão em três ou quatro pontos de carregamento, usadas para determinar os parâmetros de fratura. Para a geometria de três pontos de flexão, o ensaio é realizado em viga estável utilizando máquinas de teste padrão, monitorado com carregamento controlado. Kumar e Barai (2011) enfatizam que o Comitê Técnico RILEM - União Internacional de Ensaio e Laboratórios de Pesquisa de Materiais e Estruturas, em sua publicação em 2002, recomenda as diretrizes para a determinação da energia de fratura de materiais cimentícios, conduzindo o Teste de Flexão em Três Pontos (TFTP) onde a amostra deve ter um entalhe para provocar a abertura da fissura.

Ao executar-se um ensaio de determinação da tenacidade ao fraturamento de um dado material, busca-se, em última análise, a elevação do Fator de Intensidade de Tensões, K_i , na ponta da fissura do modelo em fase de ensaio. Esta majoração, lenta e crescente, objetiva determinar o limite do fator de intensidade de tensões a que o material pode resistir, antes que a propagação da fissura tenha início, refletindo assim, a tenacidade ao fraturamento do material (EVANGELHO, 2013; SALVADOR, 2013).

Desta forma, ao usar-se ou moldar-se no corpo de prova um entalhe inicial, busca-se não só a criação de uma seção transversal de menor resistência, por onde preferencialmente a fissura se propaga, bem como, o estabelecimento de uma pré-fissura, de extensão a_0 . Em outras palavras, o ensaio mede, por exemplo, a extensão desta fissura prévia, quando da intensificação das tensões a níveis críticos (EVANGELHO, 2013; SALVADOR, 2013).



Souza (2011) afirma que os resultados do ensaio de tenacidade à fratura vão depender de três fatores básicos: do raio da raiz do entalhe; da espessura do corpo de prova e da profundidade da trinca.

Para se avaliar experimentalmente a energia de fratura, a condição essencial é que a propagação da trinca seja estável, e em se tratando do concreto, que utiliza agregados de diversos tamanhos, as dimensões das amostras são uma preocupação importante. Quando se faz uso de amostras pequenas, a seção a ser fraturada pode conter agregados com tamanhos relativos próximos ao dessa seção, produzindo resultados insatisfatórios. Por outro lado, ao se utilizar amostras grandes, pode haver o acúmulo de energia elástica que provoca a instabilidade da propagação da trinca (RIBEIRO e RODRIGUES, 2009).

Dada a importância das dimensões do entalhe nos corpos de prova para a determinação dos resultados finais de tenacidade à fratura do concreto. O presente estudo buscou comparar os valores obtidos no ensaio de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos, realizado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela RILEM (2003), onde utilizaram-se 3 amostras de concreto para cada condição, sendo que, foi mantida a espessura de 2 mm e variou-se a profundidade dos entalhes em (7, 11 e 15 mm). Com isso, espera-se contribuir para o melhor entendimento das variáveis relacionadas a determinação de resistência à propagação de trincas no concreto e de que forma estes fatores interferem nos resultados finais dessa propriedade.

2. Estudo da tenacidade à fratura do concreto

Um dos maiores problemas atuais no acompanhamento da integridade de componentes mecânicos é a possibilidade de ocorrência de uma fratura frágil, repentina e inesperada, mesmo quando o componente esteja submetido a condições normais de operação. O dano que pode ocorrer em uma estrutura, principalmente se houver a presença de um concentrador de tensão, vai depender, basicamente, da capacidade do material absorver deformações plásticas localizadas, gerando uma região deformada na ponta da trinca (GUIMARÃES e ETOM, 2013).

A mecânica da fratura pode ser uma ferramenta muito útil para aperfeiçoar o comportamento do concreto, tendo em vista os conceitos da mecânica da fratura elástica linear (MFEL) ou da mecânica da fratura elastoplástica (MFEP). A medida quantitativa entre a fratura e tamanho da trinca marca o início dos estudos da mecânica da fratura por intermédio do trabalho de Griffith, baseado na primeira lei da termodinâmica – princípio da conservação de energia, publicado em 1920. O modelo de Griffith previu corretamente a relação entre a fratura e o tamanho da trinca em amostras de vidro. Em 1956 Irwin desenvolveu o conceito de taxa de liberação de energia, que está relacionada com a teoria de Griffith, permitindo a resolução de problemas de engenharia. Este conceito desenvolvido por Irwin ficou conhecido mais tarde como fator de intensidade de tensão. Hoje a mecânica da fratura tem sido usada como ferramenta na caracterização de materiais compósitos (VASCONCELOS, 2012).

O concreto detém algumas limitações, como baixa resistência à tração e ductilidade, sendo considerado também como um material quase-frágil. Segundo Li (2011), o modo de falha dos materiais pode ser classificados em três categorias, conforme ilustrado na Figura 1, que mostra as curvas de tensão x deformação dos materiais enquadrados como: material frágil (Figura 1a) que apresenta uma fratura abrupta, pois não tem capacidade de deformação; quase-frágil (Figura 1b) caracterizado por possuir limitada capacidade de absorver energia antes de sua ruptura; e dúctil (Figura 1c) possui deformação plástica, permitindo a lenta propagação das trincas impostas ao material.

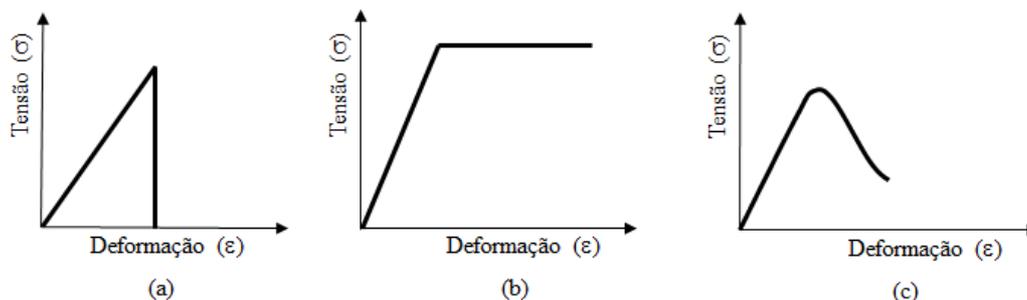


Figura 1. Possíveis curvas de tensão-deformação: a) material frágil; b) material dúctil; c) material quase-frágil.

O processo de fratura envolve etapas importantes, entre elas acumulação de danos, nucleação, propagação de trincas e a falha final. A acumulação de danos e nucleação de trincas estão relacionados à estrutura molecular, ou seja, à resistência das ligações intra e intermoleculares e com a forma de como essas ligações reagem ao estado de tensão (CANEVALORO JR, 2002; PEREZ, 2005), desta forma, estas etapas são particulares de um dado material e são fortemente influenciadas pelas etapas de processamento. Já a propagação de trincas é menos influenciada pelos mesmos processos, sendo mais sujeita a leis gerais.

Uma característica particular dos ensaios de tenacidade à fratura é, portanto, a necessidade de inserção de uma pré-trinca, na tentativa de imitar um defeito natural na amostra a ser testada. A MFLE pode fornecer uma apropriada descrição do comportamento mecânico da trinca, na MFLE o campo de tensão ao redor da ponta da trinca é usado para caracterizar as condições críticas relacionadas à iniciação da fratura em materiais frágeis (SOUZA, 2011).

Ainda segundo o autor acima citado, o campo de tensão global ao redor da ponta da trinca é uma combinação de três modos básicos de carregamento da trinca, exemplo: (a) modo de abertura encontrado em carregamentos por tração e flexão onde a descontinuidade do deslocamento é perpendicular ao plano da trinca; (b) modo de escorregamento, encontrado em carregamentos por cisalhamento puro, onde, a descontinuidade do deslocamento está no plano paralelo à direção da trinca e (c) modo de rasgamento encontrado em carregamentos por torção onde as descontinuidades dos deslocamentos são adjacentes em sentidos opostos ao plano da trinca, conforme a Figura 2.

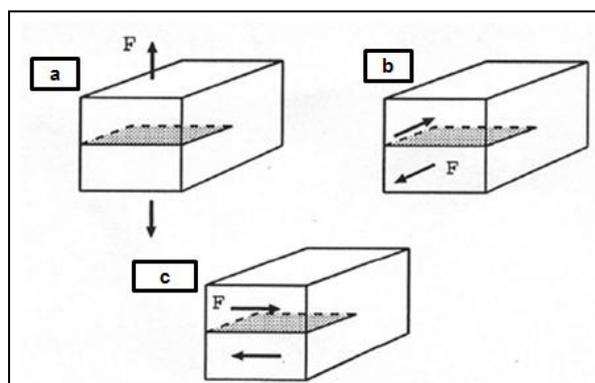


Figura 2. Modos de carregamentos de trincas em função do método de aplicação de carga e da forma de propagação da trinca. (a) modo de abertura, (b) modo de escorregamento e (c) modo de rasgamento.

2.1 Ensaio utilizado para a determinação da tenacidade à fratura do concreto

Segundo Vasconcelos (2012), os principais métodos utilizados para testes de resistência a flexão e tenacidade à flexão de concreto são conduzidos de acordo com as normas: *Japan Society of Civil Engineers - JSCE (JSCE-SF4, 1984) "Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete"* - Método de testes para resistência à flexão e tenacidade de concreto reforçado com fibras de aço, *American Society for Testing and Materials - ASTM (ASTM-C1018, 1997) "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)"* - Método de teste padrão da resistência à flexão de concreto reforçado com fibras, usando uma viga com carregamento em quatro pontos, e *ASTM C1609 (2010) "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with fourth-point loading)"* - Método de teste padrão para o desempenho à flexão de concreto reforçado com fibras, usando uma viga com carregamento em quatro pontos. Mais recentemente, a RILEM desenvolveu uma nova metodologia de avaliação da tenacidade em flexão de Concretos. Este foi o método escolhido para desenvolvimento do presente trabalho.

2.1.1 Ensaio de determinação da tenacidade à fratura do concreto pelo método da (RILEM TC 162)

Após a versão inicial editada no ano 2000 (RILEM TC 162, 2000), o Comitê Técnico da RILEM lançou sucessivas revisões da metodologia (RILEM TC 162, 2002a, RILEM TC 162, 2002b), culminando com as recomendações finais apresentadas em RILEM TC 162, 2003. Em linhas gerais o novo método tenta evitar a dependência da geometria do corpo de prova presente no método japonês, procurando eliminar também as dificuldades de determinação do deslocamento correspondente à primeira fissura presente no método americano. Em consequência, prescreve um ensaio padronizado na flexão em três pontos em viga entalhada, conforme mostra a Figura 3, na qual é possível observar que a amostra está sendo apoiada por dois suportes nas laterais (também chamados de roletes) e por um terceiro, alojado sobre o centro da viga, no qual ocorre à aplicação da força por meio de um aparelho de carga. Este ensaio além do valor da tração na flexão do material, também nos fornece o gráfico de carga x deslocamento (onde é possível obter a tenacidade do material), já que essa propriedade pode ser mensurada pelo valor correspondente a área sob a curva (carga x deslocamento) obtida no referido gráfico.

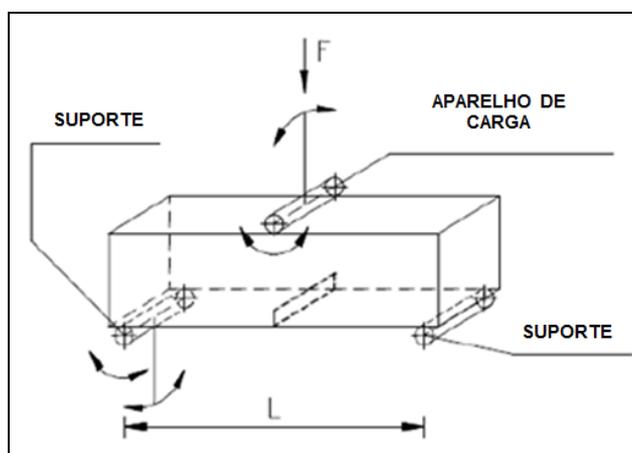


Figura 3. Esquema do ensaio de viga entalhada (Adaptado de RILEM, 2003)



O comportamento em flexão é avaliado a partir de parâmetros que avaliam níveis de carga e deslocamentos prescritos, que não dependem da localização do início da fissuração, tão pouco da geometria dos corpos de prova. Além disso, tem-se a possibilidade de tais parâmetros serem utilizados na verificação de estados limites de serviço último.

A nova metodologia da RILEM pode ser considerada uma evolução de um método proposto por Bantia e Trottier (1995), que introduziram o conceito de "resistência pós fissuração" ("*Post-Crack Strength*" - PCS). Nessa proposição, os autores empregaram a padronização do ensaio japonês (JSCE-SF4), calculando a energia absorvida antes do início da fissuração. Adicionalmente, estabeleceram diversos limites de deslocamento objetivando o cômputo de parcelas de energia compatíveis com exigências relacionadas a estados limites de serviço de interesse à análise estrutural (GROSSI, 2006).

3. Materiais e métodos

A fase experimental da presente pesquisa consistiu das seguintes etapas: caracterização dos materiais (agregado miúdo e agregado graúdo); determinação da dosagem do concreto (pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP); confecção e moldagem dos corpos de prova; execução dos entalhes nas amostras de concreto; e por fim, realização do ensaio de tração na flexão em três pontos (RILEM TC 162, 2003), o qual foi executado para a obtenção do valor da tenacidade à fratura do concreto.

Para a confecção do concreto, utilizou-se o cimento Portland CP-II-E-32, marca Poty, da fabricante Votorantim S.A, areia natural e seixo de origem quartzosa. Tanto o agregado graúdo quanto o miúdo foram submetidos ao procedimento de caracterização de suas propriedades físicas, passando primeiramente pela realização do ensaio de composição granulométrica, segundo a ABNT NM 248 (2003). Posteriormente foram feitos os ensaios para determinação da massa específica da areia com base na ABNT NM 52 (2009) e massa específica do seixo, conforme estabelece a ABNT NM 53 (2009). Por último, determinou-se a massa unitária destes materiais de acordo com o ensaio normatizado pela ABNT NM 45 (2006).

Após a caracterização dos agregados, partiu-se para elaboração do traço do concreto que foi feito segundo o método da ABCP. Primeiramente, estipulou-se o F_{ckj28} , que se refere à resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de cura, o qual é calculado utilizando-se a resistência característica à compressão mínima desejada para o projeto (F_{ck}) multiplicado por um coeficiente de majoração (desvio padrão) que, para este caso, foi adotado o valor de 4. A partir disso, fixou-se o F_{ck} em 35 MPa e, utilizando-se a curva de *Abrams*, estabeleceu-se a relação água/cimento em 0,39, chegando-se ao consumo de materiais necessários para a produção de $1m^3$ de concreto. A apresentação do traço ficou da seguinte forma: 1:0,97:2,26:0,39. Foi utilizado apenas um traço para efeito de comparação nos resultados do ensaio de tenacidade, já que o objetivo neste caso é avaliar a dispersão dos resultados por meio das modificações nas dimensões do entalhe produzido nas amostras.

Após a determinação do traço, partiu-se para confecção e moldagem dos corpos de prova. Primeiramente, pesaram-se todas as quantidades de materiais necessários para confecção dos traços para então seguir ao procedimento de produção do concreto, nesta ordem: umidificação da betoneira; colocação de todo o agregado graúdo; colocação de metade da areia; inserção de metade da água; mistura na betoneira por um minuto; adição de todo o cimento; adição do restante de areia; homogeneização dos materiais na betoneira por mais três minutos, e; mistura do restante de água, rodando a betoneira por mais dois minutos.

Logo após procedeu-se a moldagem do concreto em fôrmas prismáticas segundo as dimensões estabelecidas pela RILEM TC 162 (2003): 150 mm x 150 mm x 550 mm.

Após a moldagem os corpos de prova, foram colocados em imersão em tanque com água para cura, por um período de 28 dias. Ao término deste ciclo, foram retirados da água e então realizou-se a confecção dos entalhes nas amostras, com o auxílio de disco de corte diamantado. Foram utilizados três corpos de prova para cada tipo de entalhe produzido. Optou-se por fixar a largura da trinca em 2 mm e variar a espessura em (7, 11 e 15 mm, cada um). Ao todo foram produzidos nove corpos de prova. Na Figura 4, estão ilustrados os corpos de prova com os três tamanhos de entalhes que foram utilizados nesta pesquisa.



Figura 4. Corpos prismáticos com diferentes entalhes (a) entalhe com profundidade de 7 mm; (b) entalhe com profundidade de 11 mm e (c) entalhe com 15 mm.

Após a execução dos entalhes nos corpos de prova, foi realizado o ensaio de flexão em três pontos, conforme o que estabelece a RILEM TC 162 (2003). Esta norma afirma que a máquina de ensaio deve ser operada de modo que a deflexão medida da amostra no intervalo médio aumente a uma taxa constante de 0,2 mm / min até que a deflexão final especificada seja alcançada. Durante o teste, o valor da carga e a deflexão média (δ) são gravados de forma contínua. Durante os primeiros dois minutos do teste, os dados devem ser registrados com uma frequência não inferior a 5 Hz; depois disso, até o final do teste, a frequência não deve ser inferior a 1 Hz. A Figura 5 mostra a realização do ensaio e a aparência dos corpos de prova após o rompimento.

Após a realização do ensaio, foram feitos os cálculos segundo as equações constantes na RILEM TC 162 (2003). Utilizou-se o método 2, que na referida norma diz respeito à resistência residual (f_R) da amostra. Este método é válido para o ensaio realizado em vigas isostáticas prismáticas, solicitadas à flexão por uma única carga concentrada, aplicada "pontualmente" no meio do vão, previamente entalhado. Por intermédio dos parâmetros f_{R1} e

f_{R4} caracteriza-se uma lei constitutiva (σ - ϵ) que governa o comportamento do material em flexão. Os parâmetros f_{R1} e f_{R4} , podem ser entendidos como a resistência do material para dissipar uma energia até a flecha, e são obtidos a partir de forças residuais F_{R1} e F_{R4} , respectivamente, que correspondem as forças aplicadas em função dos correspondentes deslocamentos prescritos (δ_{R1} e δ_{R4}) no meio do vão. Tais deslocamentos são extraídos diretamente da curva carga-deslocamento.

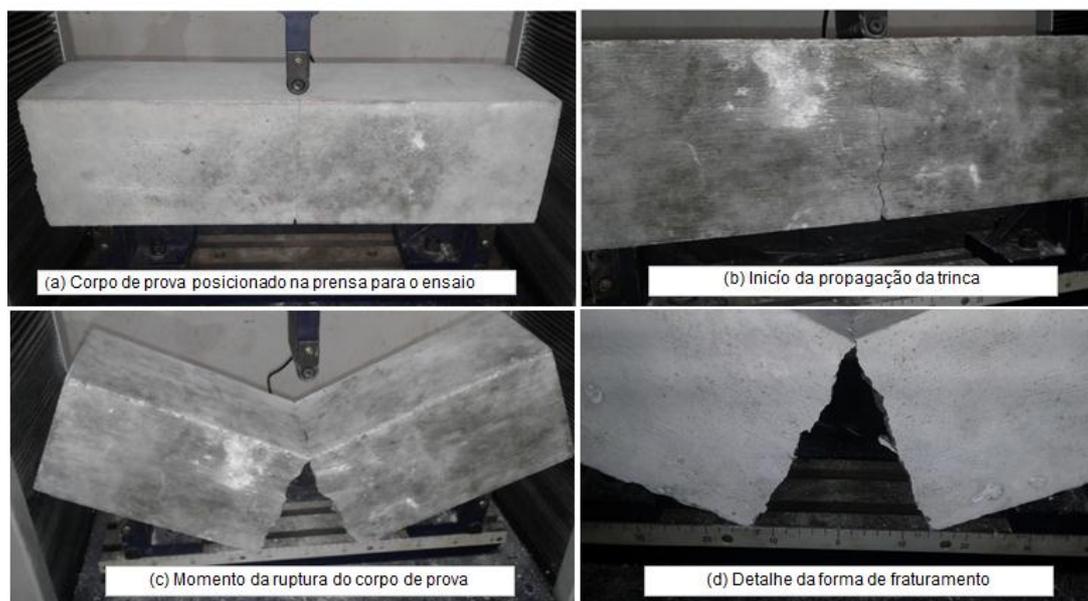


Figura 5. (a) Início do ensaio; (b) propagação da trinca; (c) ruptura do corpo de prova; (d) detalhe da ruptura da amostra.

4. Resultados obtidos

A Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de tenacidade à fratura. Pode-se verificar pelos gráficos de carga-deslocamento, que o concreto apresenta uma ruptura abrupta após chegar ao limite máximo tolerável de carga aplicado, não havendo área de escoamento. Nota-se que praticamente não houve deformação durante o processo de iniciação e propagação da fissura, indicando que este é um material frágil, ou seja, não tem capacidade para se deformar. Através dos Gráficos apresentados na Figura 6 para cada tipo de viga, observa-se que à medida que se aumenta a profundidade do entalhe ocorre à diminuição do desempenho para tenacidade à fratura das amostras, já que as vigas com 7 mm de profundidade (viga A, viga B e viga C) apresentam uma maior área sob a curva, quando comparados com as amostras com 11mm (viga D, viga E e viga F) e 15 mm (viga G, viga H e viga I). Os resultados encontrados estão de acordo com a literatura pesquisada sobre o tema, Pilkey, *et al.*, (2008) e Carvalho (2005) também observaram pouca variação nos resultados de tenacidade à fratura, comparando a influência de diferentes tamanhos de entalhe no concreto.

Como foi dito anteriormente, no capítulo de materiais e métodos, as vigas foram fabricadas com o mesmo material e com as mesmas dimensões, diferindo somente na profundidade do entalhe, que variou de 7 a 11 mm. No entanto, observou-se que algumas vigas correspondentes à mesma profundidade de entalhe apresentaram resultados divergentes em relação ao deslocamento e ao valor da tenacidade, essas diferenças podem estar atreladas ao surgimento de possíveis defeitos durante o processo de moldagem e adensamento dos corpos e prova.

A Figura 7 mostra a análise quantitativa dos resultados do ensaio de tenacidade para as amostras avaliadas. Como já foi dito anteriormente, nota-se uma diminuição na

deformabilidade da peça conforme ocorre o aumento da profundidade do entalhe. Utilizando a média aritmética dos resultados, verifica-se que a queda observada é da ordem de 15,08% em relação ao entalhe com 7 mm para o com 11 mm de espessura. No entanto, nota-se que o terceiro tipo de entalhe (com 15 mm de espessura) praticamente não apresentou alteração em relação ao de 11mm. Este resultado pode ser explicado segundo Pilkey, *et al.* (2008) pelo fato de existir um aumento no nível da curva de escoamento e, portanto, restrição até um nível limite que representa a capacidade máxima de restrição de uma trinca. Esse limite é atingido quando as dimensões da trinca são aproximadamente duas vezes a espessura da peça. Isso explica o uso de corpos de prova com trincas profundas, já que estes são projetados para medir a resistência de um material, com uma determinada espessura, à propagação de uma trinca, sob condições de máxima restrição. A razão é que o grau mínimo de comportamento dúctil que pode ser obtido para um material é aquele relacionado com a máxima condição de restrição ao escoamento plástico. Assim, a resistência à fratura do material para esse nível de máxima restrição torna-se independente de aumentos posteriores no tamanho da trinca.

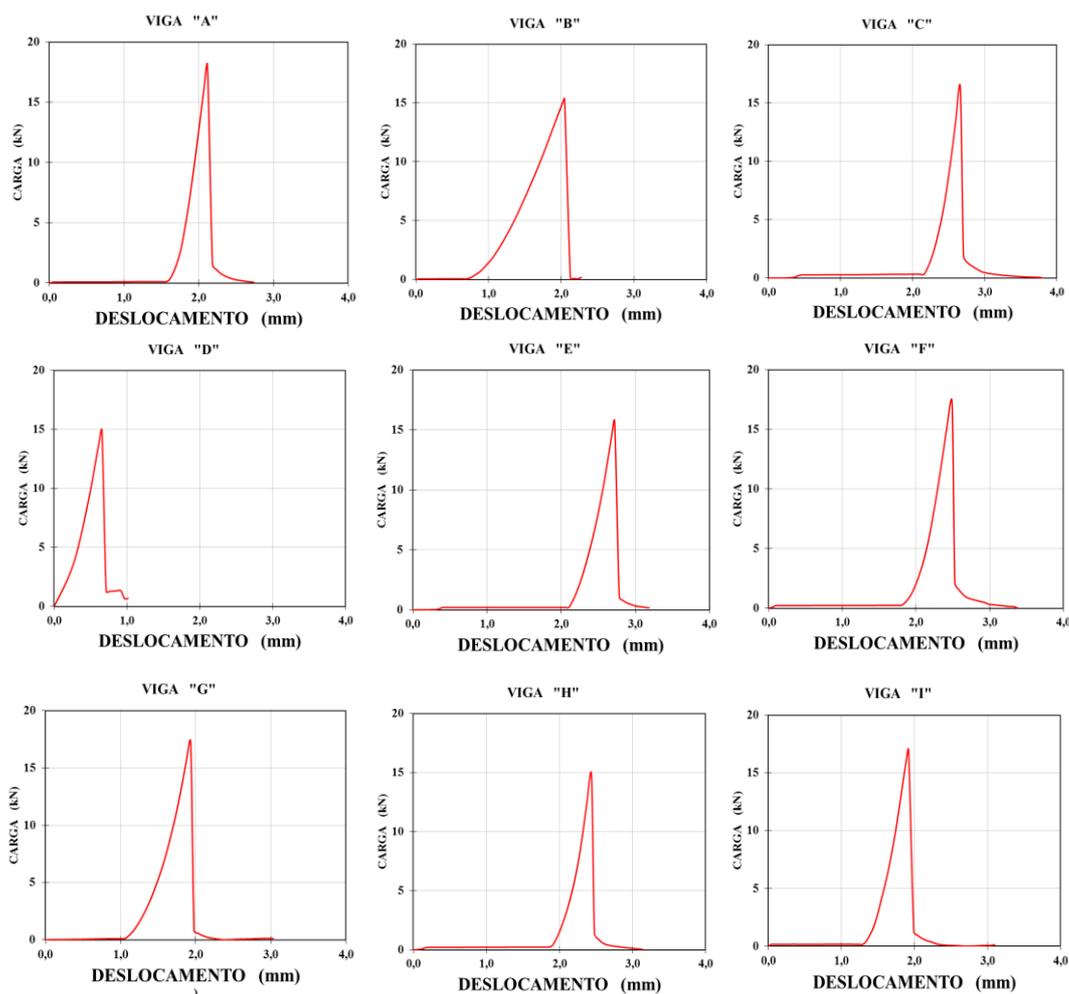


Figura 6. Gráfico da Carga-deslocamento dos corpos de prova analisados

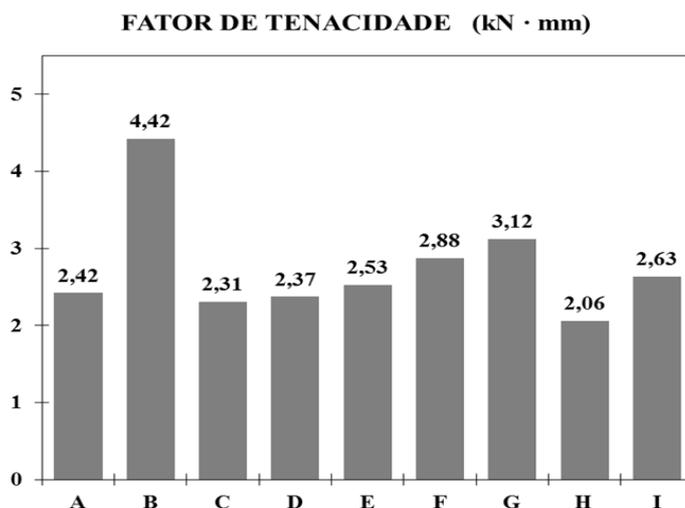


Figura 7. Gráfico Comparativo dos valores de Tenacidade à Fratura dos corpos de prova analisados.

A afirmação de que o aumento da profundidade da trinca nos corpos de prova proporciona melhores resultados, no sentido de maior estabilidade do sistema, também foi constatado por Ferreira (1997) que ensaiou vigas de concreto (100mmx50mmx400mm) de alta resistência, com entalhes de profundidades entre 10 mm e 60 mm. Nas investigações experimentais, observou que as vigas com entalhes mais profundos apresentaram comportamentos estáveis, com rampas negativas nos caminhos de amolecimento da ruptura, como demonstrado na Figura 6 (Carga x Deslocamento de abertura da entrada do entalhe).

5. Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, constatou-se que os tamanhos do entalhe, mais especificamente a sua profundidade, têm influência direta nos resultados de tenacidade à fratura de corpos de prova de concreto. Sendo que, pelas amostras que foram estudadas na presente pesquisa notou-se que, um entalhe com profundidade de 7 mm faz com que o material apresente um melhor desempenho para esta propriedade, no entanto, ao observar os resultados das amostras com entalhes de 11 e 15 mm de profundidade, verifica-se que o ensaio mostra resultados praticamente equivalentes, indicando que, para estas dimensões, o concreto apresenta uma maior estabilidade na propagação da trinca, ou seja, neste caso, os resultados estariam expressando uma maior confiabilidade do valor real da energia de fratura desse material.

Dessa forma, pode-se concluir que, para os corpos de prova utilizados com as dimensões padronizadas pela RILEM TC 162 (2003) submetidos ao ensaio de tração na flexão em três pontos, a utilização de entalhes com profundidades a partir de 11 mm até o limite de 15 mm mostram resultados mais confiáveis para a determinação da tenacidade à fratura desse material, sendo aconselhável, no entanto, que outros estudos sejam feitos utilizando maiores profundidades e também comparando os resultados com os obtidos para a espessura de entalhe, que é indicada pela referida norma para a realização deste ensaio.

Pode-se concluir, também, que o processo de moldagem e adensamento dos concretos influencia no deslocamento e na tenacidade da fratura, sendo necessários explorar estes estudos de forma mais contundente através de microscopia eletrônica de varredura para melhor subsidiar os resultados obtidos neste trabalho.



6. Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1018 (1997) "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with thirdpoint loading)", West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, p.8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1609 (2010) "Standard method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point-loading)", West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America, p.9.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: NM 52 (2009) "Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente", Rio de Janeiro.

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

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

Ashby, M. F.; Shercliff, H. e Cebon, D. (2012) "Materiais: Engenharia, ciência, processamento e projeto", Editora Elsevier, 2ª ed., Rio de Janeiro.

Canevaloro JR, S.V. (2002) "Ciência dos Polímeros, um texto básico para tecnólogos e engenheiros", Editora Atiliber, 1º ed., São Paulo.

Carvalho, E. A. (2005) "Stress concentration factors for an internally pressurized circular vessel containing a radial U-notch", International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 82, n.º.7, p.517-552.

Evangelho, T. B. (2013) "Consideração do esmagamento do concreto através do modelo de trincas sobrepostas", Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ferreira, L. E. T. (1997) "Análise de parâmetros de tenacidade ao fraturamento de concretos obtidos em ensaios de flexão de vigas", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1997.



Guimarães, M. S. da. e Etom, M. C. K. (2013) "Tenacidade à fratura e dureza na região da interface em aços cladeados por soldagem", Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Grossi, B. F. (2006) "Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço", Tese de doutorado, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Kumar, S. e Barai, S. V. (2011) "Concrete fracture models and applications", New York, United States of America: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.19-20.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF4 (1984) "Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete", Part III-2, Concrete Library International, n. 3, June, p.58-61.

Li, Z. (2011) "Advanced concrete technology", New Jersey: John Wiley e Son, Inc., 506p.

Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2008) "Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais". São Paulo, 3ª Edição. Ed. IBRACON.

Perez, F. M. (2005) "Métodos da mecânica da fratura aplicada a polietileno de média densidade destinado a extrusão de tubos", Tese de doutorado, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

Pilkey D. W. e Pilkey D. F. (2008) "Peterson's Stress Concentration Factors, Hoboken", New Jersey, John Wiley & Sons, inc., Third Edition, pp. 110.

Ribeiro, S. e Rodrigues, J. A. (2009) "Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e na energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para propagação estável de trinca", Artigo científico In: Cerâmica 55, p.181-189.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM 162 – TDF (2003) "Test and methods for steel fibre reinforced concrete", Materials and Structures, v. 36, p. 560-567.

Salvador, R. P. (2013) "Análise comparativa de métodos de ensaios para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.

Souza, J. M. de. (2011) "Estudo do ensaio de determinação da tenacidade à fratura em deformação plana (K_{Ic}) em PMMA e análise das tensões desenvolvidas por fotoelasticidade", Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.



Vasconcelos, R. E. (2012) "Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo", Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.