

ESTUDO DA ANÁLISE DO MECANISMO DE FALHA NO CONCRETO BASEADA NA MECÂNICA DA FRATURA.

Kleber Rocha Saraiva Filho¹, Filipe Lima dos Santos² (Orientador).

Resumo: O concreto é um dos materiais mais utilizados na engenharia, principalmente no ramo da engenharia civil, onde este assume o papel de material mais utilizado, sendo praticamente indispensável em qualquer projeto. Por conta de sua grande utilização, são importantes os estudos acerca de suas propriedades, que por sua vez, podem servir como auxílio para o planejamento e dimensionamento de estruturas, além de garantir a segurança e que os projetos se mantenham funcionais. Este trabalho objetiva estudar a falha do concreto baseando-se nos conceitos da mecânica da fratura, pois ela analisa a ruptura a partir de uma fissura e sua propagação, uma vez que trincas e descontinuidades são bastante frequentes em condições reais deste material. Será realizada uma pesquisada bibliográfica para construção de um referencial teórico levantando os principais conceitos de análise desta teoria aplicada ao concreto. Inicialmente serão apresentados os principais conceitos sobre Mecânica da Fratura, contendo a Mecânica da Fratura Elástico-Linear (MFEL) e a Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL). Em seguida será mostrado como estes conceitos podem ser utilizados na determinação de parâmetros de tenacidade para o concreto, tanto em aspectos teóricos quanto experimentais. Posteriormente serão apresentadas formas de utilização desses conceitos e parâmetros relacionados com aplicações práticas na engenharia.

Palavras-chave: mecânica da fratura 1; não linear 2; concreto 3; quase frágeis 4.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material de extrema importância para a engenharia, especialmente para a engenharia civil e é composto por cimento, água e agregados miúdos e graúdos como areia e brita, podendo ainda, conter aditivos dependendo da sua utilização e das alterações desejadas em suas propriedades físicas e químicas. Em nível microscópico há o surgimento de vazios entre os grãos, conhecidos como descontinuidades, normalmente originadas do processo de fabricação. O concreto pode ser produzido de forma manual, em betoneiras e até usinas centrais de concreto, em ambas as formas há descontinuidades. Todos os materiais apresentam descontinuidades, depende apenas se estão sendo vistos em escala macroscópica ou microscópica [1].

Os primeiros sinais de danificação do concreto acontecem na forma de fissuras, desvios e desagregações, originadas por vazios do processo de fabricação que vão se agravando com o uso do material. No caso dos concretos, os problemas relacionados ao seu uso podem ser de ordem física, química ou mecânica. Estes problemas incluem fatores como exposição a altas temperaturas, coeficientes de dilatação térmica diferentes entre seus constituintes, exposição a agentes agressivos como cloretos e sulfatos, fortes impactos, abrasão, entre outros [2].

As descontinuidades são o principal objeto de estudo da Mecânica da Fratura, geralmente na forma de uma fissura e sua propagação até o fraturamento total da peça e conseqüentemente a falha do material. Tendo em vista a frequência da ocorrência de defeitos nos materiais.

As fissuras atuam nos materiais como concentradores de tensão, elevando significativamente as tensões nas bordas dessas regiões, principalmente no concreto, visto que este material já apresenta vazios em sua composição antes de carregamentos externos, fazendo com que nos primeiros instantes da aplicação de cargas, ainda que pequenas, se tenha altas tensões em alguns pontos da peça, podendo levar à falha do material. A falha é a perda da habilidade de um sistema em executar sua função requerida, fisicamente ela pode ser explicada como a situação onde a resistência do sistema foi menor que a solicitação [3].

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Principais Conceitos da Mecânica da Fratura

A maioria dos materiais de uso corrente da engenharia são normalmente classificados quanto à sua tensão e deformação em frágeis e dúcteis, entretanto há um terceiro grupo no qual o concreto se encaixa, denominados de quase frágeis. Materiais frágeis são aqueles em que a tensão cai para zero no momento da ruptura, estes materiais rompem com pequenos níveis de deformação. Materiais dúcteis são aqueles onde a tensão se mantém constante quando o material escoar, estes materiais rompem com níveis de deformação maiores que os frágeis. Os materiais quase frágeis apresentam características comuns dos dois grupos anteriores, basicamente a tensão nestes materiais diminui gradualmente após a carga de pico. A Figura 1 apresenta um esboço dos diagramas de tensão-deformação para cada uma dessas três categorias de materiais [4].

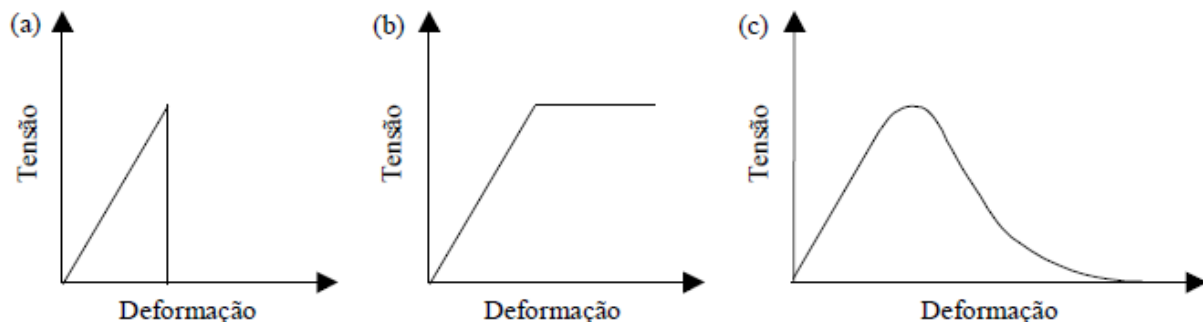


Figura 1. Diagramas de tensão-deformação para materiais: (a) frágeis; (b) dúcteis; (c) quase frágeis. (Silva et al., 2018)

As características de ruptura para uma peça de determinado material são determinadas pela sua geometria e as propriedades deste material. Com relação às propriedades, se o material for dúctil sofrerá ruptura quando a tensão nominal em toda a seção crítica assumir valores maiores que a resistência do material, sendo assim, um critério baseado apenas na tensão nominal se torna funcional para este tipo de problema. Em materiais frágeis, a peça irá romper quando a tensão máxima em qualquer ponto ultrapassar a resistência do material, haja visto que a tensão máxima depende também da geometria da peça e condições de contorno, um critério baseado apenas na tensão nominal não será adequado para descrever esse tipo de ruptura, a melhor maneira é a utilização de um critério baseado na dissipação de energia elástica, mais precisamente fazendo o uso dos conceitos da Mecânica da Fratura Elástico-Linear [5].

O estudo da ruptura em materiais quase frágeis é um pouco mais complexo, isso se deve ao desenvolvimento de uma zona inelástica na região de máxima tensão quando a peça chega à ruptura, essa zona é chamada de zona de processos inelásticos. Como neste tipo de problema há dissipação de energia elástica e inelástica, se faz necessário o uso de mais de um critério para caracterização deste tipo de ruptura. Critérios estes que serão abordados adiante neste artigo, denominados Mecânica da Fratura Elástico-Linear (MFEL) e Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL) [5].

A Mecânica da Fratura estuda a ruptura dos materiais a partir de uma fissura e sua propagação até que aconteça o fraturamento total deste material. Os principais interesses dessa teoria são descobrir a resistência de uma peça em função do tamanho de uma trinca, as dimensões máximas de uma fissura de forma que não venha a prejudicar o funcionamento da peça e em quanto tempo atinge esse tamanho, além de definir o intervalo entre as inspeções de um projeto na verificação de fissuras.

Os principais conceitos e formulações da Mecânica da Fratura podem ser melhor entendidos considerando-se uma peça que apresenta uma fissura elíptica com raio maior a e raio menor b , submetida à tração, conforme a Figura 2. Além disso, as variáveis utilizadas nas equações da teoria, juntamente com suas descrições e unidades estarão indicadas na Tabela 1.

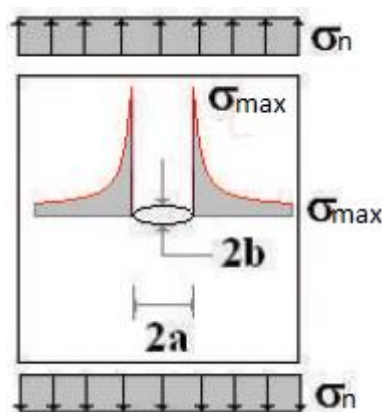


Figura 2. Modelo conceitual da Mecânica da Fratura. (Ferreira, Hanai, 2017)

Tabela 1. Descrições e unidades das variáveis utilizadas na Mecânica da Fratura. (2019)

Variável	Descrição	Unidade
σ_{max}	Tensão máxima	MPa
a	Raio maior da fissura	m
b	Raio menor da fissura	m
σ_n	Tensão nominal	MPa
Kt	Concentrador de tensão	Adimensional
$\sigma(r)$	Tensão em função da distância da ponta da fissura	MPa
Ki	Fator de intensidade de tensão	Mpa.m ^{1/2}
r	Distancia da ponta da fissura	m
Gi	Taxa de liberação de energia de deformação	Mpa.m ^{1/2}
E	Módulo de elasticidade	Pa
v	Coefficiente de Poisson	Adimensional
σ_f	Tensão de fraturamento	MPa
Kic	Tenacidade ao fraturamento	Mpa.m ^{1/2}

Neste modelo, a fissura atua como concentrador de tensão, denominado de Kt, principalmente nas bordas da elipse, onde os valores de tensão máxima atingem seu pico, sendo maiores inclusive que a tensão nominal. A relação entre tensão máxima e tensão nominal para este caso pode ser descrita por [6]:

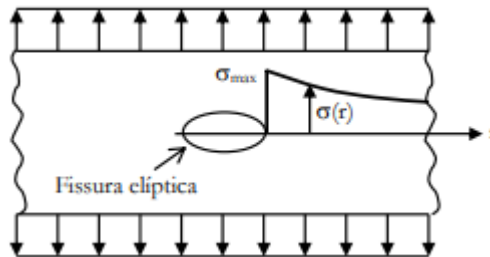
$$\sigma_{max} = \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \sigma_n = Kt \times \sigma_n \quad (1)$$

Analisando a Equação 1, percebe-se que Kt tende ao infinito para fissuras extremamente finas onde b seja muito próximo de zero, consequentemente a tensão máxima também tende ao infinito e por conta disso não é possível utilizar este modelo para descontinuidades muito estreitas, sendo assim, uma formulação utilizada é [6]:

$$\sigma(r) = \frac{Ki}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2)$$

A tensão é encontrada em função da distância da ponta da fissura (r), conforme a Figura 3. Onde Ki é o fator de intensidade de tensão e depende de alguns fatores como comprimento da fissura (2a), geometria e carga, uma das formulações aceitas para ele é [6]:

$$Ki = \sigma \sqrt{\pi 2a} \quad (3)$$

Figura 3. Tensão em função da distância da ponta da fissura, $\sigma(r)$. (Borges, 2002)

Outro parâmetro que pode ser determinado de acordo com os conceitos da Mecânica da Fratura é a taxa de liberação de energia de deformação, denominado de Gi. Ela representa a energia necessária para a propagação da fissura e é expressa por [6]:

$$Gi = \frac{Ki^2}{E'} \quad (4)$$

Onde $E' = E$ para o estado plano de tensão e $E' = E/(1-v^2)$ para o estado plano de deformação, E é o módulo de elasticidade e v é o coeficiente de Poisson.

A tensão de fraturamento (σ_f) também pode ser descoberta, mas para isso é necessário o conhecimento da tenacidade ao fraturamento do material em questão, denominado de Kic. A tensão de fraturamento é descrita por:

$$\sigma_f = \frac{Kic}{\sqrt{\pi 2a}} \quad (5)$$

Os conceitos e formulações apresentados até aqui fazem parte da Mecânica da Fratura Elástico-Linear (MFEL). Foram as primeiras concepções da Mecânica da Fratura, foram programadas inicialmente para materiais frágeis como vidros e se baseavam no pressuposto de que a distribuição de tensões nas bordas de uma fissura é a mesma para todas as fissuras e cargas aplicadas.

Percebe-se através da Equação 2, que para locais muito próximos da ponta da fissura, a tensão tenderá ao infinito, entretanto todos os materiais apresentam uma zona inelástica próximo à borda da fissura. A grande diferença entre os materiais frágeis e os quase frágeis é que essa zona inelástica é de tamanho desprezível nos frágeis, fazendo com que os conceitos da MFEL sejam aplicáveis a esses materiais. O mesmo não acontece para os materiais quase frágeis, portanto se faz necessárias adaptações na MFEL, essas adaptações deram origem à Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL) e os principais modelos para análise destes materiais [5].

2.2. Mecânica da Fratura Aplicada ao Concreto

Os conceitos da Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL) são funcionais para todos os materiais quase frágeis, como o concreto é um dos principais materiais deste tipo, os modelos de análise acabam sendo feitos com o intuito de auxiliar a análise especialmente deste material, sendo também chamada de Mecânica da Fratura ao Concreto. Os modelos abordados aqui serão: Modelo da Fissura Fictícia e Modelo do Efeito de Escala. Além de aplicação experimental e prática para o concreto.

O primeiro modelo abordado neste artigo será o Modelo da Fissura Fictícia. Proposto por Hillerborg em 1976, neste modelo a modelagem da zona inelástica é feita como uma extensão da fissura real submetida a esforços coesivos. Ele é baseado na formação de dois diagramas feitos com o auxílio de dois extensômetros em uma peça de concreto submetida à tração, conforme ilustrado na Figura 4(a). O extensômetro A medirá o deslocamento da sessão fissurada e o extensômetro B medirá o deslocamento da região não fissurada. Com as medições do segundo extensômetro, um diagrama de tensão-deformação será construído até a carga de pico, conforme a Figura 4(b). Depois disso, com as medições do extensômetro A, será projetado um diagrama de tensão-abertura da fissura com os valores após a carga de pico, conforme a Figura 4(c) [5].

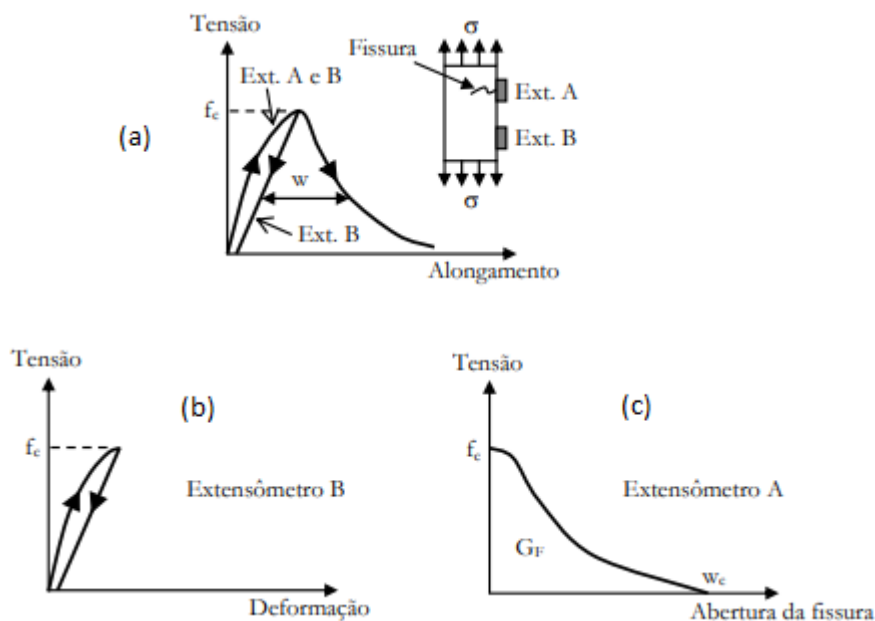


Figura 4. Representação do modelo da fissura fictícia. (Borges, 2002)

O diagrama tensão-abertura da fissura (σ - W) é de suma importância para este modelo, já que a área da curva desse diagrama será igual à energia de fraturamento, denominada de G_f . A energia de fraturamento corresponde à quantidade de energia necessária para propagação de uma unidade de medida da fissura. Segundo os diagramas, G_f pode ser descrito por [5]:

$$G_f = \int s(w)dw \quad (6)$$

Um parâmetro que pode ser definido a partir do G_f , desde que se tenha conhecimento da resistência a tração (f_t) e módulo de elasticidade (E) do material, é o comprimento característico, denominado por l_{ch} . O comprimento característico é um índice de ductilidade do material e é proporcional ao tamanho da zona de processos inelásticos, logo, quanto maior for, mais dúctil será o material. O l_{ch} pode ser expresso por [7]:

$$Ich = \frac{EGf}{f_t^2} \quad (7)$$

A principal aplicação deste método é experimental, haja visto que o principal ensaio da MFNL foi proposto pelo Comitê Técnico RILEM 50 – Fracture Mechanics of Concrete (1985) e é baseado neste método, ensaio este chamado de método de Hillerborg. Os ensaios em materiais quase frágeis são realizados com sólidos pré-fissurados solicitados até o fraturamento e a utilização de diagramas que relacionam carga e deslocamento. Os principais parâmetros de tenacidade encontrados neste ensaio são energia de fraturamento (Gf) e comprimento característico (Ich), é importante lembrar que estes parâmetros podem variar até 30% de acordo com as dimensões das peças [7].

Este ensaio é realizado com vigas submetidas à flexão em três pontos e com entalhe central, como ilustrado na Figura 5. Ele ocorre em ciclo fechado, onde o carregamento ou descarregamento ocorre em função do deslocamento das extremidades do entalhe para que não haja uma ruptura abrupta. Além disso, são necessários ainda os diagramas da carga-deformação, conforme indicado na Figura 6, onde a área desse diagrama será utilizada na determinação da energia de fraturamento (Gf). O ensaio termina quando a viga sofrer ruptura ou a carga chegar até zero [7].

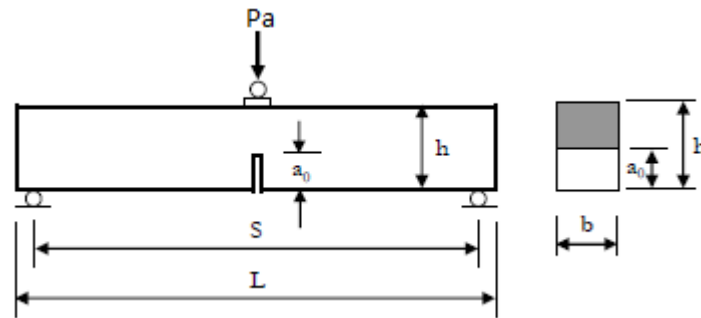


Figura 5. Viga ensaiada no ensaio do método de Hillerborg. (Borges, 2002)

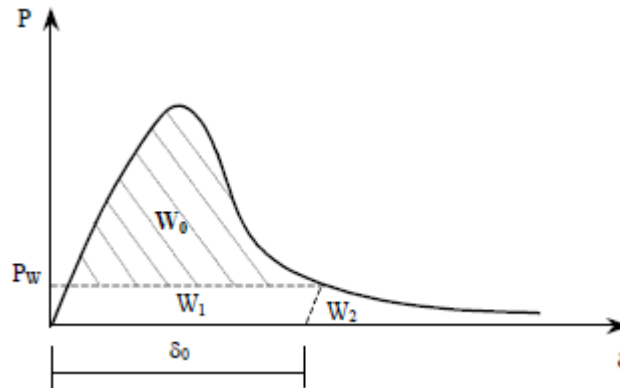


Figura 6. Diagrama tensão-deformação para o ensaio do método de Hillerborg. (Caland, 2001)

Após a realização do ensaio e obtenção dos diagramas, a energia de fraturamento será calculada através da divisão do trabalho total (Wt) pela área da seção transversal excluindo-se a parte fissurada. Conforme a equação:

$$Gf = \frac{Wt}{(h-a_0)b} = \frac{W_0 + 2P_w\delta_0}{(h-a_0)b} \quad (8)$$

Devido à forma como o ensaio é feito, a carga total (P) é determinada por $P = P_w + P_a$. Onde P_a é a carga aplicada no meio da viga para o ensaio e P_w é o peso próprio da viga e acessórios. P_w pode ser expresso por:

$$P_w = \frac{Mg}{2} \quad (9)$$

Onde M é a massa da viga e acessórios e g é a aceleração da gravidade. A determinação de P_w é de grande importância neste ensaio, pois ela permite a medição de W_1 , que é aproximadamente igual a W_2 , possibilitando assim, o cálculo do trabalho total (Wt) que será determinado pela soma de W_0 , W_1 e W_2 . As parcelas W_1 e W_2 são consideradas partes do trabalho realizadas antes da aplicação da carga de ensaio, decorrente do peso próprio da viga e acessórios.

Após a determinação de G_f , o valor do comprimento característico é definido conforme o método da fissura fictícia através da Equação 7.

O segundo modelo a ser apresentado neste trabalho é o modelo do efeito de escala. Proposto por Bažant e Kazemi em 1990, este modelo simula o fraturamento dos materiais por meio de uma fissura elástica equivalente, seu principal objetivo era obter a relação de tensão nominal de ruptura para estruturas geometricamente similares, com diferentes tamanhos, mas proporcionais entre si. Para isso, foram analisadas estruturas com essas características, onde a relação entre o comprimento inicial (a_0) e dimensão característica (h) seja constante. Para vigas, o valor de h é igual à sua altura. Após análises, chegou-se à seguinte equação para determinação da tensão nominal de ruptura (σ_{nc}) de estruturas geometricamente similares [8]:

$$\sigma_{nc} = \frac{C_n P_c}{bh} \quad (10)$$

Onde P_c é a carga de pico, b é a largura da viga, h é a dimensão característica e C_n é um coeficiente que depende do formato da estrutura e para vigas pode ser determinado por $C_n = 1,5 L/h$ e L é o vão da viga. A Figura 7 indica essas grandezas em uma viga.

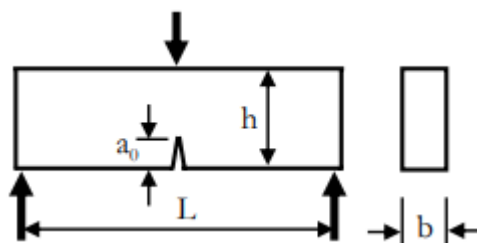


Figura 7. Grandezas de uma viga para o modelo do efeito de escala. (Borges, 2002)

Outra forma de expressar a tensão nominal de ruptura segundo este método é:

$$\sigma_{nc} = \frac{B f_t}{\sqrt{1+h/h_0}} \quad (11)$$

Onde f_t é a real resistência à tração do material, h é a dimensão característica, B e h_0 são constantes empíricas determinadas em ensaio.

A Figura 8 mostra a curva da Equação 11 e perceptível o pressuposto principal deste modelo, a tensão nominal de ruptura tende a diminuir com o aumento do tamanho da peça. Além disso, também estão ilustradas em tracejado as representações da MFEL e os critérios de ruptura, é possível notar que a curva só coincide com os critérios de ruptura para peças de pequeno tamanho e com a MFEL para estruturas de grande tamanho. Isso se deve ao fato de que os critérios de ruptura não preveem alterações na σ_{nc} para diferenças nas dimensões da peça e por outro lado, a MFEL prevê um efeito muito acentuado [8].

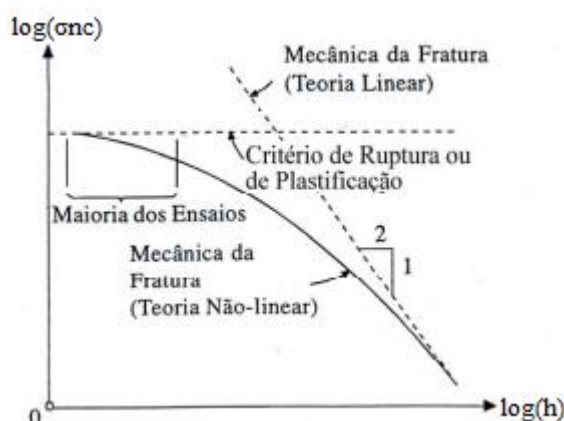


Figura 8. Representação gráfica do efeito de escala. (Coura, Barbosa, 2008)

Diversos estudos experimentais são conduzidos acerca da MFNL e o concreto, a grande maioria com a realização do método de Hillerborg, feito segundo as recomendações do RILEM. Um destes estudos foi conduzido por Caland [9], realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais.

Caland reproduziu o ensaio do Método de Hillerborg, onde ensaiou 75 vigas divididas em 6 séries (piloto, 1, 2, 3, 4, 5). A série piloto seria composta por 3 vigas de tamanhos iguais e seu objetivo era eliminar

possíveis problemas que viessem a acontecer no decorrer dos seguintes ensaios. Devido alguns problemas encontrados, a série 1 teria que ser utilizada na rodada de testes, sendo assim, as séries utilizadas para obtenção de dados do ensaio seriam as séries 2 a 5. Onde as séries 2 a 4 eram compostas por 12 vigas e a série 5 era composta por 24 vigas.

As vigas ensaiadas foram divididas em 4 categorias de acordo com a altura (h), sendo estas: 38, 76, 152, 304. Os outros parâmetros encontrados na Figura 5 variavam em função de h , onde $a_0=h/6$, $S=2,5h$ e $L=8h/3$. Além disso, todas as vigas tinham espessura (b) igual a 38 mm e abertura da fissura inicial igual a 2 mm. A Tabela 2 mostra a quantidade de vigas de cada categoria existentes em cada série.

Tabela 2. Quantidade de vigas de cada categoria existentes nas séries. (Caland, 2001)

Séries	Vigas com 38 mm de altura	Vigas com 76 mm de altura	Vigas com 152 mm de altura	Vigas com 304 mm de altura
2 a 4	3	3	3	3
5	6	6	6	6

Neste estudo foram utilizados concretos de alto desempenho, as vigas foram executadas em fôrmas de compensado naval com 15 mm de espessura e o entalhe foi pré-moldado utilizando placas de acrílico fixadas nas fôrmas. A máquina utilizada para realização deste ensaio foi uma servo-hidráulica Instron modelo 8502, esta máquina possibilita o controle da carga através da abertura do entalhe e capta simultaneamente a carga e deslocamento vertical no ponto de aplicação.

A taxa da abertura do entalhe foi de 1 mm a cada 35 minutos, taxa escolhida para que a carga máxima seja atingida entre 30 segundos e 1 minuto após o início do ensaio, já que esta é uma recomendação do RILEM. Os parâmetros obtidos durante o ensaio com o auxílio da máquina foram: carga, deslocamento vertical (flecha), deslocamento horizontal (abertura do entalhe) e tempo. Estes dados são plotados no monitor conforme o ensaio ocorre e possibilita a obtenção dos diagramas Deslocamento Horizontal x Tempo, Carga x Deslocamento Horizontal e Carga x Deslocamento Vertical. A Figura 9 mostra uma das vigas na máquina e a Figura 10 apresenta os diagramas citados para uma das vigas ensaiadas [9].



Figura 9. Viga na máquina de ensaio. (Caland, 2001)

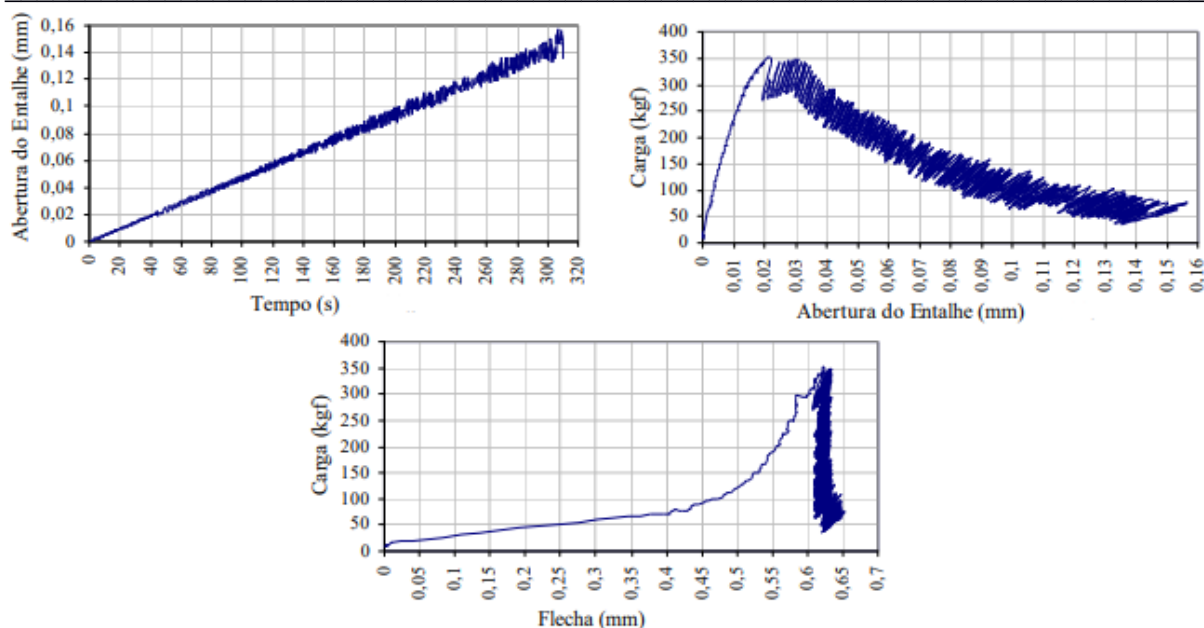


Figura 10. Diagramas para uma das vigas ensaiadas. (Caland, 2001)

Dentre os diagramas fornecidos, os de Abertura do Entalhe (Deslocamento Horizontal) x Tempo e Carga x Flecha (Deslocamento Vertical) são os mais importantes, já que o primeiro serve para verificar se o controle da taxa de abertura do entalhe de 1 mm a cada 35 minutos está sendo respeitado e o segundo é utilizado na determinação da Energia de Fraturamento de cada viga.

A energia de fraturamento (Gf) foi obtida segundo as recomendações do RILEM, de acordo com os diagramas e a Equação 8. Cada série foi dividida em 4 categorias, contendo mais de uma viga por categoria, sendo assim, a energia de fraturamento de cada categoria de uma série foi determinada através da média aritmética entre as vigas pertencentes àquela categoria. Resultando nos seguintes dados:

Tabela 3. Resultados da energia de fraturamento (Gf) para as 4 séries de vigas. (Caland, 2001)

Série	b (mm)	h (mm)	L (mm)	a0 (mm)	Gf (N/m)
2	38	38	101,33	6,33	108,33
		76	202,67	12,67	123,22
		152	405,33	25,33	135,14
		304	810,67	50,67	144,92
3	38	38	101,33	6,33	121,03
		76	202,67	12,67	127,48
		152	405,33	25,33	146,19
		304	810,67	50,67	167,87
4	38	76	202,67	12,67	127,31
		152	405,33	25,33	143,98
		304	810,67	50,67	149,68
5	38	38	101,33	6,33	140,60
		76	202,67	12,67	152,64
		152	405,33	25,33	184,91
		304	810,67	50,67	218,89

Além da determinação da energia de fraturamento (Gf) através do ensaio do método de Hillerborg que é baseado no modelo da fissura fictícia, Caland também realizou a medição da tensão nominal de ruptura (σ_{nc}) baseando-se no modelo do efeito de escala, essa foi uma das razões para que todas as vigas fossem proporcionais, com tamanhos diferentes, mas relações entre as dimensões constantes.

Caland optou por utilizar a Equação 10 para realização dos cálculos da tensão nominal de ruptura (σ_{nc}) para as 4 séries de vigas e posteriormente construiu gráficos para cada série relacionando a altura (h) da viga e σ_{nc} , conforme ilustrado na Figura 11. Pôde-se observar que a tensão nominal de flexão diminuía conforme o tamanho da viga aumentava, esse é o primeiro pressuposto do modelo do efeito de escala e pode ser notado nos 4 gráficos, especialmente no gráfico da série 5 por se tratar de uma amostragem maior. Também é perceptível certa semelhança entre estes dados e a curva apresentada na Figura 8 que representa a curva de outra equação para σ_{nc} encontrada neste mesmo modelo.

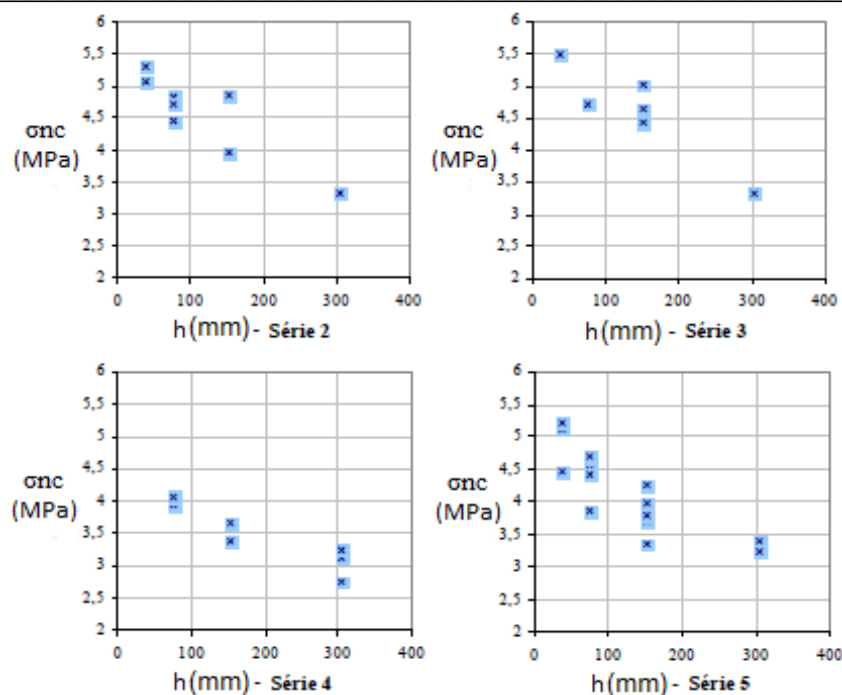


Figura 11. Gráficos de relação entre o tamanho da viga (h) e tensão nominal de ruptura (σ_{nc}). (Caland, 2001)

2.3. Aplicações Práticas da Mecânica da Fratura Não-Linear para a Engenharia

Embora existam vários estudos relacionados ao concreto e a Mecânica da Fratura, a grande maioria dos projetos na engenharia ainda não utilizam estes conceitos no dimensionamento das estruturas mesmo havendo diversas aplicações, onde a maior parte delas está associada ao efeito de escala, já que ele prevê alterações nas tensões de ruptura para peças de diferentes dimensões, obtendo assim valores de resistência bem mais realistas que os critérios de resistência usados. Serão mostradas a seguir aplicações relacionadas ao cisalhamento em vigas de concreto e armadura mínima de flexão [10].

2.3.1. Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado

A resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado é alvo de muitas pesquisas pela dificuldade em descrever com exatidão da influência de cada mecanismo na obtenção deste valor. Ela é determinada para projetos de acordo com as normas técnicas de cada país, o problema é que a maioria dos países ainda não consideram alguns fatores importantes como agentes influenciadores na resistência ao cisalhamento, como taxa de armadura de flexão, vão de cisalhamento e altura da peça, que por sua vez, está relacionada ao efeito de escala [11].

A resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado (V_n) pode ser descrita por:

$$V_n = V_s + V_c \quad (12)$$

Onde V_s é a parcela da resistência referente à armadura e V_c é a parcela associada ao concreto definida de acordo com as normas técnicas.

Em 1984, Bazant e Kim desenvolveram uma série de equações envolvendo o efeito de escala e as normas técnicas americanas existentes na época, onde o principal objetivo era encontrar uma forma de relacionar a resistência ao cisalhamento (v_u) com a taxa de armadura longitudinal, forma e tamanho da seção transversal. Para isso, foram feitas análises teóricas e experimentais utilizando vigas com armadura exclusivamente longitudinal, por conta disso, essas equações eram funcionais apenas para vigas armadas sem estribos. Após análises, chegou-se à seguinte Equação [10]:

$$v_u = \frac{k_1 \rho^{1/3}}{\sqrt{1+h/(25da)}} [\sqrt{f_c} + 3000 \sqrt{\rho/(s/h)^5}] \quad (13)$$

Onde k_1 é uma constante igual a 10, ρ é a taxa de armadura longitudinal, h é a altura da viga, s é o vão de cisalhamento, d é o diâmetro máximo do agregado e f_c é a resistência à compressão do concreto. Com relação às unidades, h , s e d devem ser dados em mm e f_c em psi de acordo com o sistema americano de unidades, isso se deve ao fato da Equação 13 ter sido obtida utilizando as normas técnicas americanas.

Em 1987, Bazant e Sun otimizaram a Equação 13, alterando o valor da constante k_1 , que agora seria determinada em função do diâmetro máximo do agregado, conforme a equação:

$$k_1 = 6,5 \left(1 + \sqrt{\frac{5,1}{d_a}} \right) \quad (14)$$

A Figura 12 é uma representação gráfica da curva das equações contidas neste tópico e das equações da MFEL quando comparadas a 461 resultados experimentais, mostrando que as formulações obtidas por Bazant, Kim e Sun apresentam respostas mais próximas das reais.

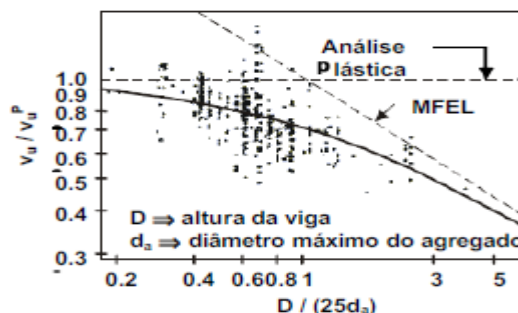


Figura 12. Efeito de escala previsto nas equações de Bazant, Kim e Sun comparadas a 461 resultados experimentais. (Borges, Bittencourt, 2004)

2.3.2. Armadura Mínima de Flexão

Outra aplicação da MFNL está ligada à taxa de armadura mínima. As armaduras transversais mínimas são adicionadas às vigas quando ocorre o surgimento de novos carregamentos não previstos no projeto inicial da estrutura, seu intuito é evitar o colapso brusco após o aparecimento de fissuras, além disso elas também tem como objetivo evitar a flambagem das armaduras longitudinais e limitar a inclinação das bielas e abertura de fissuras [11].

A taxa de armadura mínima, assim como a resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado, é definida de acordo com as normas técnicas de cada país. A maioria dos países também ignora fatores como o efeito de escala na determinação da taxa de armadura mínima, incluindo o Brasil, onde este parâmetro é definido pela NBR-6118 (2014) [12] segundo a Tabela 4.

Tabela 4. Taxa de armadura mínima ($\rho_{\min}$) para diferentes resistências de concretos. (NBR-6118, 2014)

Mpa	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\rho_{\min}$	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

No caso da norma técnica brasileira, a taxa de armadura mínima pode ser obtida apenas em função da resistência do concreto, ignorando completamente as dimensões da peça.

Em 1992, Bosco e Carpinteri formularam um modelo onde a taxa de armadura mínima era obtida através de outros parâmetros, dentre eles a altura da viga, referente ao efeito de escala. Esta formulação foi construída através de adaptações do efeito de escala, resultando na seguinte equação [10]:

$$\rho_{\min} = (0,1 + 0,0023 f_c) \frac{K_{ic}}{f_y \sqrt{h}} \quad (15)$$

Onde K_{ic} é a tenacidade ao fraturamento do concreto, h é a altura da viga, f_c e f_y são respectivamente tensão resistência à compressão do concreto e tensão de escoamento da armadura, ambas são dadas em psi.

Estas são apenas duas de diversas aplicações existentes da MFNL para o concreto, infelizmente grande parte dos países apresenta certa resistência quanto à utilização destes conceitos. Entretanto há perspectivas que em um futuro próximo, grande parte desta teoria seja utilizada em projetos com objetivo de aperfeiçoar os processos de dimensionamento das estruturas.

3. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um referencial teórico acerca da Mecânica da Fratura relacionada ao Concreto, tema relativamente novo, onde as principais contribuições para a área foram publicadas da década de 70 em diante. Embora a Mecânica da Fratura seja mais antiga, ela inicialmente foi programada para materiais frágeis, o que gerou um grande atraso no desenvolvimento desta teoria aplicada ao concreto.

Foi mostrado neste artigo como os conceitos desta teoria podem refletir melhor os resultados para alguns

parâmetros de tenacidade através dos modelos da fissura fictícia e do efeito de escala, fazendo com que no futuro estes modelos possam ganhar grande relevância quando utilizados no dimensionamento de estruturas. Em alguns países europeus já se tem uma maior influência da Mecânica da Fratura em projetos de engenharia civil, o Brasil ainda está bem atrasado neste quesito, uma das razões disso pode ser o desconhecimento, já que a maior parte das publicações da Mecânica da Fratura Não-Linear sequer tem tradução para o idioma local e também não está presente na imensa maioria dos livros.

O efeito de escala foi o ramo da MFNL que apresentou maior potencial de utilização, haja visto que ele corrige um “defeito” existente na maioria das normas técnicas estabelecidas pelo mundo, entretanto isso exigirá tempo e avanços nos estudos deste modelo através de adaptações com as normas de cada país que tenha interesse em utilizá-la.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser feitas análises das normas técnicas de países que preveem o efeito de escala em comparação com aqueles que não consideram este efeito em seus projetos, deduções das equações existentes nos modelos da MFNL, além de ensaios que podem ser realizados conforme indicado neste trabalho.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] BAUER, L. A. Falcão. Materiais de construção, 1. 5. Ed. Revisada – Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [02] COUTO, José Antônio Santos et al. O concreto como material de construção. Cadernos de Graduação: Ciências exatas e tecnológicas, Sergipe, v. 1, n. 17, p.49-58, out. 2013. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/download/552/566>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- [03] ROSA, Edison da. Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga. Florianópolis: Grante, 2002. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- [04] SILVA, Luzilene Souza et al. Análise da influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação da trinca em concreto. Revista de Ciência e Tecnologia, Belém, v. 4, n. 6, p.64-76, 2018. Disponível em: <<https://revista.ufrb.br/rct/article/view/4906>>. Acesso em: 25 jun. 2019.
- [05] BORGES, José Umberto Arnaud. Análise do comportamento de vigas de concreto de alto desempenho por meio da mecânica da fratura. 2002. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/tbitten/gmec/Teses/tese_Umberto.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- [06] MEDINA, Jorge Arturo Hinostroza. Avaliação de previsões de fratura elasto-plástica. 2014. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/24982/24982_1.PDF>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- [07] FERREIRA, Luiz E. T.; HANAI, João Bento de (Ed.). Mecânica da Fratura e Fraturamento do Concreto. Materiais de Construção Civil e Princípios de Engenharia dos Materiais, São Paulo, v. 1, n. 3, p.260-301, 2017. Disponível em: <https://www.academia.edu/37127999/Mecânica_da_Fratura_e_Fraturamento_do_Concreto>. Acesso em: 04 jul. 2019.
- [08] COURA, Cláudia V. G.; BARBOSA, Maria Teresa G.. Análise crítica sobre efeito tamanho em estruturas de concreto. Engenharia Civil - Um, Braga, n. 31, p.19-28, 2008. Disponível em: <<http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n31/Pag%2019.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2019.
- [09] CALAND, Verônica de Souza. Resultados experimentais dos parâmetros de fraturamento para concretos de alto desempenho. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=1995@1>>. Acesso em: 11 jul. 2019.
- [10] BORGES, José Umberto Arnaud; BITTENCOURT, Túlio Nogueira. Aplicações práticas da mecânica da fratura às peças de concreto simples e armado. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil, São Paulo, v. 1, n. 1, p.47-53, maio 2004. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/334368597/Aplicacoes-praticas-da-mecanica-da-fratura-as-pecas-de-concreto-simples-e-armado>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- [11] GARCIA, Sergio Luis González. Taxa de armadura transversal mínima em vigas de concreto armado. 2002. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=699&Itemid=>>. Acesso em: 18 jul. 2019.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Centro de Ciências Exatas e Naturais – CCEN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

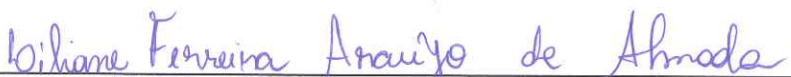
Às oito horas do dia doze de agosto de dois mil e dezenove, na sala 05 da Central de Aulas V do CCEN – Centro de Ciências Exatas e Naturais da UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de trabalho de conclusão de curso de autoria do aluno **KLEBER ROCHA SARAIVA FILHO**, aluno do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia desta universidade, N° de matrícula **2015020889**, com o título **“ESTUDO DA ANÁLISE DO MECANISMO DE FALHA NO CONCRETO BASEADA NA MECÂNICA DA FRATURA”**. A Banca Examinadora ficou assim constituída por três membros: Prof. FILIPE LIMA DOS SANTOS, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso; ENG(a). MEC(a). LILIANE FERREIRA ARAÚJO DE ALMADA e Eng. Mec. KRISTY EMANUEL SILVA FONTES, como membros. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, tendo o aluno obtido as seguintes notas: **9,00; 9,50; 8,50**. Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi aprovado com média geral **9,00**. E para constar, eu, FILIPE LIMA DOS SANTOS, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 12 de agosto de 2019.

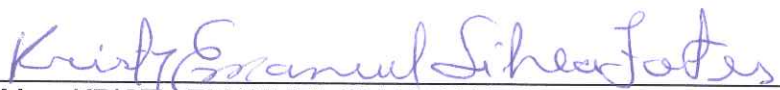
Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



Prof. FILIPE LIMA DOS SANTOS – UFERSA
Presidente e orientador



ENG(a). MEC(a). LILIANE FERREIRA ARAÚJO DE ALMADA – PPGCEM - UFERSA
Primeiro Membro



Eng. Mec. KRISTY EMANUEL SILVA FONTES - PPGCEM - UFERSA
Segundo Membro