



AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE DUAS ROCHAS ORNAMENTAIS PELOS MÉTODOS DE ENTALHE RASO E PROFUNDO¹

*Gilson Costa Jerônimo Júnior²
Eduardo Atem de Carvalho³
Carlan Ribeiro Rodrigues⁴*

Resumo

A necessidade de se estudar filtros cerâmicos empregados em turbinas a gás levou à busca de um material que tivesse comportamento similar em fratura e ao mesmo tempo fosse de baixo custo de aquisição. Um granito existente na região Norte Fluminense se revelou a melhor opção. A medida da Tenacidade à Fratura (K_{IC}) do material foi feita se empregando entalhes rasos e profundos com pouca diferença nos valores obtidos, o que valida o teste. A mudança de ensaio de 3 para 4 pontos de apoio, no entanto, causou uma variação maior, conforme esperado.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Rochas; Entalhes.

EVALUATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF TWO ORNAMENTAL ROCKS BY METHOD OF SHALLOW AND DEEP NOTCHES

Abstract

The need to study ceramic filters used in gas turbines has led to a search of one material that had similar behavior in fracture while it was low cost. A granite existing in the North Fluminense proved the best option. The measurement of fracture toughness (K_{IC}) of the material was made using shallow and deep notches, with little difference in values, which validates the test. The change in testing from 3 to 4 points of support, however, caused a greater variation, as expected.

Key words: Fracture toughness; Rocks; Notches.

¹ *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Aluno de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, LAMAV/CCT/UENF.*

³ *Engº Mecânico, M.Sc., Ph.D., Professor Associado, LAMAV/CCT/UENF.*

⁴ *Técnico em Mecânica, LAMAV/CCT/UENF.*



1 INTRODUÇÃO

De acordo com Moura e Carvalho⁽¹⁾, as cerâmicas empregadas em filtros para escapamentos de turbinas queimadoras de gás para produção de eletricidade, apresentam baixa tenacidade à fratura, com conseqüências nas suas propriedades mecânicas e vida útil.

O comportamento não linear relacionado a este material, aliado ao fato destes filtros possuírem alto custo individual, serviu como motivação direcionando a procura por um material frágil que apresente mesmo comportamento em fratura e que seja viável economicamente, permitindo a realização de centenas de testes necessários à conclusão dos estudos.

Através da análise da história dos gráficos obtidos a partir do ensaio de flexão de três e quatro pontos, pode-se chegar a um material com comportamento não linear em fratura similar aos dos filtros citados, podendo ser usado em larga escala para melhor avaliação de seu comportamento, para que não seja descartada uma série de materiais aparentemente defeituosos ou rachados sem conhecer suas reais condições de trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Granito

A formação das rochas ígneas vem da consolidação devido ao resfriamento do magma derretido ou parcialmente derretido. Normalmente o derretimento é provocado por um ou mais dos três processos: aumento da temperatura, diminuição da pressão ou uma mudança de composição.

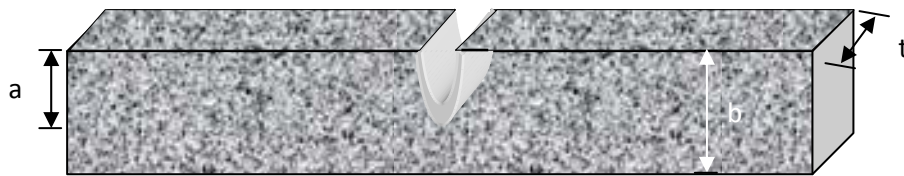
O granito é uma rocha ígnea de grão fino, médio ou grosseiro, composta essencialmente por quartzo e feldspatos tendo como minerais freqüentes muscovita, biotita e/ou anfíbolios. Esses minerais são identificáveis devido a dificuldade de trocar calor com o ambiente em função das rochas que o envolvem, causando o retardamento da solidificação.

O granito do tipo andorinha utilizado neste trabalho, provém do Estado do Rio de Janeiro, sendo que para os testes as placas foram cortadas com disco adiamantado, em barras. Depois, os corpos de prova receberam um entalhe do tipo "U", feito com disco de corte. Antes de qualquer ensaio e medições, os mesmos foram devidamente limpos.

2.2 Preparação dos Corpos de Prova

Após terem sido lavados, os corpos de prova foram submetidos a cortes através de uma máquina de corte conhecida como "Makita", gerando entalhes que apresentam o mesmo comportamento que uma trinca transversal passante.

Essas trincas foram diversificadas de acordo com cada lote de peças em estudo, variando entre 5 mm e 15 mm. Posteriormente, com o auxílio de um paquímetro, foram determinadas suas respectivas alturas, larguras e profundidades de trincas.



a – profundidade da trinca em metros;
b – altura do corpo de prova;
t – largura do corpo de prova.

Figura 1. Esquema do corpo de prova destacando suas dimensões principais.



Figura 2. Detalhe do corpo de prova destacando o entalhe, ampliado 10x.

2.3 Ensaio de Flexão em Quatro Pontos

Este ensaio consiste na aplicação de cargas em um corpo de prova com configuração regular sujeito a quatro pontos de apoio ou contato,⁽²⁾ sendo que neste ensaio a distância entre os apoios inferiores foi de 140 mm. Entre os apoios superiores a distância foi de 76 mm. Objetivando o cálculo do momento fletor, utilizou-se a seguinte expressão

$$M = \frac{(P \times d)}{2} \quad (1)$$

segundo Tada et al.,⁽³⁾ sendo a distância entre dois roletes adjacentes (d) de 0,032 m. Posteriormente, pôde-se calcular a tensão máxima suportada pelo material, através da expressão 2; objetivando chegar na expressão 4, para calcular a tenacidade a fratura.

$$\sigma = \frac{(6 \times M)}{(t \times b^2)} \quad (2)$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = 1,22 - 1,4 \times \left(\frac{a}{b}\right) + 7,33 \times \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 13,8 \times \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 14 \times \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (3)$$

$$K_{Ic} = \sigma \times (\pi \times a)^{1/2} \times F\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4)$$

2.4 Ensaio de Flexão em Três Pontos

Este ensaio consiste na aplicação de cargas em um corpo de prova com configuração regular, sujeito a três pontos de apoio ou contato.⁽²⁾ O procedimento foi realizado em condições controladas com taxa de avanço de 1mm/s.

Os testes foram realizados por meio da Emic modelo DL100 que possui uma base fixa onde foram colocadas duas hastes inferiores a uma distância de 140 mm um do outro sendo a tensão aplicada, de cima para baixo por meio de apenas uma haste, no centro do corpo de prova. Assim pode-se obter a força necessária para a ruptura de cada peça. Para calcular o momento fletor, utilizando a expressão 1, a distância entre os roletes foi 0,140 m. Posteriormente, chegou-se a tensão máxima através da expressão 5; objetivando chegar na expressão 7 para calcular a tenacidade a fratura.

$$\sigma = (6 \times M) / (b^2) \quad (5)$$

$$F(a/b) = \left(\frac{1}{\pi^2}\right) \times \frac{\left[1,99 - \left(\frac{a}{b}\right) \times \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)\right) \times \left(2,15 - 3,93 \times \left(\frac{a}{b}\right) + 2,7 \times \left(\frac{a}{b}\right)^2\right)\right]}{\left[\left(1 + 2 \times \left(\frac{a}{b}\right)\right) \times \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)^{4,5}\right)\right]} \quad (6)$$

$$K_{1C} = \sigma \times (\pi \times a)^{1/2} \times F\left(\frac{a}{b}\right) \quad (7)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A princípio, foram realizados testes de flexão em três pontos em um lote de 12 corpos de prova, sendo que 6 peças possuíam entalhes de aproximadamente 15 mm e as outras 6 possuíam entalhes variando de 5 mm até 15 mm. Os dados referentes para as peças que possuíam os entalhes de aproximadamente 15 mm estão apresentados na Tabela 1, enquanto para aquelas que possuíam o entalhe variando de 5 a 15 mm estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Resultados e medidas de um ensaio de flexão de três pontos com 6 corpos de prova com os entalhes de aproximadamente 15 mm

a(m)	b(m)	t(m)	P(N)	M(N.m)	σ (N/m ²)	(a/b)	F(a/b)	K _{1C} (Pa.m ^{1/2})
0,01493	0,030675	0,02167	428,98	15,01	95738,63	0,49	1,38	28547,26
0,01461	0,030515	0,021445	387,97	13,58	87496,50	0,48	1,35	25391,73
0,0145	0,030275	0,02144	387,97	13,58	88889,23	0,48	1,36	25707,05
0,01413	0,0302	0,021245	362,74	12,70	83521,99	0,47	1,33	23325,95
0,01467	0,03039	0,02123	410,05	14,35	93238,38	0,48	1,37	27332,35
0,01488	0,030305	0,021475	384,82	13,47	87993,05	0,49	1,39	26430,26

Os resultados destes testes apresentam uma dispersão muito pequena, como se espera de um caso onde uma trinca profunda está presente. Abaixo está representada a curva carga - extensão de um corpo de prova, enfatizando o pico de carga e sua descida não-linear correspondente à ruptura da peça.

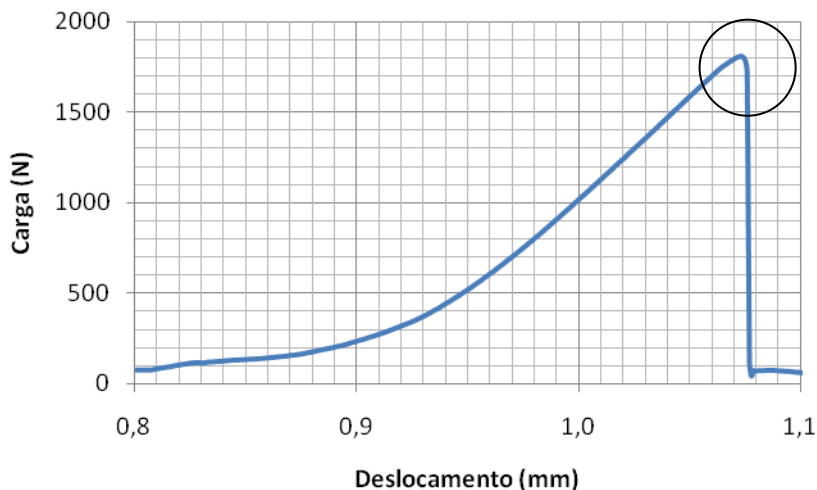


Figura 3. Gráfico que relaciona o deslocamento provocado pela máquina de ensaios e a carga aplicada pela mesma.

Tabela 2. Resultados e medidas de um ensaio de flexão de três pontos com 6 corpos de prova

a (m)	B (m)	t (m)	P (N)	M (N.m)	Σ (N/m ²)	(a/b)	F(a/b)	K_{1C} (Pa.m ^{1/2})
0,00387	0,03023	0,021295	1806,35	28,90	8910852,00	0,13	1,04	1021075,00
0,00468	0,030205	0,02146	1968,81	31,50	9653566,00	0,15	1,04	1217907,00
0,00978	0,030355	0,02119	1048,72	16,78	5156320,00	0,32	1,15	1035085,00
0,01033	0,03048	0,021305	1048,14	16,77	5083680,00	0,34	1,16	1066897,00
0,01303	0,0303	0,02119	740,54	11,85	3654292,00	0,43	1,31	971556,00
0,01283	0,030235	0,021425	601,40	9,62	2947794,00	0,42	1,30	770721,40

Já em relação ao ensaio em quatro pontos no valor encontrado de K_{1C} constatou-se dispersão maior devido às diversas proporções entre a profundidade da trinca e a altura total do corpo. Assim, o valor médio variou fortemente entre os lotes devido aos procedimentos de teste (3 ou 4 pontos). O gráfico abaixo representa a curva típica de carga-extensão correspondente ao ensaio em quatro pontos.

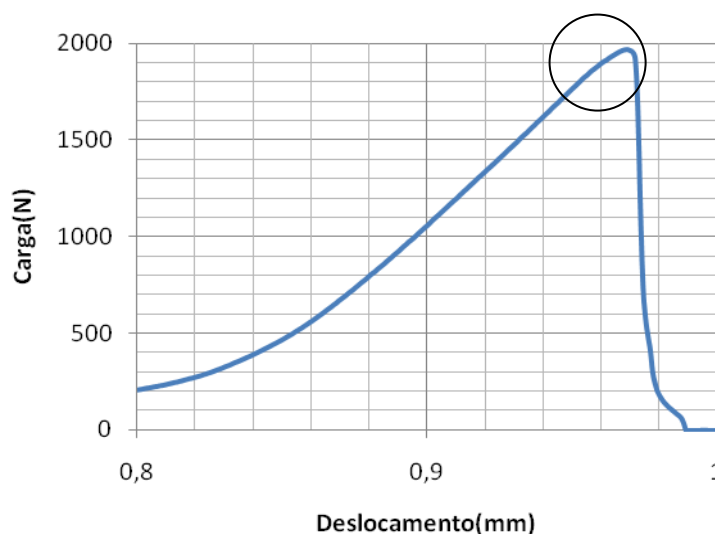


Figura 4. Gráfico que relaciona o deslocamento provocado pela máquina de ensaios e a carga aplicada pela mesma.

Para se obter dados com maior precisão um segundo lote com 34 corpos, dos quais 18 possuíam trincas de aproximadamente 5 mm (Tabela 3) e 16 possuíam trincas de aproximadamente 15 mm foram submetidos ao ensaio de flexão em três pontos (Tabela 4). Nestes, o vão de flexão (L) foi 118,04 mm.

Tabela 3. Resultados e medidas em um ensaio de flexão de três pontos com 18 corpos de prova

a(m)	b(m)	t(m)	P(N)	M(N.m)	σ (Pa)	(a/b)	F(a/b)	K_{1c} (Pa.m ^{1/2})
0,00456	0,02944	0,02001	876,88	30,69	212463,30	0,15	0,99	25093,51
0,00522	0,02963	0,01947	857,95	30,03	205219,20	0,18	0,99	25898,30
0,005	0,03001	0,02096	832,72	29,15	194171,90	0,17	0,99	23985,89
0,00497	0,03075	0,02072	832,72	29,15	184938,80	0,16	0,99	22785,04
0,00504	0,02975	0,02186	880,03	30,80	208805,90	0,17	0,99	25893,51
0,00495	0,03079	0,02183	889,49	31,13	197033,90	0,16	0,99	24228,31
0,00492	0,02970	0,01998	1018,08	35,63	242375,30	0,17	0,99	29701,55
0,00558	0,03055	0,01991	725,47	25,39	163236,10	0,18	0,99	21305,04
0,00538	0,03006	0,01965	753,86	26,39	175199,20	0,18	0,99	22448,15
0,00546	0,02999	0,0206	495,21	17,33	115626,10	0,18	0,99	14927,37
0,00544	0,03023	0,02015	851,64	29,81	195703,70	0,18	0,99	25215,98
0,00544	0,02962	0,01951	842,18	29,48	201583,10	0,18	0,99	25979,78
0,00574	0,03054	0,01966	630,85	22,08	142038,90	0,19	0,99	18811,51
0,00544	0,03047	0,02031	816,95	28,59	184786,30	0,18	0,99	23807,77
0,00458	0,02982	0,02041	763,32	26,72	180264,70	0,15	0,99	21341,50
0,00557	0,03004	0,0209	820,10	28,70	190847,40	0,19	0,99	24892,10
0,00496	0,02982	0,01993	820,10	28,70	193673,80	0,17	0,99	23828,84
0,00517	0,03017	0,01938	665,54	23,29	153547,50	0,17	0,99	19284,16

O gráfico obtido a partir do modelo de weibull para as peças com entalhe de aproximadamente 5 mm pode ser visto abaixo:

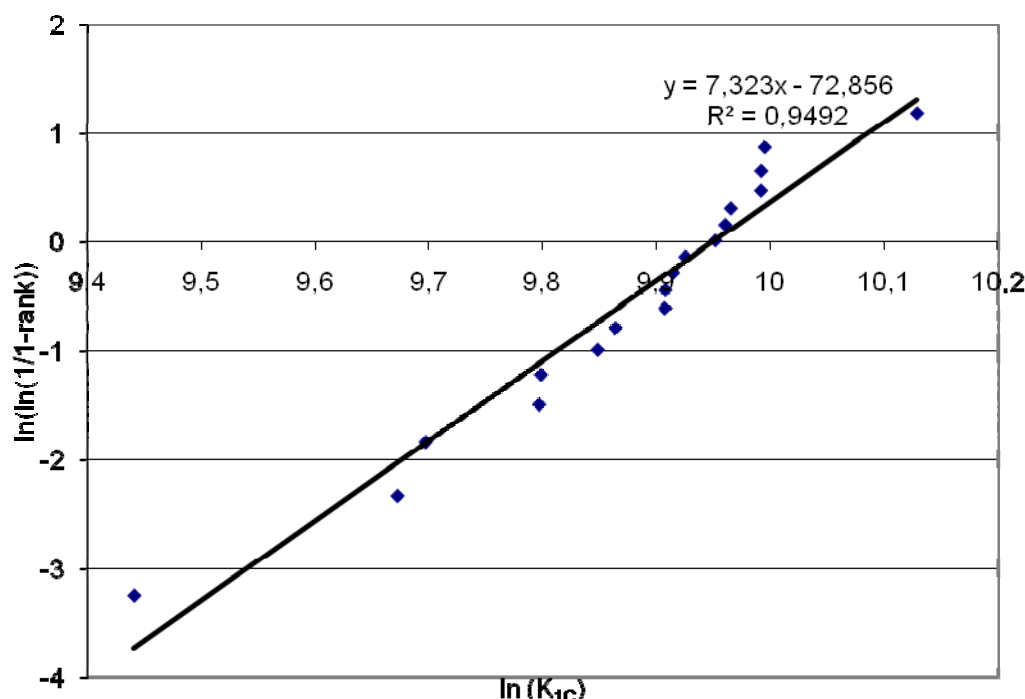
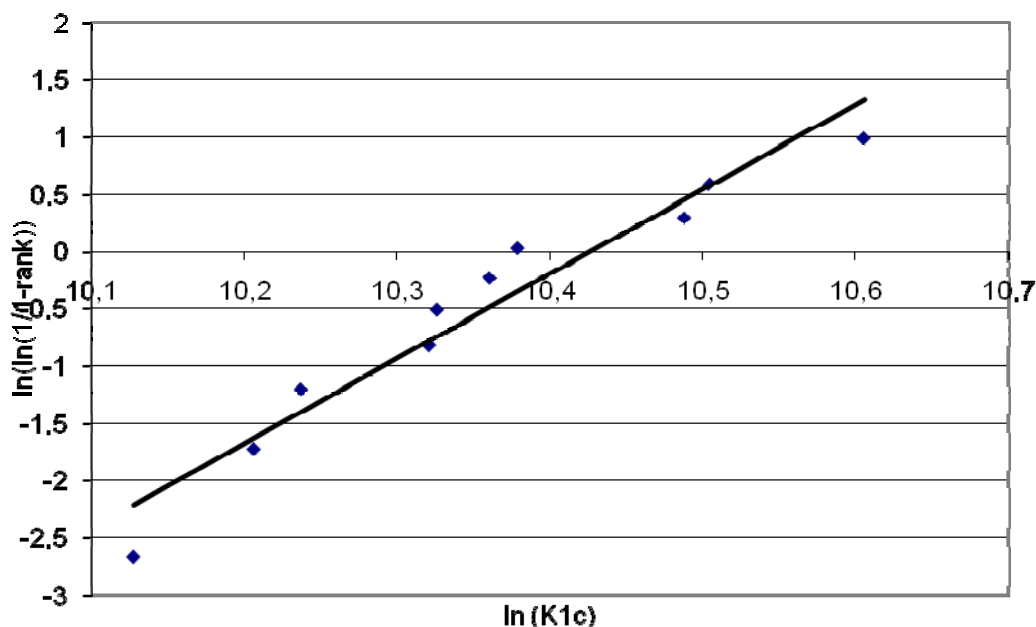


Figura 5. Gráfico obtido a partir do modelo de Weibull para as peças com entalhe de aproximadamente 5 mm.

Tabela 4. Resultados e medidas em um ensaio de flexão em três pontos com 16 corpos de prova

a(m)	b(m)	t(m)	P(N)	M(N.m)	σ (Pa)	(a/b)	F(a/b)	K_{1c} (Pa.m ^{1/2})
0,01406	0,03033	0,02174	268,11	7,91	51604,63	0,46	1,31	14256,78
0,01263	0,02983	0,0206	305,96	9,03	60880,56	0,42	1,22	14834,52
0,01223	0,02945	0,02084	309,11	9,12	63104,88	0,42	1,21	14931,28
0,01095	0,02979	0,02076	432,13	12,75	86217,19	0,37	1,13	18001,16
0,01299	0,03015	0,02113	378,51	11,17	73726,43	0,43	1,24	18449,05
0,01236	0,02971	0,02025	387,97	11,45	77823,96	0,42	1,21	18533,74
0,01309	0,02979	0,02076	365,89	10,80	73001,20	0,44	1,26	18612,56
0,01237	0,02954	0,01967	397,43	11,73	80641,78	0,42	1,21	19298,07
0,0142	0,029845	0,02016	353,27	10,43	70223,76	0,48	1,35	19970,53
0,01358	0,03043	0,01981	416,36	12,29	79613,29	0,45	1,27	20929,79
0,01299	0,029605	0,02177	410,36	12,11	82900,16	0,44	1,26	21032,10
0,01401	0,02981	0,021035	381,66	11,26	76045,44	0,47	1,33	21234,48
0,01253	0,02946	0,021785	441,59	13,03	90089,51	0,43	1,23	21934,96
0,01328	0,02959	0,020755	419,51	12,38	84834,57	0,45	1,28	22156,32
0,01282	0,029325	0,021795	438,44	12,94	90272,32	0,44	1,25	22687,98
0,01427	0,03024	0,02042	416,36	12,29	80616,86	0,47	1,34	22804,83

O gráfico obtido a partir do modelo de Weibull para as peças com entalhe de aproximadamente 15 mm pode ser visto abaixo:

**Figura 6.** Gráfico a partir do modelo de Weibull para as peças com entalhe de aproximadamente 15 mm.**Tabela 5.** Valores encontrados de Módulo de Weibull, Tenacidade à Fratura e erro relativo para os mesmos para diferentes profundidades de trinca (5 mm e 15 mm)

	Profundidade de trinca 5 mm	Profundidade de trinca 15 mm
Módulo de Weibull	7,32	7,35
Ten. Frat. Caract. (Pa.m ^{1/2})	20929,77	20607,18
$\Delta\%$ (β)	0,45	
$\Delta\%$ (θ)	-1,56	

Tabela 6. Valores encontrados de Módulo de Weibull, Tenacidade à Fratura e erro relativo para os mesmos para diferentes profundidades de trinca (5 mm e 15 mm) referentes aos ensaios de flexão em 3 e 4 pontos

	Flexão em 3 pontos		Flexão em 4 pontos
	5 mm	15 mm	5 mm
K_{1C}	23301,57	19354,26	1013873,57
Desvio Padrão	3326,47	2788,02	145503,72
Erro relativo %	14,28	14,41	14,35

A Figura 7 é o gráfico comparativo entre o comportamento da força aplicada durante o ensaio de flexão de uma cerâmica porosa e de um material frágil, destacando a descida não-linear da força para a cerâmica porosa.

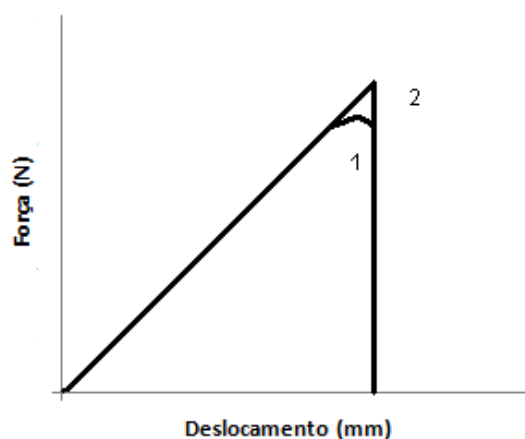


Figura 7. Esquema apresentando diferentes curvas para cerâmica porosa (1) e material frágil.⁽²⁾

4 CONCLUSÕES

O ensaio de flexão em 4 pontos induziu a valores para a Tenacidade à Fratura bem mais altos que os obtidos com o ensaio de três pontos.

A dispersão dos valores da Tenacidade à Fratura variou com a profundidade do entalhe.

O valor encontrado para o valor de Tenacidade à Fratura está dentro da faixa esperada para este tipo de material.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do PIBIC/UENF pelo financiamento da pesquisa e a Petrobras UN – BC pelo apoio continuado.

REFERÊNCIAS

- 1 MOURA, Ricardo P.; CARVALHO, Eduardo A. de. Determinação da Tenacidade à Fratura em Materiais Frágeis Porosos Via Emprego de Entalhes Semicirculares.
- 2 GARCIA, Amauri. Ensaios dos Materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- 3 TADA, Hiroshi et AL. The Stress Analysis of Cracks Handbook. 3rd ed. New York: ASME Press, 2000.