

APLICAÇÃO DA GEOMETRIA DOS FRACTAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS ILHAS PARA ANÁLISE DE FRATURA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S31803¹

*Leonardo Rodrigues de Oliveira*²

*Rafael Rodrigues de Queiroz*³

*Enio Pontes de Deus*⁴

Resumo

Ultimamente, a geometria dos fractais tem se tornado bastante difundida no meio científico. Tendo como meta analisar falhas mecânicas dos materiais, alguns estudos têm revelado a relação entre a geometria dos fractais e as propriedades mecânicas da superfície de fratura, e suas propriedades de dimensão fractal e auto-similaridade. Este estudo foi realizado com base na geometria dos fractais para análise da superfície de fratura do aço inoxidável duplex obtida através do ensaio de impacto Charpy. Considerando que a temperatura de fragilização desse aço é de 475 °C, o mesmo foi submetido ao tratamento térmico de envelhecimento para a obtenção das superfícies de fraturas cujas imagens foram captadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Na análise fractal é feito um estudo aplicando o método das ilhas através da digitalização das imagens e aplicação de *softwares* de análise de imagem. Foi dada uma ênfase na análise do cálculo da dimensão fractal (Df) de superfície, na energia absorvida no ensaio de impacto, nos mecanismos de fratura envolvidos. Além disso, foi feita a análise da superfície de fratura obtida, da energia absorvida e de valores de Df alcançados. Os resultados mostraram uma relação entre a dimensão fractal, o tamanho dos dimples em superfície de fratura e a energia de impacto para a obtenção das mesmas.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex UNS S31803; Fractais; Superfície de fratura.

APPLICATION OF THE FRACTALS GEOMETRY THROUGH THE METHOD OF ISLAND TO ANALYZE FRACTURE OF DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S31803

Abstract

Recently, the geometry of fractals has become widespread in the scientific community. Taking aim to analyze the mechanical failure of materials, some studies have shown the relationship between the fractal geometry and mechanical properties of the surface of fracture or properties of fractal dimension and self-similarity. This study was carried out based on the fractal geometry so as to analyze the fracture surface of duplex stainless steel, which was obtained by Charpy impact test. Taking into consideration the temperature of embrittlement of steel as 475 °C, it was subjected to aging heat treatment to obtain the surfaces of fractures whose images were captured in the scanning electron microscope (SEM). In fractal analysis, it is done a study by the method of the islands through the digitization of images and application of image analysis software. However, it was emphasized the calculation of fractal dimension (FD) surface on the energy absorbed in impact testing in relation to the fracture mechanisms involved. In addition, it was done the analysis of the fracture surface obtained, the energy absorbed and the values of FD obtained. Furthermore, the results showed a relationship between the fractal dimension, the size of the Dimples on the fracture surface, and impact energy so as to achieve them.

Key words: Duplex stainless steel UNS S31803, Fractals, Fracture surface.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Graduando, LAMEFF (Laboratório da Mecânica da Fratura e Fadiga) – UFC.*

³ *Graduando, LAMEFF (Laboratório da Mecânica da Fratura e Fadiga) – UFC.*

⁴ *Doutor, Professor e Coordenador LAMEFF (Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga) - UFC*

1 INTRODUÇÃO

O Aço Inoxidável Duplex (AID) possui uma estrutura bifásica, que combina algumas características dos aços austeníticos e outras dos aços ferríticos. Devido as vantagens obtidas na combinação das características destes dois tipos de aço foi investigado um melhor aproveitamento e estruturação de sua composição química, além da sua crescente utilização, principalmente em aplicações industriais que necessitam de boa resistência à corrosão e uma boa tenacidade.

Sua ampla utilização em indústrias químicas e petroquímicas revela um considerável interesse em solucionar o defeito de degradação que os mesmos apresentam quando submetidos a elevadas temperaturas em serviço com conseqüente mudança das propriedades mecânicas. A fragilização a 475°C é um destes problemas e ocorre quando esse aço é aplicado à temperatura acima de 300°C por longos períodos; deste modo a fase ferrita se decompõe em duas fases, uma rica (α') e outra pobre (α) em cromo, fragilizando o aço.⁽¹⁾

Para análise de problemas no aço inoxidável duplex foi estudado a aplicação da geometria dos fractais, pois devido a estudos diversos ficou comprovado que as superfícies de fratura são fractais. Como a superfície de fratura possui uma grande complexidade geométrica e a geometria dos fractais estuda os formatos complexos que não são abrangidos pela geometria euclidiana, então esse método abrange perfeitamente esse problema.

Vários estudos da geometria dos fractais aplicados a ciências dos materiais tornaram-se evidentes após a publicação de trabalhos por Mandelbrot, considerado como o pai da geometria do fractal pela aplicação que o mesmo deu ao tema.⁽²⁾ Estudou-se a relação entre a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy e a dimensão do fractal da superfície de fratura e aplicou-se para a determinação da dimensão fractal um método por ele desenvolvido: o método das ilhas (*Islet island analysis*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho é feito um estudo aplicando a geometria dos fractais à análise da superfície de fratura obtida através do ensaio de impacto Charpy. O material escolhido é o aço inoxidável duplex UNS S31803 submetido a diversos tempos de envelhecimento. Na análise fractal, foi calculada a dimensão fractal das superfícies obtidas utilizando como ferramenta o método das ilhas de Mandelbrot e a digitalização de imagens.

Foram utilizadas chapas de aço inoxidável duplex UNS S31803 com dimensões iniciais 308 x 156 x 12 mm, dureza igual a 21 HRC, limite de escoamento de 543,8 MPa, limite de resistência de 789,6 MPa e composição química em peso segundo a Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química (% em peso) do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 ensaiado

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
0,018	1,48	0,019	0,001	0,450	22,220	5,590	0,130
Cu	Mo	N	Nb	Al	Sn	Ce	Fe
0,28	3,080	0,18	0,021	0,003	0,012	0,02	66,496

2.1 Tratamentos Térmicos

Parte das amostras foram usinadas como recebidas e parte foram submetidas a tratamento térmico de envelhecimento a temperatura de 748 K (475°C), por períodos de 12 h, 25 h, 50 h, 100 h e 175 h, em estufa sem controle de atmosfera.

2.2 Ensaio de Impacto Charpy

Foram usinados 33 corpos de prova (CP) para ensaio Charpy – V, de acordo com a norma NBR 6157/1980,⁽³⁾ sendo 18 CP de dimensões padrão com 55 x 10 x 10 mm e 15 CP com dimensões reduzidas de 55 x 10 x 5 mm. O ensaio foi realizado para avaliar a tenacidade do material à temperatura ambiente e estudar a superfície da fratura, nos estados com e sem envelhecimento afim de que fosse determinada a dimensão fractal. Os corpos de prova também foram analisados com a posição do entalhe em relação ao sentido de laminação da chapa, sendo três corpos de prova (CP) para cada condição de ensaio.

Os CP foram retirados de chapa de acordo com o desenho apresentado na Figura 1, com a posição do entalhe menos crítica para o CP reduzido, e mais crítica para o CP padrão, com a finalidade de garantir o rompimento total.

Para mostrar a importância da precisão e usinagem na geometria do entalhe também foram confeccionados três corpos de dimensões padrão com raio de concordância do entalhe em V com valor igual a 0,30 mm, diferente do valor igual a 0,30 mm, diferente do valor normalizado que é de $0,25 \pm 0,025$ mm.

Todos os corpos de prova foram ensaiados na máquina de ensaio Charpy, conforme a norma NBR 6157,⁽³⁾ à temperatura ambiente.

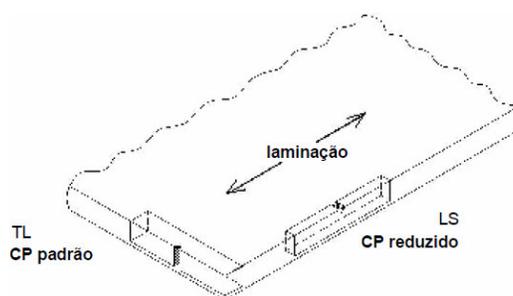


Figura 1. Posição do entalhe e retirada dos CP em relação à laminação da chapa.

2.3 Dureza

Para acompanhar o endurecimento mecânico que o tratamento térmico de envelhecimento acarreta, foram realizados ensaios de dureza Brinel, para um diâmetro de esfera de 2,5 mm e carga aplicada de 1831,81 N. Foram realizados os ensaios no material como recebido e para todas as condições de envelhecimento (12 h, 25 h, 50 h, 100 h e 175 h).

A princípio cogitou-se o uso da microdureza Vickers para o estudo da dureza das fases presentes, austenita e ferrita, mas como na literatura só a fase ferrítica influi na dureza do material, enquanto a fase austenítica não sofre qualquer mudança com o envelhecimento, então se optou pela dureza Brinel.

2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), e as imagens foram obtidas através de um detector de elétrons retroespalhados.

Foram analisadas as superfícies fraturadas após o ensaio de impacto Charpy para as amostras no estado como recebido e nas condições de envelhecimento para os CP padrão, porém para os CP reduzidos não foi possível, pois os mesmos não romperam totalmente.

Também as superfícies fraturadas foram analisadas para aumentos de 50X, 100X, 200X, 400X e 500X, com exceção para um CP sem envelhecimento que foi acrescentado os aumentos de 600X e 1.000X, para análise fractal, totalizando 92 fractografias.

Também foram feitas microscopias para análise e micro-estrutura do material, onde as amostras foram polidas e atacadas por reagente com glicerina, ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção de 3:2:1.

2.5 Cálculo da Dimensão Fractal pelo Método das Ilhas

Na estimativa da dimensão fractal (D_f) foi utilizado uma adaptação do método das ilhas de Mandelbrot, Passoja e Paullay,⁽²⁾ que faz análise das superfícies de fratura. O método consiste, basicamente, em seccionar (polir) a superfície de fratura paralelamente à mesma, e para cada seccionamento faz-se o registro das áreas e perímetros de todas as ilhas obtidas. A seguir obtém-se um gráfico com a ordenada dada pelo logaritmo das áreas e a abscissa pelo logaritmo dos perímetros de todas as ilhas obtidas. A dimensão fractal será estimada através da inclinação do gráfico obtido.

No método aplicado para estimativa da dimensão do fractal empregado no presente trabalho não foi necessário danificar as amostras das fraturas, pois o estudo realizado nas fractografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Inicialmente foram obtidos através do MEV fractografias em tons de cinza com dimensões 712 x 484 pixels (24 x 16,31 cm; com resolução de 29,667 pixel / cm) e arquivo do tipo Tif (*Tagged Image Format*). Em seguidas fractografias foram editadas através do *software Adobe Photoshop*, na seguinte seqüência: a) eliminação da legenda e a fractografia passa a ter dimensões 712 x 420 pixels; b) obtenção de 10 cortes através do comando limiar para cada fractografia sem legenda.

O passo seguinte consiste na localização das ilhas para cada limiar, e a determinação de suas áreas e perímetros conseguidos através do *software* de análise de imagem *Imagetool* produzido pela "The University of Texas Health Science Center In San Antonio".

De posse das áreas e perímetros para os 10 limiares, foi calculado logaritmo das áreas e perímetros para todas as ilhas e plotando o gráfico $\log A$ x $\log P$, do onde a dimensão do fractal foi determinada da inclinação obtida através da regressão linear dos pontos plotados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades Mecânicas

As micrografias do aço inoxidável duplex estudado são apresentadas nas figuras abaixo, onde pode-se ver as fases austenítica e ferrítica e o alongamento dos grãos devido à laminação.

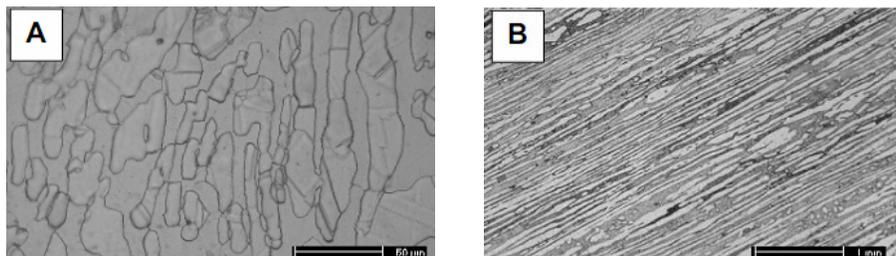


Figura 2. Estrutura do AID – a) Aumento de 1.000X. b) Aumento de 50X.

Na Tabela 2, tem-se os valores encontrados para a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy – V para os corpos de prova com dimensões padrão (55 x 10 x 10) e dureza Brinel para os diferentes tipos de envelhecimento a 748K (475 °C).

Tabela 2 – Resultado do ensaio de impacto Charpy – V (CP padrão) para amostras envelhecidas a 475 °C, e dureza Brinel

Tempo de Envelhecimento (h)	Energia Absorvida (J)	Dureza Brinel (HB)
0 (r = 0.3)	250.48	-
0	226.06	245.89
12	118.37	258.2
25	88.13	285.78
50	79.79	285.56
100	69.98	301.11
175	73.38	294.33

O envelhecimento causou uma queda significativa na energia absorvida do material para o tempo de até 25 h, a partir daí apresentou uma variação menor com a tendência a permanecer constante acima de 100 h. Segundo Mathew *et al.*,⁽¹⁾ a queda de energia observada no aço inoxidável duplex nestas condições de ensaio é devido a formação da fase α' , finamente dispersa na ferrita.

O efeito da fase α' na dureza pode ser observado. A variação da dureza vai diminuindo à medida que se aproxima de 100 h de envelhecimento devido a diminuição da taxa de precipitação da fase α' , com o aumento no tempo de envelhecimento.

Tem-se na Figura 3, a dimensão fractal versus a energia absorvida para o método das ilhas.

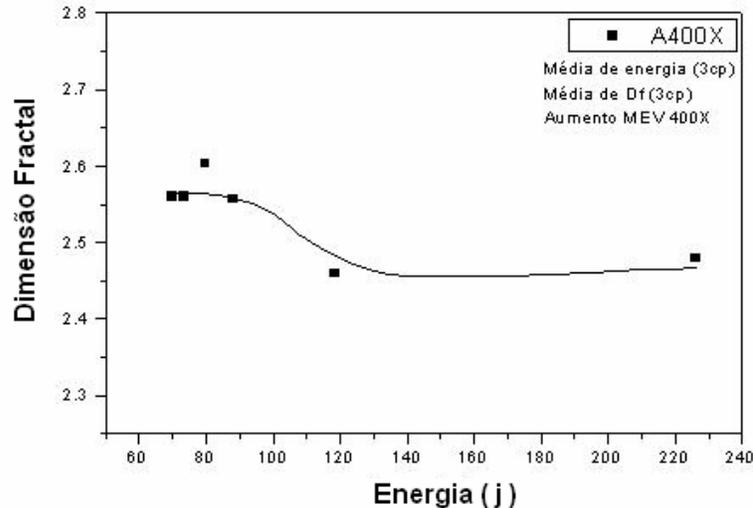


Figura 3. Df versus energia absorvida no ensaio de impacto Charpy aumento de 400X, média dos três CP, (método das ilhas).

Cada ponto assinalado no gráfico corresponde a média da dimensão fractal para os três CP sob o mesmo tempo de envelhecimento contra a média da energia absorvida dos respectivos CP. Todos os pontos foram obtidos para fractografias para aumento de 400X.

Na análise da dimensão fractal com a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy observa-se uma tendência à formação da curva tipo dúctil – frágil. Os valores obtidos sugerem um comportamento de transição entre 93 J e 118 J, apresentando no gráfico dois patamares, um patamar superior do lado esquerdo, mostrando um comportamento frágil, e maiores valores para Df e um patamar inferior do lado direito, mostrando um comportamento dúctil e menores valores para Df.

Hilders e Pilo⁽⁴⁾ estudaram um aço estrutural HSLA de composição química em peso igual a 0,48 C; 0,52 Mn; 0,25 Si; 0,03 P e 0,0019 S, e obtiveram nos ensaios uma superfície de fratura tendo como principal mecanismo a clivagem, e uma dimensão fractal maior para um maior valor de energia. Porém Hilders e Pilo⁽⁴⁾ sugerem para o caso em que o mecanismo de fratura predominante seja a presença de dimples uma relação inversa com a energia, sendo coerente com os valores encontrados neste estudo. Para os menores valores de energia encontrou-se os maiores valores de Df, considerando, é claro, a comparação de elementos que na Figura 3 pertencem a patamares diferentes.

Na Figura 4, têm-se as fractografias representando o comportamento dúctil e o comportamento frágil com dimensões respectivamente iguais a 2,45 e 2,56.

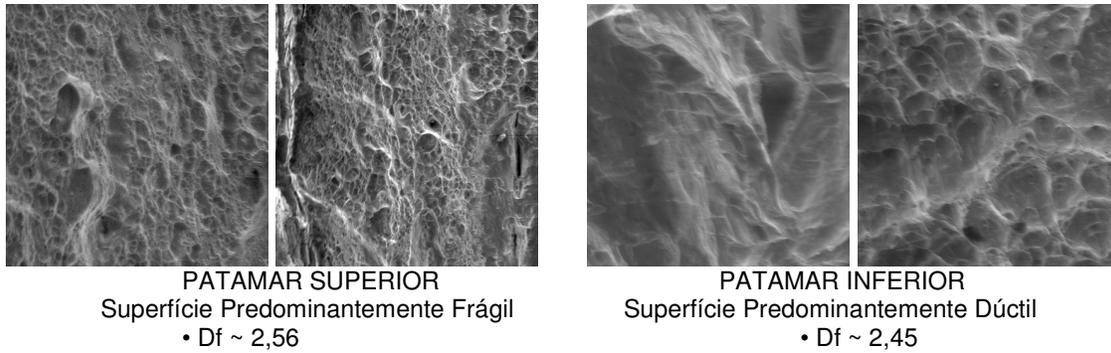


Figura 4. Esquema mostrando as superfícies pertencentes a cada patamar frágil-dúctil.

As fractografias demonstram que o principal mecanismo de fratura corresponde a formação de dimples pelo coalescimento de microvazios, sendo que os maiores dimples ocorrem para a superfície sem tratamento térmico e os menores para as superfícies tratadas, respectivamente, com maior e menor valor de energia absorvida. Porém a dimensão fractal inversamente acompanha este tamanho, sendo maior para as superfícies com menor tamanho e maior quantidade de dimples.

Na Figura 5 tem-se o conjunto de superfícies obtidas no ensaio de impacto Charpy.



Figura 5. Superfícies de fratura em ordem de envelhecimento 0 h, 12 h, 25 h, 50 h, 100 h, e 175 h.

O corpo sem envelhecimento apresenta estrutura predominantemente dúctil, enquanto que os demais são predominantemente frágeis; apresentam também uma separação em planos, com uma tendência de aumento de separações para um maior tempo de envelhecimento.

Foi escolhida para ensaio, a posição menos crítica do entalhe em relação à laminação para a avaliação da influência da posição do entalhe em relação ao sentido da laminação.

Tabela 3. Resultado do ensaio de impacto Charpy – V (CP reduzido).

Tempo de Envelhecimento (h)	Energia Absorvida (J)
0	163.5
12	157.29
25	162.83
50	165.15
100	158.26

A influência da posição do entalhe em relação à laminação foi bastante expressiva: os corpos de prova reduzidos, não romperam totalmente. Com excessão do corpo de prova sem tratamento térmico de envelhecimento, no qual a energia para o CP padrão foi bem maior, os demais corpos de tamanho reduzidos apresentaram uma energia bem superior ao CP padrão, chegando a ultrapassar 100% da energia dos mesmos. O CP sem envelhecimento apresentou uma superfície dúctil; para os CP envelhecidos a 12 h, apenas um dos CP apresentou uma estrutura conhecida como *arrester*,⁽⁵⁾ com 25 h dois corpos apresentaram esta estrutura e acima de 25 h todos os CP também apresentaram esta estrutura *arrester*, sugerindo que a mesma está relacionada com o envelhecimento do material.

3.2 A Dimensão Fractal

3.2.1 Métodos utilizados

Somente os CP com dimensões padrão tiveram suas superfícies estudadas com a geometria dos fractais, pois os corpos de prova reduzidos não romperam totalmente.

No método das ilhas foi tomado como base os tons de cinza da fractografias obtidas no MEV. As intensidades dos tons de pixels da figura variam de 0 a 255 sendo zero para a cor mais clara e 255 para a cor mais escura, respectivamente branco e preto, onde a intensidade de cinza de cada pixel representa a profundidade da fratura a quanto maior o valor mais profundo será o elemento. Na Figura 6 tem-se como exemplo a fractografia para a amostra com 50 h de envelhecimento e aumento no MEV de 400X.

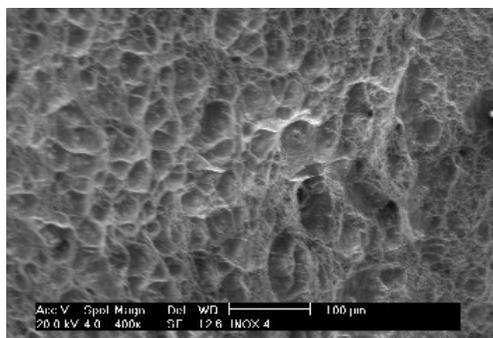


Figura 6. Fractografia obtida no MEV com aumento de 400X para CP com 50h de envelhecimento.

Finalmente, para o cálculo da dimensão fractal, utilizou-se o estudo feito por Mandelbrot,⁽⁶⁾ que demonstra a relação entre o logaritmo da área e o logaritmo do perímetro, sendo a dimensão do fractal estimada através da inclinação do gráfico. Desse estudo é fácil chegar a expressão (A), a mesma utilizada por Vasconcelos *et al.*⁽⁷⁾ Assim, a dimensão do fractal esperada é:

$$\text{Log (A)} = C + \frac{2}{D-1} \log (P) \quad (A)$$

C = Constante;

Df = Dimensão do Fractal ($2 < Df < 3$);

A = Área das ilhas;

P = Perímetro das ilhas.

Na Tabela 4 estão todos os valores calculados para Df aplicando-se o método das ilhas.

Tabela 4. Valores estimados para a dimensão fractal (aplicando o método das ilhas)

	E01	E02	E03	E121	E122	E123	E251	E252	E253
50X	2.93	2.75	2.84	3.06	2.73	2.68	2.93	2.87	2.87
100X	2.76	2.82	2.81	2.71	2.8	2.61	2.84	2.79	2.72
200X	2.59	2.61	2.61	2.56	2.61	2.45	2.68	2.69	2.63
400X	2.45	2.44	2.44	2.47	2.44	2.45	2.56	2.57	2.55
500X	2.42	2.58	2.58	2.47	2.58	2.5	2.57	2.58	2.54

3.2.2 Efeitos dos aumentos do MEV nos resultados da dimensão fractal

Na Figura 7 foi plotado o gráfico da dimensão fractal encontrada para cada aumento aplicado no MEV: 50X, 100X, 200X, 400X e 500X, para diferentes tempos de envelhecimento, 0 h, 12 h, 25 h, 50 h, 100 h e 175 h. Observa-se que esse apresenta uma tendência acima de 400X de aumento ideal para estimar.

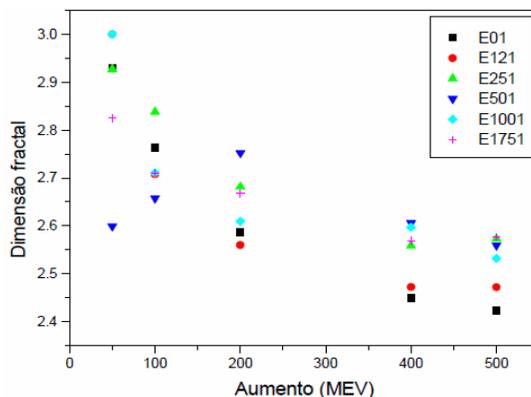


Figura 7. Gráfico da Dimensão fractal contra aumento obtido no MEV (método das ilhas).

Do exposto concluiu-se que o aumento ideal nas condições de ensaio aplicadas está entre 400X para a estimativa de Df.

4 CONCLUSÃO

Foi analisada, aplicando a geometria fractal, a superfície da fratura de corpos de prova de aço inoxidável duplex UNS S3180 envelhecidos a 475 °C, submetidos a ensaio de impacto Charpy, a temperatura ambiente. Os resultados experimentais permitem concluir que:

i. Para esse material quando o método para cálculo da dimensão do fractal for realizado com o uso de fractografias, para o aço inoxidável duplex o aumento ideal a ser utilizado no MEV está entre 400X e 500X; acima destes aumentos a dimensão praticamente não sofre variação enquanto que abaixo destes os valores conseguidos variam muito. Esta variação ocorre porque as superfícies e fraturas são fractais naturais e com isto apresentam um limitado campo de escala.

ii. Quando o mecanismo de fratura predominante for dimples em um ensaio de impacto, terá maior dimensão o elemento que apresentar menor tamanho de dimples.

iii. Entre dois elementos confeccionados de um mesmo material (corpo de prova), mas que devido às diferentes condições a que foram submetidos (tratamento

térmico) forem alcançados para os mesmos materiais diferentes valores de energia absorvida em ensaio de impacto Charpy, as grandezas dimensão fractal e energia absorvida para os impactos serão inversamente proporcionais quando a superfície de fratura for formada predominantemente por dimples.

A dimensão fractal será maior para o corpo que absorver menor energia e será menor para o corpo que absorver um valor maior.

iv. Para superfícies de fratura do aço inoxidável duplex o valor da dimensão fractal em torno de 2,56 corresponderá a uma fratura do tipo frágil, enquanto para uma superfície dúctil a dimensão será aproximadamente de 2,45, sendo a dimensão fractal menor para a superfície dúctil que para a superfície frágil.

Agradecimentos

Ao professor e orientador Dr. Enio Pontes De Deus, pela amizade, incentivos e apoio durante este trabalho.

Ao professor Eloy de Macedo Silva, pelos incentivos e disponibilização dos materiais para a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga (LAMEFF) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC e seus integrantes, pelo apoio na realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 MATHEW, M. D. et al. (1999). Low temperatur aging embrittlement of CF – 8 *stainless steel*, *Materials Science and Engineering*, A269, p 186 – 196.
- 2 MANDELBROT, B. B.; PASSOJA, D. E.; PAULLAY, A. J. (1984). Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, v.308, p. 721 – 722, Apr.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). NBR 6157 – Materiais metálicos – determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados. Rio de Janeiro.
- 4 HILDERS, O. A.; PILO D. (1997). On the development of a relation between fractal dimension and impact toughness. *Materials Characterization*, n.38, p.121-127. Elsevier Science Inc, New York.
- 5 HERTZBERG, R. W. (1986). *Deformation and Fracture mechanics of engineering materials*. 3. ed. New York, John Wiley & Sonc, Inc.
- 6 MANDELBROT, B. B. (1982). *The fractal geometry of Nature*. New York, W. H. Freeman and Company.
- 7 VASCONCELOS, W. et al. (2000). Fractal structure of colloidal solgel silica particles and agglomerates. *Acta Microscopica*,v.9, supl. A, p 141 – 142.
- 8 DEUS, E. P. (1997). *Análise do processo de fraturamento em vigas de pontes de aço sob efeito de fadiga*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 9 CHIAVERINE, V. (1998). *Aços e ferros fundidos*. 7. Ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- 10 CELTIN, P. R.; SILVA, P. S. P.; PENA, J. A. (1986). *Análise de Fraturas*. Associação Brasileira de Metais.