



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ALEXANDRE DE OLIVEIRA MARION

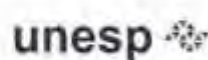
ANÁLISE FRACTAL DE FRATURAS EM REGIME LINEAR ELÁSTICO: MODO I DE
CARREGAMENTO EM RESINA FENÓLICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá
2011

M341a	Marion, Alexandre de Oliveira Análise fractal de fraturas em regime linear elástico: modo I de carregamento / Alexandre de Oliveira Marion – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 46 f. : il. Bibliografia: f. 45-46 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein 1. Processamento de imagens - Técnicas digitais 2. Fractais I. Título CDU 621.381
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ANÁLISE FRACTAL DE FRATURAS EM REGIME LINEAR ELÁSTICO:
MODO I DE CARREGAMENTO EM RESINA FENÓLICA

ALEXANDRE DE OLIVEIRA MARION

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA
DE **GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

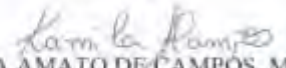
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO
UNESP-FEG


Prof. KAMILA AMATO DE CAMPOS, M.Eng.
FATEC - GUARATINGUETÁ

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

ALEXANDRE DE OLIVEIRA MARION

NASCIMENTO	25.05.1988 – CAMPINAS/ SP
FILIAÇÃO	Dirlei Marion Virginia Aparecida de Oliveira Marion
2007/2011	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

...aos meus pais, Dirlei e Virginia, pelo grande
apoio e incentivo e por estar sempre a meu lado

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a minha família que sempre me deu apoio durante toda minha vida, e principalmente aos meus pais *Dirlei* e *Virginia*, que sempre incentivaram meus estudos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein*, por sua confiança em meu trabalho, sua amizade e por ter sempre me incentivado, sem seu auxílio este trabalho não teria como ser realizado;

a aluna de doutorado *Kamila Amato de Campos* pela ajuda durante a realização do trabalho;

a todos os moradores e ex-moradores da *República Masmorra*, pelos inúmeros momentos de felicidades que passei junto a eles;

à *FAPESP*, pelo apoio financeiro através do processo nº 2010/06308-9,

enfim, à todos aqueles que apesar de não terem tido seus nomes citados fizeram parte desta tão importante fase da minha vida.

Marion, A. O. **Análise fractal de fraturas em regime elástico: modo I de carregamento em resina fenólica**. 2011. 46f. Tese (Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Para o desenvolvimento do presente trabalho de graduação sobre o comportamento fractal de fraturas, é necessário estabelecer referências para a análise fractal de superfícies de fratura, avaliando, a partir de ensaios de tenacidade à fratura nos modos I, II e misto I/II, o comportamento de fraturas em materiais frágeis, sob o regime linear elástico. Fraturas em regime linear elástico são descritas por seu comportamento fractal por vários pesquisadores, em especial J.J. Mecholsky. A motivação da presente proposta decorre de um trabalho feito pelo grupo e aceito para publicação no periódico *Materials Science and Engineering A* (Horovistiz et al, 2010), onde o modelo de Mecholsky não pôde ser comprovado para a fratura em corpos de prova ranhurados para ensaios de compressão diametral de titânia sob o modo I. O objetivo geral desta proposta é quantificar as regiões de relevo formadas pelos diferentes mecanismos de propagação de trincas na fratura sob regime linear elástico, em corpos de prova poliméricos (resina fenólica), relacionando tenacidade, espessura dos corpos de prova e dimensão fractal. As fraturas analisadas foram provenientes de ensaios SCB, em modo I de carregamento, sendo a aquisição das imagens feitas com o uso de microscópio óptico de reflexão e as topografias das superfícies obtidas pelo método de reconstrução por extensão de foco, calculando-se os valores de dimensão fractal com o uso dos mapas de elevações. A dimensão fractal foi classificada como: dimensão monofractal (D_f), quando a fratura é descrita por um único valor; ou dimensão textural (D_t), que é uma análise macroscópica da fratura, combinada com a dimensão estrutural (D_s), que é uma análise microscópica. Os resultados demonstraram que não há relação clara entre a tenacidade, espessura e valores fractais para o material investigado. Por outro lado, é evidente que os valores fractais se alteram com a evolução das trincas durante o processo de fratura. Assim, num caso real com a propagação heterogênea das trincas, os valores fractais são descritores do processo termodinâmico da fratura, e não propriedades características de estado, ao contrário do que propõe Mecholsky para a propagação de trincas à velocidade constante. Ou seja, o relevo das superfícies de

fratura expõe características do comportamento local da interação do campo de tensões à frente da trinca com a microestrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio semi-circular bending. Fractal. Resina fenólica. Processamento digital de imagens.

Marion, A. O. **Fractal analysis of fracture under elastic:** phenolic resin mode I loading. 2011. 46f. Thesis (Graduate Work in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011

ABSTRACT

For the development of this graduate work of fractal fracture behavior, it is necessary to establish references for fractal analysis on fracture surfaces, evaluating, from tests of fracture tenacity on modes I, II and combined I / II, the behavior of fractures in fragile materials, on linear elastic regime. Fractures in the linear elastic regime are described by your fractal behavior by several researchers, especially Mecholsky JJ. The motivation of that present proposal stems from work done by the group and accepted for publication in the journal Materials Science and Engineering A (Horovistiz et al, 2010), where the model of Mecholsky could not be proven for fractures into grooved specimens for tests of diametric compression of titania on mode I. The general objective of this proposal is to quantify the distinguish surface regions formed by different mechanisms of fracture propagation in linear elastic regime in polymeric specimens (phenolic resin), relating tenacity, thickness of the specimens and fractal dimension. The analyzed fractures were obtained from SCB tests in mode I loading, and the acquisition of images taken using an optical reflection microscope and the surface topographies obtained by the extension focus method of reconstruction, calculating the values of fractal dimension with the use of maps of elevations. The fractal dimension was classified as monofractal dimension (D_f), when the fracture is described by a single value, or texture size (D_t), which is a macroscopic analysis of the fracture, combined with the structural dimension (D_s), which is a microscopic analysis. The results showed that there is no clear relationship between tenacity, thickness and fractal values for the material investigated. On the other hand it is clear that the fractal values change with the evolution of cracks during the fracture process. Thus, in a real case with heterogeneous propagation of cracks, the fractal values are descriptors of the thermodynamic process of fracture, and not characteristic properties of state, unlike the proposed by Mecholsky about crack propagation at constant speed. In other words, the distinguish surfaces of the fracture exposes particulars of the local behavior of interaction between the microstructure and the stress field ahead the crack.

KEY-WORDS: semi-circular bending test. Fractal. Phenolic resin. Digital image processing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma característica assintótica com o aumento de sua massa molecular (CANEVAROLO, 2002).....	12
Figura 2 - Diagrama esquemático da síntese e reações de cura de resinas fenólicas do tipo resol e novolac (CANEVAROLO, 2002).....	13
Figura 3 - Tipos de resinas fenólicas obtidas em função da razão formaldeído/fenól e peso molecular resultante (CANEVAROLO, 2002).....	14
Figura 4 - Fractais formados através de funções iteradas: (a) Curva de Peano; (b) Floco de Neve de Koch.....	16
Figura 5 - Conjunto de Mandelbrot.	16
Figura 6 - Exemplo de emprego da rotina de reconstrução por extensão de foco. (a) sequência de imagens, em progressão sucessiva de foco. (b) Imagem obtida pela combinação das regiões em foco das imagens em a.(c) mapa de elevações obtido da reconstrução do foco.	21
Figura 7 - Exemplo de emprego da rotina de reconstrução por paralaxe, a partir de um par estéreo. (a) projeção esquerda -4^0 ; (b) projeção direita $+4^0$; (c) mapa de reconstrução 3D.....	22
Figura 8 - Os três modos gerais de carregamento em um sólido infinito com uma trinca e comportamento elástico. (a) modo I, modo de abertura por tração. (b) modo II, modo de abertura por cisalhamento. (c) modo III, modo de abertura por rasgamento (EFFTING, 2004).....	23
Figura 9 - Corpo de prova para o ensaio SCB (Ahaollahi, 2004).	24
Figura 10 - Fatores geométricos YI e YII para o modo I puro e modo II puro para diferentes valores de a / R e S / R (Ahaollahi, 2004).	25
Figura 11 - Angulo do entalhe correspondente ao modo II puro para diferentes valores de a/R e S/R (Ahaollahi, 2004).	26
Figura 12 - O fator normalizado $T*II$ do modo II puro para diferentes valores de a/R e S/R (Ahaollahi, 2004).	27
Figura 13 - Embutidora Panpress 30.	28
Figura 14 - Corpo de prova polimérico cilíndrico.....	29
Figura 15 - Serra de precisão Buehler Isomet 1000.	29
Figura 16 - Processo de fabricação dos corpos de prova. (a) corpo de prova obtido apos o embutimento e os planos de corte transversal para obtenção dos cilindros de diferentes espessuras. (b) corte longitudinal. (c) corte do entalhe.....	30
Figura 17 - Gráfico gerado pela máquina servo-elétrica Shimadzu AGX do ensaio SCB.....	31
Figura 18 - Esquema de pilhas de imagens (ampliação de 200x).	33
Figura 19 - Imagem totalmente focada (ampliação de 200x).....	33
Figura 20 - Mapa de elevações (ampliação de 200x)	34
Figura 21 - Mapa 3D de elevações.	34
Figura 22 - (a) Mapa de elevação original; (b) respectivo histograma.....	35
Figura 23 - (a) Mapa de elevação dividido por 2; (b) respectivo histograma.	35
Figura 24 - Cálculo da dimensão fractal com o uso do método box-counting, onde o coeficiente angular da reta é igual a dimensão fractal.....	36
Figura 25 - Gráfico do espalhamento dos pontos do método box counting com o uso da derivada.....	37
Figura 26 - Cálculo da dimensão textural (D_t) e dimensão estrutural (D_s) através do coeficiente angular da reta.	37
Figura 27 - Correlação entre dimensão fractal e o fator de intensidade de tensão.	41

Figura 28 - Correlação entre dimensão fractal média e o fator de intensidade de tensão.	41
Figura 29 - Gráfico de Dimensão Fractal ao longo da superfície fraturada.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de KI.....	39
Tabela 2 - Valores de KI.....	39
Tabela 3 - Valores de KI.....	40
Tabela 4 - Valores de KI.....	40
Tabela 5 - Valores de dimensão monofractal, dimensão textural e dimensão estrutural.	40
Tabela 6 - Valores de R2 dos valores de dimensão fractal.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 Material Polimérico	11
2.1.1 Resina Fenólica (Fenol-Formaldeído).....	12
2.2 Fractografia.....	15
2.2.1 Fractal.....	15
2.2.2 Dimensão Fractal.....	17
2.2.3 Multifractal	18
2.2.4 Modelo de Mecholsky	19
2.3 Análise Digital de Imagens	20
2.4 Modos de Carregamento.....	22
2.5 Ensaio SCB (Semi-Circular Bend).....	23
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Preparação dos corpos de prova poliméricos	28
3.2 Ensaio SCB (Semi-Circular Bend).....	30
3.3 Análise de imagens digitais	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Resultados	38
4.2 Discussão	43
5 CONCLUSÃO.....	44
6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	45

1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento da presente linha de pesquisas sobre o comportamento fractal de fraturas, é necessário estabelecer referências para a análise fractal de superfícies de fratura, avaliando, a partir de ensaios de tenacidade à fratura nos modos I, II e misto I/II, o comportamento de fraturas em materiais frágeis, sob o regime linear elástico. Fraturas em regime linear elástico são descritas por seu comportamento fractal por vários pesquisadores, em especial J.J. Mecholsky. A motivação da presente proposta decorre de um trabalho feito pelo grupo e aceito para publicação no periódico *Materials Science and Engineering A* (Horovistiz et al, 2010), onde o modelo de Mecholsky não pôde ser comprovado para a fratura em corpos de prova ranhurados para ensaios de compressão diametral de titânia sob o modo I. O desenvolvimento desses ensaios trouxe ao grupo, que desenvolve outros projetos de pesquisa financiados pela FAPESP e pelo CNPq sobre fractografia quantitativa, uma série de questões que serão abordadas na presente proposta, como: a garantia da acuidade na medição de elevações para os mapas topográficos e do posicionamento das amostras, a confiabilidade e representatividade das medidas de dimensão fractal, os critérios para a abordagem multifractal e a validade dos modelos ora propostos para a relação entre tenacidade e comportamento fractal de superfícies de fratura.

O presente projeto propõe a realização de ensaios de flexão semicircular (SCB, semi-circular bending) em corpos entalhados e pré-trincados, para a geração e análise de fraturas no modo I de carregamento (modo de abertura por tração), em materiais como uma cerâmica estrutural (titânia) e um polímero (resina fenólica), sempre sob regime linear-elástico. Ainda, para abordar o comportamento auto-afim dos materiais fraturados e criar referências ao processo de reconstrução tridimensional de superfícies, as topografias das fraturas serão investigadas por microscopia de força atômica, em modo de contato.

Assim, visa ampliar a profundidade e o alcance de projetos já em andamento, e disponibilizar referências e métodos para a avaliação fractal de superfícies de fratura.

1.1 Objetivo

O objetivo geral desta proposta quantificar as regiões de relevo formadas pelos diferentes mecanismos de propagação de trincas na fratura sob regime linear elástico, visando prover recursos para auxiliar em análises de falhas de componentes ou na estimativa de parâmetros de comportamento mecânico, como a tenacidade à fratura, para o projeto de componentes estruturais.

Para atender a este objetivo geral, devem ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliação dos parâmetros de ajuste de rotina para reconstrução por extensão de foco, para a medição da topografia e reconstrução de imagens obtidas a partir de pilhas de imagens feitas por microscopia óptica, em diferentes e sucessivas posições de foco;
- b) Descrever o contexto fractal ou multifractal de fraturas sob regime linear elástico em polímeros;
- c) Caracterizar o comportamento multifractal para relacionar a influência dos modos de carregamento sobre a ativação de micromecanismos;
- d) Avaliar a correlação entre tenacidade, dimensão fractal e micromecanismos de fratura em regime linear elástico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Material Polimérico

A palavra polímero tem origem do grego *poli* (muito) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligações covalentes. A matéria prima para produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, elastômero e fibras (CANEVAROLO, 2002).

- Plásticos: material polimérico de alta massa molecular, sólido como produto acabado. Os plásticos podem ser divididos em:
 - ✓ Termoplásticos: plásticos com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeito a um aumento de temperatura e pressão. Quando é retirado desse processo, o polímero solidifica em um produto com forma definida. Este processo pode ser realizado repetidas vezes, essas alterações físicas são reversíveis. Em polímeros semicristalinos, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina.
 - ✓ Polímero que não pode ser dissolvido ou aquecido até altas temperaturas de forma a permitir deformação contínua. Os termoplásticos se tornam termofixos através de crosslinks (ramificações).
- Elastômeros: polímero que a temperatura ambiente pode ser deformado repetidamente ao menos duas vezes o seu comprimento original. Retirando o esforço, o elastômero volta rapidamente ao tamanho original. Podem ser sintéticos ou naturais.
- Fibras: termoplásticos orientados com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (eixo maior). Deve satisfazer a condição geométrica do comprimento ser no mínimo cem vezes maior que o diâmetro ($L / D > 100$) (CANEVAROLO, 2002).

Muitas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula e de sua massa molecular. Como polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molecular, é de se esperar grandes variações em suas propriedades. Alterações no tamanho da molécula, quando esta é pequena, provocam grandes mudanças nas suas propriedades físicas. Essas alterações tendem a ser menores com o aumento do tamanho da molécula, sendo que para polímeros as diferenças ainda existem, mas são pequenas. Isso é

vantajosamente usado, produzindo-se comercialmente vários tipos (grades) de polímeros para atender as necessidades particulares de uma dada aplicação ou técnica de processamento. A Figura 1 apresenta de forma esquemática, a variação de uma propriedade física geral com o aumento da massa molecular. A variação é assintótica (crescente, como apresentado, ou decrescente), tendendo para um valor que normalmente é usado para referenciamento.

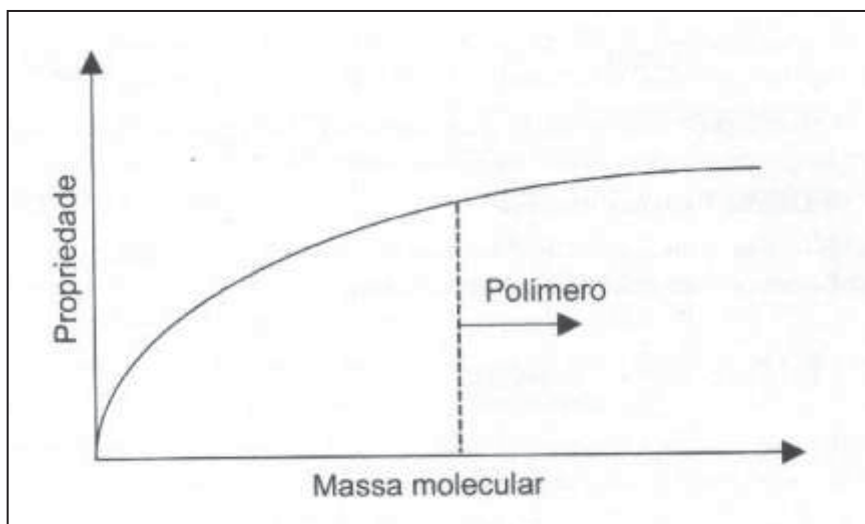


Figura 1- Propriedades apresentadas pelos polímeros variam de forma característica assintótica com o aumento de sua massa molecular (CANEVAROLO, 2002).

Nem todos os compostos de baixa massa molecular geram polímeros. Para sua síntese, é necessário que pequenas moléculas (monômeros) se liguem entre si para formar a cadeia polimérica. Assim, cada monômero deve ser capaz de se combinar com outros dois monômeros no mínimo, para ocorrer a reação de polimerização. Os números de pontos reativos por molécula é chamado de funcionalidade, portanto o monômero deve ter pelo menos funcionalidade 2. A bifuncionalidade pode ser obtida com a presença de grupos funcionais reativos e/ou duplas ligações reativas (CANEVAROLO, 2002).

2.1.1 Resina Fenólica (Fenol-Formaldeído)

As resinas fenol-formaldeído foram inventadas no ano de 1909 pelo químico belga Leo Baekeland, que empreendeu suas pesquisas entre 1907 a 1909 e criou, em 1910, a General Bakelite Company para a exploração industrial de suas descobertas (DUBOIS, 1972).

A síntese de resinas fenólicas é realizada utilizando a mistura de fromaldeído e fenól,

conforme mostra esquematicamente a Figura 2. O formaldeído é bifuncional (pode formar duas ligações) e o fenól trifuncional (pode formar três ligações, em uma posição para duas posições orto). A reação completa dos dois produtos é, portanto, na razão molar 3:2. A Figura 3 mostra um gráfico onde é mostrado o tipo de resina fenólica obtida em função da razão molecular formaldeído/fenól e qual massa molecular obtida após a síntese. Como mostra o gráfico, as resinas fenólicas são divididas em dois grupos: novolacas e resóis.

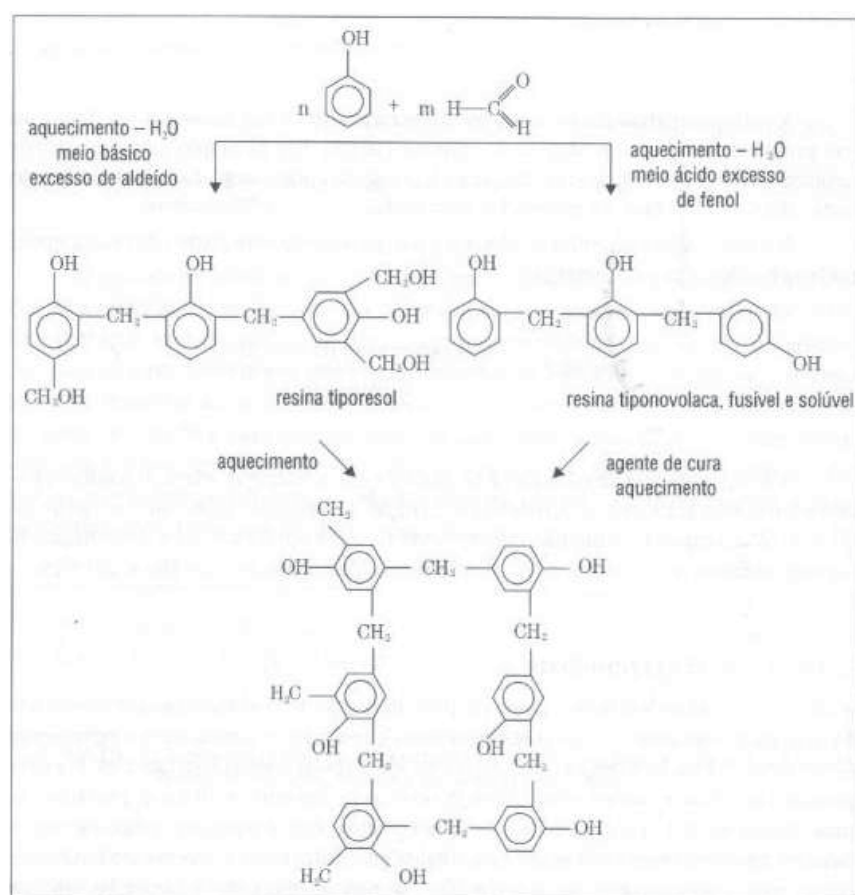


Figura 2 - Diagrama esquemático da síntese e reações de cura de resinas fenólicas do tipo resol e novolac (CANEVAROLO, 2002).

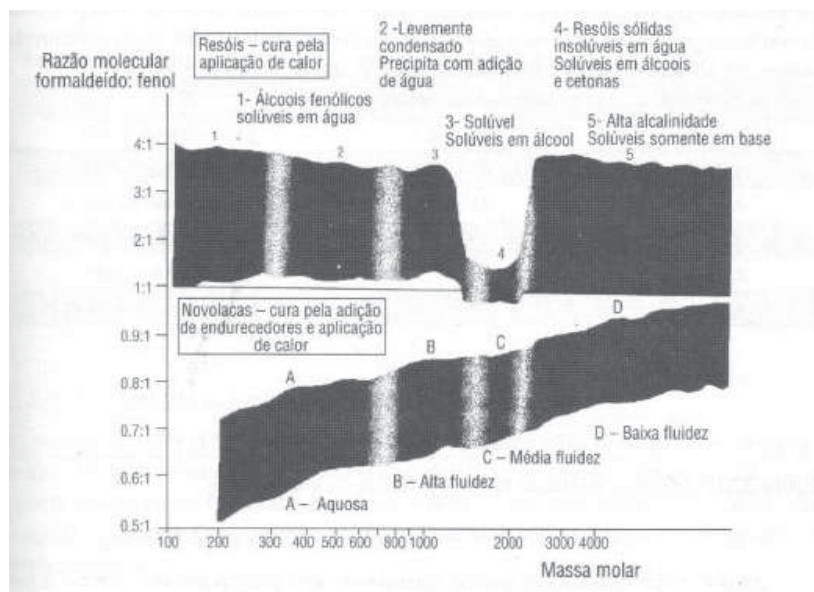


Figura 3 - Tipos de resinas fenólicas obtidas em função da razão formaldeído/fenól e peso molecular resultante (CANEVAROLO, 2002).

As resinas novolacas são conhecidas como de dois estágios, sendo normalmente sinterizadas com menor quantidade de formaldeídos ($< 0,88$ mol formaldeído / mol de fenól). Para o processo de adição de um produto capaz de fornecer o restante de formaldeído ou equivalente para a reação. Invariavelmente, utiliza-se hexametileno tetramina ($C_6H_6N_4$), que age como uma mistura de formaldeídos e amônia. O subproduto da reação é normalmente amônia.

As resinas fenólicas do tipo resol são conhecidas como resinas de um estágio e são sintetizadas com catalizadores básicos e com formaldeído na quantidade necessária para permitir a reação completa. A reação é interrompida com resfriamento logo que algumas ligações cruzadas estão presentes, o que representa um risco se a reação é levada a um ponto onde a resina torna-se sólida à temperatura ambiente. Por esse motivo, aplicações destas resinas geralmente utilizam soluções líquidas ou resinas parcialmente reagidas (NETO, 2006).

As principais características das resinas fenólicas são: peso baixo molecular (insolúvel), densidade entre $1,36$ e $1,46 \text{ g/cm}^3$ (com carga celulósica), termorrígido e opaco. Suas propriedades principais são (MANO, 2003):

- Alta resistência mecânica;
- Alta resistência térmica;
- Boa resistência química;
- Estabilidade dimensional;

- Baixo custo;
- Etc.

2.2 Fractografia

A fractografia é uma das principais ferramentas utilizadas no processo de análise de falhas. Consiste em identificar aspectos fractográficos e estabelecer as relações entre a presença, ou ausência desses aspectos com a seqüência de eventos da fratura, podendo levar à determinação do carregamento e condições dos esforços no momento da falha. A fractografia confirma ou remove as suspeitas que possam recair sobre os modos de falha ocorridos.

Esta ferramenta é a chave para se determinar a seqüência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientais (temperatura, umidade e etc), tipo de carregamento, defeitos do material e outras anomalias que podem contribuir para o início, crescimento e término da fratura também podem ser avaliados pelo uso da fractografia. Normalmente, esta área da pesquisa faz uso de diferentes técnicas, podendo-se citar a observação visual, óptica macroscópica, seguida da microscópica óptica, microscopia eletrônica de varredura e, em alguns casos, microscopia eletrônica de transmissão (Rezende, 2007). Dentro deste campo, a fractografia quantitativa utiliza parâmetros numéricos para caracterizar a morfologia de superfícies de fratura. Estes parâmetros são denominados: fractal e multifractal (Lauschmann, 2007).

2.2.1 Fractal

O fractal é um objeto que não perde a sua definição formal à medida que é ampliado inúmeras vezes, mantendo a sua estrutura idêntica à original. Outra definição, um objeto é dito fractal se além da independência da escala, a dimensão Hausdorff ou dimensão fractal do mesmo for diferente do que a sua dimensão topológica. A dimensão Hausdorff deve ser diferente da dimensão topológica ou dimensão do espaço em que o fractal está inserido, isto quer dizer que ela deve ser diferente da dimensão de objetos Euclidianos como o ponto, a reta ou o plano, devem estar entre tais.

Os fractais podem ser agrupados em três categorias principais. Estas categorias são determinadas pelo modo como o fractal é formado ou gerado:

- Sistema de funções iteradas possuem uma regra fixa de substituição geométrica. Exemplos: Conjunto de Cantor, Curva de Peano, Floco de Neve de Koch (Figura 4).

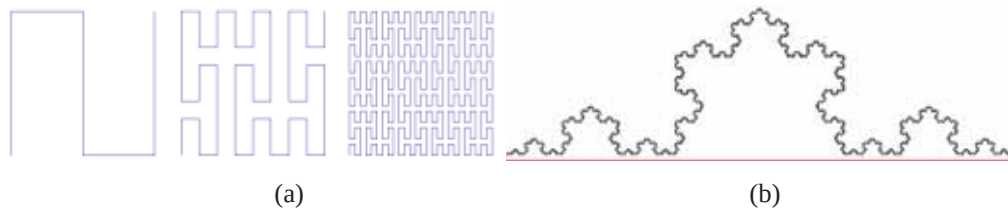


Figura 4 - Fractais formados através de funções iteradas: (a) Curva de Peano; (b) Floco de Neve de Koch

- Fractais definidos por uma relação de recorrência em cada ponto do espaço. Exemplos: Conjunto de Mandelbrot (Figura 5) e o Fractal de Lyapunov. Estes também são chamados de fractais de fuga do tempo.

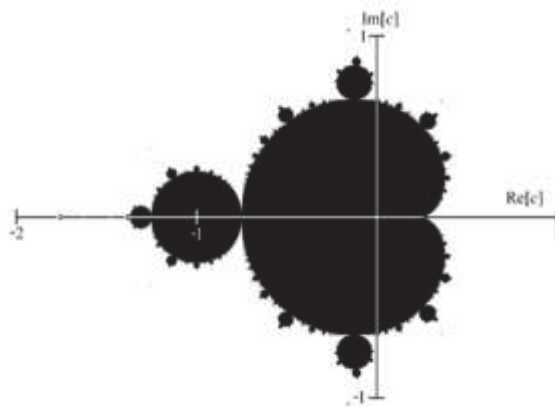


Figura 5 - Conjunto de Mandelbrot.

- Fractais aleatórios, gerados por processos estocásticos ao invés de determinísticos. Exemplo: Terrenos Fractais e o Vôo de Lévy.

Ainda, também podem ser classificados de acordo com sua autossimilaridade. Existem três tipos de autossimilaridade encontrados em fractais:

- Autossimilaridade exata: é a forma em que a autossimilaridade é mais marcante, evidente. O fractal é idêntico em diferentes escalas. Fractais gerados por sistemas de funções iterativas geralmente apresentam uma autossimilaridade exata.
- Quase-autossimilaridade: é uma forma mais comum de autossimilaridade. O fractal aparenta ser aproximadamente (mas não exatamente) idêntico em escalas diferentes. Fractais quase-autossimilares contém pequenas cópias do fractal inteiro de maneira distorcida ou degenerada. Fractais definidos por relações de recorrência são geralmente quase-autossimilares, mas não exatamente autossimilares.
- Autossimilaridade estatística: é a forma menos evidente de autossimilaridade. O fractal possui medidas numéricas ou estatísticas que são preservadas em diferentes escalas. As definições de fractais geralmente implicam alguma forma de autossimilaridade estatística (mesmo a dimensão fractal é uma medida numérica preservada em diferentes escalas). Fractais aleatórios são exemplos de fractais que possuem autossimilaridade estatística, mas não são exatamente nem quase autossimilares.

Pelo fato do fractal possuir uma granulometria infinita, nenhum objeto natural pode sê-lo. Os objetos naturais podem exibir uma estrutura semelhante ao fractal, porém com uma estrutura de tamanho limitado. Num processo de fratura, esse fato é pronunciado pelas heterogeneidades na velocidade de propagação da frente da trinca.

2.2.2 Dimensão Fractal

Na geometria euclidiana os objetos são considerados como tendo uma, duas ou três dimensões, sendo o valor da dimensão um indicador da quantidade de espaço que ocupa um objeto. Porém, os fractais não se enquadram nesta classificação e a dimensão fractal surge, então, como uma alternativa de medição desses novos objetos.

A dimensão fractal é definida por números não-inteiros, que indicam o grau de complexidade e irregularidade que o fractal possui, ou seja, o quanto do espaço físico ele ocupa. A geometria irregular apresentada pelo fractal é considerada como a transição entre

duas outras geometrias regulares. Sendo assim, uma curva fractal tem uma dimensão entre uma linha reta e um plano ($1 < D < 2$), enquanto que a superfície fractal de um objeto tem uma dimensão entre um plano e um volume ($2 < D < 3$) (UNDERWOOD; BANERJI, 1987; RUSS, 1994; HOROVISTIZ, 2000).

O cálculo da dimensão fractal (D) pode ser feito considerando uma linha de comprimento L, que é dividida em N partes iguais, sendo que cada segmento desta reta é $u = L/N$. Deste modo pode ser dito que:

$$N = \left(\frac{L}{u}\right)^D \quad (1)$$

Aplicando o logaritmo na equação (1):

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{u}\right)} \quad (2)$$

Para um objeto compacto e uniforme, D é um número inteiro igual a uma das dimensões da geometria euclidiana, mas para um fractal, tem-se que D é igual a um número fracionário.

2.2.3 Multifractal

Há estudos que mostram que em superfícies de fratura reais uma única dimensão fractal não é suficiente para descrevê-la, pois objetos reais possuem similaridade localizada em pequenas faixas de ampliação, devido à heterogeneidade intrínseca dos processos de propagação de trincas.

Objetos reais não apresentam o mesmo comportamento fractal sobre qualquer faixa de ampliação, sendo possível identificar o limite inferior e superior desta faixa. O limite inferior pode ser estabelecido como sendo uma combinação de fatores de microscopia, tais como ampliação e resolução, e fatores inerentes à natureza do objeto. Por outro lado, o limite superior é o próprio tamanho do objeto (HOROVISTIZ, 2000). Superfícies ou perfis de fratura com diferentes dimensões fractais são caracterizados por diferentes valores (HOROVISTIZ, 2000).

Brian Kaye (1989) publicou vários trabalhos relacionados a fractais mistos, onde conseguiu identificar dois segmentos de reta nos gráficos que fazia para cálculo da dimensão fractal. Estes segmentos de reta receberam a denominação de “textural” e “estrutural”, de acordo com a posição em que estavam no gráfico. A dimensão “textural” (D_t) corresponde ao coeficiente angular da reta de menor inclinação, onde a escala de ampliação é pequena e descreve um processo físico que controla a rugosidade da superfície. Enquanto que a dimensão “estrutural” (D_s) é dada pela reta de maior inclinação, onde os valores da escala são maiores e as características estruturais do material se emergem.

2.2.4 Modelo de Mecholsky

As relações entre fratura e fractais tem sido alvo de muitos pesquisadores, sendo que, alguns deles, como Mecholsky (2006) e Carpinteri e Pugno (2005), atribuem valores únicos para a dimensão fractal (D) de fraturas em materiais frágeis. Estes valores de dimensão fractal são assumidos como propriedades dos materiais e são relacionados aos valores de resistência, como a resistência teórica ou a tenacidade à fratura (CARPINTERI; CHIAIA; CORNETTI, 2004).

A proposta de Mecholsky é que o movimento não-uniforme na frente da trinca se deve a mudanças na entropia configuracional, que implica na reconfiguração dos eventos de ligação interatômica e conduz a mudanças descontínuas da geometria na ponta da trinca (MECHOLSKY, 2006).

O modelo de Mecholsky se baseia em experimentos realizados de forma a controlar a velocidade de propagação das trincas, mantendo-as sempre muito lentas para que a propagação aconteça de forma estável. Neste modelo, a resistência teórica (σ_t) pode ser calculada em função do módulo de Young (E) e da dimensão fractal (D) da superfície, conforme a equação (3).

$$\sigma_t = E\sqrt{D/2\pi} \quad (3)$$

Modelos para a tenacidade à fratura (K_C) e para a energia de fratura (G_C) também foram propostos por Mecholsky, seguindo sua linha de raciocínio, conforme apresentado nas equações (4) e (5).

$$K_C = K_0 + E\sqrt{a_0 \cdot (D - 2)} \quad (4)$$

$$G_C = G_0 + \frac{a_0 \cdot E \cdot (D - 2)}{2} \quad (5)$$

Sendo a_0 uma dimensão característica relacionada à escala do processo e determinada experimentalmente (WEST et al., 1999). O modelo de Mecholsky limita-se a fraturas com comportamento absolutamente frágil, com aspecto “espelho + névoa + crista de galo”, com rugosidade progressiva a partir da nucleação de acordo com o crescimento da velocidade de propagação da trinca (PLANGSANGMAS; MECHOLSKY; BRENNAN, 1999). Contudo, esta é uma limitação mais forte do que aparenta, já que Mecholsky se limita a casos de fratura com velocidade constante de propagação de trincas, o que não corresponde à realidade da maioria das falhas por fratura.

Para criar seu modelo, Mecholsky usou duas amostras para cada tipo de material analisado, sendo que para cada amostra foram feitas de 8 a 10 imagens, com ampliações de 400x e o método usado para medição da dimensão fractal foi o “slit-island” (HILL et al, 2001).

2.3 Análise Digital de Imagens

Na reconstrução de relevos por microscopia óptica convencional, o método mais difundido é o da reconstrução por extensão de foco, onde uma pilha de imagens, obtida com o posicionamento ordenado e sucessivo da objetiva para diferentes planos de foco, é processada para identificação das regiões com melhor índice de nitidez (ou foco), obtendo duas saídas: uma imagem completamente focada e um mapa de elevações, caso as imagens sejam capturadas para posições de foco com espaçamento regular (Horovistiz, et al., 2003). O índice de nitidez é determinado, normalmente, pelo uso de filtros digitais passa-alta (Horovistiz, et

al., 2003), ou relações de vizinhança (Goldsmith, 2000). A Figura 6 mostra um exemplo da aplicação de uma rotina desenvolvida no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMat), do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da FEG/UNESP. Neste caso, tanto o mapa de elevações quanto a imagem reconstruída guardam semelhanças de textura devido ao caráter extremamente rugoso da fratura, o que também costuma ocorrer mesmo quando a fratura apresenta regiões lisas, como no caso da formação de regiões de “espelho” em resina epóxi (Plangsangmas, et al., 1999). Como esta técnica depende de parâmetros como distância de trabalho, profundidade de foco, abertura numérica e controle do movimento vertical de objetivas na microscopia óptica, a representação de regiões de dimensões nanométricas, como interfaces em compósitos carbono/epóxi, sua aplicação fica restrita para a descrição dos micromecanismos de maior extensão sobre a superfície de fratura, o que é bastante significativo na maioria dos casos, sendo suficiente para avaliar boa parte dos efeitos de degradação, por exemplo, utilizando ampliações de até 500 X, sem qualquer necessidade de recobrimento.

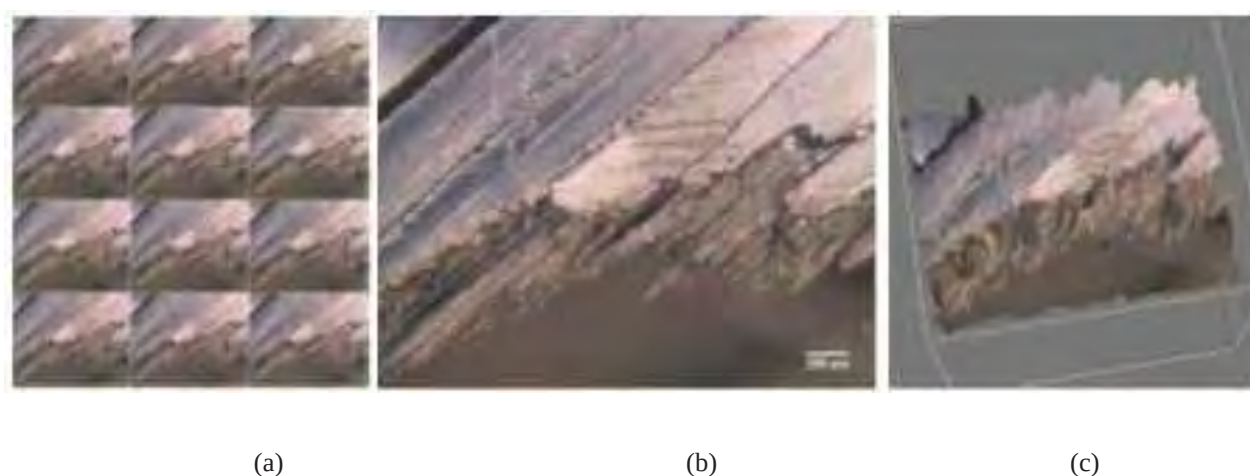


Figura 6 - Exemplo de emprego da rotina de reconstrução por extensão de foco. (a) sequência de imagens, em progressão sucessiva de foco. (b) Imagem obtida pela combinação das regiões em foco das imagens em a.(c) mapa de elevações obtido da reconstrução do foco.

Devido à limitação na distância de trabalho das objetivas na microscopia óptica, para ampliações maiores que 500 X, a técnica mais indicada (Hein, 2001) é a reconstrução por medidas de paralaxe, a partir de pares estereoscópicos obtidos por microscopia eletrônica de varredura. Neste caso, conceitos de reconhecimento de padrões são empregados para identificar regiões semelhantes entre as imagens do par estéreo, para medir seu deslocamento relativo (paralaxe), que será proporcional às diferenças locais de elevação. A Figura 7 apresenta um exemplo de aplicação desta técnica.

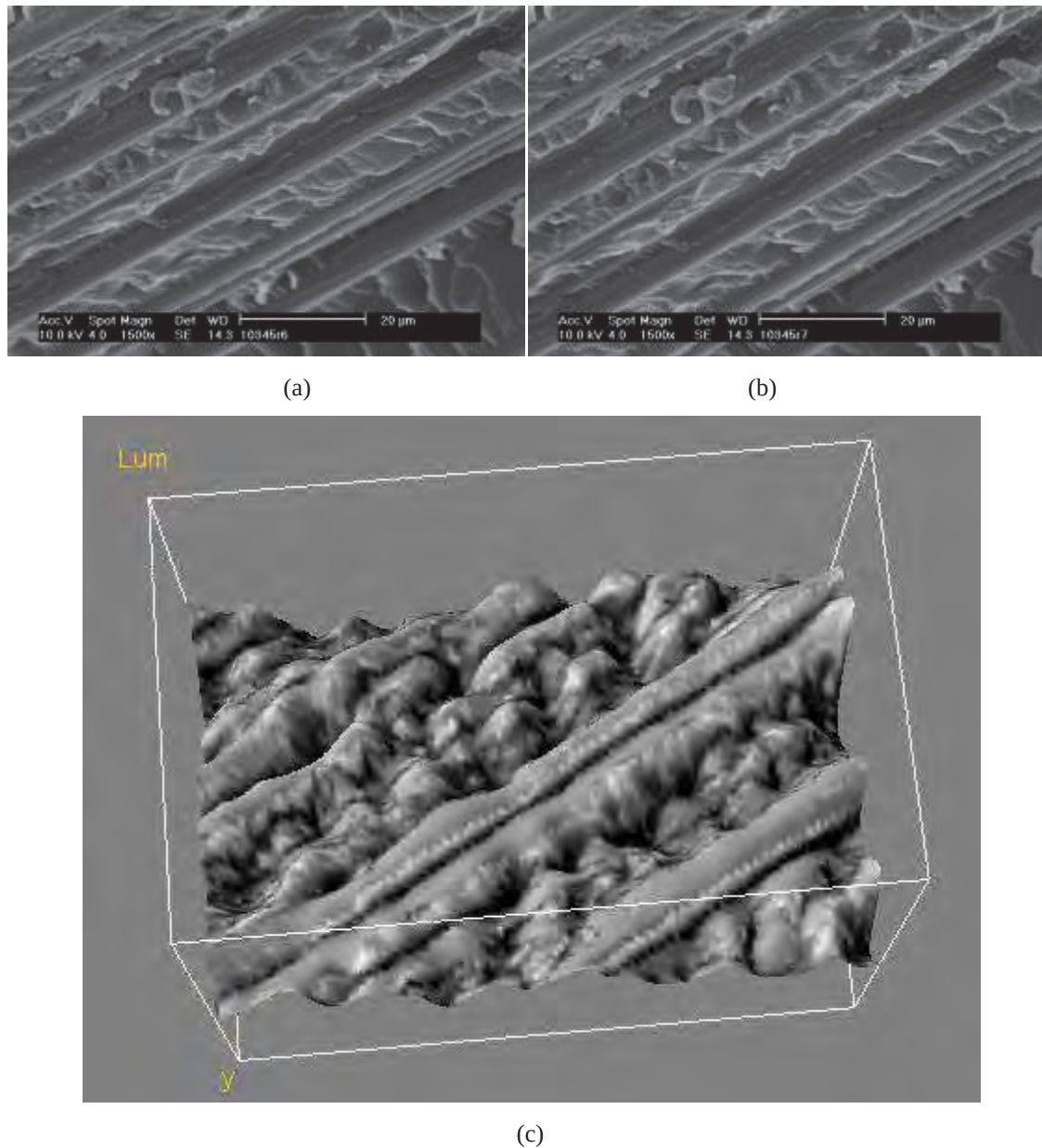


Figura 7 - Exemplo de emprego da rotina de reconstrução por paralaxe, a partir de um par estéreo. (a) projeção esquerda -4° ; (b) projeção direita $+4^{\circ}$; (c) mapa de reconstrução 3D.

2.4 Modos de Carregamento

Há três tipos gerais de fratura ou modos de ruptura em que os materiais sólidos podem estar sujeitos. Dado um sólido infinito de comportamento puramente elástico e que neste sólido haja a inserção de uma trinca de tamanho arbitrário (Figura 8), pode-se encontrar os

estados de tensões na ponta da trinca para cada um dos três tipos gerais de carregamento ilustrados abaixo (EFFTING, 2004):

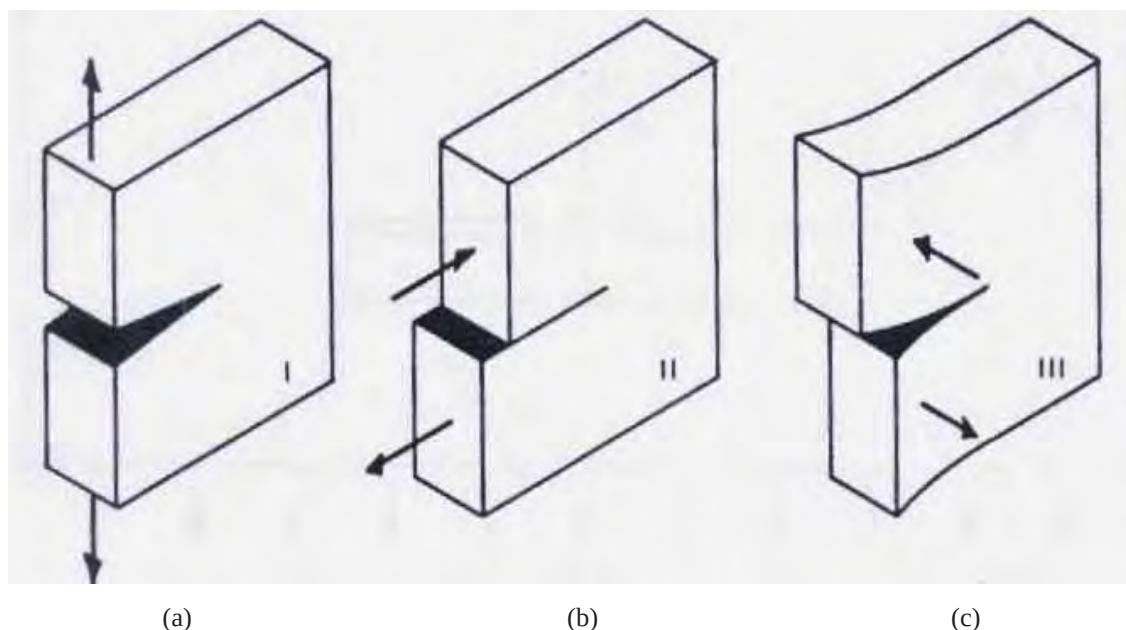


Figura 8 - Os três modos gerais de carregamento em um sólido infinito com uma trinca e comportamento elástico. (a) modo I, modo de abertura por tração. (b) modo II, modo de abertura por cisalhamento. (c) modo III, modo de abertura por rasgamento (EFFTING, 2004)

2.5 Ensaio SCB (Semi-Circular Bend)

Para analisar a resistência à fratura dos materiais, muitos testes são feitos. Alguns testes são específicos para analisar a propagação de trincas ao longo da peça. Estes testes analisam a fratura de diferentes formas, podendo ser usados para o Modo I, Modo II e também Modo Misto de fraturas.

Entre tantos ensaios feitos para este tipo de análise, há o Semi-Circular Bend (SCB). Este teste tem sido muito escolhido por pesquisadores, pois possui poucas operações mecânicas, os corpos de prova são simples de serem preparados, e necessita de apenas um ensaio comum de flexão em três - pontos. Chong e Kuruppu (1984) foram os primeiros que sugeriram uma amostra semi-circular para a realização de testes de fratura em materiais frágeis.

Como mostrado na Figura 9 o corpo de prova é um disco semi-circular de raio R com um entalhe angulado de um comprimento “ a ” fabricados a partir do centro do semi-círculo. O fator de intensidade K_I (equação 6) e K_{II} (equação 7) para o espécime SCB são escritos como:

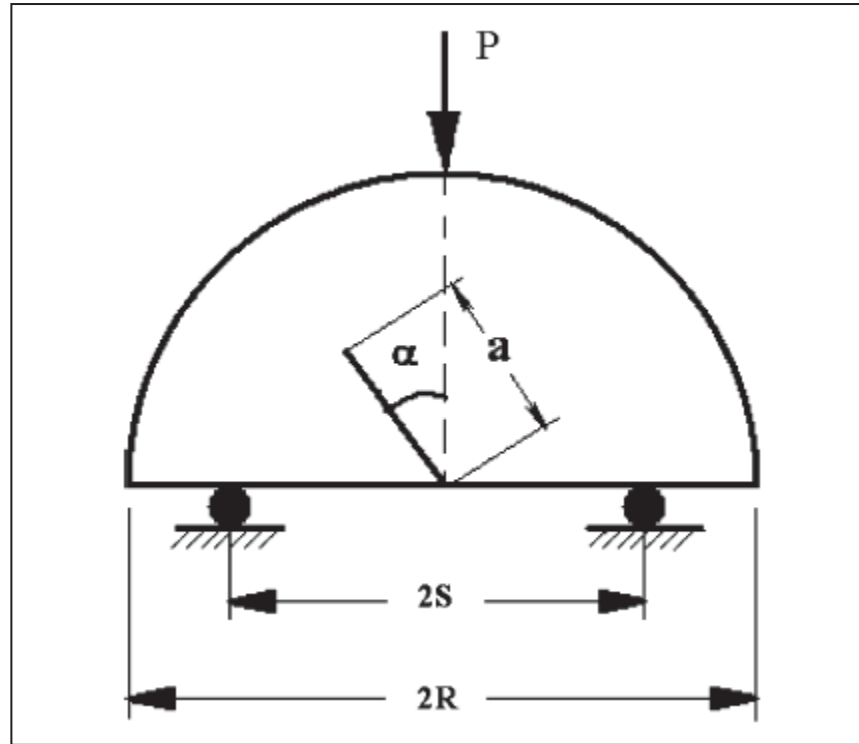


Figura 9 - Corpo de prova para o ensaio SCB (Ahaollahi, 2004).

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2Rt} Y_I \quad \left(\alpha, \frac{a}{R}, \frac{S}{R} \right) \quad (6)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2Rt} Y_{II} \quad \left(\alpha, \frac{a}{R}, \frac{S}{R} \right) \quad (7)$$

Onde P é a carga compressiva aplicada e t é a espessura do corpo de prova. Para o modo I e II fatores geométricos de Y_I e Y_{II} , respectivamente, são funções da relação comprimento do entalhe pelo raio do corpo de prova (a / R), a metade da extensão do raio relação S / R e o ângulo do entalhe (que é o ângulo entre a linha do entalhe e a direção vertical). Diferentes combinações de modo I e II de modo pode ser fornecidas pela mudança do ângulo do entalhe e as relações a / R e S / R . Vários pesquisadores ter usado tanto técnicas analíticas ou numéricas para o cálculo dos factores Y_I e Y_{II} (por exemplo, Kuruppu e Chong, 1984; Ayatollahi e Aliha, 2004). A Figura 10 mostra os resultados de elementos finitos.

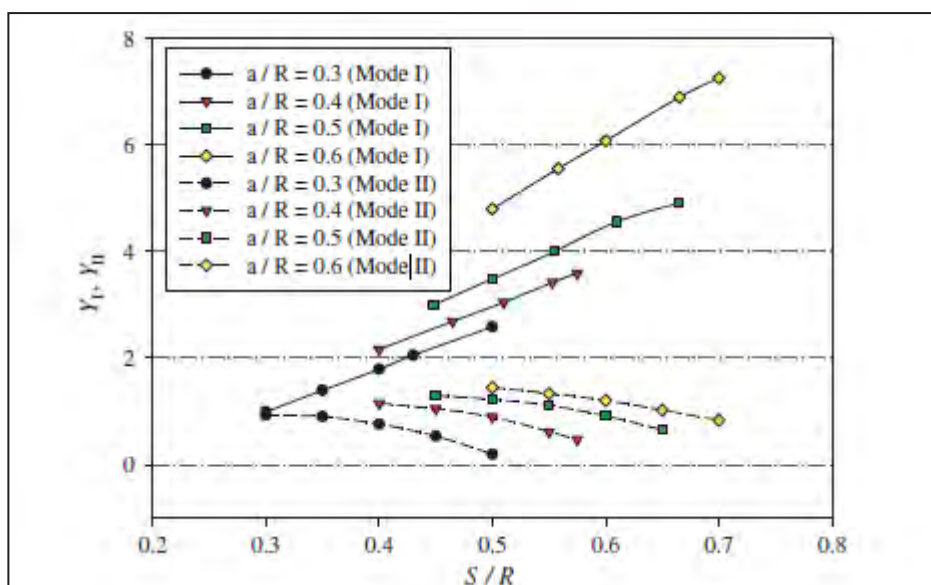


Figura 10 - Fatores geométricos Y_I e Y_{II} para o modo I puro e modo II puro para diferentes valores de a/R e S/R (Ahaollahi, 2004).

Os valores de Y_I e Y_{II} correspondentes ao modo I puro e puro modo II, respectivamente, para vários valores de a/R e S/R (Ayatollahi e Aliha, 2004). Quando α é igual a zero, a amostra é sempre submetido ao modo I puro. No entanto, o modo II é atingido em diferentes ângulos α , dependendo de a/R e S/R . A Figura 11 mostra os valores de α correspondentes ao modo II puro em uma amostra para SCB em várias proporções de a/R e S/R . Para o modo I, valores superiores de α o fator de intensidade se torna negativo. Ayatollahi e Aliha (2004) utilizaram as propriedades do caminho independente da integral J para o cálculo dos fatores de intensidade de tensão. A integral J_I foi obtida diretamente do ABAQUS, que usa o método modificado de extensão virtual de trinca proposto por Li et al. (1985).

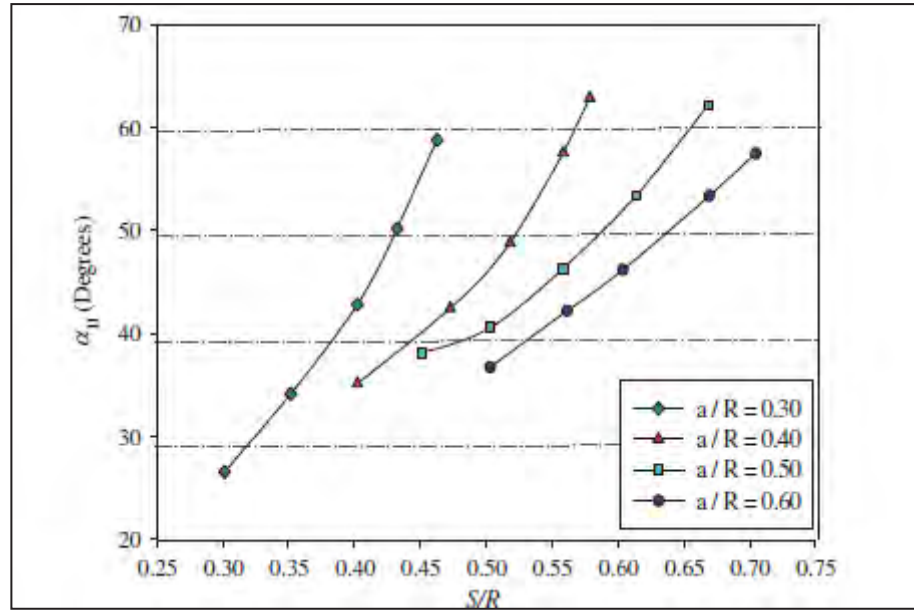


Figura 11 - Ângulo do entalhe correspondente ao modo II puro para diferentes valores de a/R e S/R (Ahaollahi, 2004).

Na definição do fator intensidade de tensão para a descrição das tensões na vizinhança da ponta da trinca, o primeiro termo de tensão regular (também conhecido como T-stress) tem efeitos significativos sobre a fratura frágil em modo II puro e modo misto I / II de carregamento. A T-stress foi calculada para amostras semi-circulares descritas por Ayatollahi e Aliha (2004) usando o método dos elementos finitos e uma técnica de diferença de tensões (Ayatollahi et al. , 1998). Eles fizeram uso de um parâmetro adimensional, T^* e obtiveram:

$$T^* \left(\alpha, \frac{a}{R}, \frac{S}{R} \right) = T \frac{2Rt}{P} \quad (8)$$

E derivados os valores numéricos de T^* para diferentes combinações de modo I e modo II. A Figura 12, mostra as variações de T^* versus a razão S/R e para a razão comprimento a/R para modo II puro.

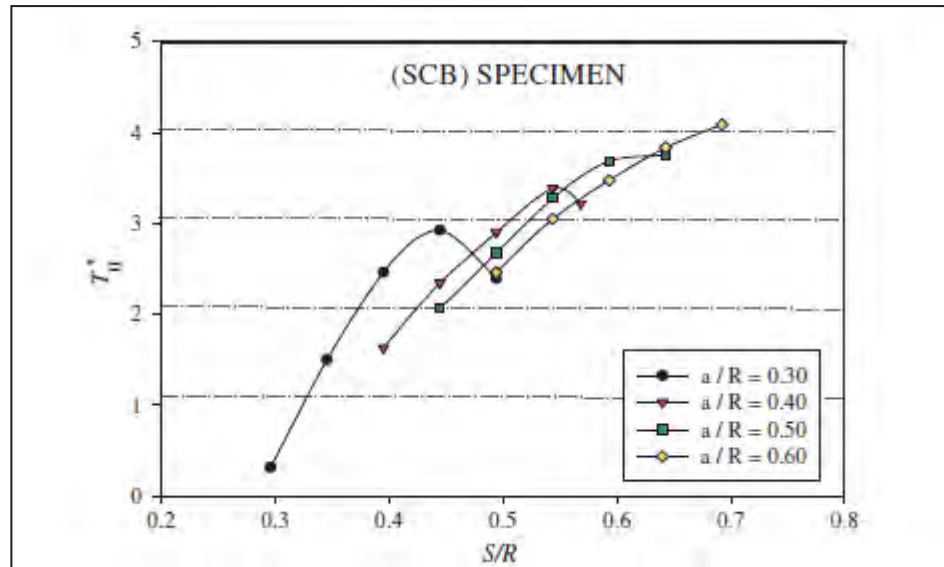


Figura 12 - O fator normalizado T_{II}^* do modo II puro para diferentes valores de a/R e S/R (Ahaollahi, 2004).

3 METODOLOGIA

3.1 Preparação dos corpos de prova poliméricos

Os corpos de prova poliméricos utilizados neste trabalho são compostos por uma resina fenol-formaldeído (Buehler PhenoCure).

Os corpos de prova poliméricos foram obtidos através do processo de embutimento a quente, que consiste em adicionar um polímero termorrígido em uma embutidora, aplicar pressão e temperatura para a cura do polímero e em seguida o resfriamento. Foi colocado um volume de 45 mL da resina fenólica granulada em uma embutidora, Panpress 30 (Figura 13), com seu interior previamente lubrificado com vaselina líquida. O processo de embutimento é formado por duas etapas, a primeira consiste no aquecimento da resina sob pressão (aquecimento da temperatura ambiente, 25°C até o patamar máximo de 150°C sob pressão (6 a 9 bar), durante um período de 15 minutos) e a segunda é formada pelo resfriamento da resina deste patamar de 150°C até a temperatura ambiente (durando o período de 15 minutos).



Figura 13 - Embutidora Panpress 30.

Após o embutimento foram obtidos corpos de prova cilíndricos (Fig. 14) de 30 milímetros de diâmetro e 40 milímetros de espessura. Estes corpos de prova passaram por processos de corte em uma serra de precisão Buehler Isomet 1000 (Fig. 15), usando disco diamantado com espessura de 0,3 mm. Primeiramente os corpos de prova cilíndricos foram cortados transversalmente em cilindros menores de diferentes espessuras, 2, 3, 4 e 5 milímetros. Em seguida estes cilindros foram cortados longitudinalmente em partes iguais. O próximo passo foi realizar o entalhe de 4,5 milímetros de comprimento e 0,3 milímetros de

largura nas semi-circunferências obtidas do processo anterior. O entalhe foi feito no centro e perpendicularmente à superfície cortada do corpo de prova (Figura 16). Foram confeccionados 18 corpos de prova de cada espessura.



Figura 14 - Corpo de prova polimérico cilíndrico.



Figura 15 - Serra de precisão Buehler Isomet 1000.

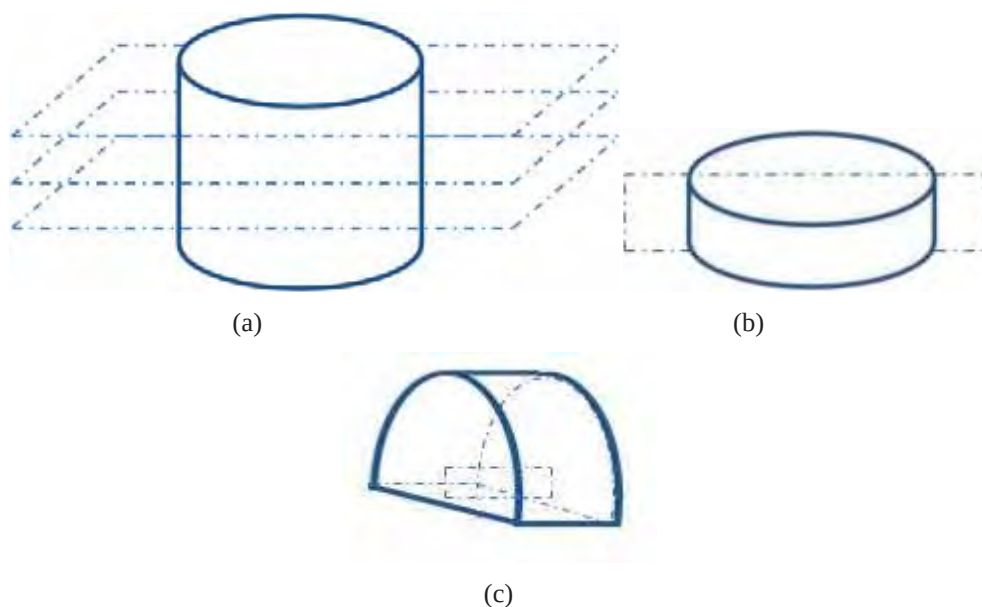


Figura 16 - Processo de fabricação dos corpos de prova. (a) corpo de prova obtido após o embutimento e os planos de corte transversal para obtenção dos cilindros de diferentes espessuras. (b) corte longitudinal. (c) corte do entalhe.

3.2 Ensaio SCB (Semi-Circular Bend)

Os ensaios SCB (Semi-Circular Bend) foram realizados para determinar o fator de intensidade de tensão (K_I). Estes ensaios foram realizados em uma máquina servo-elétrica Shimadzu AGX-50kN, utilizando uma célula de carga de 5kN a uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Os corpos de prova foram ensaiados até a fratura, gerando superfícies de fratura para serem analisadas por reconstrução por extensão de foco.

Para a realização dos ensaios o equipamento foi preparado para a realização de um ensaio de flexão de três pontos. Os corpos de prova foram alinhados e centralizados ao equipamento de forma adequada, havendo um espaço de 12,8 milímetros entre as hastes do equipamento.

Antes da realização dos ensaios o equipamento foi calibrado e zerado. Ao final dos ensaios os corpos de prova fraturados foram guardados de forma a não danificar a superfície de fratura para posteriormente serem analisados microscopicamente. Ao término de cada ensaio foi gerado um gráfico da força pelo deslocamento (Figura 17).

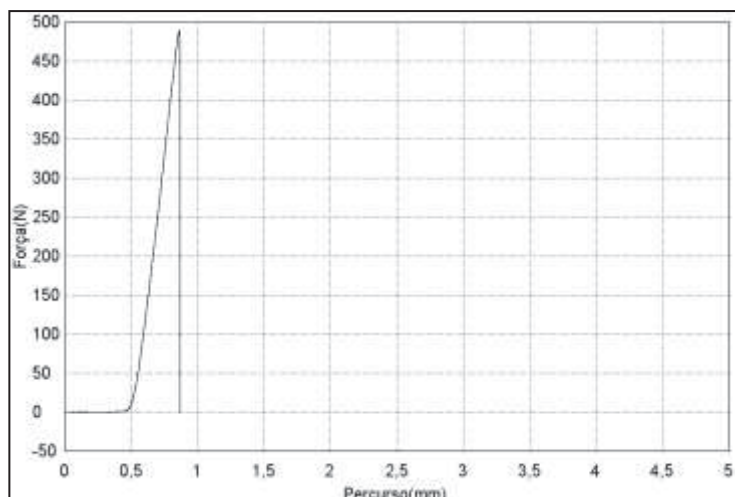


Figura 17 - Gráfico gerado pela máquina servo-elétrica Shimadzu AGX do ensaio SCB.

O gráfico apresenta uma região inicial sem a aplicação de força até aproximadamente o deslocamento de 0,5 milímetros, isto é decorrente da aproximação da haste superior do equipamento ao corpo de prova. Este ensaio é realizado em materiais frágeis, isto é explicado pelo crescente aumento da força sobre o corpo de prova até um determinado ponto crítico onde o material não consegue mais absorver energia e ocorre a fratura total.

A partir do gráfico fornecido pelo equipamento é possível selecionar o ponto de máxima força. E a partir deste dado é possível calcular o fator de intensidade de tensão (K_I). Posteriormente estes valores serão analisados e comparados juntamente com as reconstruções por extensão de foco.

O K_I foi calculado segundo a Equação (9), onde “P” representa a força aplicada, “Y” representa o fator geométrico, “a” representa o comprimento do entalhe, “R” representa o raio do corpo de prova e “t” a espessura do corpo de prova.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{2Rt} YI \quad (9)$$

3.3 Análise de imagens digitais

Ao terminar os ensaios SCB, os corpos de prova fraturados foram analisados no LAIMat (Laboratório de Análises de Imagens de Materiais), com o auxílio de um microscópio óptico invertido de reflexão modelo Nikon Epiphot 200 dotado de lâmpada de xenônio e câmera digital Zeiss AxioCam ICc3. Os corpos de prova foram presos ao

microscópio com auxílio de apoios, deixando a superfície fraturada perpendicular à objetiva.

Para a realização das imagens foi utilizada uma objetiva de 20 vezes, totalizando uma ampliação total da amostra de 200 vezes, sem utilização de filtros e analisador. Foram tiradas inúmeras imagens com intervalo de 1 μm , formando pilhas de imagens. Para cada corpo de prova analisado ao microscópio foram tiradas 8 pilhas de imagens, a primeira à partir da região adjacente ao entalhe e as seguintes distanciadas de 1mm no sentido da propagação (Figura 18). Em seguida foram feitas as reconstruções por extensão de foco.

Para gerar a reconstrução por extensão de foco a partir das pilhas de imagens, o programa de análise de imagens digitais NIH Image J, foi utilizado. Primeiramente todas as imagens da pilha são importadas para o programa, utilizando a ferramenta “*Import > Image Sequence*”, em seguida foi utilizada a rotina (plugin) “*stack focuser*”, uma ferramenta de reconstrução de pilhas, gerando uma imagem totalmente focada (Figura. 19) e um mapa de elevações (Figura 20). Utilizando a rotina “*3D > Interactive 3D Surface Plot*” foi gerado um mapa em três dimensões da pilha de imagens (Figura 21).

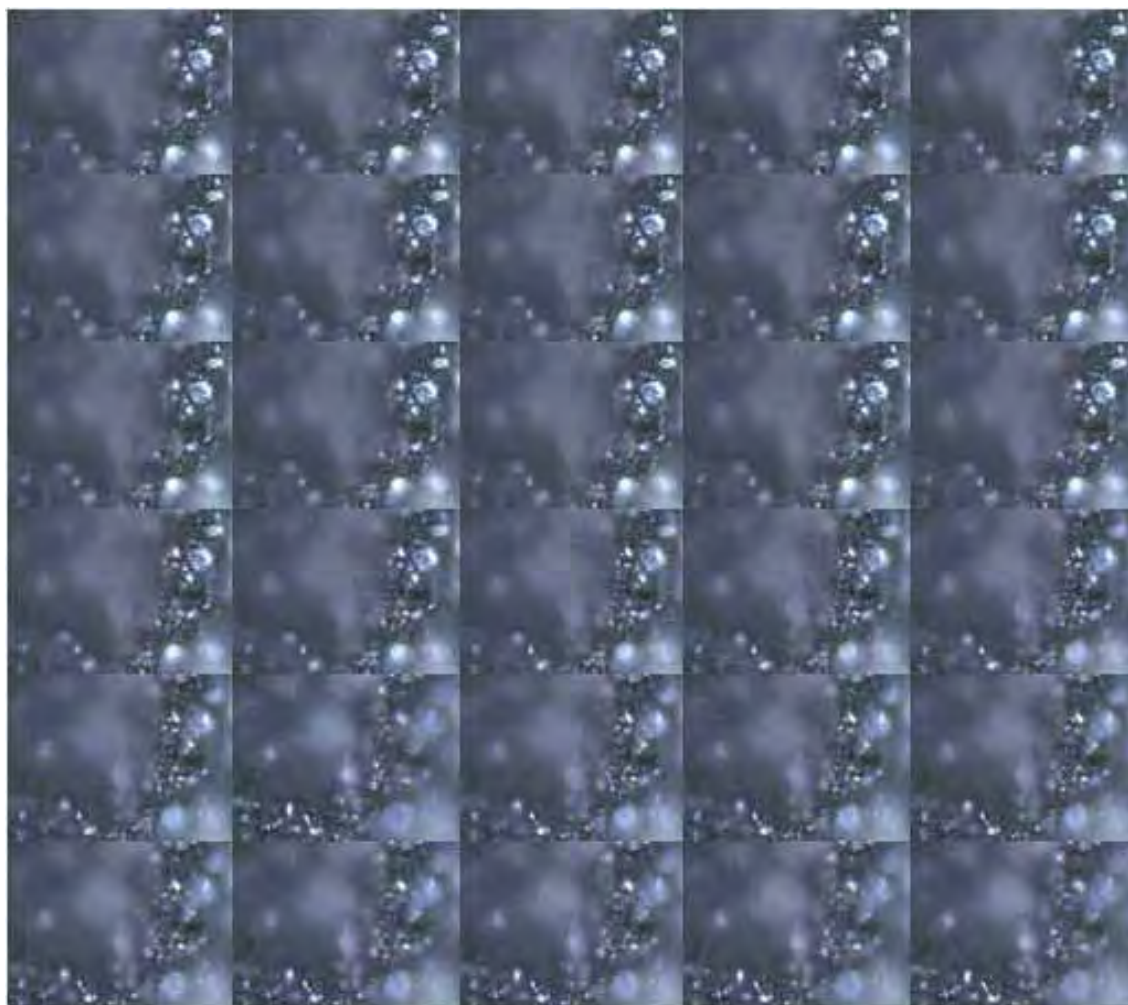


Figura 18 - Esquema de pilhas de imagens (ampliação de 200x).

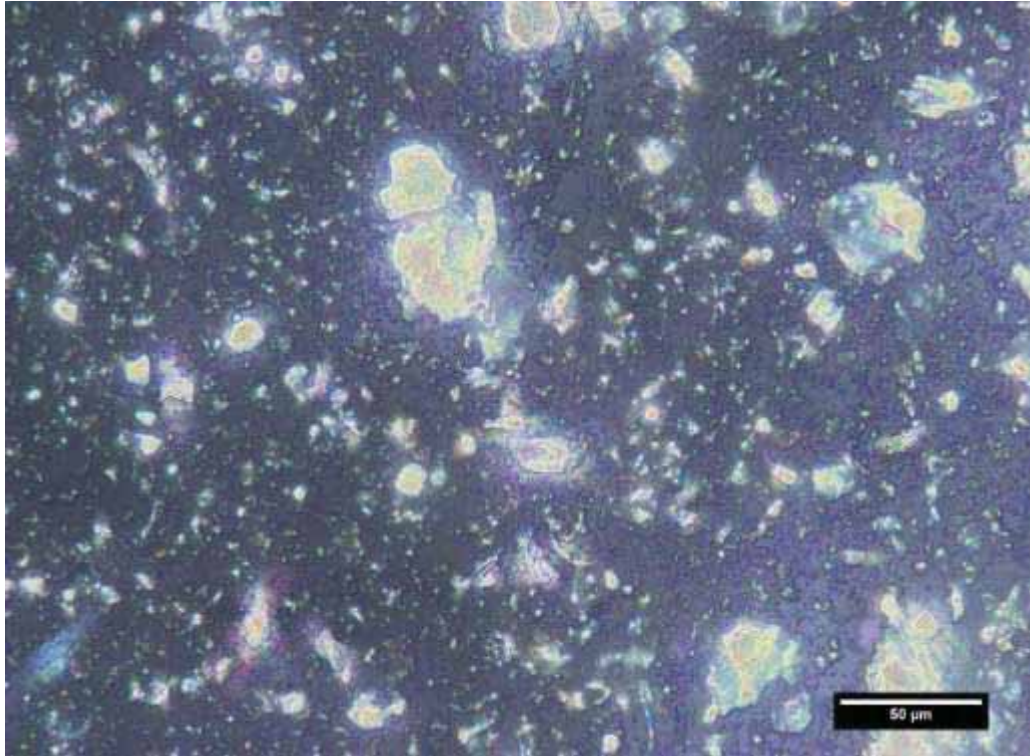


Figura 19 - Imagem totalmente focada (ampliação de 200x).

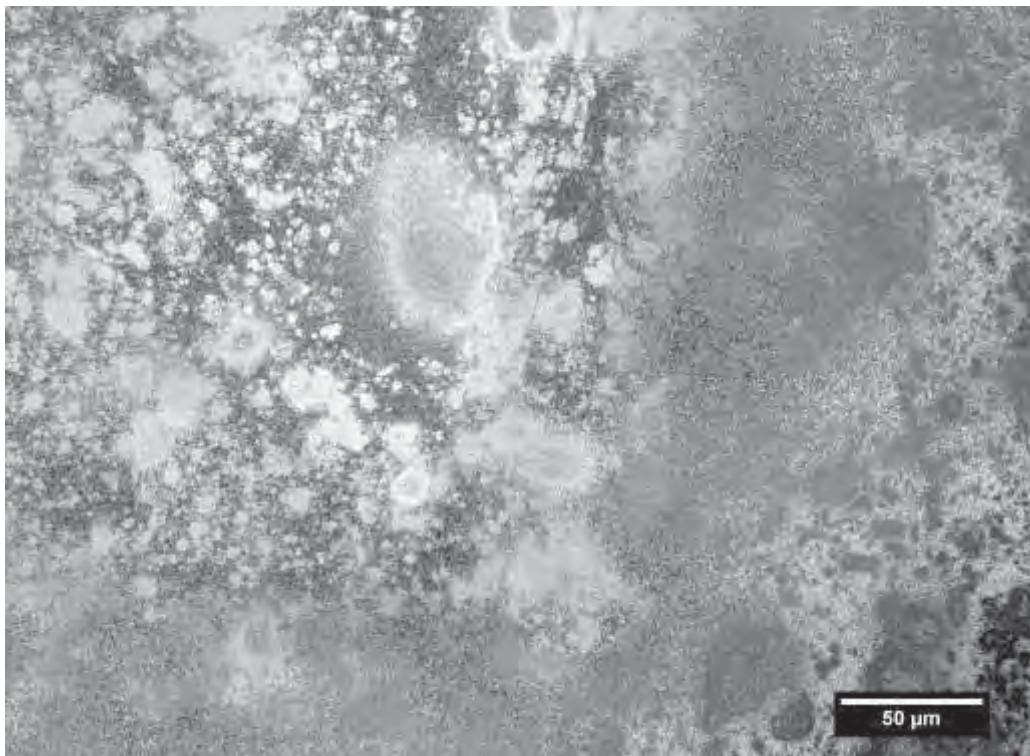


Figura 20 - Mapa de elevações (ampliação de 200x)

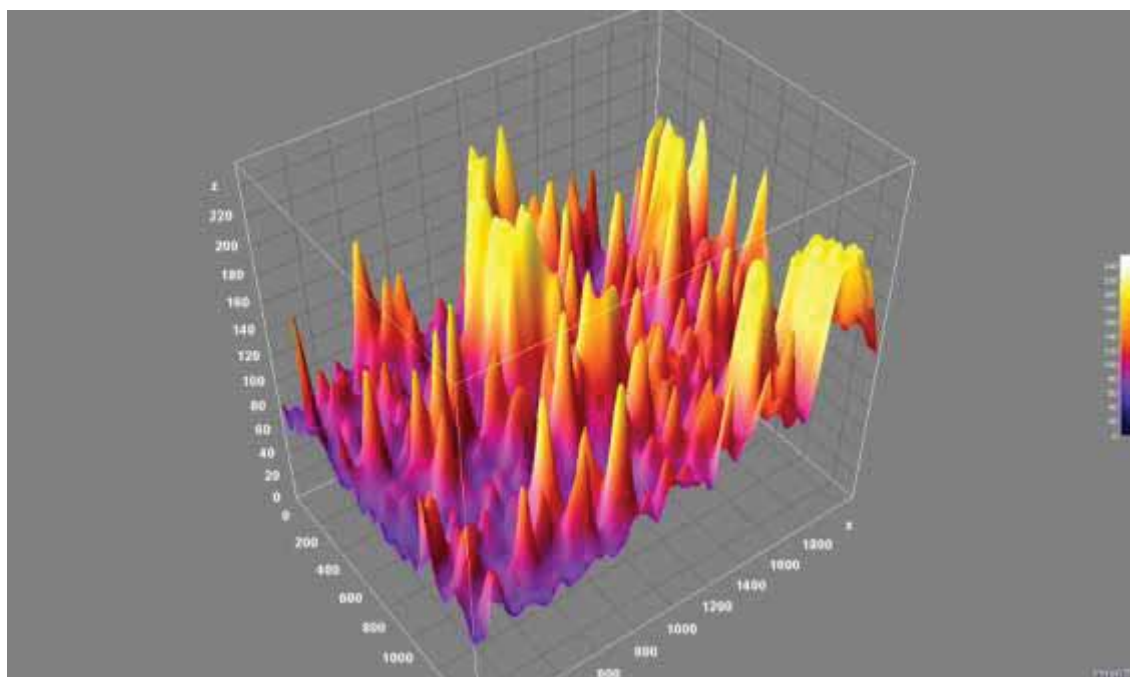


Figura 21 - Mapa 3D de elevações.

Com os mapas de elevação é possível analisá-los e determinar os valores de dimensão fractal ao longo das superfícies reconstruídas e associar este mapeamento com os valores de K_f .

A partir do mapa de elevações (imagem totalmente focada da fratura) é possível o cálculo da dimensão fractal.

Para gerar os dados necessários para o cálculo da dimensão fractal a partir do mapa de elevações, foi utilizado o programa de análise de imagens digitais NIH Image J. Mas quando o mapa de elevações é obtido através da reconstrução por extensão de foco, como explicado anteriormente, o mapa de elevações é multiplicado por um valor que depende do número de imagens na pilha. Este fator multiplicador é o resultado da parte inteira da divisão de 255 pelo número de imagens da pilha. Deste modo a imagem resultante desta rotina apresenta um histograma melhor distribuído dentro de seus limites (255 pixels). Porém, para a realização dos cálculos de dimensão fractal, é necessário dividir o mapa de elevações pelo valor mínimo encontrado no histograma, deste modo os valores presentes no mapa de elevação representam as distâncias reais da fratura.

Para a obtenção destes dados foram seguidos os seguintes passos. Primeiramente o histograma do mapa de elevação foi gerado, utilizando o comando “Analyze>Histogram”, caso o valor de mínimo nele encontrado for maior que 1 (um), o mapa de elevação deve ser dividido por este número. Este procedimento é feito selecionando o mapa de elevação e em seguida utilizando a ferramenta “Process>Math>Divide”, logo após outro histograma deve ser gerado deste novo mapa, onde o mínimo é igual a 1. Todos os mapas de elevação passaram por este procedimento para que as análises fossem feitas sobre os valores reais do relevo da fratura (Figura 22 e 23).

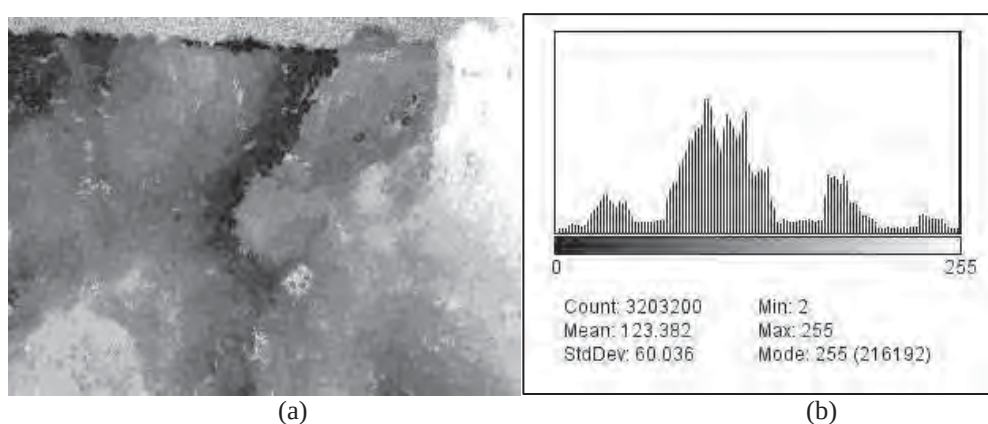


Figura 22 - (a) Mapa de elevação original; (b) respectivo histograma.

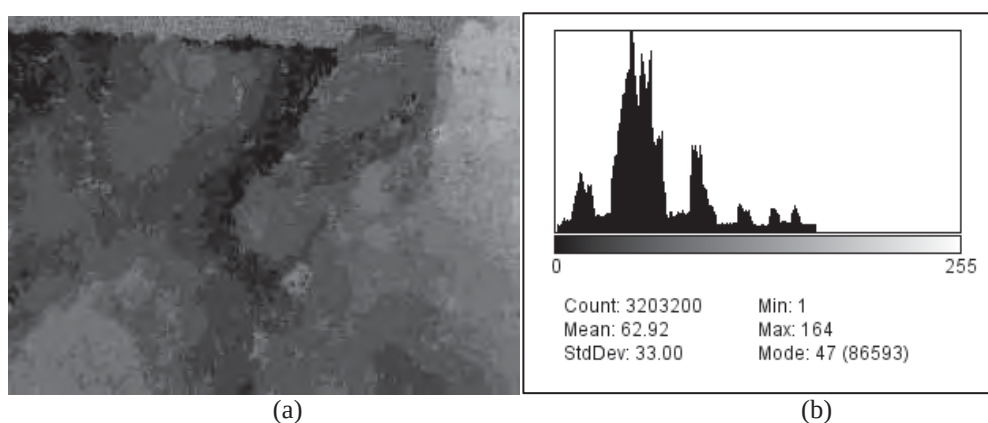


Figura 23 - (a) Mapa de elevação dividido por 2; (b) respectivo histograma.

Em seguida, para gerar os dados para serem utilizados no cálculo da dimensão fractal foi utilizada a rotina “Plugins>Fractal>MapFractalCount”, gerando uma tabela com os dados para o cálculo da dimensão fractal (Box count e Box size).

A dimensão fractal poder ser calculada como sendo o coeficiente angular da linha de tendência de um gráfico onde $-\log(\text{Box size})$ é o eixo da abscissa e $\log(\text{Box count})$ é o eixo das ordenadas. Este gráfico foi gerado (Figura 24).

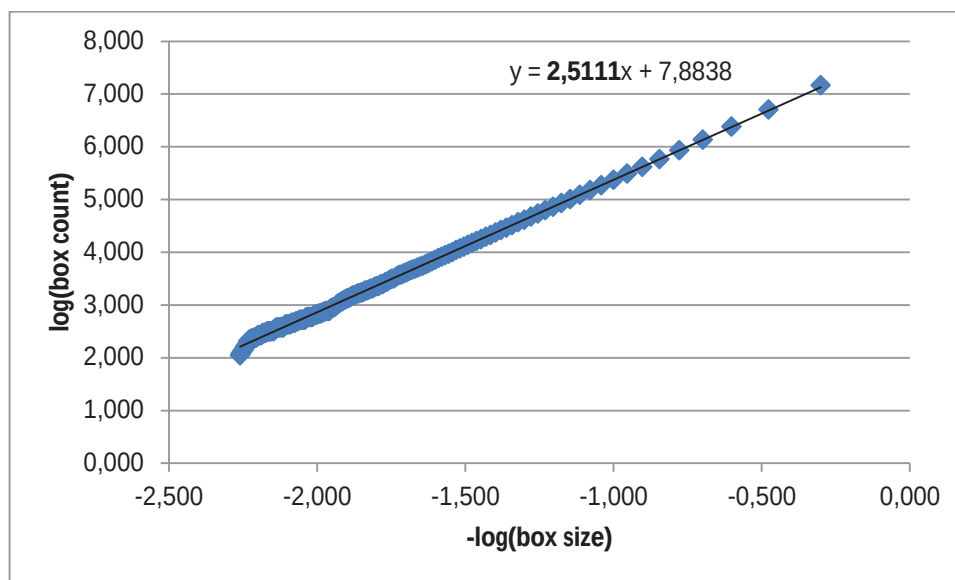


Figura 24 - Cálculo da dimensão fractal com o uso do método box-counting, onde o coeficiente angular da reta é igual a dimensão fractal.

O próximo passo para a análise dos dados foi determinar a dimensão textual (D_t) e dimensão estrutural (D_s). Isto pode ser feito observando analisando o gráfico de $\log(\text{Box count})$ por $-\log(\text{Box size})$, conforme a inclinação da reta, mas esta metodologia não é apropriada devido à dificuldade de análise visual.

Para determinar o D_t e D_s , foi calculada a derivada primeira do $\log(\text{Box count})$, para encontrar os pontos de inflexão, calculando a mediana desses pontos para suavizar a dispersão desses dados (Figura 25). Para o ponto que divide as regiões foi calculado o desvio padrão destes dados. Sendo que os valores referentes à D_s foram aqueles que tinham o menor valor de dispersão, padronizado em valores menores que 10% do desvio-padrão.

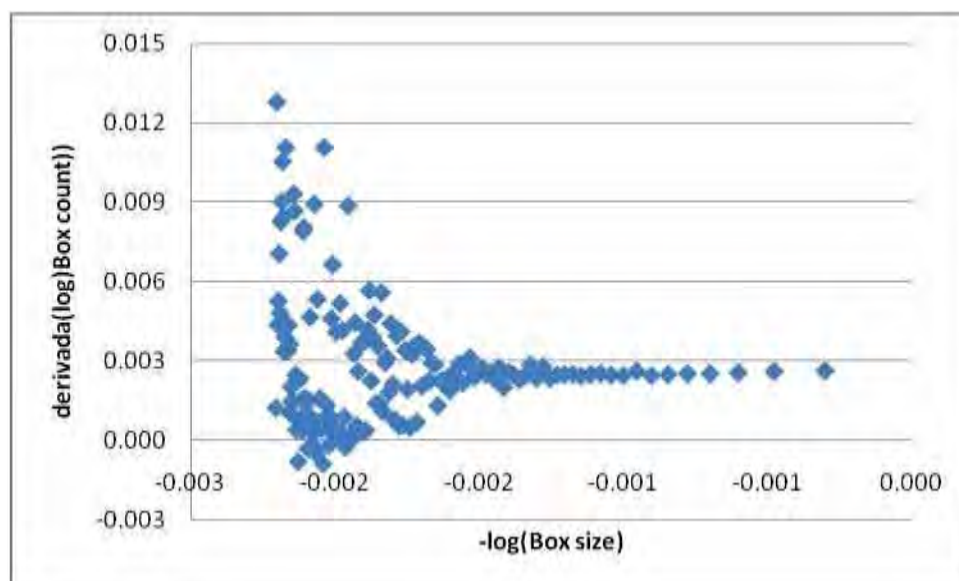


Figura 25 - Gráfico do espalhamento dos pontos do método box counting com o uso da derivada.

Depois de encontrado qual o ponto que dividia as duas retas, construiu-se o gráfico do método *box counting*, com as regiões separadas e suas respectivas linhas de tendências, sendo que, a que possui o maior coeficiente angular é referente a D_s e a outra é referente a D_t (Figura 26).

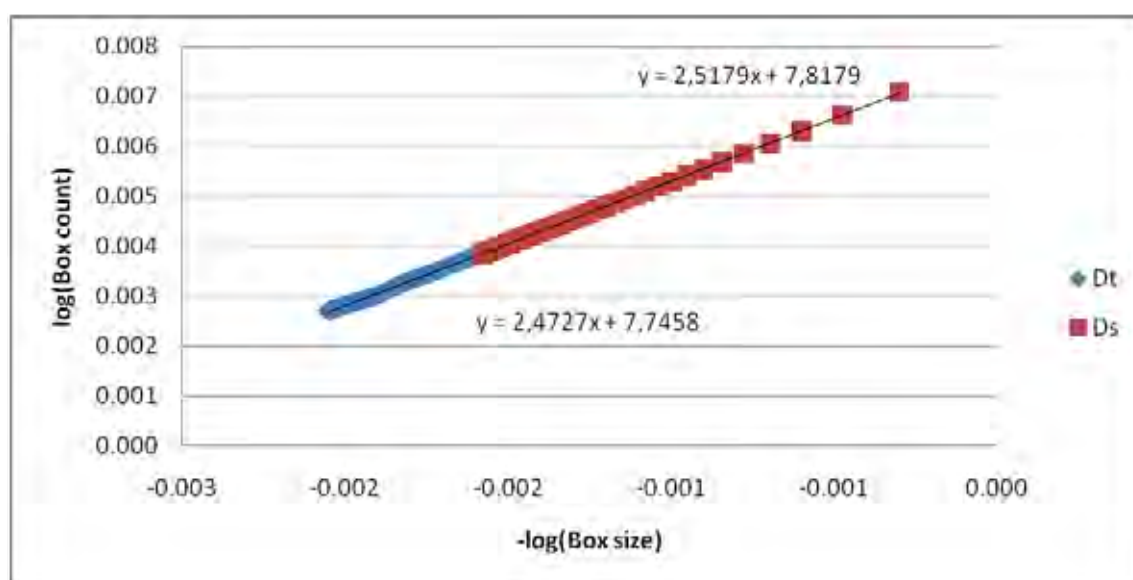


Figura 26 - Cálculo da dimensão textural (D_t) e dimensão estrutural (D_s) através do coeficiente angular da reta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados

Os corpos de prova foram divididos em quatro grupos, D, F, G e H, separados pela espessura, 2, 3, 4, e 5 milímetros respectivamente. Os corpos de prova foram escolhidos de forma aleatória. Todos os ensaios foram realizados em na máquina servo-elétrica Shimadzu AGX-50kN, no departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/ UNESP, em temperatura ambiente, utilizando uma célula de carga de 5kN a uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min.

A partir dos ensaios SCB foram obtidos gráficos da força pelo deslocamento, e a partir da força máxima, das dimensões dos corpos de prova, do valor do fator geométrico (obtido da Figura 10, onde $S/R = 0,43$ e $a/R=0,3$; $Y_I=2$) foram calculados os valores dos fatores de intensidade de tensão (K_I). Os valores de K_I estão dispostos na Tabela 1 a 4.

Tabela 1 - Valores de KI.

Corpo de Prova (espessura: 2 mm)	
Amostra	K _I (MPa*m ^{1/2})
D1	1,209
D2	1,587
D3	1,124
D4	1,263
D5	1,254
D6	1,312
D7	1,304
D8	1,533
D9	1,588
D10	1,589
D11	-
D12	-
D13	1,580
D14	-
D15	1,722
D16	-
D17	-
D18	-
Média	1,422
Desvio	
Padrão	0,196

Tabela 2 - Valores de KI.

Corpo de Prova (espessura: 3 mm)	
Amostra	K _I (MPa*m ^{1/2})
F1	1,550
F2	1,314
F3	1,560
F4	-
F5	1,560
F6	1,440
F7	1,588
F8	1,516
F9	1,140
F10	1,552
F11	1,434
F12	1,346
F13	1,654
F14	1,608
F15	1,764
F16	1,500
F17	1,438
F18	1,640
Média	1,506
Desvio	
Padrão	0,142

Tabela 3 - Valores de K_I .

Corpo de Prova (espessura: 4 mm)	
Amostra	K_I (MPa*m^{1/2})
G1	1,490
G2	1,605
G3	1,547
G4	1,087
G5	1,402
G6	1,405
G7	1,154
G8	1,595
G9	-
G10	-
G11	-
G12	-
G13	-
G14	-
G15	-
G16	-
G17	-
G18	-
Média	1,447
Desvio	
Padrão	0,195

Tabela 4 - Valores de K_I .

Corpo de Prova (espessura: 5 mm)	
Amostra	K_I (MPa*m^{1/2})
H1	1,726
H2	1,570
H3	1,736
H4	-
H5	1,626
H6	1,603
H7	1,407
H8	1,426
H9	1,605
H10	1,938
H11	1,531
H12	1,707
H13	1,632
H14	1,485
H15	1,644
H16	1,595
H17	1,615
H18	1,416
Média	1,603
Desvio	
Padrão	0,133

Os corpos de prova que não apresentam valor de K_I nas tabelas acima foram descartados devidos problemas durante os ensaios SCB, como: amassamento, corpo de prova não alinhado corretamente e dimensões fora do especificado.

A partir destes resultados foram escolhidos aleatoriamente 12 (doze) amostras para a análise no microscópio óptico. Para cada amostra foi feita a reconstrução por foco da fratura, esta análise foi feita ao longo de 8 mm da superfície fraturada, totalizando 8 reconstruções por amostra.

Para cada reconstrução por foco através da utilização do programa Image J foram obtidos os valores de Box count e Box size, analisando estes dados foi gerado um gráfico de $\log(\text{Box count}) \times -\log(\text{Box size})$. A partir deste gráfico foram calculadas as dimensões monofractal e multifractal (dimensão textural e dimensão estrutural), para cada reconstrução. Foram calculados os valores médios das dimensões mono e multifractal para cada amostra (a média foi feita entre os 8 pontos analisados de cada amostra), estes resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de dimensão monofractal, dimensão textural e dimensão estrutural.

Amostra	Monofractal				Dt			Ds		
	KIC	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV
D1	1,21	2,73	0,02	0,01	2,81	0,09	0,03	2,82	0,03	0,01
D2	1,59	2,73	0,04	0,01	2,71	0,10	0,04	2,81	0,02	0,01
D6	1,31	2,69	0,12	0,04	2,68	0,07	0,03	2,82	0,04	0,01
D13	1,58	2,67	0,12	0,04	2,68	0,10	0,04	2,81	0,07	0,02
F2	1,31	2,44	0,17	0,07	2,63	0,22	0,08	2,73	0,10	0,04
F7	1,59	2,57	0,06	0,02	2,71	0,07	0,02	2,72	0,05	0,02
F3	1,56	2,37	0,12	0,05	2,72	0,12	0,05	2,73	0,07	0,02
G5	1,40	2,55	0,14	0,06	2,75	0,12	0,05	2,72	0,06	0,02
G3	1,55	2,64	0,01	0,00	2,51	0,12	0,05	2,75	0,04	0,01
H2	1,57	2,66	0,07	0,03	2,61	0,08	0,03	2,76	0,09	0,03
H7	1,41	2,50	0,15	0,06	2,64	0,08	0,03	2,79	0,07	0,03
H11	1,53	2,42	0,15	0,06	2,61	0,10	0,04	2,77	0,05	0,02

Para melhor interpretação dos dados obtidos foi gerado um gráfico correlacionando a dimensão fractal (Mono, Dt e Ds) com o fator de intensidade de tensão (Figura 27) e um gráfico correlacionando a média da dimensão fractal (Mono, Dt e Ds) com o fator de intensidade de tensão (Figura 28).

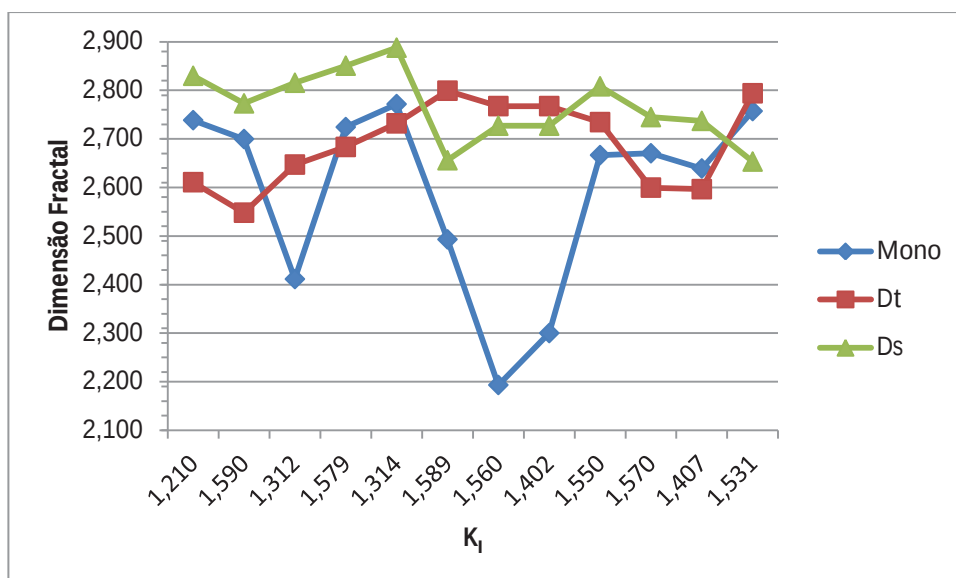


Figura 27 - Correlação entre dimensão fractal e o fator de intensidade de tensão.

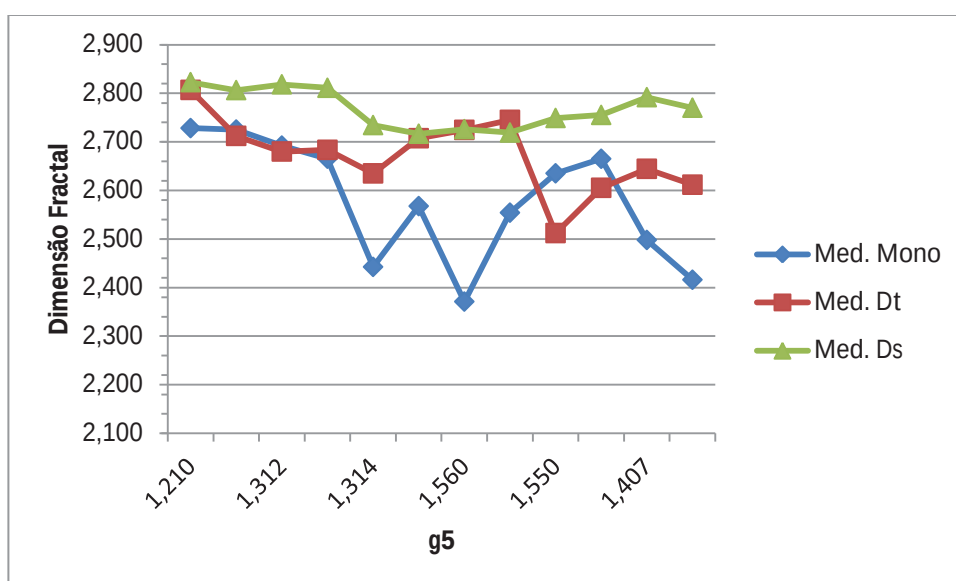


Figura 28 - Correlação entre dimensão fractal média e o fator de intensidade de tensão.

Foram construídos para cada amostra os gráficos do valor da dimensão fractal ao longo dos oito pontos analisados (Figura 29). Em seguida foi realizada a análise destes gráficos, o coeficiente de correlação (R^2) foi calculado para determinação da correlação entre os valores da dimensão fractal ao longo da superfície fraturada (Tabela 6).

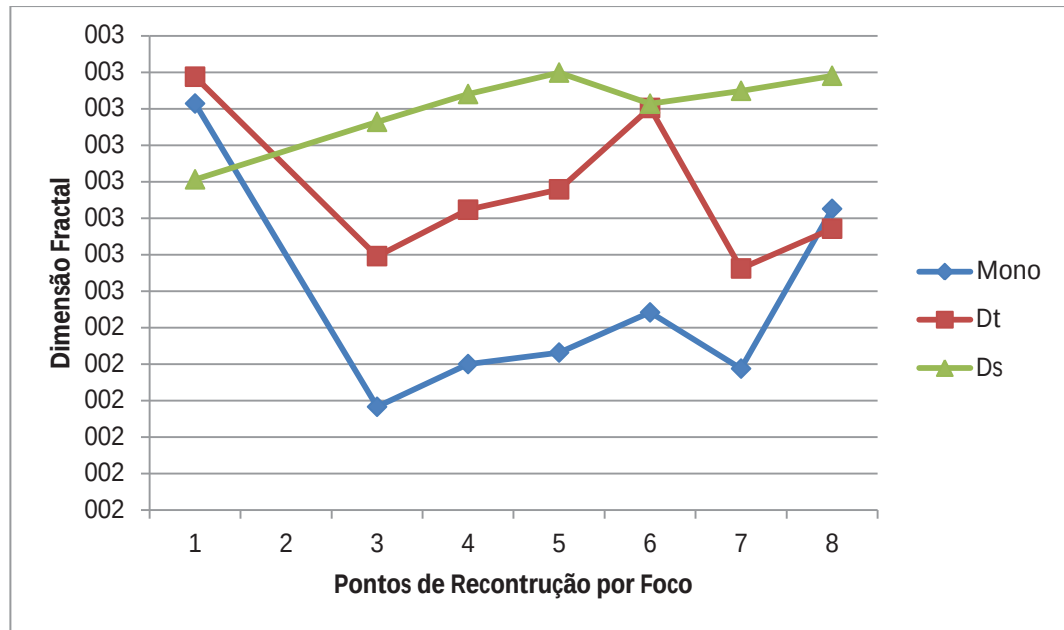


Figura 29 - Gráfico de Dimensão Fractal ao longo da superfície fraturada.

Tabela 6 - Valores de R2 dos valores de dimensão fractal.

Coeficiente de Correlação			
Amostra	Mono	Dt	Ds
D1	0,032	0,582	0,025
D2	0,053	0,115	0,020
D6	0,208	0,083	0,000
D13	0,644	0,032	0,836
F2	0,248	0,032	0,004
F7	0,025	0,026	0,000
F3	0,065	0,627	0,032
G5	0,646	0,000	0,095
G3	0,352	0,108	0,013
H2	0,115	0,009	0,308
H7	0,287	0,154	0,195
H11	0,061	0,218	0,682

4.2 Discussão

A partir dos ensaios SCB foram obtidos os dados necessários para os cálculos dos fatores de intensidade de tensão (K_I) para os corpos de prova do modo I de carregamento. Analisando os valores de K_I para os corpos de prova de diferentes espessuras (2, 3, 4 e 5 milímetros) expressos na Tabela 1, é observado que para os corpos de prova de espessura 2, 3, 4 e 5 milímetros apresentaram valores médios de K_I : $1,422 \pm 0,196$; $1,506 \pm 0,142$, $1,411 \pm 0,195$ e $1,60 \pm 0,133$ (MPa.m^{1/2}) respectivamente.

Analisando estes resultados pode-se dizer que há um aumento do valor de K_I com o aumento da espessura dos corpos de prova. Isto ocorre porque com o aumento na espessura do corpo de prova há o aumento do *constraint* (ou restrição plástica), diminuindo a facilidade de deformação plástica e consequentemente do avanço da trinca, ou seja, é necessária uma força maior para que ocorra o avanço da trinca. Quando o valor de K_I atinge um determinado valor (igual ou maior ao K_{IC}) há o avanço da trinca.

Os valores médios da dimensão Monofractal, D_t e D_s apresentaram pequeno desvio padrão e coeficiente de variação (CV), indicando que os dados são uniformes, não apresentando grande variação em seus valores durante o avanço da fratura, pois a média de cada amostra foi feita a partir dos oito pontos analisados ao longo da superfície fraturada.

Analisando o gráfico 1 é possível identificar que para todas as dimensões: monofractal, textural e estrutural, que com o aumento da valor do fator de intensidade de tensão (K_I) há um padrão polinomial, o polinômio que melhor se adéqua é o do sexto grau. Consequentemente não é possível encontrar uma correlação direta entre o valor da dimensão fractal com o K_I , pois esta relação não é linear.

Também não é possível afirmar que existe uma relação direta entre os valores das dimensão fractais ao longo da superfície fraturada, pois os valores encontrados do coeficiente de correlação (R^2) não estão próximos a 1, que significaria um alto grau de correlação, sendo uma correlação não linear.

5 CONCLUSÃO

A partir do trabalho realizado e dos dados obtidos não foi possível até o presente momento identificar correlações claras entre a tenacidade, espessura e valores fractais para os corpos de prova investigados, pois as correlações encontradas não apresentam caráter linear, e sim polinomial, desta forma não é possível estabelecer uma relação clara entre os parâmetros analisados. Por outro lado, é evidente que os valores fractais se alteram com a evolução das trincas durante o processo de fratura. Assim, num caso real com a propagação heterogênea das trincas, os valores fractais são descritores do processo termodinâmico da fratura, e não propriedades características de estado, ao contrário do que propõe Mecholsky para a propagação de trincas à velocidade constante. Ou seja, o relevo das superfícies de fratura expõe características do comportamento local da interação do campo de tensões à frente da trinca com a microestrutura.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AYATOLLAHI, M. R.; AILIHA, M. R .M. Fracture parameters for cracked semi-circular specimen. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, v. 79, p. 45-53. jun. 2004.

CALISTER, W.D., **Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Nova York, Ed. John Wiley & Sons. Inc, 1997, 975 p.

CANEVAROLO, S.V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 1. ed. São Paulo. Artliber Editora, 2002. 448 p.

CHONG, K.P.; KURUPPU, M.D. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. **International Journal of Fracture**, v. 26, p. 52-62, may. 1984.

DUBOIS, J.H. Plastics history. Boston. **Cahners Book**, Boston, v. 1, p. 58-62, may. 1972.

EFFTING, C. **Mecânica da fratura aplicada aos materiais dúcteis e frágeis**. 2004. 248f. Dissertação (Mestrado em Mecânica da Fratura) - Universidade do estado de Santa Catarina, 2004.

GOLDSSMIHT, N.T., Deep focus: a digital image processing technique to produce improved focal depth in light microscopy, **Image Analysis and Stereology**, New York, v. 19, p. 163-167, oct. 2000.

HEIN, L.R.O., Quantitative fractography by digital image processing: NIH Image macro tools for stereo pair analysis and 3-D reconstruction, **Journal of Microscopy**, Cidade, v.240, p. 17-28. jul. 2001.

HOROVISTIZ, A.L.; RIBEIRO, L.M.F.; CAMPOS, K.A.; JESÚINO, A.; HEIN, L.R.O., Quantitative fractography under light microscopy: a digital image processing approach,. **Praktische Metallographie**, Alemanha, v. 40, p. 57-68, jun. 2003.

LI, F.Z., SHIH, C.F., NEEDLEMAN, A. **A comparison of methods for calculating energy release rate. Engineering Fracture Mechanics**, New York, v. 21, n. 2, p. 405-421, feb. 1985.

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 3. ed. São Paulo. Editor Edgard Blucher, 2003. 218 p.

MANO, E.B. ; DIAS, M.L.; OLIVEIRA, C.M.F. **Química experimental de polímeros**. 1 ed., São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1991. 242 p.

NETO, F.L.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed., São Paulo. Edgard Blucher, 2006. 336 p.

PLANGSANGMAS, L; MECHOLSKY, Jr. J.J.; BRENNAN, A.B. Determination of fracture toughness of epoxy using fractography , **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 72, n. 2, p. 257-268, apr. 1999.

VICENTE, C. **Tecnologia Mecânica, Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed., São Paulo. Editora Afiliada, 1987. 279 p.

REZENDE, M. C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos**, v. 17, p. 4-11. may. 2007.

G. T. Saleiro; S. L. Cardoso; R. Toledo; J. N. F. Holanda. Avaliação das fases cristalinas de óxido de titânio suportado em cerâmica vermelha. **SciELO**, São Paulo, v. 56, p. 335, jun. 2010.