

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS – CCNE
CURSO BACHARELADO EM FÍSICA**

**CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE EM
SUPERFÍCIES NITRETADAS A PLASMA DA LIGA
Ti6Al4V**

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

Autor: Bruno Serpa Machado

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES
NITRETADAS A PLASMA DA LIGA Ti6Al4V**

por

Bruno Serpa Machado

Monografia apresentada ao Curso de Física da Universidade Federal de Santa Maira, como pré-requisito para obtenção do título de **Bacharel em Física**.

Orientador: Prof^ª. Dra. Cristiane de Souza Javorsky

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas - CCNE
Curso de Física Bacharelado**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES
NITRETADAS A PLASMA DA LIGA Ti6Al4V**

elaborada por

Bruno Serpa Machado

como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Física.**

Comissão Examinadora:

**Prof^a. Cristiane de Souza Javorsky, Dra.
(Presidente/Orientador)**

Prof. Lúcio Strazzabosco Dorneles, Dr.

Prof. José Carlos Merino Mombac, Dr.

Santa Maria, RS, Brasil, 07 de janeiro de 2010

RESUMO

Trabalho de Graduação em Física
Departamento de Física
Universidade Federal de Santa Maria

CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES NITRETADAS A PLASMA DA LIGA Ti6Al4V-ELI

Autor: Bruno Serpa Machado

Orientador: Prof^ª. Dra. Cristiane de Souza Javorsky

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 07 de Janeiro de 2010.

O presente trabalho trata da caracterização das modificações topográficas ocorridas em superfícies nitretadas a plasma da liga Ti6Al4V-ELI. A rugosidade constitui um parâmetro importante de materiais utilizados em situações que envolvam desgaste, corrosão e biocompatibilidade, como é o caso de implantes ortopédicos. Sabe-se que superfícies rugosas exibem padrões característicos de espalhamento de luz, ou de distribuição de intensidade de brilho em imagens. Por outro lado, é bem estabelecido o fato de que a rugosidade influi na diferenciação e atividade das células ósseas em contato com a superfície de implantes. Para caracterizar as modificações ocorridas na topografia, nas diferentes condições de nitretação das amostras, primeiramente obtêm-se imagens de topo adquiridas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com a aplicação da geometria fractal, realizou-se um estudo sobre as camadas superficiais de nitreto de titânio formadas sobre a amostra. Este estudo consistiu em aplicar a análise fractal, com a utilização de um software de análise, com intuito de determinar as dimensões fractais das superfícies nitretadas a plasma para as diferentes condições de temperatura. A análise apresentou diferentes valores para a medida de dimensão fractal nas diferentes condições de temperatura no processo de nitretação. Entretanto, com base nesses dados obtidos, a análise fractal de imagens de MEV da superfície consiste num parâmetro que não nos permite diferenciar duas condições de nitretação, e através desse estudo não é possível compreender melhor a dinâmica do processo de nitretação.

Palavras-chave: caracterização; nitretação; parâmetros de rugosidade; geometria fractal

ABSTRACT

This paper deals with the characterization of topographic changes occurred on surfaces of plasma nitrided Ti6Al4V-ELI alloy. Surface roughness is an important parameter of materials used in situations involving friction, attrition, corrosion and biocompatibility, as the case of orthopedic implants. It is known that rough surfaces exhibit characteristic patterns of light scattering, or distribution of intensity of brightness in images. Moreover, it is well established the fact that the roughness influences the differentiation and activity of bone cells in contact with the implant surface. To characterize the changes in topography, in the different conditions of nitriding of the samples, first we obtain images of the top acquired through the technique of scanning electron microscopy (SEM). With the application of fractal geometry, a study of the surface layers of titanium nitride formed on the samples was realized. This study consisted of applying fractal analysis, using analysis software to determine the fractal dimensions of surfaces on plasma nitrided for different temperature conditions. The analysis showed different values for the measurement of fractal dimension in different temperature conditions in the process of nitriding. However, based on these data, the fractal analysis of SEM images of the surface is a parameter that is not possible to differentiate two conditions for nitriding and through this study is not possible to understand the dynamics of the process of nitriding.

Keywords: characterization; nitriding; roughness parameters; fractal geometry

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação esquemática da estrutura de camadas formadas sobre a liga Ti6Al4V após nitretação.....	10
FIGURA 2 – A rugosidade média, R_a , corresponde à altura obtida pela divisão da área em verde pelo comprimento L	12
FIGURA 3 – Rugosidades parciais e rugosidade máxima (R_{max})	13
FIGURA 4 – Curva triádica de Koch.....	17
FIGURA 5 - Estrutura Fractal de um contorno de uma região Julien.....	18
FIGURA 6 - Técnicas para medir dimensão fractal.....	19
FIGURA 7 – Correlação entre a dimensão física medida e a dimensão da textura da imagem.....	23
FIGURA 8 – Imagens de topo obtidas por meio de MEV da Liga Ti6Al4V-ELI.....	33
FIGURA 9 – Cálculo da Dimensão fractal utilizando o software fractal3e para o triângulo de Sierpinski.....	34
FIGURA 10 – Gráfico, em eixos log-log, entre a contagem do número de caixas vs. o raio das mesmas para o triângulo de Sierpinski.....	35
FIGURA 11 – Imagem de um Fractal Browniano gerada pelo programa Fractal Modeling and Analysis aplicada ao programa Fractal Analysis System.....	37
FIGURA 12 – Gráfico do cálculo para a dimensão fractal, em eixos log-log, da imagem do Fractal Browniano mostrada na Figura 11.....	38
FIGURA 13 – Imagens da topografia da Liga Ti6Al4V a 973K adquiridas por MEV.....	39
FIGURA 14 - Imagens da topografia da Liga Ti6Al4V a 1073K adquiridas por MEV.....	39
FIGURA 15 - Gráfico para o cálculo da dimensão fractal, em eixos log-log, da imagem x500 na temperatura 973K para os atributos 1024x512.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição química da liga Ti6Al4V-Grau 5 (massa %)	31
TABELA 2 – Parâmetros utilizados no processo de nitretação	31
TABELA 3 – Teste 1 com Imagens Geradas pelo Programa Fractal Modeling and Analysis	36
TABELA 4 – Teste 2 com Imagens Geradas pelo Programa Fractal Modeling and Analysis	36
TABELA 5 – Teste 3 com Imagens Geradas pelo Programa Fractal Modeling and Analysis	36
TABELA 6 – Teste 4 com Imagens Geradas pelo Programa Fractal Modeling and Analysis	37
TABELA 7 – Cálculo da Dimensão Fractal para as Imagens das amostras nitretadas a 973K	40
TABELA 8 – Cálculo da Dimensão Fractal para as Imagens das amostras nitretadas a 1073K	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 PROCESSO DE NITRETAÇÃO	9
2.1 O Plasma e o Processo de Nitretação	9
3 RUGOSIDADE	11
3.1 Parâmetros Baseados em Medidas Verticais	11
3.1.1 Rugosidade Média.....	11
3.1.2 Desvio Quadrático Médio.....	13
3.1.3 Rugosidade Parcial.....	13
3.1.4 Rugosidade Máxima (R_{max}).....	14
3.1.5 Rugosidade R_z	14
3.2 Parâmetros Baseados em Medidas Horizontais	14
3.3 Parâmetros Baseados em Medidas Proporcionais	14
3.4 Limitações dos Parâmetros de Rugosidade	14
4 FRACTAIS	16
4.1 Auto-Similaridade e Auto-Afinidade	16
4.2 Fractais Estatísticos	17
4.3 Dimensão Fractal	18
4.3.1 Dimensão de Auto-Similaridade.....	20
4.3.2 Dimensão de Escala.....	21
4.3.3 Dimensão de Capacidade.....	21
4.4 Relação Brilho e Superfície	22
4.5 Métodos que Medem a Dimensão Fractal em Função do Brilho	24
4.5.1 Método do Edredom de Minkowski.....	24
4.5.2 Ilhas de Korcak.....	25
4.5.3 Análise Dimensional.....	26
4.5.4 Textura Local.....	27
5 MICROSCOPIA	28
5.1 Microscopia Ótica	28
5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	29
5.3 Microscopia de Força Atômica	30
6 MATERIAIS E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	31
6.1 Materiais	31
6.2 Métodos	31
6.2.1 Aquisição de Imagens.....	32
6.2.2 Processamento e Análise de Imagens.....	32
7 RESULTADOS	33
7.1 Estudos Preliminares	33
7.2 Testes Preliminares	33
7.3 Cálculo da Dimensão Fractal para Imagens Obtidas por MEV da Liga Ti6Al4V-ELI	38
8 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Ligas de titânio têm sido largamente aplicadas na confecção de próteses ortopédicas e dentárias, de parafusos, pinos, placas e arames usados em cirurgias ortopédicas, bem como de instrumentos cirúrgicos. Porém, estas ligas possuem limitações como à baixa resistência ao desgaste e a possível toxicidade dos elementos da liga em contato com o organismo humano. Para resolver estes problemas, tratamentos superficiais têm sido usados, os quais produzem uma estrutura de camadas com novas características.

A caracterização da rugosidade e da topografia de superfícies tornou-se uma ferramenta de muita importância para muitas indústrias, isto porque as propriedades funcionais dos materiais são muitas vezes determinadas pela estrutura e características da superfície (CHAPPARD, D. *et al.*, 2003, MAHOVIC POLJACEK, S. *et al.*, 2008, MARTAN, J. *et al.*, 2005).

De acordo com estudos realizados nas últimas décadas (RIE, K.T. *et al.*, 1995, JAVORSKY, 2002), camadas superficiais de nitreto de titânio produzidas a plasma apresentam elevado grau de biocompatibilidade. Também se sabe que a rugosidade influi na diferenciação e atividade das células ósseas em contato com a superfície de implantes. Assim, como a nitretação a plasma induz simultaneamente a formação de nitreto de titânio e a alteração da geometria da superfície, é grande o interesse na caracterização dessas alterações e suas relações com as condições de nitretação (RIE, K.T. *et al.*, 1995, JAVORSKY, 2002).

Em particular, a liga Ti6Al4V submetida ao processo de nitretação a plasma mantém a sua biocompatibilidade, aprimora o processo de osteointegração, além de melhorar a resistência à corrosão, ao desgaste e à fricção.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é caracterizar a superfície de amostras da liga Ti6Al4V do ponto de vista das modificações topográficas produzidas no processo de nitretação. Sabe-se que superfícies rugosas exibem padrões característicos de espalhamento de luz, ou de distribuição de intensidade de brilho em imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Assim, para caracterizar as amostras, foram adquiridas imagens de elétrons secundários de topo das superfícies nitretadas, as quais foram analisadas para medir as respectivas dimensões fractais.

2 PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA

2.1 Plasma e o Processo de Nitretação

Desde aproximadamente o início dos anos 80, as técnicas de modificação superficial de ligas metálicas tem experimentado um grande desenvolvimento. O uso de feixes de alta energia, plasmas e técnicas de deposição em vácuo permitem modificações superficiais muito mais controladas e de alta qualidade. Muitas destas novas técnicas foram originalmente desenvolvidas e extensivamente usadas em aplicações em filmes finos na área de eletrônica, mas, atualmente, estão sendo aplicados em aços, alumínio, titânio e suas ligas (KRAUSS, 1989).

A nitretação a plasma, também chamada de nitretação iônica, ou nitretação por descarga luminescente, é uma tecnologia bem conhecida para tratamento superficial de metais. O plasma pode ser definido como um gás altamente ionizado constituído por elétrons livres, átomos neutros, radicais livres e moléculas ionizadas ou excitadas. O impacto dos elétrons com moléculas gasosas e a consequente transferência de energia levam à excitação e à subsequente relaxação do átomo provocando a emissão de fótons. O processo é auto-sustentado, pois durante as colisões novos elétrons são gerados assim como novos átomos ou moléculas neutras que irão colidir com estes elétrons e, assim, sucessivamente. O plasma é formado pela aplicação de um campo elétrico, alto o suficiente para produzir elétrons e íons livres, entre dois eletrodos (TIER, 1998, JAVORSKY, 2001).

O equipamento necessário para nitretação a plasma consiste de uma câmara de aço inoxidável, uma bomba de vácuo, um sistema de distribuição de gases e uma fonte de alimentação. O material a ser tratado é colocado dentro da câmara e conectado ao cátodo enquanto as paredes da câmara são conectadas ao ânodo. Uma diferença de potencial é então aplicada entre o cátodo e o ânodo, fazendo com que o plasma surja e circunde a amostra. Os íons positivos e átomos no estado excitado, produzidos na descarga movem-se rapidamente em direção a amostra (carregada negativamente) e atingem sua superfície com alta energia cinética.

O bombardeamento da superfície por estas partículas causa “sputtering”, isto é, a remoção de átomos da superfície por transferência de energia cinética, resultando na limpeza e despassivação superficial. Uma superfície despassivada favorece a difusão de espécies químicas, como o nitrogênio, do plasma para o material que está sendo tratado possibilitando a formação de nitretos superficiais.

Este processo produz uma estrutura de camadas, as quais possuem diferentes valores de dureza, de tal forma que se estabelece um gradiente de dureza que dá suporte mecânico aos nitretos superficiais, pois a pequena diferença entre os módulos de elasticidade das camadas ajuda a evitar a decoesão ou o trincamento tanto do revestimento como do substrato (JAVORSKY, 2001).

Uma das vantagens do processo de nitretação a plasma em relação aos processos convencionais é que além da espessura, também a estrutura da camada nitretada pode ser variada. O controle de parâmetros como pressão, composição do gás e temperatura oferece a possibilidade de efetuar alterações na estrutura de camadas, conferindo-lhe propriedades especiais e tornando-a adequada para diferentes condições de trabalho. A variação destes parâmetros, juntamente com a voltagem e a densidade de corrente, é totalmente controlável, assegurando a reprodutibilidade do tratamento (TIER, 1998, JAVORSKY, 2001).

Quando o titânio ou suas ligas são submetidos ao processo de nitretação duas camadas distintas podem se desenvolver na sua superfície: uma mais externa chamada de camada de compostos e outra mais interna chamada zona de difusão. A camada de compostos é constituída por nitretos de titânio δ -TiN (estrutura cúbica de face centrada) e ϵ -Ti₂N (estrutura tetragonal). Na zona de difusão, o nitrogênio que se difunde através da camada de compostos para o interior da amostra é incorporado dentro da rede do titânio, formando uma solução sólida intersticial (ARZAMOSOV, 1996, MENTIN, 1989). Na Figura 1 é representada a estrutura de camadas resultante deste processo.

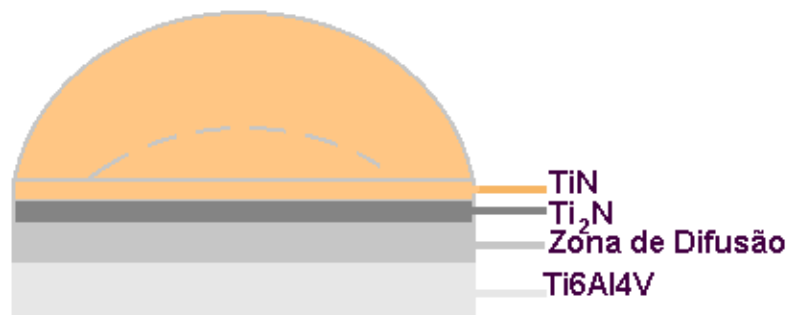


Figura 1 - Representação esquemática da estrutura de camadas formadas sobre a liga Ti6Al4V após nitretação (JAVORSKY, 2001).

3 RUGOSIDADE

Rugosidade é o conjunto de irregularidades formado por saliências e reentrâncias de uma superfície. Os tamanhos e a distribuição espacial destas irregularidades têm papel importante no desempenho de peças e instrumentos.

No caso de superfícies submetidas a processos físico-químicos, tanto naturais como induzidos por tratamentos superficiais, estas grandezas podem tanto indicar a ocorrência de processos indesejados, como possibilita o controle das condições de tratamento, visando uma aplicação específica.

Os parâmetros usados para a caracterização da rugosidade são divididos em três classes, conforme o tipo de medida em que se baseiam, a saber, distâncias verticais, distâncias horizontais e medidas proporcionais. Entre os que utilizam medidas de distâncias verticais, ou de profundidade, encontram-se R_a , R_q , R_z , R_t e R_{\max} (ALVES, 2002, SALES PALMA, 2006). Os parâmetros obtidos a partir de medidas horizontais incluem L_e e T_p . Finalmente, os principais parâmetros baseados em medidas proporcionais são K_e e K_p (SIQUEIRA *et al.*, 2003).

Estes parâmetros são utilizados quando perfis de elevação uni- e bidimensionais são obtidos por perfilometria ou microscopia de força atômica, ou ainda, de imagens de cortes transversais.

3.1 Parâmetros Baseados em Medidas Verticais

3.1.1 Rugosidade Média

Este é o parâmetro mais usado mundialmente. A rugosidade média é a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos dos pontos do perfil superficial em relação à linha média dentro do percurso de medição,

$$R_a = \frac{1}{L} \int_a^b |y| dx, \quad (1)$$

em que $L = b - a$, $y = f(x) - \langle f(x) \rangle$ e $\langle f(x) \rangle$ é a linha média, calculada como o valor médio de $f(x)$ no intervalo $[a, b]$,

$$\langle f(x) \rangle = \frac{1}{L} \int_a^b f(x) dx, \quad (2)$$

Para uma amostra de perfil, como as obtidas em um perfilômetro, calcula-se R_a como

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3)$$

onde n é o número de pontos de perfil amostrados e a linha média, formada por um conjunto discreto de pontos do perfil, pode ser

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i), \quad (4)$$

A integral na Equação (1) ou o somatório da Equação (3) corresponde à área em verde na Figura 2 e, portanto, de acordo com a Equação (2) R_a pode ser calculada pela divisão desta área pelo comprimento L .

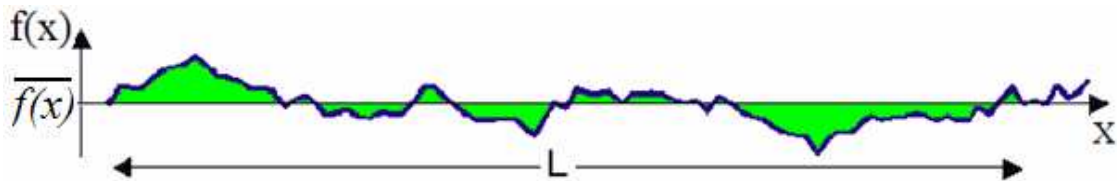


Figura 2 – A rugosidade média, R_a , corresponde à altura obtida pela divisão da área em verde pelo comprimento L . (JAVORSKY, 2002).

O cálculo de R_a pelo método ilustrado na Figura 2 é conveniente quando se utilizam imagens digitais de cortes transversais da amostra. Para estimar R_a , a imagem do perfil é inicialmente segmentada e, em seguida, é traçada a linha média do perfil superficial. Então, a área entre o perfil e a linha média é marcada e medida. Finalmente, o resultado é dividido pela largura da imagem L .

Em Javorsky (2002), o valor de R_a da superfície da liga Ti6Al4V nitretada a plasma a 1073K foi medido aplicando este método a imagens de microscopia eletrônica de varredura, e o valor de $1,0\mu\text{m}$ em segmentos de $73\mu\text{m}$ foi obtido.

3.1.2 Desvio Quadrático Médio (R_q)

Do mesmo modo que R_a , este é outro parâmetro que mede o afastamento médio da linha média. O desvio quadrático médio R_q é calculado como a raiz da média do quadrado (RMS – Root Mean Square) do afastamento da linha média,

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_a^b y^2} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad (5)$$

Podemos ainda determinar R_p , que seria a altura máxima do pico mais elevado de rugosidade, situado acima da linha média, e o valor de R_m , que consiste na máxima profundidade do vale mais profundo da rugosidade, situado abaixo da linha média. A figura 3 demonstra os parâmetros citados.

3.1.3 Rugosidade Parcial (Z_i)

A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média existente dentro do comprimento de amostragem, no i -ésimo intervalo de amostragem, conforme ilustrado na Figura 3.

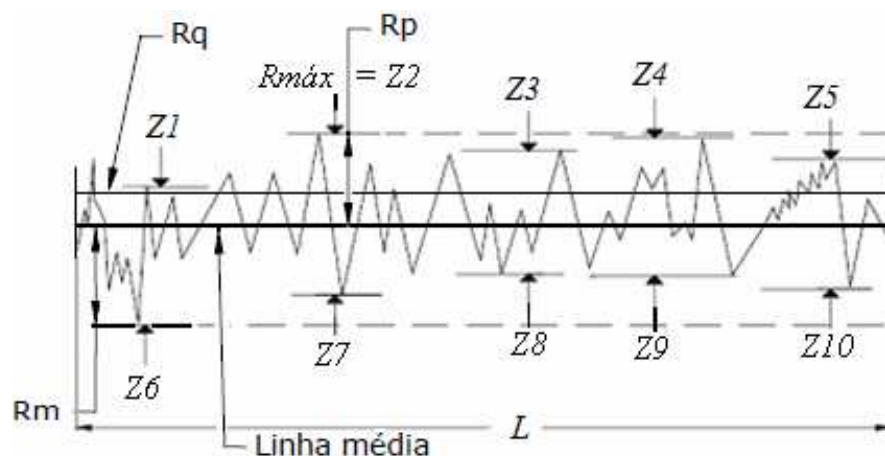


Figura 3 – Rugosidades parciais, rugosidade máxima ($R_{máx}$) (SALES PALMA, 2006).

3.1.4 Rugosidade Máxima (R_{\max})

Consiste no maior valor das rugosidades parciais Z_i apresentadas no percurso de medição (ver Figura 3).

3.1.5 Rugosidade (R_z)

Corresponde à média aritmética dos valores de rugosidade parcial (Z_i), representados na Figura 3,

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (6)$$

3.2 Parâmetros baseados em medidas horizontais

Dentre os parâmetros de medidas de rugosidade usados para caracterização temos os parâmetros baseados em medidas horizontais, estes consistem em L_c que é o comprimento do contato a uma profundidade abaixo da saliência mais alta; e T_p que consiste na fração de contato a determinada profundidade (GONZÁLEZ, 1987 apud SIQUEIRA *et al.*, 2003).

3.3 Parâmetros baseados em medidas proporcionais

Para os parâmetros de medição de rugosidade fundamentados em medidas proporcionais temos K_e que é definido como o coeficiente de esvaziamento e K_p que consiste no coeficiente de enchimento (GONZÁLEZ, 1987 apud SIQUEIRA *et al.*, 2003).

3.4 Limitações dos Parâmetros de Rugosidade

O uso de diferentes parâmetros de medida de rugosidade está ligado ao fato de que diferentes perfis podem apresentar valores idênticos para alguns destes parâmetros.

Assim, por exemplo, dois perfis podem apresentar o mesmo valor de medida vertical como R_a , e diferir grandemente nos valores de uma medida horizontal, como L_c . Desta forma não podemos descrever as irregularidades apresentadas na superfície do material usando um único parâmetro, pois, cada um deles, revela um aspecto da topografia estudada.

Uma descrição alternativa da rugosidade superficial pode ser obtida com o uso da geometria fractal. Esta nos possibilita a caracterização de diferentes perfis, pois estes apresentarão diferentes valores de dimensão fractal. Não é possível encontrar muitos trabalhos que utilizaram a geometria fractal para descrever a topografia da superfície e as mudanças morfológicas produzidas por vários tratamentos superficiais tais como: nitretação a plasma, bombardeamento de íons, ataques químicos (CHAPPARD, D. *et al.*, 2003, MAHOVIC POLJACEK, S. *et al.*, 2008, MARTAN, J. *et al.*, 2005). No entanto não encontramos trabalhos que usam a medida da dimensão fractal para descrever as alterações na rugosidade superficial de ligas de titânio nitretadas a plasma.

Desta forma, o trabalho visa investigar as mudanças tribológicas realizadas na superfície dos materiais submetidas ao processo de nitretação a plasma, bem como utilizar a geometria fractal como ferramenta de caracterização, pois esta é sensível às alterações ocorridas na superfície, mostrando maiores mudanças nas alturas das irregularidades da superfície mais precisamente do que os parâmetros de rugosidade.

4 FRACTAIS

Fractal (do latim “fractus” que significa “irregular” ou “quebrado”) é definido como um objeto cuja forma geométrica irregular ou fragmentada pode ser dividida em partes, as quais, ao menos aproximadamente, são cópias em tamanho reduzido do todo (SOARES, 1994).

A teoria dos fractais foi organizada em um ensaio de Benoit Mandelbrot intitulado “Objetos Fractais: forma, acaso e dimensão”, publicado em 1975 (FRACTAL..., 1999. p.2527). Objetos fractais já eram conhecidos há quase um século. Entretanto, eles só haviam sido citados como anomalias ou contra-exemplos de certas noções geométricas. Na concepção de Mandelbrot, essas “exceções” deixam de ser marginais. Ao contrário, os casos “interessantes” tornam-se habituais. De fato, a natureza fornece inúmeros exemplos de sistemas que apresentam um caráter fractal, entre os quais podemos citar a ramificação dos brônquios e bronquíolos, a ramificação de uma bacia hidrográfica, a forma das cadeias de montanhas, o movimento browniano, etc. A partir deste entendimento, novos “modelos” ou figuras geométricas elementares nascem para enriquecer o alfabeto matemático.

4.1 Auto-Similaridade e Auto-Afinidade

Uma importante característica dos objetos fractais é a auto-similaridade ou a auto-afinidade. Um objeto é auto-similar quando, ao analisarmos uma pequena parcela ampliada do mesmo, esta se parece com o objeto como um todo. Existem dois tipos de semelhança: a exata (réplicas perfeitas) e a estatística (réplicas que apresentam os mesmos padrões, as mesmas características).

Um objeto é denominado estritamente auto-similar quando pequenas parcelas do mesmo reconstituem o objeto inicial. Cada uma destas parcelas é uma cópia exata, só que em escala menor, do todo. Um exemplo frequentemente encontrado na literatura para esse tipo de fractal é a curva triádica de Koch. Esta curva pode ser obtida da seguinte forma: 1º) Em um segmento com certo comprimento é dividido em três outros iguais; 2º) No segmento central é dividido em outros dois segmentos iguais em comprimento. Com o término dos passos citados acima, obtém-se uma figura composta por quatro segmentos. Repetindo nesses segmentos os passos acima se obtém uma figura com 16 lados.

A curva de Koch resulta da repetição deste processo *ad infinitum*, conforme ilustra a Figura 4. Agora, ampliando uma porção dessa curva poderemos reproduzir a curva completa, ou seja, a porção ampliada sobrepõe-se perfeitamente à curva original.

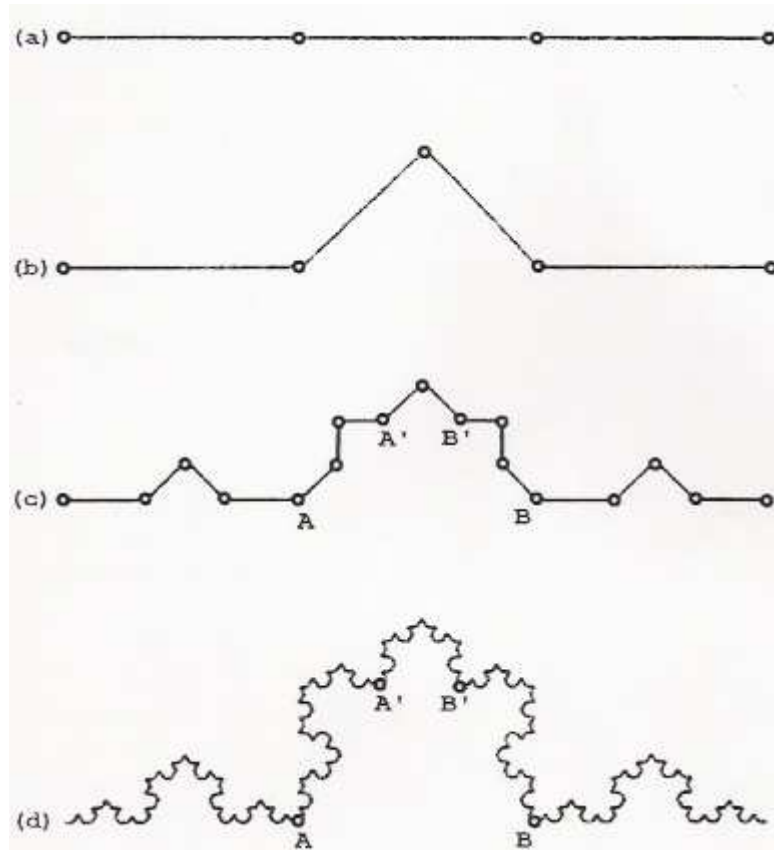


Figura 4 - Curva triádica de Koch. Em (a) o segmento de reta é dividido em três partes iguais; em (b) o segmento central é substituído por dois segmentos iguais; em (c) processo é repetido nos segmentos resultantes do primeiro e segundo passos; em (d) dos passos anteriores são repetidos indefinidamente CHAVES (1989 apud SOARES, 1994).

Para a maioria dos objetos fractais, as partes são miniaturas "deformadas" do todo, isto é, para reproduzir o objeto original é necessário ampliar cada uma de suas partes diferentemente em cada uma das direções do espaço. Neste caso, quando a ampliação é anisotrópica, diz-se que os objetos são auto-afins.

4.2 Fractais Estatísticos

Muitos objetos presentes na natureza apresentam formas fractais, porém muitos destes não apresentam uma auto-similaridade exata, isto é, uma pequena parcela não possui a forma completa do todo.

Entretanto, quanto mais de perto estes objetos forem observados, mais detalhes serão revelados. Um exemplo muito conhecido é o da costa de uma ilha ou continente, conforme ilustrado na Figura 5. Nesse tipo de fractal natural o resultado imediato de cada ampliação não pode ser mapeado exatamente sobre o todo. Contudo, observa-se que existe uma semelhança qualitativa, isto é, se forem feitas ampliações em diferentes pontos, então, em média, as características estruturais dessas ampliações tenderão para um valor próximo das características médias do todo. Objetos que apresentem auto-afinidade ou auto-similaridade apenas em média são conhecidos como **fractais estatísticos**.

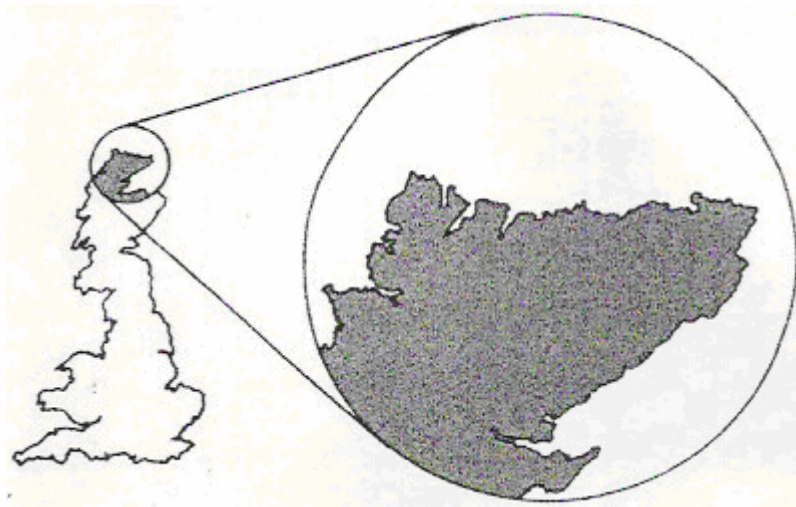


Figura 5 - Estrutura Fractal de um contorno de uma região Julien (1987 apud SOARES, 1994).

4.3 Dimensão Fractal

Mandelbrot propôs como definição que um fractal é “um objeto que apresenta uma dimensão característica maior do que a sua dimensão topológica, mas inferior à dimensão do espaço em que está imerso” (1977 apud SOARES, 1994). A caracterização de um objeto segundo esta descrição consiste em determinar as diferentes dimensões características que se encontram entre as duas últimas.

A principal informação que se obtém das definições de dimensão usadas para caracterizar objetos irregulares que apresentam auto-similaridade ou auto-afinidade é sobre a maneira como estes objetos ocupam o espaço em que estão imersos, e cuja dimensão é definida em termos do número de coordenadas necessárias para localizar um ponto.

A ocupação do espaço pode ser qualificada em termos da conectividade entre os pontos que formam o objeto ou quantificada conforme variam as medições sobre o objeto com o tamanho da escala de medida. No primeiro caso fala-se em dimensão topológica e, no segundo, em dimensão de medida. Assim, por exemplo, uma curva é um objeto de dimensão topológica 1 que pode tanto ocupar um espaço bidimensional (um plano) como um espaço tridimensional, enquanto uma superfície, que tem dimensão topológica 2 ocupa parcialmente um espaço tridimensional.

Segundo Russ (1992), a dimensão fractal determina a taxa com a qual a medida (o perímetro, a área ou volume) de um objeto aumenta com a redução da escala de medição. Existem variadas maneiras de se medir dimensão fractal. *As técnicas mais utilizadas* são as de Richardson (dimensão de escala), de Minkowski e de Kolmogorov (dimensão de Box-counting), as quais são representadas esquematicamente na Figura 6 e detalhadas nas seções subsequentes.

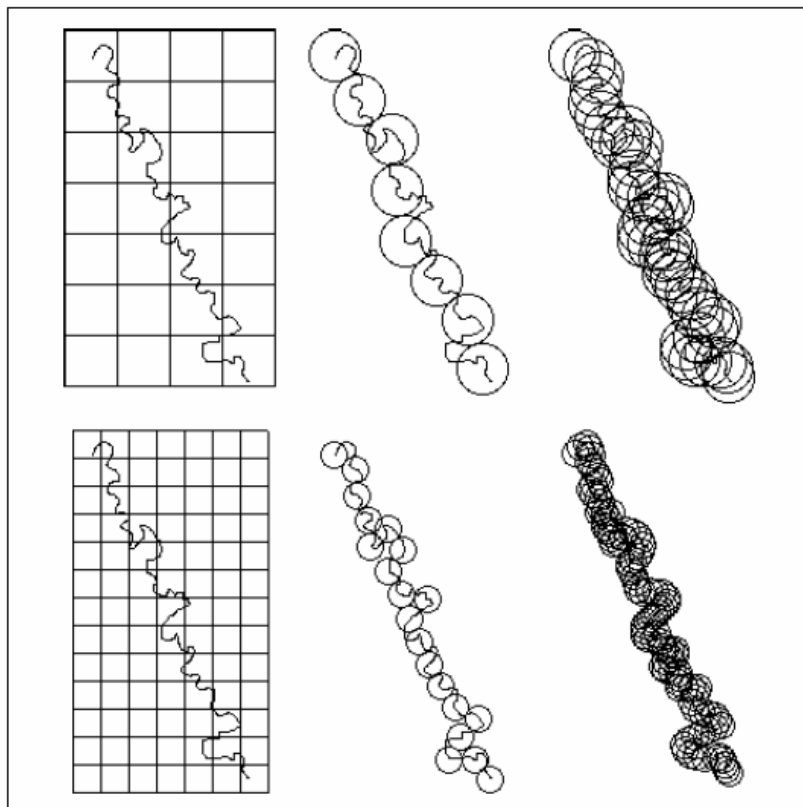


Figura 6 - Técnicas para medir dimensão fractal. À esquerda a técnica de Kolmogorov, de contagem do número de caixas através da qual passa a curva em função do tamanho da caixa. No centro a técnica de Richardson, de contagem do número de réguas, ou passos, necessários para cobrir a curva em função do comprimento da régua. À direita a técnica de Minkowski, que consiste em medir a área varrida por um círculo que se desloca continuamente ao longo da curva em função do tamanho do círculo. (RUSS, 1992).

4.3.1 Dimensão de Auto-Similaridade

A dimensão de auto-similaridade, D , é definida com o expoente da relação entre o número, N , de partes auto-similares em que o objeto é dividido e o fator de escala, λ , pelo qual é reduzida a escala de medida,

$$\lambda = \frac{1}{N^{\frac{1}{D}}} \quad (7)$$

Assim, por exemplo, dividindo um segmento de reta de comprimento L_0 em $N = 3$ partes iguais, o seu comprimento fica reduzido a $L = \lambda.L_0 = \frac{1}{3}.L_0$. Portanto, $\lambda = \frac{1}{3} = \frac{1}{3^{\frac{1}{D}}}$ e

$D = 1$. Já no caso da curva de Koch, definida na Seção 3.3.1, observa-se que cada uma das $N = 4$ partes da curva da Figura 4 (b) tem comprimento L igual a $\frac{1}{3}$ do comprimento L_0 da curva na Figura 4(a). O mesmo fator se obtém quando se compara a Figura 4(c) com a Figura 4(b) e assim, sucessivamente. Portanto, $L = \frac{1}{3}$ e $L_0 = \frac{1}{4^{\frac{1}{D}}}$. Isolando D na Equação (7)

obtém-se

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{\lambda}} \quad (8)$$

que, para o caso da curva de Koch vale $D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,2618$. Neste exemplo, diferentemente do caso de um segmento de reta, a dimensão de auto-similaridade excede a dimensão topológica do objeto, assumindo um valor não inteiro menor do que a dimensão do espaço bidimensional em que está imerso. O valor não inteiro desta medida é que a define como uma "Dimensão Fractal".

A dimensão de auto-similaridade, embora útil para o entendimento do conceito de dimensão fractal, aplica-se apenas para objetos estritamente auto-similares, cuja regra de construção é conhecida, o que não é o caso da maioria dos objetos encontrados na natureza.

4.3.2 Dimensão de Escala

A dimensão de escala é a primeira das medidas de dimensão usadas para figuras cuja complexidade não deixa transparecer imediatamente a sua auto-similaridade.

A técnica de Richardson consiste em realizar uma "caminhada" ao longo da curva, colocando sobre ela, sucessivamente, uma régua com comprimento r .

O número de régua utilizadas para cobrir toda a curva multiplicada pelo tamanho da mesma uma medida L para o comprimento. Agora se o tamanho da régua usada para realizar esta medida for reduzido, então o número de irregularidades contornadas será maior e o comprimento medido tende a aumentar. Portanto, durante esse processo diferentes valores para o comprimento serão obtidos.

Colocando esses resultados em uma tabela, duas situações podem ocorrer: o comprimento converge para um valor limite ou cresce indefinidamente. No primeiro caso, encontram-se as curvas da geometria euclidiana, como círculos, elipses, parábolas e outras cujo comprimento podem ser calculados por uma integral de linha. No segundo caso, encontram-se os objetos fractais. Então, lançando estes resultados em um gráfico de $\log L$ contra $\log \frac{1}{r}$, a inclinação da reta ajustada aos pontos desse gráfico fornece $D - 1$, em que D é a dimensão de escala.

4.3.3 Dimensão de Capacidade

Definida como um procedimento de contagem de caixas, a técnica de Kolmogorov mede a dimensão de capacidade, também conhecida como dimensão de "box-counting". O procedimento para medir esta dimensão consiste em cobrir o objeto com uma grade e contar o número N de quadrados em que existe pelo menos um ponto do objeto. O procedimento é repetido para caixas de tamanhos r variados. A dimensão de capacidade é obtida lançando os valores obtidos em um gráfico de $\log N$ versus $\log r$ e medindo o coeficiente angular da reta obtida. Este é um método rápido, mas de menor precisão numérica.

A técnica de Minkowski é baseada na relação entre a área de influência da curva analisada e o espaço métrico que ela ocupa. Para obter o seu valor, a curva a ser caracterizada é dilatada usando-se um círculo com raio r que percorre todo o seu traçado, formando o desenho de uma "salsicha". Desta forma, teremos uma área formada pela figura que está sobreposta à curva.

O procedimento consiste em utilizar círculos de raios sucessivamente menores e lançar os resultados em um gráfico do logaritmo da área versus o logaritmo do raio, obtendo uma reta cujo coeficiente angular da mesma fornecerá o valor da dimensão fractal daquela curva, ou contorno em estudo.

4.4 Relação Brilho e Superfície

Segundo Russ (1994), a análise das variações de brilho pode ser usada para descrever a rugosidade. E se o ser humano é capaz de pressentir a rugosidade ou a aspereza de uma superfície pelo seu aspecto visual, então deve ser possível extrair informações sobre a dimensão fractal e características de uma imagem que estejam relacionadas com a rugosidade. A luz espalhada pela superfície contém as informações necessárias para quantificar a textura (a maioria dos pesquisadores descreveria um padrão de brilho com “suave” ou “texturizado”, dependendo da variação local de brilho ser pequena ou grande).

Os valores de textura obtidos não concordam com a dimensão física do material, porque dependem dos detalhes da iluminação, do albedo da superfície (refletividade absoluta), resposta da câmera, etc. No entanto, esses valores, variam na proporção da dimensão fractal da superfície.

Na Figura 7 é mostrado um exemplo de correlação entre a dimensão física medida em uma seção transversal e a dimensão da textura de imagens de MEV e de microscopia óptica. Para fins de comparação, a textura da imagem, determinada tanto em baixa como em alta ampliação mostra a mudança na rugosidade superficial física. Entretanto, uma vez que existem muitos fatores que determinam a relação entre brilho absoluto e a inclinação da superfície, e uma vez que o fractal é auto-afim ao invés de auto-similar, a comparação numérica dos perfis de elevação e de brilho pode não ser acessível.

Segundo Russ (1994), os valores das dimensões de superfície dos mesmos materiais sob condições de iluminação e visualização semelhantes podem ser comparados, utilizando ferramentas de imageamento. Porém dados quantitativos são difíceis de obter, uma vez que, os coeficientes de proporcionalidade decorrentes da iluminação, os processos físicos da produção da imagem e o processo de detecção são complexos. Portanto, a relação quantitativa entre a dimensão da imagem, isto é, da distribuição de brilho, e a dimensão física da superfície, isto é, do perfil de elevação, só podem ser estabelecidos, empiricamente.

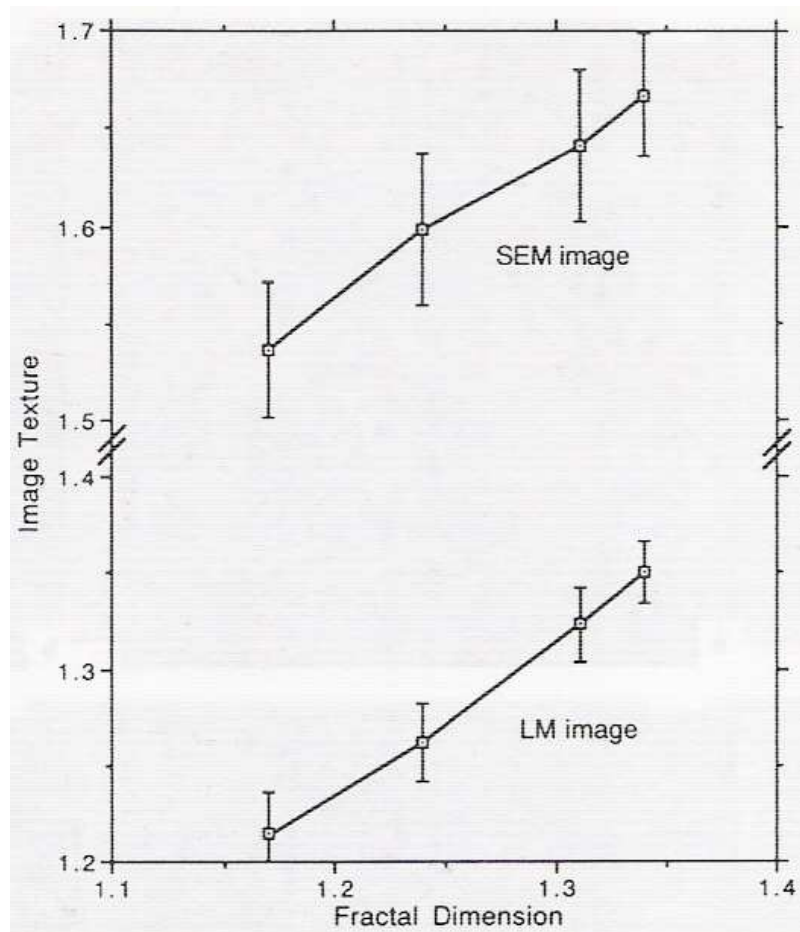


Figura 7 – Correlação entre a dimensão física medida em uma seção transversal e a dimensão da textura da imagem da superfície (RUSS, 1994).

Uma análise entre a relação das elevações e as inclinações da superfície é mais bem entendida utilizando um perfil de elevação simples. Ou seja, para um plano em estudo que contém o perfil, trabalhando somente no espaço bidimensional, a inclinação da linha será a primeira derivada da elevação.

Se este perfil de elevação for um fractal então as inclinações acabam por ser uma questão difícil, pois fractais matemáticos, como a curva de Koch, não possuem derivada definida em nenhum ponto.

Em métodos que medem a elevação da superfície e o conhecimento do desvio-padrão das elevações não é suficiente para descrever a rugosidade da superfície. A dimensão fractal inclui a informação necessária sobre a correlação de valores como uma função da sua separação.

A partir de dados em uma tabela destas elevações é possível calcular a dimensão fractal. Mas essas unidades de brilho não possuem qualquer relação absoluta com qualquer coisa sobre a superfície. Para uma iluminação perfeitamente espalhada (difusa), a intensidade segue uma lei Lambertiana que varia com o co-seno do ângulo com a normal da superfície. Conseqüentemente, as variações de brilho representam uma mudança na inclinação da superfície, e não de elevação (todo mapa de elevação pode ser convertido em uma imagem, ou mapas de brilho, mas nem todo mapa de níveis de brilho é um mapa de elevação). Ou seja, o brilho não é sinônimo de elevação e de fato, na maioria das vezes, o brilho está associado à inclinação da superfície e não de sua elevação (RUSS, 1994).

4.5 Métodos de Medida de Dimensão Fractal em Função do Brilho

Para superfícies, o perfil de elevação obtido por técnicas experimentais, como MEV, AFM, etc., é auto-afim. E isto determina quais técnicas de medida de dimensão fractal podem ser utilizadas.

Segundo Russ (1994), a interseção de um plano horizontal com uma superfície fractal auto-afim produz linhas de contorno que são auto-similares, ao invés de meramente auto-afins, e assim, pode-se usar métodos de medidas de dimensão fractal para linhas auto-similares. Desta forma, algumas técnicas que podem ser utilizadas são: Método das Ilhas de Korcak, Método de Análise Dimensional, Método do Edredom de Minkowski e o Método de Medida de Textura Local.

4.5.1 Edredom de Minkowski

Este método pode ser aplicado tanto para medição de superfícies auto-similares e auto-afins e para superfícies estritamente auto-similares um elemento é movido por cada ponto da superfície para varrer um volume (chamado de edredom de Minkowski, do mesmo modo que a salsicha de Minkowski é colocada em torno de uma linha), e este elemento é chamado de “elemento estruturante”. Modificações nesse elemento estruturante permitem que este método também possa ser utilizado para superfícies auto-afins.

Uma imagem possui valores de elevação (nesse caso o brilho é atribuído conforme o valor de elevação), e a medida de Minkowski pode ser realizada por muitos sistemas de

análise de imagens usando procedimentos de vizinhanças locais às vezes chamados de dilatação em escala de cinza ou operadores de classificação.

Estes operadores examinam uma região de pixels em torno de cada pixel da imagem original, encontram os valores mais brilhantes ou mais escuros (maior ou menor “elevação”) naquela vizinhança, e criam uma nova imagem na qual o pixel central recebe um dos valores extremos, ou a diferença entre os dois. Se a diferença não é diretamente acessível, então, guardando separadamente as imagens de mínimo e máximo, e aplicando uma subtração subsequente dará à mesma informação de faixa de valores.

Se a vizinhança é feita circular, ou o mais próximo possível de um círculo, considerando uma grade quadrada então, o valor integrado total de brilho da imagem de diferença ou de faixa é o volume do edredom de Minkowski para um tamanho de disco, correspondente ao tamanho da vizinhança. A repetição da operação para muitos tamanhos variados de vizinhanças fornecerá os dados para montar um gráfico log-log, do volume contra o raio do elemento estruturante, a partir do qual a dimensão fractal de superfície é obtida (RUSS, 1994).

4.5.2 Ilhas de Korcak

Sabendo-se que existe uma relação entre a rugosidade das fronteiras expressas como uma dimensão fractal e a rugosidade da superfície, isto nos fornece um dos meios utilizados para medir dimensão fractal, neste contexto como a relação de Korcak.

Passando um plano através de uma superfície numa direção vertical produz um perfil de elevação que é auto-afim, ao invés de auto-similar e desta forma deve ser feitas medidas utilizando métodos de medida para perfis auto-afins. Contudo, se passarmos um plano horizontal através de uma superfície nos resulta em um perfil de interseção, cujo mesmo obedece a uma relação $(D-1)$, desde que a superfície seja isotrópica. Esta interseção com o perfil produz uma série de pontos de interseção cujo espaçamento entre eles é fractal.

Toda essa abordagem descrita acima, da interseção de um plano horizontal com uma superfície fractal, consiste em medir a área das ilhas ou lagos que se encontram acima ou abaixo desta superfície que foi seccionada. Portanto, uma imagem segmentada em um limiar de brilho produzirá as tais ilhas ou lagos e o processo de segmentação (“threshold”) pode ser repetido em muitas “elevações” (níveis) diferentes e o número de ilhas ou lagos pode ser contado. Um gráfico do número de ilhas ou lago cuja área excede o valor de A em função de A , em escala log-log, produz um gráfico com uma linha reta cujo valor da inclinação, por

meio da qual, pode-se determinar a dimensão fractal da superfície. Este é o chamado Método de Korcak para a medida da dimensão de uma superfície e embora ineficiente o método produza valores corretos. Ele tem sido aplicado a casos que variam desde fraturas de metais até a superfície terrestre (RUSS, 1994).

4.5.3 Análise Dimensional

Segundo Russ (1994), uma outra aplicação para as ilhas ou lagos produzidos pela interseção da superfície fractal com um plano seria usar tanto a área como o valor do perímetro de cada ilha ou lago. Se estes objetos produzidos por este método forem Euclidianos, a relação entre a área e uma dimensão linear como o perímetro seria que a área é proporcional ao perímetro ao quadrado. Um gráfico log-log do Perímetro vs. Área tem uma inclinação igual à metade da dimensão fractal da borda, que por sua vez é 1,0 menor do que a dimensão da superfície. Uma observação deve ser notada aqui, pois temos duas abordagens a serem selecionadas. A primeira seria utilizar a área líquida das ilhas sem qualquer “lago” interno e o perímetro total incluindo aquele em torno de tais regiões internas, e a segunda em que a área inclui os lagos e o perímetro é apenas o da borda externa.

Analisando o gráfico destas duas abordagens nota-se que a inclinação é um pouco diferente para estes casos uma vez que as áreas preenchidas (“cheias”) são maiores que as áreas líquidas (diferença entre a área total da ilha e a área dos lagos no seu interior) e o perímetro externo é menor que o perímetro total.

Existe uma dificuldade com o método do Log P vs. Log A para determinar a dimensão fractal que consiste na grande dificuldade de medir o perímetro ao invés de contar as ilhas. A área é relativamente fácil de determinar (contagem de pixels) e pode ser utilizado para construir diferentes gráficos de Korcak para as mesmas ilhas. Além disso, este método pode ser tendencioso, pois os menores valores de perímetro são medidos com menor precisão e com um tamanho de pixel que é maior em relação ao tamanho total do que para as ilhas com maiores perímetros. Isto é uma consequência devido ao tamanho finito de pixels de uma imagem e da natureza fractal das bordas, o que significa que o perímetro varia com o tamanho do elemento de medição. É por isso que as ilhas menores devem ser descartadas para o ajuste, devido ao pouco número de pixels que elas possuem e que a medição do perímetro e até mesmo da área torna-se muito difícil. E ainda, as ilhas maiores podem ser resultados de várias ilhas menores em contato, ou emendadas (RUSS, 1994).

4.5.4 Textura Local

A luz espalhada por uma superfície rugosa contém as informações necessárias para quantificar a textura então, é possível distinguir diferentes rugosidades e esta capacidade está relacionada com a utilização de vários operadores de textura para a segmentação de imagens.

Desta forma, para imagens obtidas de topo, onde o fator de análise consiste no brilho, torna-se necessário classificar cada pixel da imagem de acordo com alguma característica da superfície, analisar em regiões todos os pixels que se tocam e realizar medidas sobre as características resultantes. Um valor de textura local que mede a dimensão fractal a partir das diferenças de brilho entre cada pixel e seus vizinhos, em função da distância entre os mesmos, pode produzir uma imagem em que o brilho local do pixel é proporcional à rugosidade local. Isto tem sido aplicado a fotos aéreas de cadeias de montanhas, fotos macroscópicas de fraturas de metais, e imagens de microscopia eletrônica de estruturas dentro de células humanas (RUSS, 1994).

Existem dois métodos que são capazes de analisar a textura local. Ambos os métodos usam valores do pixels em uma vizinhança, onde o elemento de varredura (ou análise) pode ser de forma circular, e consideram a distância de cada pixel ao pixel situado no centro do elemento de varredura. Uma abordagem lança em um gráfico, como de costume log-log, a diferença média entre o brilho do pixel central e dos seus vizinhos em função da sua distância. A inclinação deste gráfico é dimensionada e atribuída como o valor de brilho para aquela localização de pixel na imagem. E o processo é repetido para cada pixel da imagem.

O segundo método encontra o pixel mais brilhante e o mais escuro dentro do elemento de varredura (um disco ou uma grade quadrada) em função do raio. O pixel central pode não ser um dos valores extremos. O log-log do intervalo entre o mais escuro e o mais brilhante em função do raio do elemento de varredura produz um valor para a inclinação que é dimensionada e atribuída ao pixel local. Ambas as abordagens dão uma medida de uma dimensão local. Se os valores de brilho do pixel são imaginados como representação de uma elevação, então os discos ou a grade são os elementos estruturante.

Encontrar a diferença entre o mínimo e o máximo é o mesmo que calcular a espessura do edredom de Minkowski. Para uma superfície, o volume deste edredom é equivalente à espessura da salsicha ao longo de uma linha de um perfil. Como o processo pode ser realizado de forma bastante eficiente, simplesmente encontrando os valores mínimos e máximos em função da distância, o procedimento também é o equivalente para a superfície da medição de Hurst para perfis (RUSS, 1994).

5 MICROSCOPIA

Atualmente, os microscópios são aparelhos complexos capazes de revelar estruturas invisíveis a olho nu. A sua utilização desempenha um papel importante para os estudos científicos em Biologia, Medicina, Geologia, Física, Metalurgia, Engenharia, Ciência dos Materiais e muitas outras áreas. Os microscópios são divididos em: Microscópio Ótico (Luz), Microscópio Eletrônico de Transmissão, Microscópio Eletrônico de Varredura, Microscopia Crioelétrica e Microscopia de Força Atômica.

5.1 Microscópio Ótico

O tipo mais simples de microscópio é uma lente de aumento, que permite observação de estruturas com diversos tipos de aumento, mas com o avanço das tecnologias o microscópio foi ficando mais complexo sendo constituído de dois sistemas de lentes que funcionam com duas lentes convergentes, a lente que fica mais próxima do objeto é denominada objetiva e aquela por meio da qual a pessoa observa a imagem ampliada é denominada de ocular. Sendo este aparelho que nos permite a observação com aumentos de algumas dezenas até um máximo de 1500 a 2000 vezes.

Os primeiros microscópios óticos usavam um sistema de luz transmitida assim, a luz gerada em uma fonte é colimada por lentes condensadoras, passando por diafragmas e filtros e depois atravessa a amostra, nesse caso a amostra deve ser preparada em lamina finas e transparentes, produzindo os contrastes que nos permitem identificar estruturas de interesse. Porém se os objetos em estudo forem materiais opacos, no caso metais, outro sistema de observação deve ser utilizado, este sistema chama-se microscopia de luz refletida. Neste, a iluminação é feita através da objetiva com o auxílio de um espelho semitransparente que, ao mesmo tempo em que dirige a luz da fonte de iluminação para a amostra, permite que a luz refletida pela amostra chegue até as oculares (ROSA, 2008).

A adaptação de câmeras fotográficas para o registro das imagens pode ser feita diretamente na posição das oculares ou dividindo o feixe incidente sobre as oculares com um espelho semitransparente e dirigindo-o para um tubo destinado a receber as câmeras. Este tipo de dispositivo é conhecido como tubo trinocular.

A microscopia de luz refletida é frequentemente referenciada como a microscopia de luz incidente ou a microscopia metalúrgica. Esta técnica é escolhida para realizar o imageamento de materiais quando os mesmos permanecem opacos em espessuras de até cerca de 30 microns, como é o caso da maioria dos metais, minerais, cerâmicas, muitos polímeros, semicondutores, carvão, plástico, papel, madeira, couro, vidro e muitos outros. Este arranjo também é usado para analisar a capacidade de uma substância de emitir luz quando exposta a outras radiações diferentes da luz visível (radiação ultravioleta, raios X ou raios catódicos) sendo este fenômeno conhecido como fluorescência (ROSA, 2008).

5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV ou SEM - Scanning Electron Microscopy) um feixe colimado de elétrons, com intensidade e energia bem definido, varre a superfície das amostras. Elétrons de diferentes energias são emitidos da região superficial perturbada pelos elétrons primários do feixe incidente. Estes incluem elétrons primários retro espalhados (BSE - Backscattered Electrons), elétrons Auger e, na sua maior parte, elétrons secundários (SE - Secondary Electrons), isto é, elétrons ejetados da superfície do alvo como resultado da interação dos elétrons primários com os elétrons fracamente ligados aos núcleos dos átomos da amostra.

No MEV pode-se obter um melhor detalhamento com uma ampliação superior a 250.000 vezes. Nesse aparelho, as amostras são iluminadas por um feixe de elétrons, focalizados por um campo eletrostático ou eletromagnético. O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de detectores de raios-X permitindo a realização de análise química na amostra em observação. Através da captação pelos detectores e da análise dos raios-X característicos emitidos pela amostra, resultado da interação dos elétrons primários com a superfície, é possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons. Este procedimento facilita a identificação de precipitados e mesmo de variações de composição química dentro de um grão.

Atualmente quase todos os MEV são equipados com detectores de raios-X, sendo que devido à confiabilidade e principalmente devido à facilidade de operação, a grande maioria faz uso do detector de energia dispersiva (EDX) (JAVORSKY, 2001).

5.3 Microscopia de Força Atômica (AFM)

Princípio de funcionamento do microscópio de força atômica é a medida das deflexões de um suporte em cuja extremidade livre está montada uma sonda que percorre a superfície da amostra. Estas deflexões são causadas pelas forças que agem entre a sonda e a amostra. Seu funcionamento é semelhante a uma agulha de toca-discos (vinil) que no lugar da agulha (sonda), se encontra o “cantilever”, que consiste em uma haste flexível em cuja parte inferior é crescida uma ponta com dimensão de poucos microns.

Para percorrer a amostra de forma a se obter uma imagem, um sistema de posicionamento utiliza cerâmicas piezoelétricas, capazes de realizar movimentos nas três direções (x,y,z), com precisão de angstroms (Å) (DAMIANI, 2000, FILHO, 2003). Durante esta varredura, é utilizado um sistema de alinhamento, em que um feixe de laser incidente sobre o “cantilever” é refletido em um sensor que fornece informação de posição para o sistema de realimentação e controle. Este sistema corrige a posição do “cantilever” de forma a manter o contato com a amostra, durante a varredura e permitir a obtenção da imagem.

Durante a varredura da amostra podem atuar forças de atração ou repulsão, de natureza diversa que variam em função da distância entre o cantilever e a amostra. A imagem obtida na AFM é resultante da convolução da topografia real da amostra com a forma da agulha do cantilever. Assim, diferentemente das outras formas de microscopia aqui descritas, em que a intensidade de brilho está relacionada à inclinação local, na AFM a intensidade de brilho está relacionada ao perfil bidimensional de elevação da superfície e pode ser usada para avaliar rugosidade física.

Alterações na rugosidade superficial da liga Ti6Al4V nitretada a plasma (DA SILVA, M.M., *et al*, 2006), bem como de camadas de nitreto de titânio fisicamente depositadas (CARBONARI, M.J., *et al*, 2001) tem sido observadas com o uso desta técnica. No entanto, o estudo de alternativas para a caracterização quantitativa destas alterações não tem sido explorado.

6 MATERIAIS E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

6.1 Materiais

O material utilizado no presente trabalho, consiste em uma liga de Titânio, Ti6Al4V, cuja composição química é apresentada abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química da liga Ti6Al4V-Grau 5 (massa %).

Carbono (C)	Ferro (Fe)	Alumínio (Al)	Vanádio (V)	Titânio (Ti)
0.0170	0.0170	5.85	3.69	Bal.

As amostras analisadas foram nitretadas no Laboratório de Metalurgia Física da Escola de Engenharia da UFRGS pela Profa. Cristiane Javorsky, do Departamento de Física da UFSM, orientadora deste trabalho. As condições de nitretação estão descritas em (JAVORSKY, 2001), de acordo com a Tabela 2,

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processo de nitretação

Amostras	Temperatura	Gás de Nitretação	Tempo de Nitretação	Pressão do Gás
A21700	973K	Gás Marrom (76% N ₂ + 24% H ₂)	6 horas para todos os processos de nitretação	300 Pa
A21800	1073K	Gás Marrom (76% N ₂ + 24% H ₂)	6 horas para todos os processos de nitretação	300 Pa

6.2 Métodos

Nesta seção são descritas as técnicas que foram utilizadas para a caracterização do material em estudo e as ferramentas de tratamento e análise de dados. O imageamento da topografia foi efetuado por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), no modo de elétrons secundários, pela Profa. Cristiane Javorsky, orientadora deste trabalho, no Laboratório de Metalurgia Física da Escola de Engenharia da UFRGS (SANTIAGO, 2005).

As imagens foram analisadas com o uso de um software, desenvolvido por Hiroyuki Sasaki. Este foi selecionado entre outros, tanto de domínio público como sob licença de uso, por estarem acompanhados da descrição dos métodos numéricos empregados.

O software efetivamente utilizado foi testado com imagens padrão, de objetos estritamente auto-similares ou auto-afins, cujas dimensões medidas são previamente conhecidas, por construção.

6.2.1 Aquisição de Imagens

As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas no modo de elétrons retroespalhados, cujas intensidades de brilho são fortemente determinadas pelas inclinações superficiais, isto é, estão relacionadas à topografia da superfície. Uma vez que a caracterização quanto à dimensão fractal envolve medidas realizadas em diferentes escalas, as imagens foram adquiridas em diferentes magnificações. As demais condições de aquisição (tensão de aceleração, corrente, ganho e offset), foram fixadas de modo que as intensidades não fossem afetadas por outras causas diferentes das inclinações locais.

6.2.2 Processamento e Análise de Imagens

As imagens de microscopia foram processadas e analisadas segundo as técnicas de medida da dimensão fractal, adequadas para a análise de distribuições de intensidade de brilho, descritas nas seções anteriores, a saber, como a técnica do “Box-Counting” para análise de imagens em tons de cinza.

A utilização de software com o intuito de determinar as características das superfícies, as quais foram relacionadas com as condições impostas para as amostras tratadas.

7 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio das ferramentas de aquisição, processamento e análise de imagens.

7.1 Estudos Preliminares

A Figura 8 mostra algumas imagens de microscopia eletrônica de varredura obtidas de topo, utilizada no presente trabalho.

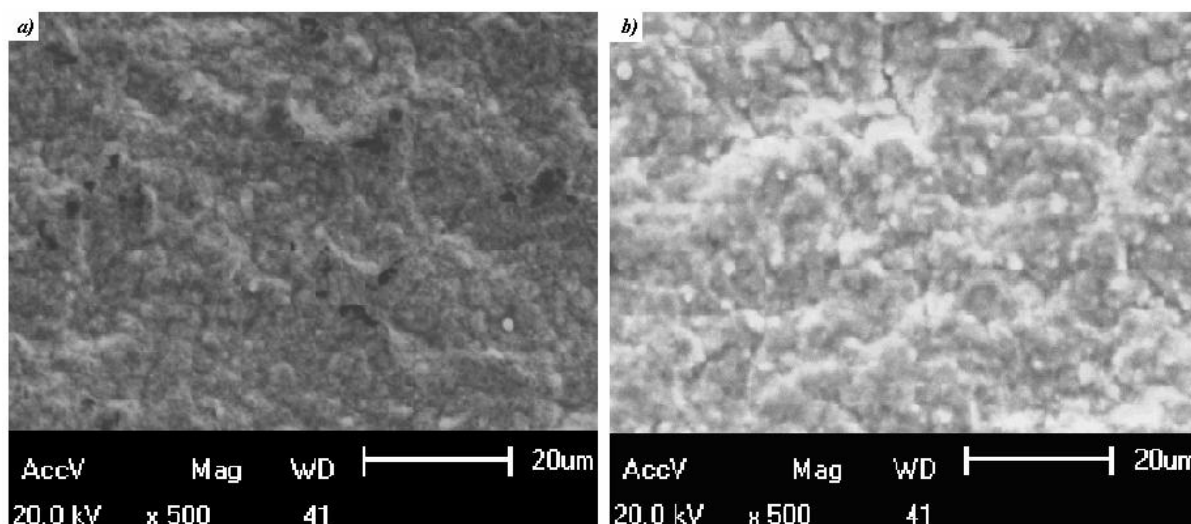


Figura 8 - Imagem de topo obtidas por meio de MEV da Liga Ti6Al4V-ELI. Em a) Imagem da amostra nitretada a 973K e em b) uma imagem da amostra nitretada a 1073K; Ambas com a especificação das condições de aquisição.

7.2 Testes Preliminares

No presente trabalho foi empregado o software empregado foi o *Fractal Analysis System* (versão 3.4.7) - *Fractal3e* -, desenvolvido por Hiroyuki Sasaki, da Secretaria da Agricultura do Japão, como ferramenta para análise das imagens e obtenção para os valores de dimensão fractal. O programa permite analisar imagens em tons de cinza pelo método do "Box-Counting". Para garantir a exatidão dos resultados obtidos com este programa, é preciso que a altura e largura das imagens, medidas em pixels, correspondam a potências de 2.

Primeiramente, utilizam-se imagens de testes para se adquirir confiabilidade nos valores que o programa, para determinar a dimensão fractal, irá nos fornecer e cuja dimensão das imagens é conhecida. Como teste inicial, gera-se uma imagem completamente plana (em preto ou em branco), cuja dimensão fractal é exatamente 2 (dois), emprega-se esta imagem no programa *Fractal3e* para determinar a sua dimensão fractal. O resultado é exatamente o valor esperado, $D = 2,00$. Em seguida, aplica-se o Triângulo de Sierpinski, cujo valor teórico da dimensão fractal é $D=1,5850$. Então, de acordo com o programa utilizado, a dimensão calculada para o triângulo é de $D=1,5743$. As Figuras 9 e 10 demonstram o procedimento para este teste.

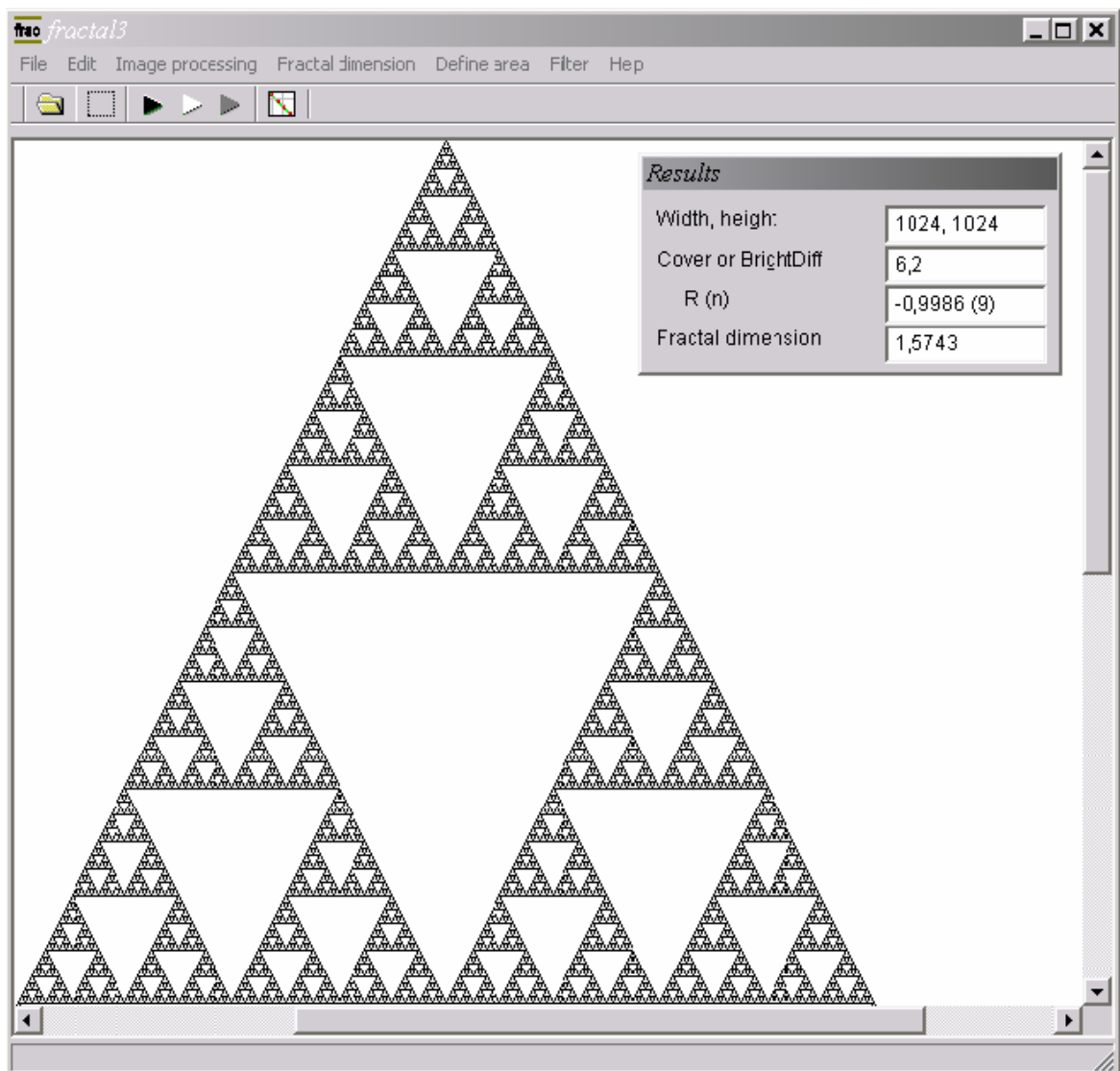


Figura 9 – Cálculo da Dimensão fractal utilizando o software fractal3e para o triângulo de Sierpinski.

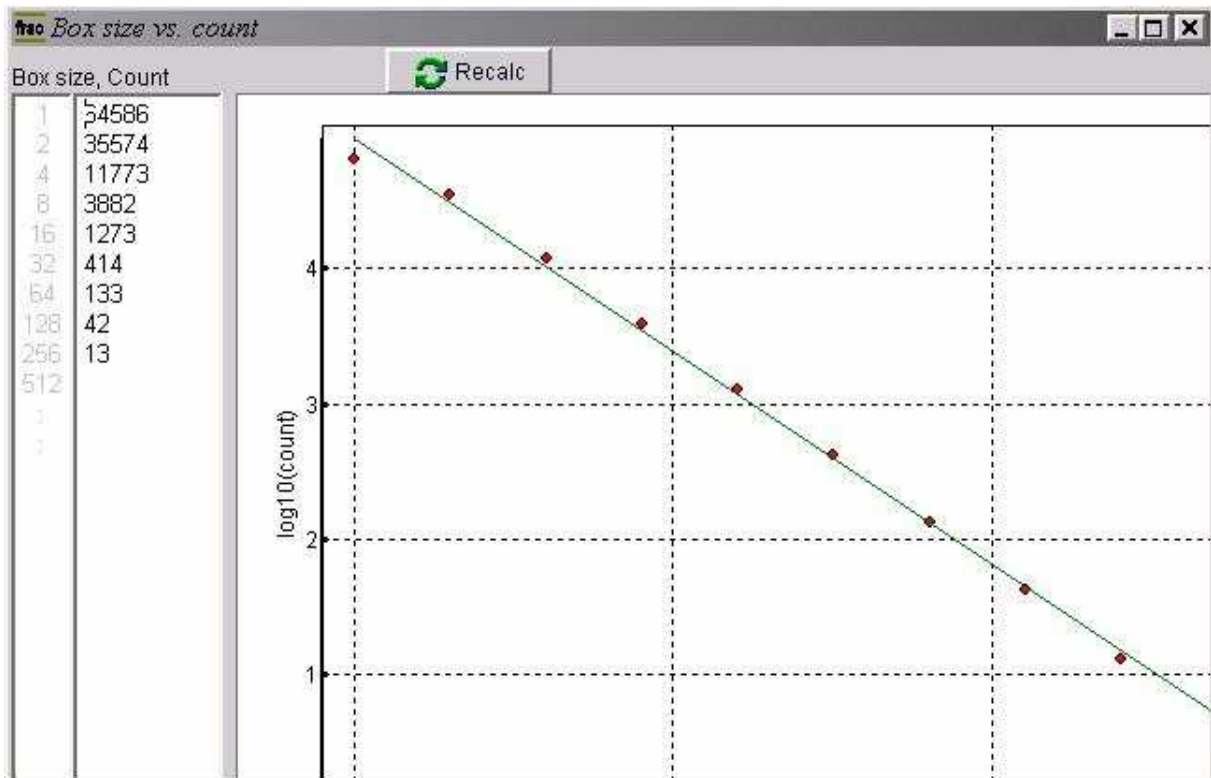


Figura 10 – Gráfico, em eixos log-log, entre a contagem do número de caixas vs. o raio das mesmas para o triângulo de Sierpinski.

O resultado obtido para o Triângulo de Sierpinski não é exato devido ao fato de que as linhas que formam os ângulos de 60° não são compostas por pontos espaçados uniformemente, ou seja, os pixels ao longo da reta não estão espaçados uniformemente e, portanto não formam um contínuo nessas linhas.

Alem disso, testes com imagens geradas pelo programa *Fractal Modeling and Analysis*, de versão para Windows e desenvolvido por M.S. Esterman, proveniente do livro *Fractal Surfaces*, foram aplicadas ao software *Fractal3e* com o intuito de adquirir uma maior confiabilidade nos dados a serem obtidos na determinação da dimensão fractal para as imagens adquiridas por MEV. As Tabelas 3, 4, 5 e 6 mostram os resultados para estes testes. O coeficiente de correlação, $R(n)$, consiste na relação entre, por exemplo, o logaritmo da contagem de caixas e o logaritmo do tamanho das caixas. Portanto, com o software do Russ geram-se imagens, em tons de cinza, cuja dimensão é conhecida, de valor $D=2,5$, para superfícies fractais tais como: Fractal Browniano, Fractal de Midpoint Displacement, Multifractal e Fourier Series.

Tabela 3 – Teste 1 com Imagens Geradas pelo Programa *Fractal Modeling and Analysis*.

Fractal Russ/ Técnica	Minkowski Cover	Kolmogorov	Fractal3e (teste1)
MidPoint Displac.	2,2817	2,5284	2,3311
Broniano	2,2592	2,4573	2,2866
Multifractal	2,2887	2,5249	2,3491
Fourier	2,5836	2,8346	2,8870

Tabela 4 – Teste 2 com Imagens Geradas pelo Programa *Fractal Modeling and Analysis*.

Fractal Russ/ Técnica	Minkowski Cover	Kolmogorov	Fractal3e (teste2)
MidPoint Displac.	2,2833	2,5488	2,3478
Bronian	2,2160	2,4439	2,2561
Multifractal	2,2671	2,4892	2,3006
Fourier	2,5877	2,8663	2,8868

Tabela 5 – Teste 3 com Imagens Geradas pelo Programa *Fractal Modeling and Analysis*.

Fractal Russ/ Técnica	Minkowski Cover	Kolmogorov	Fractal3e (teste2)
MidPoint Displac.	2,2963	2,5752	2,4195
Bronian	2,1966	2,3245	2,1873
Multifractal	2,2728	2,4869	2,2940
Fourier	2,5820	2,8294	2,8517

Tabela 6 – Teste 4 com Imagens Geradas pelo Programa *Fractal Modeling and Analysis*.

Fractal Russ/ Técnica	Minkowski Cover	Kolmogorov	Fractal3e (teste2)
MidPoint Displac.	2,3007	2,6129	2,4288
Bronian	2,1796	2,3859	2,2083
Multifractal	2,3089	2,5620	2,3806
Fourier	2,5822	2,8689	2,8465

Os valores obtidos pelas diferentes técnicas apresentadas pelo software do Russ comparando com os valores adquiridos pelo Fractal3e denotam resultados adequados, sendo que os valores numéricos não variam muito entre si. Para os valores para $R(n)$, obtidos pelo programa *Fractal3e*, mostraram-se apropriados, onde $R(n) = -0,9999$, pois este valor indica a correlação entre os dados na medida fractal.

Esta estatística descreve a “medida” em que a relação entre os logaritmos de escala e detalhe é linear. As Figuras 11 e 12 demonstram a aplicação do software Fractal3e em uma imagem de teste gerada pelo programa do livro do John Russ, *Fractal Surfaces*.

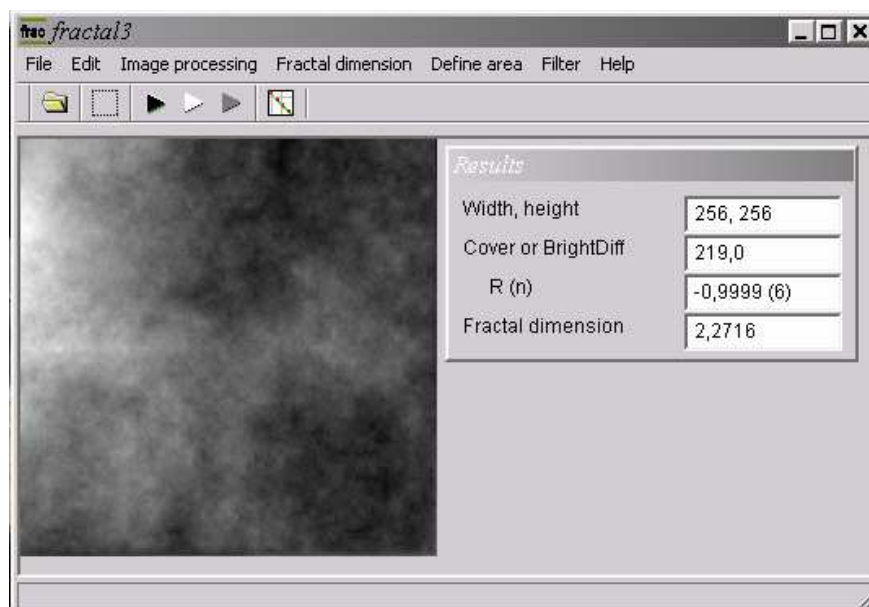


Figura 11 – Imagem de um Fractal Browniano gerada pelo programa *Fractal Modeling and Analysis* do livro do John Russ, *Fractal Surfaces* aplicada ao programa *Fractal Analysis System*.

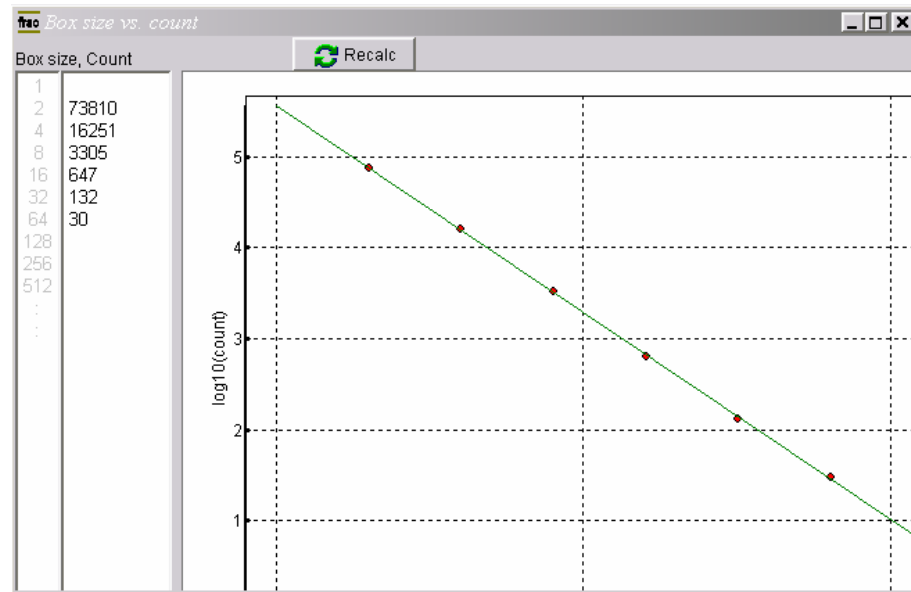


Figura 12 – Gráfico do cálculo para a dimensão fractal, em eixos log-log, do Fractal Browniano mostrada na Figura 11.

7.3 Cálculo da Dimensão Fractal para Imagens Obtidas por MEV da Liga Ti6Al4V-ELI

A Figura 13 e a Figura 14 mostram imagens de microscopia eletrônica de varredura da amostra de Ti6Al4V a 973K e a 1073K respectivamente, adquiridas no Laboratório de Metalurgia Física - LAMEF/PPGEM - Centro de Microscopia da UFRGS, onde as imagens foram obtidas em diferentes magnificações no intervalo de x500, x3000, x5000, x13000 e x33000 e cujos parâmetros utilizados para o processo de nitretação estão indicados na Tabela 2 da seção 7.1 - Materiais.

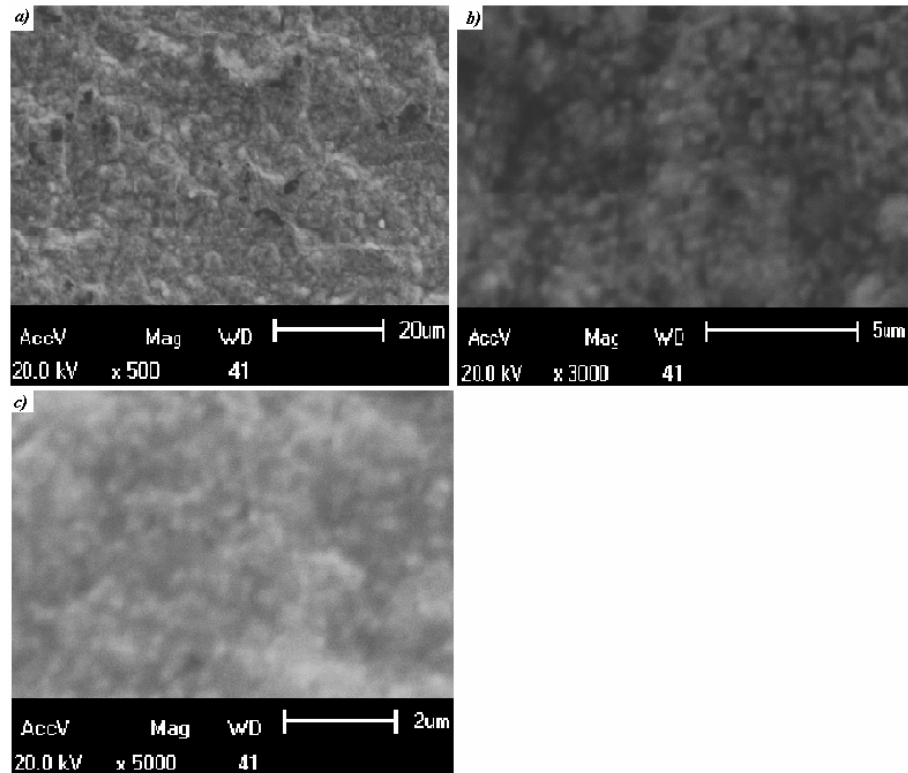


Figura 13 – Imagens da topografia da Liga Ti6Al4V a 973K adquiridas por MEV – a) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 500x; b) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 3000x; c) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 5000x;

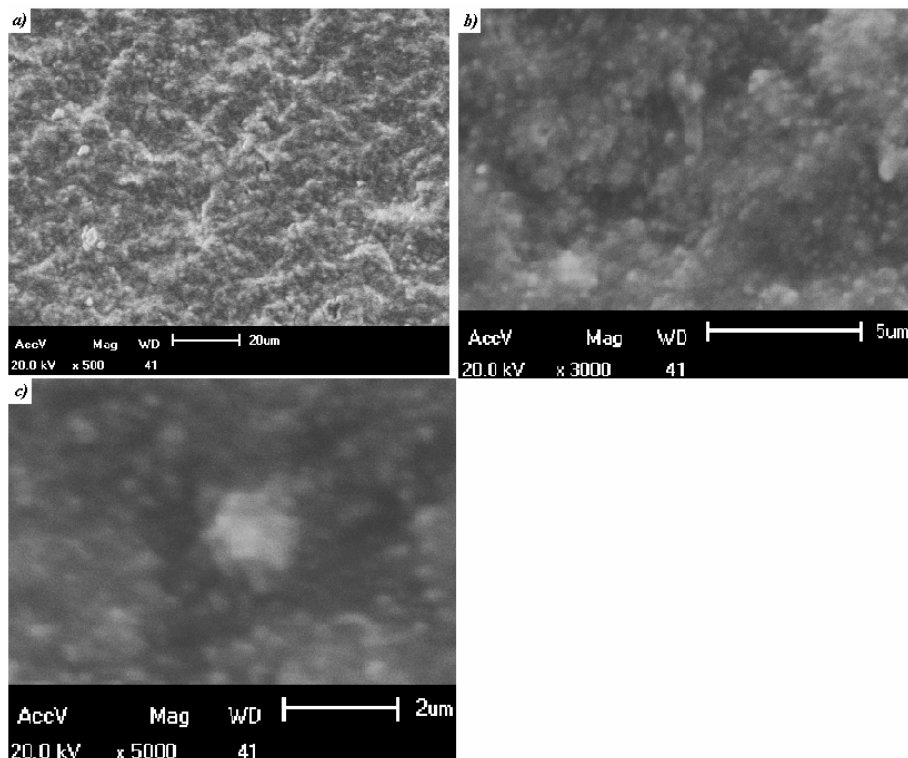


Figura 14 – Imagens da topografia da Liga Ti6Al4V a 1073K adquiridas por MEV – a) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 500x; b) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 3000x; c) Imagem da liga de Titânio com ampliação de 5000x;

É notável nas imagens das Figuras 13 e 14 que quanto maior à ampliação novos detalhes aparecem, demonstrando as características da superfície evidenciando um aspecto similar a objetos auto-afins. Devido às limitações apresentadas pelo programa *Fractal3e*, a dimensão fractal foi calculada para diferentes atributos (largura e altura). Este procedimento do cálculo para diferentes atributos teve como intuito verificar se o valor para a dimensão fractal teria muitas variações e se não iria resultar em valores absurdos. Como pode ser visto nas Tabelas 7 e 8, ela mostra o cálculo da dimensão fractal para as diferentes ampliações e para as diferentes condições de temperatura. A Figura 15 demonstra o gráfico para um dos cálculos efetuados pelo programa.

Tabela 7 – Cálculo da Dimensão Fractal para as Imagens das amostras nitretadas a 973K.

Atributos / MEV	Imagem x500	Imagem x3000	Imagem x5000	Imagem x13000	Imagem x33000
1024x512	2,4833	2,3192	2,2777	2,3192	2,3141
512x512	2,4737	2,3169	2,2762	2,3169	2,3089
256x512	2,4930	2,3587	2,3194	2,3587	2,3445
512x256	2,5332	2,3387	2,3214	2,3387	2,3410
256x256	2,5157	2,3534	2,3028	2,3534	2,3478
Média	2,49978	2,33738	2,2995	2,33738	2,33126
Desvio Padrão	0,2024331399	0,019123729	0,021821091	0,019123729	0,018290517

Tabela 8 – Cálculo da Dimensão Fractal para as Imagens das amostras nitretadas a 1073K.

Atributos / MEV	Imagem x500	Imagem x3000	Imagem x5000	Imagem x13000	Imagem x33000
1024x512	2,4810	2,3485	2,4030	2,4322	2,4212
512x512	2,4892	2,3429	2,4103	2,4372	2,4262
256x512	2,4568	2,3483	2,4571	2,4825	2,4559
512x256	2,4296	2,3495	2,4712	2,4712	2,4184
256x256	2,4510	2,3594	2,4688	2,4936	2,4260
Média	2,46152	2,34972	2,44208	2,46334	2,42954
Desvio Padrão	0,023966059	0,005995165	0,032881408	0,027374952	0,015101258

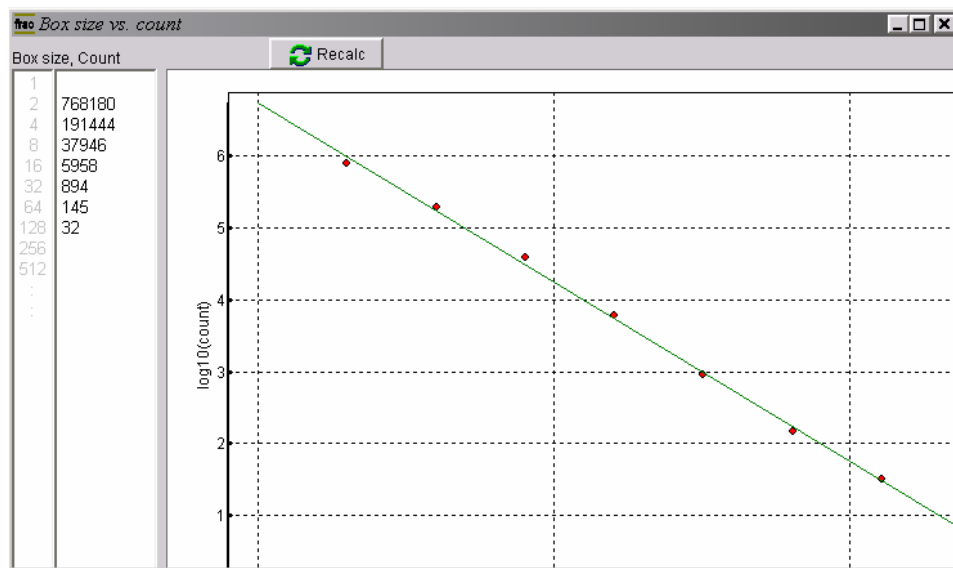


Figura 15 – Gráfico para o cálculo da dimensão fractal, em eixos log-log, da imagem x500 na temperatura 973K para os atributos 1024x512, mostrado na Tabela 7.

Os resultados da análise de medida de dimensão fractal, obtidos pelo programa Fractal3e, calculado para as diferentes condições de nitretação, apresentaram diferentes valores de dimensão fractal nas diferentes condições de temperatura, 973K e 1073K.

Com os valores obtidos nas Tabelas 7 e 8, os resultados indicam que para a temperatura de 973K a dimensão fractal mostrou que a média para D foi de 2,36 com um desvio padrão de 0,0791. E para a análise da temperatura de 1073K a média para a dimensão fractal corresponde a 2,43 com um desvio padrão de 0,0466. A Tabela 7 apresentou um valor de dimensão fractal, para a magnificação de x500, que difere muito para os obtidos nas outras magnificações. O mesmo acontece na Tabela 8, onde a dimensão para a magnificação de x300 apresenta um resultado menor em comparação com as outras magnificações. De acordo com Mahovic Poljacek, S., *et al*, 2008, constata em seu artigo que o valor para a dimensão fractal é independente da magnificação e isto seria uma verdadeira característica da morfologia da superfície.

Juntamente com a análise das dimensões também se verificou os valores para os coeficientes de correlação ($R(n)$). Para ambas as condições de temperatura analisados os valores de $R(n)$ mostraram se aceitáveis e o seu valor é próximo de -0,9999. Estes valores indicam que existe uma boa correlação na medida, que está associada à correlação entre a contagem de caixas e o tamanho das mesmas. Isto é, explica como uma variação em detalhe (medido como o logaritmo da contagem de caixas) é interpretada pela variação na escala linear (medido como o logaritmo do tamanho da caixa) de acordo com uma lei de potência.

8 CONCLUSÃO

A rugosidade superficial de materiais tornou-se um importante parâmetro a ser considerado quando implantes metálicos são projetados. Portanto, a finalidade deste trabalho foi investigar as mudanças topográficas ocorridas após o processo de nitretação a plasma da liga Ti6Al4V-ELI. De acordo com a literatura a rugosidade superficial pode ser descrita por meio de muitos parâmetros e o mais comum calculado é a rugosidade média (R_a). Esta técnica foi desenvolvida na década de 50 e possui uma grande aplicação na área industrial. Porém muitos objetos observados na natureza apresentam formas complexas e irregulares e não podem ser descritos pela geometria Euclidiana. Contudo, a geometria fractal vem sendo largamente utilizada para descrever os materiais e nos permite uma melhor compreensão física nas mudanças da rugosidade topográfica das superfícies desses materiais (CHAPPARD, D. *et al*, 2003).

A análise fractal foi empregada, com a utilização do software Fractal3e, cujo mesmo utiliza o método do "Box-counting", e esta análise apresentou diferentes valores para a medida de dimensão fractal nas diferentes condições de temperatura durante o processo de nitretação. Entretanto, a análise fractal de imagens de MEV da superfície consistiu num parâmetro que não nos permitiu diferenciar duas condições de nitretação.

A compreensão da dinâmica do processo de nitretação não é possível, pois a medida da dimensão fractal é a dimensão de um perfil de inclinação e não de um perfil bidimensional. Dessa forma, não se pode estabelecer uma relação entre elas, a não ser empiricamente. Assim, não se pode concluir nada sobre a dinâmica com base nesses resultados, pois a dimensão é um mapa de inclinação (MEV) e não um perfil bidimensional da superfície física. Então, de acordo com Mahovic Poljacek, S., *et al*, 2008, a análise fractal fornece informações da característica quantitativa sobre a topografia da superfície e pode fornecer uma visão sobre os processos responsáveis pelas mudanças topográficas quando é possível estabelecer uma relação entre perfil de inclinação e um perfil bidimensional da superfície física.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, M.L. **Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de Padrões de Massa Classe F2.** *Dissertação de Mestrado*, Pós-graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ: 2002.
- [2] ARNAULT, J.C.; KNOLL, A.; SMIGIEL, E.; CORNET, A. **Roughness Fractal Approach of Oxidised Surfaces by AFM and Diffuse X-Ray Reflectometry Measurements.**, *Applied Surface Science*, No.171, p.189-196, 2001.
- [3] ARZAMASOV, V. N.; GROMOV, V.I.; SOSKOV, M.D. **Effect of regimes of ion nitriding on the structure and properties of titanium alloys.** *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 38, nos.5-6, p.214-215, 1996.
- [4] CARBONARI, M.J., MARTINELLI, J.R., **Effects of Hot Isostatic Pressure on Titanium Nitride Films Deposited by Physical Vapor Deposition.**, *Materials Research*, Vol. 4, No. 3, 2001.
- [5] CAPOTE, G.; PRIOLI, R.; FREIRE, F.L.J. **Effects of the Growth Conditions on the roughness of Amorphous Hydrogenated Carbon Films Deposited by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition.** *JVST A - Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 24, No. 6, 27 October, 2006.
- [6] CHAPPARD, D., DEGASNE, I., HURÉ, G., LEGRAND, E., AUDRAN, M., BASLÉ, M.F., **Image analysis measurements of roughness by texture and fractal analysis correlate with contact profilometry.**, *Biomaterials*, No 24, p. 1399-1407, 2003.
- [7] CHAVES, C.M.G.F., **Fenômenos de Agregação.** *Ciência Hoje*, v. 10, n. 55, p. 26-32, jun. 1989.
- [8] COLL, B. et al. **Metallurgical and Tribological Modification of Titanium and Titanium Based Alloys for Medical Devices by Plasma Assisted Techniques.**, *In Technical Bulletin from Multi-Arc Scientific Coatings/Innovatique S.A.*, 1998.
- [9] COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 3.ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1974.
- [10] COUTINHO, T.A. **Metalografia de Não-Ferrosos.**, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1980.

- [11] DA SILVA, M.M., UEDA, M., OTANI, C., REUTHER, H., LEPIENSK, C.M. SOARES JUNIOR, C., OTUBO, J., **Hybrid Processing of Ti6Al4V Using Plasma Immersion Ion Implantation Combined with Plasma Nitriding.**, *Materials Research*, Vol. 9, No.1, p.97-100, 2006.
- [12] DAMIANI, F.; TATSCH, P.J.; DUARTE, F.C. **Microscópio de Tunelamento com Varredura (STM) e Microscópio de Força Atômica (AFM)**, *IE 607A - Medidas para Caracterização e Análise de Materiais*, Universidade Federal de Campinas. Campinas, São Paulo: 07 de Junho, 2000.
- [13] DAVIDSON, M. W., ABRAMOWITZ M., **Optical microscopy**, *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*, v.2, p. 1106-1141, 2002.
- [14] DE SOUZA, G.B.; FOERSTER, C.E.; DA SILVA, S.L.R.; LEPIENSKI, C.M. **Nanomechanical Properties of Rough Surfaces.**, *Materials Research*, vol. 9, No. 2, p.159-163, 2006.
- [15] DOTTO, M.E.R.; KLEINKEN, M.U. **Scaling laws in etched Si surfaces.**, *Physical Review B*, Vol. 65, p. 245323, 21 June, 2002.
- [16] FRACTAL. In: **Enciclopédia Larousse Cultural**. Porto Alegre: Nova Cultural, 1999. p.2527. v.11.
- [17] FILHO, R.B.; MATTOSO, L.H.C. **Estudo de Polímeros por Microscopia de Força Atômica.**, *Comunicado Técnico - Embrapa Instrumentação Agropecuária*, No. 53, 2003.
- [18] GOLDENSTEIN, H., **Microscopia Ótica**. *Transparências de QFL-2308 e OMI-2201*.
- [19] JAHN, R.; TRUCKENBRODT, H., **A Simple Fractal Analysis Method of the Surface Roughness.**, *Journal of Materials Processing Technology*, No.145, p.40-45, 2004.
- [20] JAVORSKY, C.S. **Produção e Caracterização de Amostras Nitretadas a Plasma da liga Ti6Al4V-ELI**. *Tese de Doutorado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais-PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: 2001.
- [21] JAVORSKY, C.S.; STROHAECER, T.R.; VASCONCELLOS, M.A.Z. **Caracterização de Amostras Nitretadas a Plasma da Liga de Implante Ti6Al4V-ELI**, *I Seminário de Tecnologia em Implantes Cirúrgicos, IV Simpósio de Tratamentos Térmicos e Engenharia de Superfícies*, Gramado, RS, 26 Outubro, 2002.

- [22] JULIEN, R., BOTET, R., **Aggregation and Fractal Aggregates.**, Singapore: *World Scientific Publishing*, 1987. 120p.
- [23] KRAUSS, G., **Steels - Heat Treatment and Processing Principles.**, ASM International, 1989.
- [24] LARISCH, B.; BRUSKY, U.; SPIES, H.J. **Plasma nitriding of stainless steels at low temperatures.** *Surface and Coatings Technology*, No. 116–119, p.205–211, 1999.
- [25] MAHOVIC POLJACEK, S., RISOVIC, D., FURIC, K., GOJO, M., **Comparison of fractal and profilometric methods for surface topography characterization**, *Applied Surface Science*, No. 254, p. 3449-3458, 2008.
- [26] MANDELBROT, B. B., **The Fractal Geometry of Nature.**, New York: W. H. Freeman and Company, p. 458, 1977.
- [27] MANDELBROT, B. B., **Objectos Fractais.**, Lisboa: **Gradiva Publicações**, p.300, 1991.
- [28] MARTAN, J.; PRZYBYLSKI, G.; TABAKA, R.; KOWALSKI, Z.W., **Fractal Analysis of Roughness Profile Induced by Ion bombardment of Metal Surface.**, *VACUMM - Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology*, No. 78, p.217-221, 2005.
- [29] METIN, E.; INAL, O. I., **Kinetics of layer growth and multiphase diffusion in ion-nitrided titanium.**, *Metallurgical Transactions A*, vol.20 A, p. 1819-1832, Set. 1989.
- [30] METIN, E.; INAL, O. I., **Microstructural and microhardness evaluations in ion nitrided titanium.**, *Materials Science and Engineering*, vol.A145, p. 65-77, 1991.
- [31] MURALEEDHARAN, T. M.; MELETIS, E.I. **Surface modification of pure titanium and Ti-6Al-4V by intensified plasma ion nitriding.**, *Thin Solid Films*, No.221, p.104-113, 1992.
- [32] PAIVA, JR; R.D.; MURAMATSU, M. **Desenvolvimento de um Rugosímetro a Laser**, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, Vol.17, No.2, 2004.
- [33] PELLMAN, M. **PVD Coatings for Medical Device Applications.**, *In Technical Bulletin from Multi-Arc Scientific Coatings/Innovatique S.A.*, 1998.

- [34] PIRES, G.P.; TAGIAFERRI, A.A.; THAUMATURGO, C. **Interferometria Óptica para Ensaios não Destrutivos.** *Revista Matéria*, Vol.7, No.1, 2002.
- [35] POLJACEK, S.M.; RISOVIC, D.; FURIC, D., GOJO, M., **Comparison of Fractal and Profilometric Methods for Surface Topography characterization.**, *Applied surface Science*, No. 254, p.3449-3458, 2008.
- [36] RAAIF, M.; EL-HOSSARY, F.M.; NEGM, N.Z.; KHALIL, S.M., **Surface Treatment of Ti-6Al-4V alloy by RF plasma nitriding.**, *Journal of Physics: CONDENSED MATTER*, 03 September, 2007.
- [37] RIE, K.-T.; STUCKY, T.; SILVA, R.A.; LEITÃO, E.; BORDJI, K.; JOUZEAU, J. -Y; MAINARD, D., **Plasma surface treatment and PACVD on titanium alloys for surgical implants.**, *Surface and Coatings Technology*, no. 74 –75, p. 973-980, 1995.
- [38] ROSA, M., **Segmentação de Grãos de Hematita em Amostras de Minério de Ferro por Análise de Imagens de Luz polarizada.**, *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção., Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maira, RS: 2008.
- [39] RUSS, C. John., **The Image Processing Handbook.**, Boca Raton: CRC Press, p.27, 1992.
- [40] RUSS, J. C., **Fractal Surfaces.**, Plenum Press, New York: 1994.
- [41] SALES PALMA, E. **Metrologia**, Engenharia Mecânica - Mecatrônica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerias, Minas Gerias, MG: 2006.
- [42] SANTIAGO, A.S., DOS SANTOS, E.A., SADER, M.S., SANTIAGO, M.F., SOARES, G.A., **Response of osteoblastic Cells to Titanium Submitted to Three Different Surface Treatments.**, *Brazilian Oral Research*, Vol.19, No.3, São Paulo, July/September, (2005).
- [43] SILVA, E.R; MURAMATSU, M. **O Fenômeno de Spackle como Introdução à Metrologia Óptica no Laboratório Didático.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol.19, No.2, p. 283-286, 2007.
- [44] SIQUEIRA, K.P., MONTEFUSCO, A.R.G., NETO, A.B.G., BONDUELLE, A., **Principais Metodologias de Medição de Estado de Superfícies**, *Centro de Ciências Florestais e da Madeira*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Junho, 2003.

- [45] SITTING, C.; TEXTOR, M.; SPENCER, N.D.; et al., **Surface characterization of implant materials c.p. Ti, Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-4V with different pretreatments.**, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, no. 10, p. 35-45, 1999.
- [46] SOARES, T.T. **Sobre a Introdução da Geometria Fractal na Metalografia Quantitativa via Imagens Digitais.**, *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: 1994.
- [47] THOMSEN, P., TEXTOR, M., TENGVALL, P., BRUNETTE, D.M., **Titanium in Medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications**, 1 ed., Berlin: Springer, 2001.
- [48] TIER, M. D., **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma.** *Tese de Doutorado*, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 1998.
- [49] TOGASHI, A.Y., **Influência de Diferentes Superfícies de Titânio na Adesão, Proliferação e Diferenciação de Células Semelhantes a Osteoblastos em Culturas, na Presença ou não de Proteínas Morfognéticas Óssea-7(BMP-7).**, *Tese de Doutorado*, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Universidade de São Paulo São Paulo, SP: 2007.
- [50] VIARO, N. S. S., **Estudo do Efeito da Corrosão da Liga Ti6Al4V e do Aço Inoxidável EF138 Utilizados como Material de Implante.**, *Tese de Doutorado.*, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 1994.
- [51] YILDIZ, F.; YETIM, A.F.; ALSARAN, A.; ÇELIK, A., **Plasma Nitriding behavior of Ti6Al4V Orthopedic Alloy**, *Surface & Coatings Technology*, No. 202, p.2471-2476, 2008.