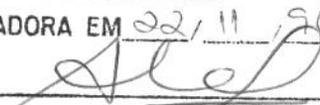


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Estudo da Zona de Estiramento através de Técnica de Reconstrução Tridimensional

Autor: **Luis Rogério de Oliveira Hein**
Orientadora: **Ana Maria Martinez Nazar**
Co-orientador: **Jean Jacques Ammann**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Luis Rogério de
Oliveira Hein E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 22/11/96.



ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Estudo da Zona de Estiramento através de Técnica de Reconstrução Tridimensional

Autor: Luis Rogerio de Oliveira Hein
Orientadora: Ana Maria Martinez Nazar
Co-orientador: Jean Jacques Ammann

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	H364e
V.	Ex
TOMBO BC/	29404
PROC.	281197
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	15/01/97
N.º CPD	

CM-00098161-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

H364e

Hein, Luis Rogerio de Oliveira

Estudo da zona de estiramento através de técnica de reconstrução tridimensional / Luis Rogerio de Oliveira Hein.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientadores: Ana Maria Martinez Nazar, Jean Jacques Ammann.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fractografia. 2. Processamento de imagens. 3. Ligas de alumínio - Fratura. 4. Interpretação fotográfica. I. Nazar, Ana Maria Martinez. II. Ammann, Jean Jacques. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

**Estudo da Zona de Estiramento através de
Técnica de Reconstrução Tridimensional**

Autor: **Luis Rogerio de Oliveira Hein**

Orientadora: **Ana Maria Martinez Nazar**

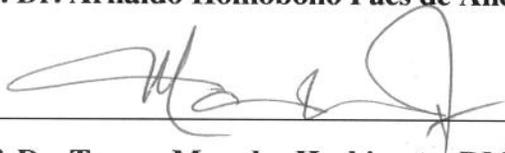
Co-orientador: **Jean Jacques Ammann**



**Profa. Dra. Ana Maria Martinez Nazar, Presidente
DEMA/FEM/UNICAMP**



Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade, IPEN/USP



Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto, DMT/FE-G/UNESP



Prof. Dr. Itamar Ferreira, DEMA/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, DEMA/FEM/UNICAMP

Campinas, 22 de novembro de 1996

Dedicatória:

Aos meus pais, João Henrique e Maria do Carmo, por seu amor, por seu apoio em tudo que construí.

À memória de Maria Aparecida, minha avó materna, com muita saudade.

Agradecimentos

Gostaria de, em primeiro lugar, agradecer à contribuição de meus orientadores, Professora Doutora Ana Maria Martinez Nazar e Doutor Jean Jacques Ammann, e pela oportunidade de realizar este trabalho .

Aos meus grandes amigos Professor Doutor Fernando de Azevedo Silva, da FE-G/UNESP, por nossos longos debates sobre Processamento Digital de Imagens, e Professor Ernandes Marcos da Silveira Rizzo, da ETFES e doutorando pelo DEMA/FEM/UNICAMP, pelas amplas discussões sobre a personalidade e o conceito de um trabalho para doutoramento.

Ao Professor Doutor Tomaz Manabu Hashimoto, da FE-G/UNESP, por seu apoio técnico, sua inestimável amizade e por ter me oferecido a oportunidade única de integrar o Grupo Acadêmico em Caracterização Microestrutural, Fractográfica e Comportamento Mecânico de Materiais, do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, UNESP, colaborando na construção e realização de um sonho.

Aos demais componentes do Grupo Acadêmico, Tecnólogo Humberto Lopes Rodriguez, Professor Marcelo dos Santos Pereira, Professora Doutora Maysa Alves Nunes, Professor Doutor Sérgio João Crnkovic e Professor Valdir Alves Guimarães, por suas inúmeras contribuições e pelo que aprendi trabalhando em equipe.

Ao Professor Doutor José Carlos César Amorim, Gerente do Pólo Computacional do Câmpus de Guaratinguetá, por seu imprescindível apoio na instalação do programa *KHOROS* nas *workstations* do Departamento de Materiais e Tecnologia.

Às Técnicas Cláudia Aoki e Rita Helena Buso Jacon, por mais este excelente apoio nas sessões de microscopia eletrônica, e aos demais funcionários do DEMA/FEM/UNICAMP, pelo agradável ambiente de trabalho.

Aos amigos do Departamento de Materiais e Tecnologia, da FE-G/UNESP, por me proporcionarem uma tranqüila e positiva integração à rotina de trabalho no Câmpus de Guaratinguetá.

Ao Engenheiro Jeferson Firmino das Chagas, doutorando pelo DMT/FE-G/UNESP, por seu incentivo.

Ao Técnico Ewerton Firmino das Chagas, da ALCAN Alumínio do Brasil S.A., por seu trabalho de análise da composição química do material empregado neste trabalho.

À FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro para a infra-estrutura do Laboratório de Análise e Processamento de Imagens e Sinais do DEMA/FEM/UNICAMP.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo dentro do Programa de Incentivo à Capacitação Docente.

Em especial, ao meu irmão João Henrique e à minha *irmã* Elisabete, pela acolhida em sua casa, seu incentivo e pelo conforto da companhia do nosso pequeno Henrique.

Enfim, diversas pessoas colaboraram nas diferentes etapas deste trabalho e é tarefa impossível não cometer alguma injustiça. Fica aqui, assim, representada minha gratidão a todos os que me ajudaram a cumprir mais esta etapa da minha carreira.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2. ZONA DE ESTIRAMENTO E MECÂNICA DA FRATURA	3
2.1 DEFINIÇÃO	3
2.2 FORMAÇÃO DA ZONA DE ESTIRAMENTO	6
2.3 MORFOLOGIA DA ZONA DE ESTIRAMENTO	7
2.3.1 <i>Considerações sobre sua geometria.....</i>	7
2.3.2 <i>Efeito da tenacidade à fratura.....</i>	8
2.4 RELAÇÕES ENTRE A ZONA DE ESTIRAMENTO E K_{Ic} , δ_c E J_{Ic}	10
2.4.1 <i>Modelos para determinação de CTOD.....</i>	10
2.4.2 <i>Relações entre a zona de estiramento e K_{Ic}.....</i>	11
2.4.3 <i>Determinação de J_{Ic} e da linha de arredondamento da ponta da trinca.....</i>	13
2.5 COMENTÁRIOS: CRITÉRIOS EXPERIMENTAIS E A VALIDADE DOS MODELOS EXISTENTES.....	16
3. FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA E RECONSTRUÇÃO 3-D.....	18
3.1 INTRODUÇÃO	18
3.2 A ESTEREOLOGIA NA FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA.....	19
3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES.....	22
3.3.1 <i>Métodos de análise tridimensional a partir da medição de perfis.....</i>	22
3.3.1.1 <i>Abordagem linear</i>	22
3.3.1.2 <i>Abordagem fractal</i>	25
3.3.2 <i>O método das secções seriais</i>	26
3.3.3 <i>O método shape-from-shading (SFS)</i>	27
3.3.4 <i>Reconstrução estereoscópica.....</i>	29
3.4 O PAPEL DAS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS.....	31
3.5 PERSPECTIVA: APLICAÇÕES DA FRACTOGRAFIA QUANTITATIVA NA ANÁLISE DE FALHAS.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS: CRITÉRIOS EXPERIMENTAIS.....	34
4.1 INTRODUÇÃO: ETAPAS DO PROCEDIMENTO.....	34
4.2 MATERIAL UTILIZADO.....	35
4.3 ENSAIOS MECÂNICOS PARA DETERMINAÇÃO DE CTOD	36
4.4 OBSERVAÇÃO EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	38
4.4.1 <i>Escolha do detector de elétrons.....</i>	38
4.4.2 <i>Definição do nível de ampliação.....</i>	39
4.4.3 <i>Método para medição de paralaxe: discussão e seleção.....</i>	40

4.4.4 Técnica de obtenção de pares estereoscópicos	42
4.4.5 Definição dos ângulos de observação	43
4.5 INVESTIGAÇÃO DA ZONA DE ESTIRAMENTO	51
4.6 REVELAÇÃO FOTOGRÁFICA	52
4.7 DIGITALIZAÇÃO	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES: PARTE I - O ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA RECONSTRUÇÃO 3-D.....	54
5.1 SOBRE SUA CONCEPÇÃO	54
5.2 O AMBIENTE DE PROJETO	55
5.3 ROTINAS PARA RECONHECIMENTO DE PADRÕES	56
5.4 ALINHAMENTO DE IMAGENS	58
5.5 MELHORAMENTO DE IMAGENS	59
5.6 IMPLEMENTAÇÃO DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA A MEDIÇÃO DE PARALAXE	60
5.6.1 Normalização dos valores de correlação	64
5.6.1.1 Expressões para normalização da correlação cruzada.....	65
5.7 A ESTRUTURA DO PROGRAMA	70
5.8 APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA A AVALIAÇÃO DA ZONA DE ESTIRAMENTO.....	72
5.8.1 Seleção das regiões de interesse.....	72
5.8.2 Obtenção dos perfis	72
5.8.3 Critério de amostragem para as medições de elevação	73
5.8.4 Correções para o cálculo das elevações	74
5.9 COMENTÁRIOS ADICIONAIS SOBRE A TÉCNICA DE RECONSTRUÇÃO 3-D.....	75
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES: PARTE II - ANÁLISE DA ZONA DE ESTIRAMENTO.....	77
6.1 ENSAIOS MECÂNICOS.....	77
6.2 SOBRE A DEFINIÇÃO DOS LIMITES DA ZONA DE ESTIRAMENTO	78
6.3 A EVOLUÇÃO DO RELEVO DA ZONA DE ESTIRAMENTO AO LONGO DA FRENTE DA TRINCA	81
6.4 MEDIDAS DO TAMANHO DA ZONA DE ESTIRAMENTO	87
6.5 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA ZONA DE ESTIRAMENTO	91
6.5.1 Primeira consideração: parametrização dos perfis da zona de estiramento por H_{ze} e L_{ze}	91
6.5.2 Validade dos parâmetros da zona de estiramento: L_{ze} versus H_{ze}	93
6.5.3 Segunda consideração: Perfis parametrizados apenas por L_{ze}	95
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	97
7.1 CONCLUSÕES	97
7.2 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	99
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1</i> Definição da zona de estiramento (ze) conforme ASTM E813-88.....	4
<i>Figura 2.2</i> Aspecto da zona de estiramento da fratura, em liga Al 7050-T73651.....	4
<i>Figura 2.3</i> Identificação de regiões do relevo da zona de estiramento em liga de Al 7075-T7651	5
<i>Figura 2.4</i> Formação da zona de estiramento, no arredondamento da ponta da trinca.....	6
<i>Figura 2.5</i> Relação entre J_{Ic} e a formação da zona de estiramento.	14
<i>Figura 3.1</i> Definição de parâmetros básicos para dimensionamento da projeção de objetos convexos em um plano.	20
<i>Figura 3.2</i> Projeção de objetos da superfície de fratura no plano e definição dos parâmetros de rugosidade..	21
<i>Figura 3.3</i> Definição das componentes de orientação angular.....	24
<i>Figura 3.4</i> Visualização tridimensional por SFS.....	28
<i>Figura 3.5</i> Imprecisão dos métodos da estereologia quantitativa.....	32
<i>Figura 4.1</i> Fluxograma das etapas do procedimento experimental.	35
<i>Figura 4.2</i> Sentido do corte dos corpos de prova a partir da chapa laminada (orientação T-L)	36
<i>Figura 4.3</i> Dimensões dos corpos de prova para determinação de CTOD.....	37
<i>Figura 4.4</i> Distorção entre as imagens de par estéreo de uma moeda de um centavo de Real.	39
<i>Figura 4.5</i> Formas de observação estereoscópica com projeções paralelas.....	41
<i>Figura 4.6</i> Saturação do feixe eletrônico em amostras com variação de relevo.....	44
<i>Figura 4.7 a</i> Imagens da zona de estiramento, em liga de Alumínio Al 7050-T73651.....	47
<i>Figura 4.7 b</i> Imagens da zona de estiramento, em liga de Alumínio Al 7050-T73651 (continuação).	48
<i>Figura 4.8 a</i> Perfis de variação de relevo entre imagens obtidas com diferentes amplitudes de inclinação do porta-amostra.	49
<i>Figura 4.8 b</i> Perfis de variação de relevo entre imagens obtidas com diferentes amplitudes de inclinação do porta-amostra (continuação).....	50
<i>Figura 4.9</i> Procedimento proposto pelo método EGF P1-87D, para medição da L_{ze}	51
<i>Figura 5.1</i> Tela do módulo CANTATA do software KHOROS 1.0.5, para programação visual.	55
<i>Figura 5.2</i> Descrição das operações de translação e rotação, para o pré-alinhamento das imagens.	58
<i>Figura 5.3</i> Efeito da função de equalização de contraste.	60
<i>Figura 5.4</i> Homogeneização do contraste por efeito da equalização.	61
<i>Figura 5.5</i> Representação gráfica da correlação unidimensional.	63
<i>Figura 5.6</i> Evolução do espectro de correlação no alinhamento de imagens.....	64
<i>Figura 5.7</i> Resultados dos testes das expressões de normalização da correlação.....	66
<i>Figura 5.8</i> Representação esquemática da estrutura do algoritmo para reconstrução 3-D.....	71

Figura 5.9 Espectro da magnitude da transformada rápida de Fourier para perfil obtido com incremento $\Delta y = 1$	74
Figura 6.1 Representação das três formações possíveis para o perfil da zona de estiramento.	79
Figura 6.2 Critérios para adoção de referenciais para medição da zona de estiramento.	80
Figura 6.3 Comportamento do relevo da zona de estiramento ao longo da frente da trinca.....	82
Figura 6.4 Representações, no espaço 3-D, da evolução dos perfis obtidos ao longo da frente da trinca, contendo a zona de estiramento.....	82
Figura 6.5 Mapa de elevação esquemático da evolução dos perfis ao longo da frente da trinca.	83
Figura 6.6 Evolução dos perfis obtidos, de acordo com a posição ao longo da frente da trinca.....	84
Figura 6.7 Distribuição dos valores de L_{ze} e H_{ze} medidos ao longo da frente da trinca de uma mesma amostra, segundo o posicionamento previsto no método EGF P1-87-D.....	85
Figura 6.8 Dispersão da relação entre os parâmetros L_{ze} e H_{ze} ao longo da frente da trinca de uma única amostra.	86
Figura 6.9 Critério adotado na literatura para medição do tamanho da zona de estiramento.	87
Figura 6.10 Par estéreo tomado da região central da frente da trinca da amostra 1.....	89
Figura 6.11 Vista em perspectiva da superfície reconstruída a partir do par estéreo da figura 6.9.	89
Figura 6.12 Mapa de elevações obtido a partir do par estéreo da figura 6.9.....	90
Figura 6.13 Relação entre as elevações (parametrizadas pelo critério para H_{ze} definido por BROEK) e as posições da frente da trinca (parametrizadas por L_{ze}) no interior da zona de estiramento, para perfis tomados junto ao terço central de 3 amostras.....	92
Figura 6.14 Distribuição das elevações dos perfis da zona de estiramento (tomados junto ao terço central das 3 amostras) em relação a posições da frente da trinca parametrizadas por $\frac{V}{L_{ze}}$	96

Lista de Tabelas

<i>Tabela 4.1 Limites de Composição Química da Liga Al 7050 (AMS 4050; UNS A97050)</i>	36
<i>Tabela 6.1 Resultados Obtidos nos Ensaios CTOD</i>	77
<i>Tabela 6.2 Comparação das medidas do tamanho da zona de estiramento, em regiões de mesma amostra</i>	85
<i>Tabela 6.3 Medidas do tamanho da zona de estiramento</i>	88
<i>Tabela 6.4 Comparação entre os critérios para medição de H_{2e}</i>	94

Nomenclatura

- A – área de superfície plana
 A_A – fração de área real
 A_A' – fração de área medida sobre o plano de projeção
 B – largura do corpo de prova do ensaio CTOD
 B_x – largura de banda de frequência da função $f(x)$
 $c_g(\alpha, \beta)$ – coeficiente de normalização da correlação apresentado por Gonzalez e Woods
 $c_R(\alpha, \beta)$ – coeficiente de normalização da correlação cruzada apresentado por Russ
 D – dimensão fractal (modelo de Mandelbrot)
 d_T – espaçamento entre os ligamentos (do modelo de Kraft)
 E – módulo de Young
 $F(u, v)$ – transformada de Fourier da função $f(x, y)$
 $F^*(u, v)$ – conjugado complexo da função $F(u, v)$
 $f^*(x, y)$ – conjugado complexo da função $f(x, y)$
 G – módulo de elasticidade transversal
 $G(u, v)$ – transformada de Fourier da função $g(x, y)$
 H_{ze} – altura da zona de estiramento
 i, j – coordenadas dos elementos da uma matriz
 J_{lc} – tenacidade à fratura na condição elasto-plástica
 K_{lc} – tenacidade à fratura em deformação plana
 L – comprimento de objetos sobre a linha de amostragem
 $L(\eta)$ – função comprimento aparente de uma curva na dimensão fractal (modelo de Mandelbrot)
 L_L – fração linear real
 L_L' – fração linear medida sobre o plano de projeção
 L_o – constante do modelo de Mandelbrot
 L_t – comprimento real medido sobre perfil
 L_{ze} – largura da zona de estiramento
 M – ampliação
 n – coeficiente de encruamento (da equação de Hollomon)
 $N(u, v)$ – coeficiente de normalização da correlação cruzada proposto por Chand e Holburn
 $N_m(\alpha, \beta)$ – coeficiente de normalização da correlação cruzada proposto neste trabalho
 P – número de pontos na grade de amostragem; paralaxe
 P_P – fração de pontos real
 P_P' – fração de pontos medida sobre o plano de projeção

- R_L – rugosidade linear
 $R_L(\eta)$ – função rugosidade linear em dimensão fractal
 R_S – rugosidade superficial
 $R_S(\eta)$ – função rugosidade linear em dimensão fractal
 S – superfície de amostragem; projeção de área (modelo de Broek, eq. 4.4)
 S_S – fração superficial real
 S_S' – fração superficial medida sobre o plano de projeção
 S_r – área real de uma superfície
 V – volume de amostragem
 V_V – fração volumétrica
 W – dimensão básica do corpo de prova do ensaio CTOD (ASTM E 1290-93)
 z – coordenada de elevação
 α, β – variáveis mudas de integração, referentes ao deslocamento da função $g(x,y)$ por $f(x,y)$ na correlação
 α, φ_p – componentes de orientação de orientação angular (do modelo de Gokhale e Underwood)
 δ_c – abertura crítica da ponta da trinca
 $\Delta\theta$ – variação total no ângulo de observação (par estereoscópico)
 Δa_{ze} – avanço da ponta da trinca, para a formação da zona de estiramento
 ε_f – deformação logarítmica para a fratura
 η – unidade de medida em dimensão fractal
 θ' – ângulo entre o plano médio da pré-trinca de fadiga e o plano médio da zona de estiramento
 ν – coeficiente de Poisson
 σ_c – limite de escoamento
 σ_t – limite de resistência à tração
 $\sigma_{t,r}$ – limite de resistência à tração verdadeiro
 ψ – fator estrutural de um perfil (do modelo de Gokhale e Underwood)
 \mathcal{F}^{-1} – operador da transformada inversa de Fourier
 ASM – sigla para American Society for Materials International
 $ASTM$ – sigla para American Society of Testing and Materials
 EGF – sigla para European Group on Fracture

Resumo

HEIN, L.R.O., *Estudo da zona de estiramento através de técnica de reconstrução tridimensional*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 113 p., Tese (Doutorado)

O estudo das relações entre a zona de estiramento e a tenacidade à fratura dos materiais para uso em estruturas mecânicas tem encontrado grande interesse no meio científico e tecnológico. Entretanto, grandes restrições vêm sendo encontradas quanto à adoção de técnicas para sua avaliação, o que tem implicado em uma pequena quantidade de trabalhos sobre a geometria dessa região. Desta forma, este trabalho visa o desenvolvimento de um método para análise da superfície da zona de estiramento, baseado nos conceitos das medições de paralaxe e em técnicas de processamento digital de imagens, buscando estabelecer critérios mais precisos para a definição de seus limites naturais e estudar a evolução de sua geometria, através da análise de perfis. O algoritmo para reconstrução tridimensional foi inteiramente desenvolvido dentro do ambiente gráfico do programa *KHOROS*, criado por pesquisadores da New Mexico University. Empregando-se técnicas de observação em microscópio eletrônico de varredura especialmente adaptadas para este trabalho, foram fotografados pares estereoscópicos de zonas de estiramento formadas em superfícies de fratura de amostras da liga Al 7050, obtidas em ensaios mecânicos para determinação do CTOD crítico, seguindo orientações do método EGF P1-87-D. Assim, foram obtidos perfis de elevação que permitiram realizar medições de parâmetros como a largura e a altura da zona de estiramento, bem como estudar a evolução de sua geometria. A zona de estiramento apresenta relevo muito acidentado, o que provoca uma dispersão natural dos resultados, apesar do emprego de uma definição consistente para a identificação de seus limites. Conclui-se que os perfis da região, desde que sob estado de deformação plana, podem ter sua geometria média descrita pela forma de uma semi-parábola. Esses resultados levaram a concluir que a metodologia e o algoritmo desenvolvidos têm aplicação viável na fractografia quantitativa.

Palavras-Chave: *zona de estiramento, reconstrução tridimensional, estereoscopia, paralaxe, processamento digital de imagens, fractografia quantitativa*

Abstract

HEIN, L.R.O., *Estudo da zona de estiramento através de técnica de reconstrução tridimensional*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 113 p., Tese (Doutorado)

The study about stretch zone and materials fracture toughness behaviour has been found remarkable interest in the science and technology field. Moreover, there are many restrictions about the use of measurement techniques, noted by a low number of published works related to stretch zone geometry. The goal of this research is to develop a method for stretch zone surface analysis, based on parallax measurement theory using digital image processing techniques, to establish accurate criteria for its natural boundaries definition and to study its geometrical evolution, by profilometric analysis. The three-dimensional reconstruction algorithm has been fully developed using the graphic interface of KHOROS program, created by New Mexico University researchers. By means of particular scanning electron microscopy techniques, stretch zone stereo pairs of Al 7050 alloy fracture surfaces were photographed as indicated by EGF P1-87-D method. These fracture surfaces were obtained from CTOD testing. The reconstructed surfaces were analysed by means of profiles, to measure width and height parameters of the stretch zone and to study its geometry. Because the complex stretch zone surface topographies, it was observed a large but natural dispersion of size data, despite the use of a reliable definition for region boundaries identification. So, it is concluded that stretch zone profiles mean geometry, under plane strain, can be described by the semi-parabolic shape. Finally, the results let to conclude that developed methodology and algorithm has viable use for quantitative fractographic analysis.

Key-words: *stretch zone, three-dimensional reconstruction, stereoscopy, parallax, digital image processing, quantitative fractography*

1. Introdução e Objetivos

A zona de estiramento é uma região característica de superfícies de fratura que envolvem a propagação estável de uma trinca anterior à ruptura final, e sua formação está associada às condições de tenacidade à fratura do material, descrevendo um estado crítico. Dessa forma, há grande interesse em se avaliar sua morfologia, como será demonstrado no próximo capítulo. Entretanto, os estudos realizados até o momento não abordam, de forma objetiva, as características de sua geometria, tendo em vista as dificuldades em se adotar técnicas de análise e critérios adequados para sua avaliação (SCHWALBE *et al*, 1993).

Por outro lado, a adaptação dos conceitos do processamento digital de imagens à ciência dos materiais tem se apresentado como uma alternativa viável e de baixo custo de implementação, verificando-se um notável progresso da estrutura e potencial dos *softwares* desenvolvidos por empresas ligadas à área de caracterização microestrutural (FOSTER e FOOKES, 1996). Contudo, os esforços empregados para o desenvolvimento de técnicas de processamento e análise de imagens fractográficas ainda são muito tímidos, o que limita o desenvolvimento da fractografia quantitativa como forma de estudo.

Assim, os objetivos deste trabalho são:

1. Desenvolver uma metodologia para avaliação da morfologia da zona de estiramento, através da reconstrução do relevo dessa região utilizando as técnicas de processamento digital de imagens.
2. Definir critérios consistentes para a identificação dos limites naturais da zona de estiramento, visando garantir a reprodutibilidade das medições. Esse objetivo baseia-se na hipótese de que os limites da zona de estiramento podem ser

identificados por pontos críticos tomados sobre perfis de elevação extraídos da superfície avaliada pelo método de reconstrução tridimensional.

3. Descrever a geometria de perfis da zona de estiramento, questionando-se a hipótese de que a zona de estiramento assuma a forma semi-circular. Este estudo propõe discutir a dispersão natural da geometria dessa região, bem como sua evolução ao longo de toda a sua extensão.

2. Zona de Estiramento e Mecânica da Fratura

2.1 Definição

A zona de estiramento (ze) da fratura é definida como sendo a região de transição, formada entre a propagação estável da trinca e a propagação instável, provocada pela sobrecarga que leva à ruptura final, como mostra a figura 2.1. Essa região pode ser observada em alguns materiais com um certo grau de ductilidade, e sua topografia apresenta evidência de deformação plástica, aparentando ser como um *estiramento* da fronteira da região de propagação estável (figura 2.2). Reconhecer a zona de estiramento na superfície de fratura, contudo, não é tarefa simples para determinados materiais de comportamento dúctil.

Por *estiramento* entende-se, segundo BROOKS e CHOUDHURY (1993), como sendo um mecanismo de deformação por deslizamento ao longo de planos orientados de forma bastante oblíqua em relação à superfície livre da trinca, resultando em um aspecto de ondulações pálidas sobre uma superfície de aparência lisa. Seu aspecto é, muitas vezes, denominado *clivagem dúctil*.

Dessa forma, é empregado, neste trabalho, o termo *zona de estiramento* para evidenciar o princípio de que a região de estudo consiste na *zona* entre a propagação estável e a propagação instável da trinca *onde ocorre estiramento*, uma vez que o arredondamento da ponta da trinca se dá, necessariamente, por esse mecanismo. A expressão *zona estirada*, bastante empregada, não traduz esse conceito com tal ênfase.

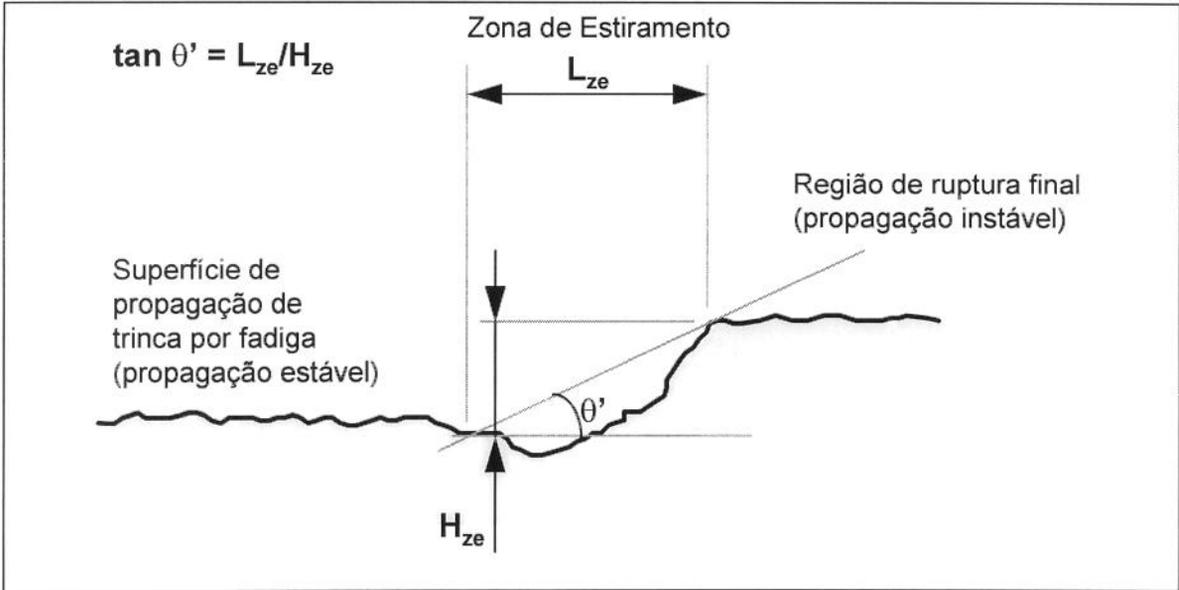


Figura 2.1 Definição da zona de estiramento (ze) conforme ASTM E813-88. L_{ze} e H_{ze} são, respectivamente, medidas da sua largura e profundidade usadas como referência para cálculo de CTOD e J_{Ic} . Adaptada de PANDEY *et al* (1991).

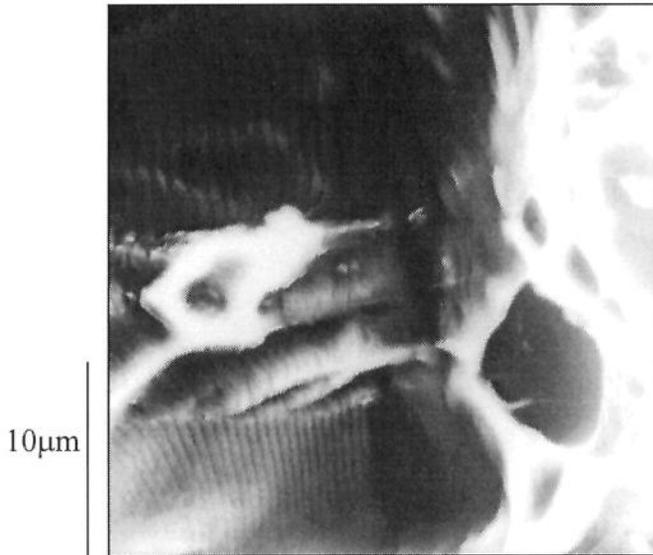


Figura 2.2 Aspecto da zona de estiramento da fratura, em liga Al 7050-T73651. (MEV, detector de elétrons secundários, 2650X, dist. de trabalho de 7,5 mm, 0° de inclinação)

GRIFFIS e SPRETNAK (1970) definiram a zona de estiramento como *a etapa logarítmica da propagação estável da trinca anterior à propagação instável, onde a fratura se dá por deformação intensa, localizada nas direções de cisalhamento puro*. Essa descrição expõe o fato de que a zona de estiramento é caracterizada por uma taxa de crescimento bastante superior àquela observada na formação das estrias, devido à ativação intensa do deslizamento de planos preferenciais, resultante de um estado crítico que leva à ruptura final.

EL-SOUDANI (1985) discrimina cinco regiões ao longo da zona de estiramento formada em aços baixa liga, classificando-as em função dos mecanismos de fratura envolvidos. Essas cinco regiões são descritas, a partir da região de fadiga, como:

- a) Primeiro arredondamento à frente da pré-trinca
- b) Primeira linha de vazios
- c) Segundo arredondamento (estiramento)
- d) Crescimento da trinca por coalescimento de vazios, em zigue-zague
- e) Decoção por cisalhamento de bandas conjugadas

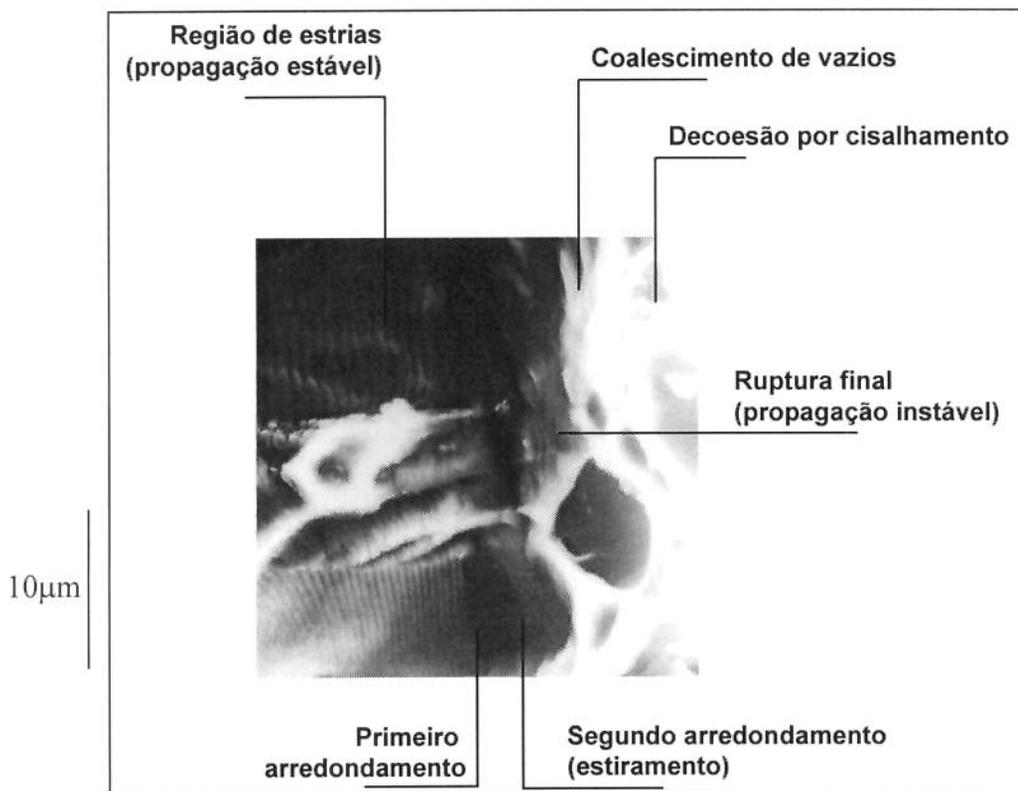


Figura 2.3 Identificação de regiões do relevo da zona de estiramento em liga de Al 7075-T7651, conforme a classificação proposta por EL-SOUDANI (1985).

Cabe ressaltar que algumas dessas regiões não são observadas em outros materiais. Na figura 2.3 são identificadas e classificadas regiões do relevo da zona de estiramento apresentada na figura 2.2, de acordo com a proposta de EL-SOUDANI. A região de estiramento tem como característica principal a presença de ondulações largas, formadas por linhas de deslizamento, resultando numa superfície bastante lisa, como mostra a figura 2.3, que forma a parte anterior da primeira ocorrência de *dimples* na região de ruptura final. É importante comentar que a região de ruptura final também pode, na fratura mista, conter

aspectos de clivagem, significando que a zona de estiramento não apresenta, necessariamente, uma formação regular ao longo de toda a frente da trinca, dependendo da presença de um estado de deformação plana e de características locais de ductilidade, como será discutido adiante.

2.2 Formação da zona de estiramento

SRINIVAS *et al.* (1987) descrevem o processo de formação da zona de estiramento em três etapas, ilustradas por BROEK (1974a), como apresenta a figura 2.4:

- com a aplicação de cargas externas, tensões de tração abrem a pré-trinca e a deformação plástica arredonda a ponta da trinca por estiramento, enquanto começam a ser formados vazios à sua frente;
- a zona de estiramento continua a crescer e os vazios aumentam de tamanho até que se atinja um estado crítico, ou a condição crítica de tenacidade à fratura;
- a trinca começa a se propagar de forma instável por coalescimento de vazios.

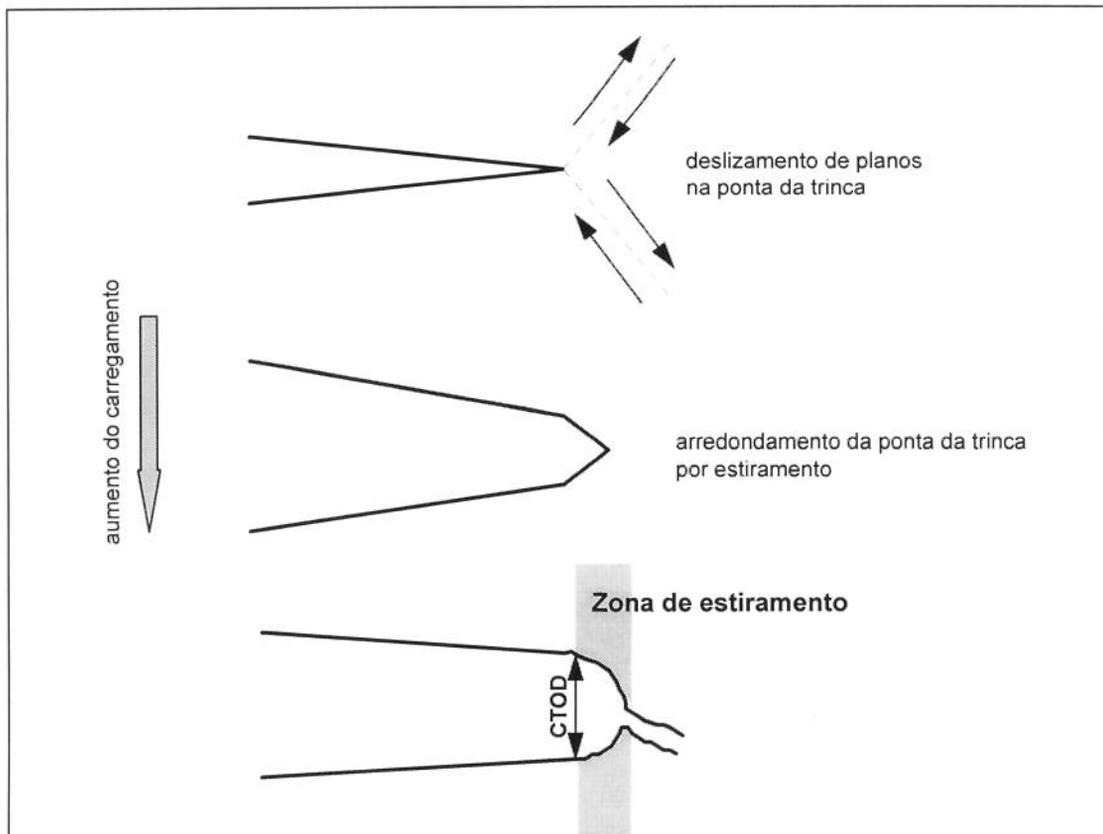


Figura 2.4 Formação da zona de estiramento, no arredondamento da ponta da trinca. (Adaptada de BROEK, 1974a)

2.3 Morfologia da zona de estiramento

2.3.1 Considerações sobre sua geometria

A aproximação mais comumente adotada para a geometria da zona estirada é a da forma semi-circular. Por essa abordagem, que considera o cisalhamento livre dos planos à frente da trinca, as dimensões da largura e da profundidade da zona de estiramento (respectivamente, L_{ze} e H_{ze} , definidas na figura 2.1) seriam as mesmas, resultando em $\theta' = 45^\circ$. Como será mostrado a seguir, essa aproximação é questionada por grande número de pesquisadores, uma vez que, em função do encruamento na ponta da trinca, são encontrados valores experimentais diferentes de 45° (BROEK, 1974a; KRASOWSKY e VAINSHTOK, 1981; DOIG *et al*, 1984; PANDEY *et al*, 1991; PLUVINAGE e LANVIN, 1993).

BROEK (1974a) também discute a aproximação semi-circular, encontrando a seguinte correlação para ligas Al-Zn-Mg:

$$\frac{L_{ze}}{H_{ze}} \cong 1,4 \quad (2.1)$$

O ângulo θ' , definido na figura 2.1 como o ângulo entre o plano médio da pré-trinca de fadiga e o plano médio da zona de estiramento, depende diretamente da orientação dos planos locais de deslizamento, que variam ao longo da frente da trinca. Nesse mesmo estudo, por exemplo, BROEK encontrou valores de L_{ze}/H_{ze} entre 1,22 e 1,70 para ligas de Alumínio da série 7XXX. Observe que os resultados de BROEK divergem, significativamente, da forma semi-circular.

Segundo KRASOWSKY e VAINSHTOK (1981), para a zona de estiramento, formada sob deformação plana com a propagação da trinca por coalescimento de microcavidades, a seguinte relação, bastante próxima da proposta por BROEK, foi observada para um aço com 0,05% de Carbono:

$$\frac{L_{ze}}{H_{ze}} = \sqrt{2} \quad (2.2)$$

Essa relação não é válida, contudo, para temperaturas muito baixas (menores ou iguais a 123 K), onde a largura da zona de estiramento tenderá a ser nula, como ocorre em materiais frágeis. É importante ressaltar que, como função do estado de tensões presente na ponta da trinca, o tamanho da zona de estiramento independe do processo de ruptura final.

Para condições de tensão plana à frente da trinca para o mesmo aço, embora a existência da zona de estiramento seja questionável nesse estado, essa relação mudaria para (KRASOWSKY e VAINSHTOK, 1981):

$$\frac{L_{ze}}{H_{ze}} = 2 \quad (2.3)$$

Essas expressões demonstram que há um forte questionamento quanto à proposição da forma semi-circular para descrever, geometricamente, a zona de estiramento.

2.3.2 Efeito da tenacidade à fratura sobre a zona de estiramento

É evidente que a geometria da zona de estiramento varia de acordo com as condições que definem a tenacidade à fratura de um material. Segundo PISARENKO *et al.* (1987), L_{ze} e H_{ze} parecem ser invariantes quanto à geometria e o tamanho da peça ou amostra, desde que exista um estado de deformação plana à frente da trinca. Essa constatação coincide com os resultados obtidos por PUTATUNDA e RIGSBEE (1984), e GILMORE *et al.* (1983), que observaram que a identificação da formação da zona de estiramento fica restrita pela redução da espessura dos corpos de prova, devido à predominância do estado de tensão plana. Já HYATT e MATTHEWS (1994) concluíram que o comprimento da pré-trinca de fadiga não tem influência sobre a L_{ze} , para o aço ASTM A170.

O efeito da temperatura está relacionado com as condições de tenacidade à fratura à frente da trinca. HOELZER *et al.* (1986), PISARENKO *et al.* (1987), BASSIM *et al.* (1992) e HYATT e MATTHEWS (1994) avaliaram, para aços ARBL, que a zona de estiramento tem suas dimensões sensivelmente reduzidas com a diminuição da temperatura para valores menores que a temperatura de transição frágil-dúctil.

HYATT e MATTHEWS (1994) e DRAR (1995) observaram que a zona de estiramento aumenta sob taxas de carregamento elevadas, para temperaturas acima da transição frágil-dúctil, para aços médio carbono. Segundo DRAR, esse crescimento da zona de estiramento seria explicado pela dificuldade na dissipação de calor, traduzindo-se num aumento momentâneo da taxa de deformação plástica até um certo limite a partir do qual prevalece a fratura por clivagem, para permitir uma elevada velocidade de propagação da trinca. Esse efeito, contudo, só é sensível para taxas de carregamento bastante superiores àquelas empregadas comumente nos ensaios de avaliação dos parâmetros de tenacidade à fratura.

Quanto às condições da microestrutura, SRINIVAS *et al.* (1987) e PLUVINAGE e LANVIN (1993) sugeriram que a zona de estiramento varia linear e proporcionalmente ao inverso da raiz quadrada do tamanho médio dos grãos, de forma similar à expressão de Hall-Petch para o limite de escoamento. Da mesma forma, PLUVINAGE e LANVIN (1993) propõem relações entre o limite de escoamento e as dimensões da zona estirada, embora tenham observado uma grande dispersão nos valores experimentais (com coeficiente de regressão linear igual a 0,48), que são dadas a seguir:

- Para aços XC35:

$$L_{ze} = -1,05.10^{-1} \cdot \sigma_e + 154,4 \quad [\mu m] \quad (2.4)$$

$$H_{ze} = -9,61.10^{-2} \cdot \sigma_e + 123,3 \quad [\mu m] \quad (2.5)$$

- Para ligas de Alumínio (série 7XXX):

$$L_{ze} = -1,03.10^{-2} \cdot \sigma_e + 60,6 \quad [\mu m] \quad (2.6)$$

$$H_{ze} = 5,96.10^{-5} \cdot \sigma_e + 30,3 \quad [\mu m] \quad (2.7)$$

Esses autores verificaram, também, uma pequena variação nas dimensões da zona de estiramento em relação à direção de laminação. Corpos de prova orientados transversalmente à direção de laminação apresentaram zonas de estiramento um pouco menores que os tomados longitudinalmente.

Em resumo, alterações na geometria da zona de estiramento de um material são dadas em relação a modificações nas características que definem seu comportamento mecânico, no mesmo sentido que aquelas associadas à tenacidade à fratura. Isso significa que esse parâmetros poderiam ser interpretados diretamente como propriedades características de um determinado material.

2.4 Relações entre a zona de estiramento e K_{Ic} , δ_c e J_{Ic}

BROEK (1974b) afirmava que a grande vantagem em se obter uma relação entre as dimensões da zona de estiramento e a tenacidade à fratura estaria na possibilidade de se estimar esse parâmetro em peças fraturadas em serviço, com propagação de trincas por fadiga, podendo-se avaliar, por exemplo, a adequação do material ou do desenho do componente à sollicitação mecânica e ao ambiente. Essa previsão, contudo, ainda não se estabeleceu de forma satisfatória, em virtude da grande dispersão na medição dessas dimensões.

2.4.1 Modelos para determinação de CTOD

Há várias propostas na literatura sobre relações entre J_{Ic} , K_{Ic} e CTOD crítico (δ_c) com a largura ou a profundidade da zona de estiramento, modificando a proposta pioneira de BROEK (1974a). A norma ASTM E813-88 estabelece uma expressão para CTOD em função da largura (ou comprimento) da zona de estiramento, L_{ze} , assumindo que a zona de estiramento tem forma semi-circular, como mostra a figura 2.1. Por essa expressão:

$$\delta_c = 2L_{ze} = 2H_{ze} \quad (2.8)$$

PANDEY *et al* (1991) propuseram uma correção para essa expressão, adicionando uma componente elástica para o deslocamento na ponta da trinca. Mas não explicaram como essa componente seria calculada ou medida, tendo, em trabalho mais recente, abandonado essa idéia na determinação de J_{Ic} a partir da linha de arredondamento (*blunting line*) construída através de medições da largura da zona de estiramento (PANDEY, 1992).

Uma forma mais consistente de correção considera o próprio ângulo de arredondamento da zona de estiramento, da forma (DOIG *et al.*, 1984):

$$\delta_c = 2L_{ze} \text{ sen } \theta' \quad (2.9)$$

RANGANATH *et al.* (1990), por sua vez, propuseram generalizar o emprego da largura da zona de estiramento na determinação da linha de arredondamento para avaliação de CTOD, da forma:

$$\delta_c = C.L_{ze} \quad (2.10)$$

Segundo os autores, esse método tende a ser menos conservativo que o proposto na norma BS 5762. Há, contudo, uma certa dificuldade experimental para a obtenção do valor da constante C , sendo observadas diferenças significativas entre os valores obtidos para as geometrias de corpos de prova propostas na norma citada.

Em condições de escoamento restrito (deformação plana), valores de J_{Ic} , K_{Ic} e δ_c podem ser correlacionados através das expressões (DOWLING, 1993):

$$\delta_c \approx \frac{\alpha(K_{Ic})^2}{E\sigma_e} \quad (2.11)$$

$$J_{Ic} \approx \frac{(K_{Ic})^2(1-\nu^2)}{E} \quad (2.12)$$

$$\delta_c \approx \frac{J_{Ic}}{\sigma_e} \quad (2.13)$$

Assim, foram propostas outras expressões buscando relacionar J_{Ic} , K_{Ic} e L_{ze} ou H_{ze} .

2.4.2 Relações entre a zona de estiramento e K_{Ic}

BROEK (1974a) propõe que uma relação entre L_{ze} e H_{ze} depende das propriedades de escoamento do material, bem como da orientação local dos planos de deslizamento. Baseado

nessa hipótese, apresenta o modelo de SPITZIG, que sugere que L_{ze} reflete o espaçamento dos ligamentos do modelo de KRAFFT. KRAFFT desenvolveu uma abordagem alternativa ao conceito da zona plástica à frente da trinca. De acordo com esse modelo, K_{Ic} poderia ser descrito em termos da deformação plástica de elementos de tração dispostos sucessivamente à frente da trinca. Assim, K_{Ic} seria função do espaçamento dos ligamentos (d_T) entre esses elementos (que é equivalente à sua largura), ou seja:

$$K_{Ic} = E \left[\frac{\sigma_e + \sigma_t}{E} + \frac{n}{2} \right] \sqrt{2\pi d_T} \quad (2.14)$$

onde E , n , σ_e e σ_t são, respectivamente, o módulo de Young, o coeficiente de encruamento da equação de Hollomon ($\sigma = k\varepsilon^n$), o limite de escoamento e o limite de resistência à tração.

SPITZIG e BROEK assumem, dessa forma, que a zona de estiramento pode ser imaginada como a metade da estricção do primeiro elemento de tração à frente da trinca, resultando em:

$$L_{ze} = d_T/2 \quad (2.15)$$

E, portanto:

$$K_{Ic} = E \left[\frac{\sigma_e + \sigma_t}{E} + \frac{n}{2} \right] \sqrt{4\pi L_{ze}} \quad (2.16)$$

Entretanto, ao considerar o coeficiente de encruamento na expressão (2.16), o modelo proposto se afasta da natureza linear elástica da definição de K_{Ic} .

PLUVINAGE e LANVIN (1993) obtiveram, empiricamente, correlações na forma proposta por KRASOWSKY e VAINSHTOK (1981), dadas por:

$$K_{Ic} = \sigma_e \sqrt{166 L_{ze}} \quad (2.17)$$

$$K_{Ic} = \sigma_e \sqrt{299 H_{ze}} \quad (2.18)$$

Observe que as equações (2.17) e (2.18) guardam entre si a relação $L_{ze}/H_{ze} \cong 1,80$.

BARON (1994), analisando os dados experimentais obtidos por KRASOWSKY e VAINSHTOK (1981), propõe uma relação entre L_{ze} , K_{Ic} e parâmetros obtidos em ensaios de tração, embora, em sua dedução, adote condições de contorno compatíveis com o regime elasto-plástico e conceitos da abordagem linear elástica, o que provoca uma certa inconsistência. A equação de BARON envolve o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de elasticidade transversal (G), o limite de escoamento (σ_e) e a deformação logarítmica para a fratura (ϵ_f), na forma:

$$K_{Ic} = \frac{\sigma_e}{1 - 2\nu} \sqrt{\frac{2\pi L_{ze} \left[\ln \epsilon_f - \ln \left(\frac{\sigma_e}{3G} \right) \right]}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \epsilon_f}} \quad (2.19)$$

Em resumo, há uma certa dificuldade em se estabelecer modelos entre K_{Ic} e as dimensões da zona de estiramento uma vez que essa última é melhor descrita pelo regime elasto-plástico. Como esses modelos tentam, de certo modo, traduzir a transição entre o comportamento linear-elástico e o elasto-plástico, sua validade naturalmente estará restrita pelo tamanho da própria zona de estiramento e pelas condições de carregamento na propagação estável da pré-trinca.

2.4.3 Determinação de J_{Ic} e da linha de arredondamento da ponta da trinca

Como a zona de estiramento representa diretamente a abertura da ponta da trinca, e existe uma comprovada relação entre J_{Ic} e CTOD (LIU e VARGA, 1994; MORRISON e KARISALLEN, 1995), é natural a proposta de se estimar os valores de J_{Ic} a partir da geometria dessa região.

A principal abordagem está na proposição da linha de arredondamento da ponta da trinca (*blunting line*) como função da L_{ze} para a determinação de J_{Ic} . A descrição da linha de arredondamento, a partir das dimensões da zona de estiramento, tem um caráter conceitualmente realístico, pois trata diretamente do processo de arredondamento da ponta da trinca no ponto crítico (figura 2.5). Essa afirmativa foi referendada recentemente por LANDES (1995), afirmando que a avaliação da linha de arredondamento pela zona de estiramento leva a valores mais representativos.

Em 1974, LANDES e BEGLEY propuseram a primeira expressão para essa definição, onde:

$$J_{Ic} = 2\left(\frac{\sigma_e + \sigma_t}{2}\right)\Delta a_{ze} = 2\left(\frac{\sigma_e + \sigma_t}{2}\right)L_{ze} \quad (2.20)$$

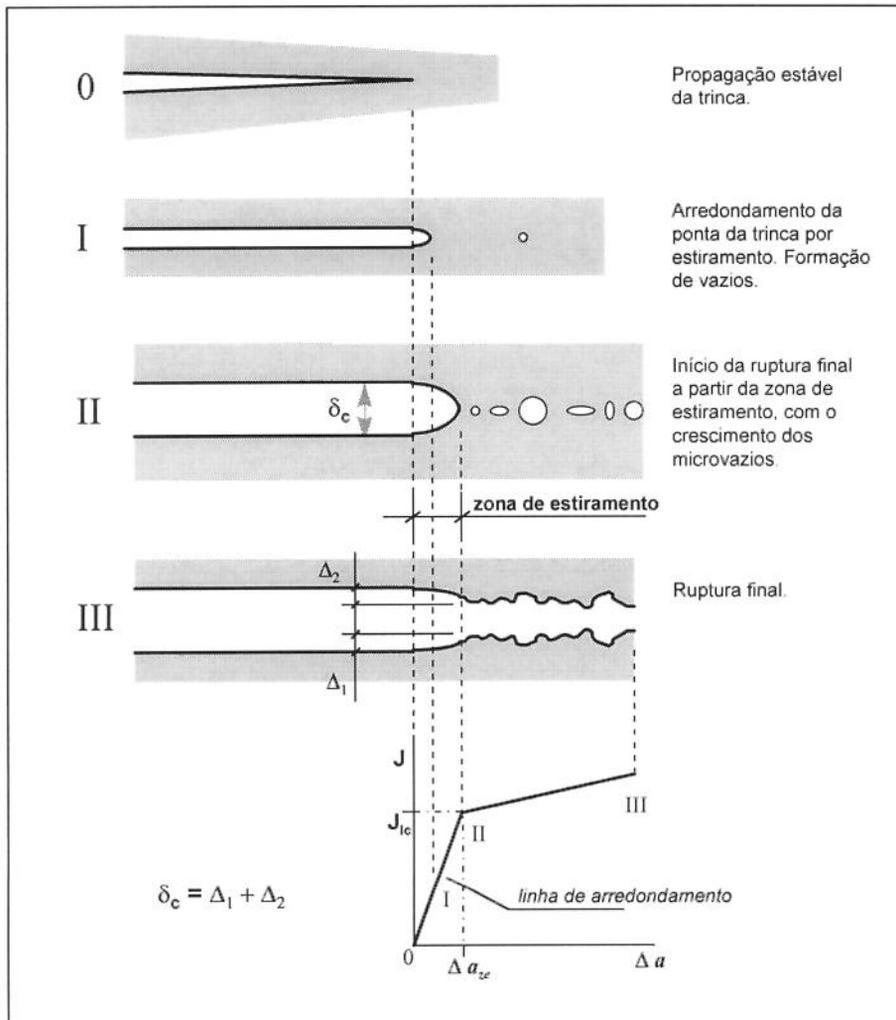


Figura 2.5 Relação entre J_{Ic} e a formação da zona de estiramento. Adaptada de GILMORE *et al.* (1983).

Observe que $\Delta a_{ze} = L_{ze}$ se a largura da zona de estiramento for medida paralelamente ao plano médio de propagação da pré-trinca, isto é, alinhada com o mesmo plano de medição do comprimento inicial da trinca.

A universalidade da equação (2.20) foi contestada por MILLS (1981) e KOBAYASHI, H. *et al.* (1983), uma vez que resulta em valores não-conservativos de J_{Ic} para uma ampla gama de materiais. MILLS, embora houvesse comprovado a validade da equação (2.20) para materiais de alta resistência, propôs outra expressão para ligas com baixa resistência e bastante sensíveis ao encruamento, obtida empiricamente, para estimar de forma mais

conservativa a linha de arredondamento, uma vez que o coeficiente angular é duas vezes maior que na equação de LANDES e BEGLEY:

$$J_{Ic} = 4\left(\frac{\sigma_e + \sigma_t}{2}\right)L_{ze} \quad (2.21)$$

Ainda, MILLS apresentou uma relação empírica entre J_{Ic} e δ_c (COD), considerando $L_{ze} \approx \frac{1}{3}\delta_c$, da forma:

$$J_{Ic} = 2\sigma_e\delta \quad (2.22)$$

Essa consideração de MILLS foge da aproximação de uma forma semi-circular para a zona de estiramento, que se traduziria num superdimensionamento do volume dessa região.

O efeito do encruamento na inclinação da curva foi avaliado por PANDEY *et al.* (1992) resultando na seguinte equação:

$$J_{Ic} = \left(\frac{1+n}{e^n n^{3n}}\right)\left(\frac{\sigma_e + \sigma_{t,r}}{2}\right)\Delta a_{ze} \quad (2.23)$$

onde n é o coeficiente de encruamento da equação de Hollomon, e $\sigma_{t,r}$ é o limite de resistência à tração verdadeiro. Essa expressão teria validade na faixa $0,03 < n < 0,54$, embora com significativa dispersão. O objetivo dos autores foi estabelecer uma alternativa para ligas que não se ajustam às propostas de MILLS (1981) e LANDES e BEGLEY (1974).

Também foram elaboradas relações diretas entre J_{Ic} e L_{ze} , a partir desses estudos. A forma geral dessas expressões é dada por (BASSIM *et al.*, 1992):

$$J_{Ic} = 2k\sigma_e L_{ze} \quad (2.24)$$

onde k é um fator de restrição que varia entre 0,6 para o aço AISI 4340 até 2,00 ou mesmo maior que 5, no caso de escoamento intenso. Valores de J_{Ic} obtidos a partir da expressão acima aproximam-se bastante dos derivados da curva J_R (SRINIVAS *et al.*, 1987).

A partir da equação (2.24), SRINIVAS (1994) propôs uma técnica para medição de J_{Ic} de materiais com alta ductilidade, onde a pré-trinca de fadiga poderia ser substituída por um

entalhe de raio conhecido. Essa proposta é bastante questionável, como mostra o estudo de KOLEDNIK (1992), embora assuma que o fator de restrição descreve o encruamento provocado pela movimentação da zona plástica durante a propagação da pré-trinca por fadiga. Esse trabalho demonstra, contudo, a importância de se considerar os efeitos do encruamento na ponta da trinca sobre a tenacidade à fratura.

2.5 Comentários: critérios experimentais e a validade dos modelos existentes

Como todos os modelos propostos para a determinação da tenacidade à fratura através da zona de estiramento são obtidos ou comprovados por resultados experimentais, o maior problema tem sido a confiabilidade e a precisão dos procedimentos de medição. Uma pesquisa conjunta, visando estabelecer métodos e critérios para medição da largura da zona de estiramento, foi realizada por 12 laboratórios europeus a partir de fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (HALIM *et al.*, 1988). Essas pesquisas permitiram obter duas conclusões principais:

- a indefinição de um referencial sobre os limites da zona de estiramento implicou numa grande dispersão entre os resultados obtidos pelos diversos participantes;
- basta apenas uma das superfícies de fratura para a realização das medições.

Uma constatação muito importante foi a de que a dispersão pôde ser reduzida mediante um trabalho educativo, para que a definição morfológica da zona de estiramento fôsse obedecida por todos os participantes (SCHWALBE *et al.*, 1993). Houveram casos de erros grosseiros de análise, como situações onde formações de *dimples* foram consideradas como integrantes da zona de estiramento, ou onde a ampliação excessiva não permitia a visualização dos limites naturais da região. Essa mesma dificuldade de definição já havia sido assumida por OHJI *et al.*(1983).

Esses resultados, contudo, permitiram o estabelecimento de uma norma para determinação da tenacidade à fratura de materiais dúcteis pelo European Group on Fracture (EGF), apresentada por SCHWALBE *et al.*(1988).

PLUVINAGE e LANVIN (1993) mediram a altura e a largura da zona de estiramento usando cinco métodos diferentes: microscopia eletrônica de varredura (elétrons

retroespalhados), medidas de rugosidade, método da ondulação, microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários) e de secções verticais com deposição de níquel. Desses métodos, o de secções verticais e o de microscopia eletrônica de varredura via elétrons secundários apresentaram os menores desvios, embora exibindo variações da ordem de 14% em torno da média. Os resultados obtidos por esses métodos apresentaram a mesma ordem de grandeza (L_{ze} entre 5 e 200 μm) que os verificados nos esforços do EGF (HEERENS *et al.*, 1988), demonstrando a eficácia do uso do MEV para estimar as dimensões da zona de estiramento.

De qualquer modo, mesmo com esses recursos, os autores desprezaram a idéia de verificar a forma da zona de estiramento. Além disso, deve-se salientar a grande divergência entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos empregados nessa linha de trabalho, o que demonstra a necessidade do estabelecimento de uma metodologia de avaliação da zona de estiramento que permita aliar precisão e reprodutibilidade na determinação de parâmetros geométricos da zona de estiramento (largura, profundidade, forma, etc).

3. Fractografia Quantitativa e Reconstrução 3-D

3.1 Introdução

O estabelecimento de relações entre microestrutura e comportamento mecânico passa pelo estudo dos mecanismos de fratura em função da evolução de campos de tensões. Nesse sentido, a fractografia quantitativa visa estudar a história do processo de fratura, descrita nas próprias superfícies formadas pela separação das partes, através da presença de características como facetas de clivagem, estrias de fadiga decorrentes do carregamento cíclico, alvéolos denotando comportamento plástico, separação intergranular, etc.

A Fractografia Quantitativa tem como objetivo principal descrever as características de superfícies fraturadas em termos quantitativos, buscando aproximar os aspectos macroscópicos e microscópicos da fratura com alguns parâmetros do comportamento mecânico. Os parâmetros avaliados na Fractografia Quantitativa podem ser classificados em duas categorias: *medidas globais* (quando se determinam valores relacionados à superfície como um todo, como rugosidade superficial, fração volumétrica, etc) e *medidas de características específicas* como área superficial, corda mínima, volume, elevação média de objetos, etc.

Os métodos da Fractografia Quantitativa são muito variados, podendo envolver desde uma simples contagem de estrias até a elaboração de algoritmos específicos, devido à própria complexidade geométrica das superfícies envolvidas, especialmente no caso de materiais estruturais, decorrente da presença de múltiplas fases e morfologias em sua microestrutura. Como essa ciência compreende o estudo de relevos, há, muitas vezes, a necessidade do

desenvolvimento de métodos de reconstrução tridimensional da superfície de fratura (como neste estudo, que visa avaliar a zona de estiramento).

Assim, este capítulo apresenta e discute o estado da arte de alguns métodos de reconstrução tridimensional empregados na análise fractográfica, expondo os motivos que levaram à seleção do método reconstrução estereoscópica associado a rotinas de processamento digital de imagens para a avaliação quantitativa da topografia da zona de estiramento.

3.2 A estereologia na fractografia quantitativa

Os primeiros trabalhos para modelagem matemática da topografia da fratura foram baseados na estereologia. Segundo EL-SOUDANI (1990), o objetivo básico do uso da estereologia, na fractografia, é adequar o grau com que os modelos teóricos representam o comportamento observado na fratura dos materiais, em consonância com os conceitos da mecânica da fratura. Pode haver, efetivamente, uma boa compatibilidade na associação entre parâmetros da mecânica da fratura e da fractografia quantitativa graças, certamente, ao tratamento linear empregado no seu desenvolvimento.

Uma das primeiras propostas de formulação de equações da fractografia quantitativa, baseadas nos conceitos da estereologia, foi elaborada por EL-SOUDANI (1974), sendo demonstrada a partir dos teoremas de Delesse, Rosiwal e Thomson (VANDER VOORT, 1984), observando-se os mecanismos de evolução da topografia das superfícies de fratura. Em sua análise, o autor demonstra que, para uma superfície de curvatura aleatória sem dobras ou sobreposições, a fração superficial real (S_S) de qualquer objeto de interesse (ϕ), com distribuição estatisticamente uniforme, é igual à sua fração de área na imagem de projeção normal (A_A'), que equivale à fração linear (L_L') e também à fração de pontos de amostragem (P_P') na mesma imagem da projeção normal da superfície analisada (figura 3.1). isto é:

$$[S_S]_{\phi} = [A_A']_{\phi} = [L_L']_{\phi} = [P_P']_{\phi} \quad (3.1)$$

Já para a superfície real total, tem-se:

$$S_S = f(R_S) \cdot A'_A = g(R_S) = h(R_S) L'_L = i(R_S) P'_P \quad (3.2)^\dagger$$

Em 1975, EL-SOUDANI expande seu teorema, demonstrando que a fração superficial de um objeto de interesse ($[S_S]_\phi$) pode ser correlacionada diretamente à sua fração volumétrica, $[V_V]_\phi$, observadas algumas restrições quanto à complexidade de relevo da superfície de fratura (isso é, a presença de dobras, trincas secundárias e sobreposições). Essa expressão também teve sua validade demonstrada para sistemas polifásicos (EL-SOUDANI, 1977). Esse conjunto de relações define, assim, uma interface clara entre os métodos quantitativos da fractografia e da metalografia, favorecendo o estudo da influência da microestrutura sobre o comportamento da fratura através da estereologia (LIU, 1993).

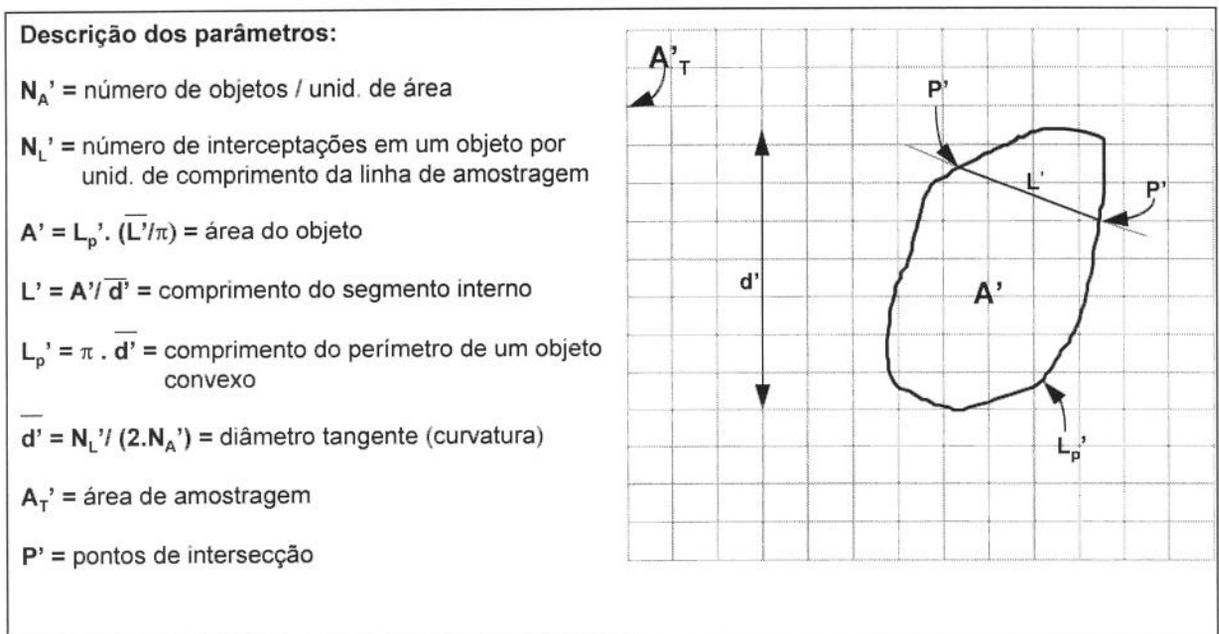


Figura 3.1 Definição de parâmetros básicos para dimensionamento da projeção de objetos convexos em um plano. (Adaptado de UNDERWOOD e BANERJI, 1987a.)

[†] Essa simbologia foi definida por *International Society for Stereology* (VANDER VOORT, 1984):

V - Volume de elementos tridimensionais ou volume de amostragem
S - Área da superfície ou área de interface (geralmente usada para superfícies não planas)
A - Área de superfície plana (alguns autores usam esse símbolo para projeções de superfícies não-planas)
L - Comprimento de objetos sobre a linha de amostragem, ou comprimento da própria linha de amostragem
P - Número de pontos na grade de amostragem
V_V - Soma dos volumes dos objetos de interesse dividida pelo volume total de amostragem (fração volumétrica)
S_S - Razão entre a soma das áreas das superfícies dos objetos e a área da superfície total amostrada
L_L - Soma dos comprimentos dos interceptos lineares dividida pelo comprimento total da linha de amostragem
P_V - Número de pontos por volume de amostragem
S_S' , L_L' e P_V' - Frações medidas sobre o plano de projeção

EL-SOUDANI (1978) sugere, então, que a topografia da superfície de fratura pode ser expressa em termos de sua rugosidade superficial (R_S) como variável independente das funções que descrevem as relações de proporcionalidade da equação (3.2), avaliada indiretamente através dos valores de rugosidade linear obtidos pela técnica de medição de perfis. As definições desse autor para os conceitos de rugosidade superficial e linear são muito semelhantes àquelas propostas anteriormente por PICKENS e GURLAND (1976), como apresenta a figura 3.2, da forma:

$$R_S = \frac{S_t}{A'} \quad (3.3)$$

e,

$$R_L = \frac{L_t}{L'} \quad (3.4)$$

Pela equação (3.3), fica evidente a importância de se medir a área real da superfície de fratura (S_t), uma vez que, a partir desta, pode ser definido o valor de R_S (além de muitos outros parâmetros). A determinação precisa de R_S e S_t é o maior desafio da Fractografia Quantitativa. Para tanto, têm sido desenvolvidas diversas técnicas para sua medição, abordadas a seguir.

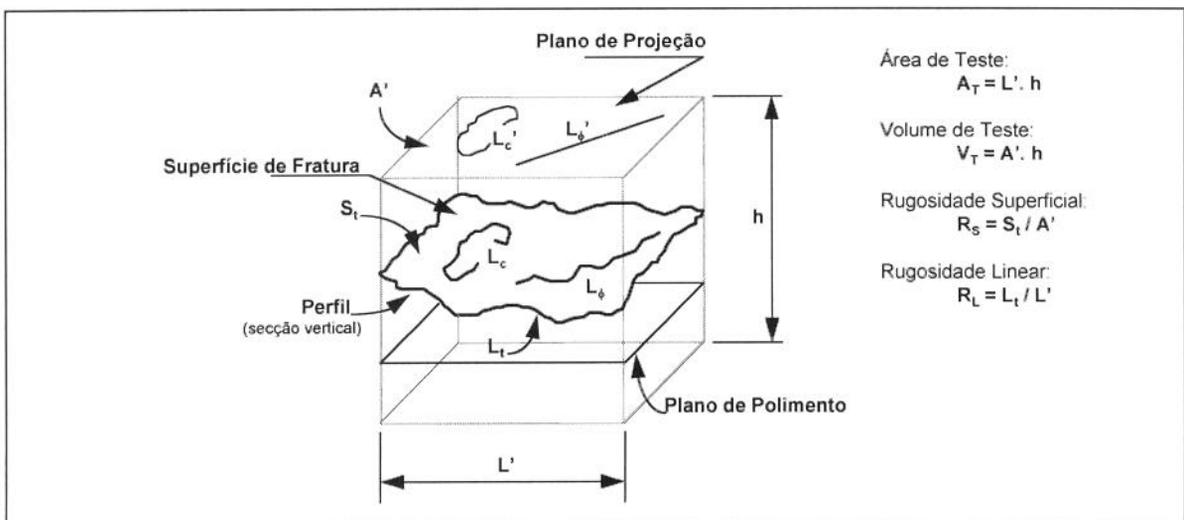


Figura 3.2 Projeção de objetos da superfície de fratura no plano e definição dos parâmetros de rugosidade. Adaptado de (UNDERWOOD e BANERJI, 1987a)

3.3 Técnicas de análise tridimensional de superfícies

A medição de um relevo pressupõe sua descrição no espaço tridimensional, uma vez que cada ponto obtido deve ser definido por três coordenadas. Assim, as dimensões medidas na fractografia quantitativa são, na verdade, derivadas da análise tridimensional da superfície de fratura, através da qual são definidos os parâmetros de interesse que devem ser avaliados. Quando se estudam formações de estrias de fadiga, por exemplo, observa-se que a superfície fraturada apresenta regiões com ondulações relativamente periódicas em sua extensão, o que permite definir que o espaçamento médio dessas ondulações (estrias) é uma dimensão de interesse, pois descreve a evolução do comportamento dessas regiões.

Desse modo, qualquer parâmetro na fractografia quantitativa é dado, intrinsecamente, em função do comportamento tridimensional da superfície de fratura, que deve ser avaliado.

Em geral, as técnicas de análise tridimensional mais usadas abrangem duas formas principais de estudo que são: a geração (ou medição) de perfis e a reconstrução tridimensional. A medição de perfis visa estimar parâmetros relativos à rugosidade linear que, associados à rugosidade superficial, permitem descrever a superfície estudada enquanto que, na reconstrução tridimensional, a superfície é reconstruída diretamente a partir dos dados levantados.

A técnica mais usual de reconstrução tridimensional empregada no estudo fractográfico é a estereoscopia, onde são obtidas informações topográficas através da localização de pontos semelhantes tomados sobre pares de imagens, permitindo reconstruir, diretamente, a superfície avaliada. Além dessa técnica, outras duas alternativas para a reconstrução tridimensional consistem no *shape-from-shading* e no método das secções seriais. Esses métodos, embora de mais difícil emprego, também serão discutidos neste trabalho.

O objetivo deste tópico é, portanto, apresentar o estágio atual de desenvolvimento dessas técnicas para justificar a escolha do método utilizado neste trabalho.

3.3.1 Métodos de análise tridimensional a partir da medição de perfis

3.3.1.1 Abordagem linear

As técnicas de medição de perfis foram introduzidas na fractografia quantitativa na década de 70, trazendo a aparente vantagem de não envolver uma grande complexidade matemática na sua determinação. Um teorema de EL-SOUDANI (1978) propõe que *duas superfícies com a mesma rugosidade linear apresentam a mesma rugosidade superficial*, o que significava que R_S poderia ser descrita unicamente em função de R_L , que pode ser medida com certa facilidade sobre perfis da superfície de fratura (WASÉN *et al*, 1988).

Dois grupos de expressões originadas à partir desse teorema são classificados em relação ao valor da rugosidade linear (COSTER e CHERMANT, 1983):

- para $R_L < \pi/2$, representando superfícies idealmente planas, conforme a definição de EL-SOUDANI (1974):

$$R_S = \frac{(R_L + \pi/2 - 2)}{(\pi/2 - 1)} \quad (3.5)$$

- para $R_L > \pi/2$, para superfícies rugosas (como no caso de fratura dúctil):

$$R_S = aR_L + b, \text{ onde } a \text{ e } b \text{ são constantes} \quad (3.6)$$

Esse teorema de EL-SOUDANI é contestado por WRIGHT e KARLSSON (1983) quanto à inconsistência nas considerações para sua dedução, embora esses autores ainda proponham expressões com R_S em função de R_L .

WOJNAR e KUMOSA (1990) propõem três novos parâmetros referentes ao comportamento de trincas secundárias que, associados à rugosidade linear, podem descrever a rugosidade superficial. Esses parâmetros seriam: o comprimento médio de trincas secundárias, seu espaçamento médio e densidade. Entretanto, a dedução desses parâmetros também sofre de grande inconsistência, uma vez que as trincas secundárias são consideradas sempre perpendiculares à trajetória média da fratura, e sua aplicabilidade é, assim, bastante questionável.

GOKHALE e UNDERWOOD (1990), por sua vez, sugerem expressar R_S como função da rugosidade linear e de um fator definido a partir da função de distribuição de orientação do perfil, $f(\alpha, \varphi_p)$, onde α e φ_p são componentes de orientação angular, medidas em

relação ao plano de corte (figura 3.3). Esse fator, denominado *fator estrutural do perfil* (ψ), é definido por:

$$\psi(\varphi_p) \equiv \int_0^{\pi} [\text{sen } \alpha + (\frac{\pi}{2} - \alpha) \cos \alpha] f(\alpha, \varphi_p) \cdot d\alpha \quad (3.7)$$

e,

$$R_S = \overline{R_L \cdot \psi} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) tem, conforme a demonstração de seus autores, validade para superfícies com qualquer grau de complexidade e anisotropia, desde que verificada a ausência de dobras e trincas secundárias ramificadas. Embora seja necessária a medição de ψ , GOKHALE e DRURY (1990) afirmam que, na maioria dos casos, a amostragem em apenas três planos verticais (contendo os perfis) com direções diferentes permite estimar a rugosidade superficial com um erro de $\pm 6\%$, para 95% de confiabilidade. Contudo, os resultados obtidos por esse modelo sofrem forte influência do grau de ampliação empregado na observação dos perfis (LI *et al.*, 1995).

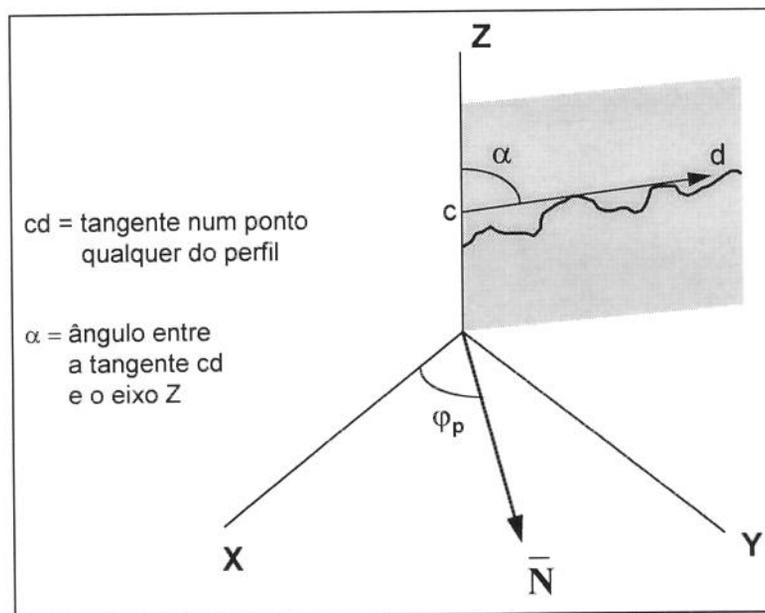


Figura 3.3 Definição das componentes de orientação angular. (GOKHALE e UNDERWOOD, 1990)

Diferentes técnicas são comumente empregadas para a medição de perfis sobre a superfície de fratura, sendo selecionadas de acordo com critérios como o grau de ampliação ou a necessidade de se preservar a integridade da amostra. A mais antiga delas, o *método das*

secções verticais, consiste em efetuar cortes planos, paralelos (EL-SOUDANI, 1978) ou não (BADDELEY *et al.*, 1986), orientados perpendicularmente ao plano médio da fratura, para avaliar os perfis formados pelas linhas de intersecção. A medição dos perfis é feita de forma manual (por meio de grades padronizadas), semi-automática (através de mesas digitalizadoras) ou automática (empregando rotinas de processamento digital de imagens). Embora sua concepção venha a ser bastante simples, essa técnica se mostra bastante trabalhosa, exigindo cuidados especiais para minimizar fontes de erro como o arredondamento de bordas durante o corte ou o polimento.

Outras técnicas compreendem o uso de rugosímetros, interferometria laser, ou preparação de réplicas para medir a evolução de perfis sem destruir a superfície de fratura. Em todos os casos, porém, o fator limitante está mesmo na abordagem matemática para o cálculo de R_s a partir dos dados obtidos.

3.3.1.2 Abordagem fractal

Além da abordagem linear, são desenvolvidas teorias baseadas em fractais para a descrição da rugosidade. A análise por fractais pode ser feita nos casos em que os padrões de geometria do relevo guardam similaridade dentro de uma faixa de ampliação, sendo necessário distinguir entre superfícies fractais e não-fractais (HORNBOKEN, 1989), embora a aplicação dessa teoria seja possível na maioria dos casos (UNDERWOOD e BANERJI, 1987b).

Os primeiros conceitos para aplicação de fractais na fractografia foram desenvolvidos por MANDELBROT *et al.* (1984), definindo a dimensão fractal D tal que, para a equação fractal de uma curva irregular no plano:

$$L(\eta) = L_0 \eta^{-(D-1)} \quad (3.9)$$

Onde $L(\eta)$ é o comprimento aparente da curva em função da unidade de medida η , e L_0 é uma constante com dimensões de comprimento. A dimensão D é dada por uma constante relacionada à inclinação na forma linear da equação (3.9), ou seja:

$$\log L(\eta) = \log L_0 - (D-1) \log \eta \quad (3.10)$$

O que explica que a similaridade dos padrões geométricos deve existir para haver uma relação linear entre $\log L(\eta)$ e $\log \eta$ em todo o intervalo avaliado em η (AVERBACH, 1990).

Os parâmetros de rugosidade superficial e linear são expressos na forma fractal como:

$$R_L(\eta) = C_1 \eta^{-(D_L-1)} \quad (3.11)$$

$$R_S(\eta) = C_2 \eta^{-(D_L-2)} \quad (3.12)$$

Dessa forma, o estudo da superfície de fratura por fractais pode ser uma boa tentativa para a avaliação de características globais.

Contudo, a adequação da modelagem por fractais às demais teorias de estudo da fratura deve ser vista com reservas. A título de exemplo, o mérito de relações entre modelos da fractografia quantitativa baseados na teoria dos fractais e o conceito de tenacidade à fratura é questionado por LEI e CHEN (1995). Esses autores demonstram que a dimensão fractal D é função da entropia (e, portanto, função de estado), variando durante o processo irreversível de propagação da trinca.

Assim, modelos que propõem uma correlação linear negativa entre D e os logaritmos de K_{Ic} , como os desenvolvidos por MU e LUNG (1988), não teriam validade. JIANG *et al.* (1994), por sua vez, desenvolveram um modelo estabelecendo uma relação positiva logarítmica entre J_{Ic} , D e a fração volumétrica de vazios formados na superfície de fratura de materiais dúcteis, o que é coerente com os argumentos de LEI e CHEN.

3.3.2 O método das secções seriais

O método das secções seriais consiste em estudar planos paralelos ao plano médio da fratura, mas em diferentes posições de elevação, estabelecendo curvas de nível definidas pelas interfaces formadas pelas características do relevo com esses planos.

Esse estudo pode ser feito de forma destrutiva, através do polimento sucessivo (RUSS, 1990), ou preservando-se a superfície através de ajustes progressivos na posição do foco (KANEDA *et al.*, 1992).

Algoritmos para esse tipo de reconstrução têm sido desenvolvidos por diversos pesquisadores (PREZA *et al.*, 1992; DEFRISE, 1993). Entretanto, sua aplicabilidade é bastante restrita a baixos níveis de ampliação e a confiabilidade na estimativa de volumes, a

partir de secções planas, é questionada por LOUIS e GOKHALE (1995), o que torna sua aplicação inviável para este estudo.

3.3.3 O método *shape-from-shading* (SFS)

O princípio básico do *shape-from-shading* (literalmente *forma a partir do sombreamento*), introduzido por HORN (1990), é relativamente simples. Considera que o processo de formação de imagem é constituído de três fatores: a forma do objeto, sua refletividade no meio e as condições de iluminação. Então se, inicialmente, forem conhecidas a fonte de iluminação e as propriedades ópticas da superfície do material, o sombreamento correspondente a cada acidente de relevo fornecerá informações para a reconstrução tridimensional, uma vez que as variações no brilho estarão associadas diretamente às alterações na orientação da superfície (SZELISKI, 1991).

Variações no brilho entre pontos consecutivos são interpretados pelos algoritmos SFS mais populares como gradientes de elevação, construindo-se, dessa forma, um mapa de gradientes a partir do qual é reconstruída a superfície tridimensional. A implementação de algoritmos para cálculo de gradientes em imagens é muito simples (SMITH *et al.*, 1977), e seu processamento é satisfatoriamente rápido nos microprocessadores atuais. Esse princípio leva a pensar que uma única imagem é suficiente para a obtenção das informações sobre o relevo.

Esse conceito torna bastante evidente a associação desse método à microscopia eletrônica de varredura, segundo RUSS (1990), uma vez que as condições de incidência do feixe de elétrons (que é a fonte de iluminação) e de refletividade da superfície do material (dada em função de sua condutividade) seriam dados relativamente fáceis de se obter. Entretanto, distorções são introduzidas pela heterogeneidade na composição química da superfície observada, por saturação, astigmatismo e espalhamento do feixe eletrônico, pela presença de pontos oxidados, etc, que dificultam a aplicação direta do método da forma proposta pelo autor (HEIN *et al.*, 1994). A figura 3.4 exemplifica o efeito dessas fontes de distorção.

Nesse sentido, pode-se comprovar que uma das grandes restrições à aplicação do SFS é a de que melhores resultados são obtidos a partir de superfícies lisas, com variação suave de brilho, a tal ponto que alguns algoritmos incorporam essa desvantagem como condição de contorno para o cálculo dos valores de elevação (OLIENSIS, 1991). BEIL e CARLSEN

(1990), por exemplo, não conseguiram bons resultados na reconstrução estereoscópica de regiões contendo bordas ou nervuras, observando um pronunciado arredondamento nesses pontos.

Para ampliar a eficácia do método, diversas adaptações vêm sendo consideradas, como a implementação de rotinas de parametrização das elevações (LEE e KUO, 1994), cálculo variacional (HORN e BROOKS, 1986), e estéreo-fotometria (LEE e KUO, 1993; KIM e BURGER, 1991; SHAO, *et al.*, 1991).

Essa última alternativa é potencialmente interessante pois consiste em obter duas ou mais imagens de uma mesma região a partir de um mesmo ponto de observação mas com fontes de iluminação distintas, permitindo a construção de um sistema de equações para a determinação do mapa de elevação (RUSS, 1990). Por exemplo, num microscópio eletrônico de varredura a tensão de aceleração do feixe poderia ser alterada para a produção de duas (ou mais) imagens de uma mesma projeção. Nesse caso, os efeitos da composição química da superfície da amostra sobre o contraste são considerados variáveis do sistema de equações obtido, com a definição de um modelo condizente, produzindo informações sobre a elevação.

Até o momento, contudo, não foi obtido um modelo baseado no SFS que seja plenamente adequado à observação fractográfica em microscópio eletrônico, o que inviabiliza seu emprego neste estudo.

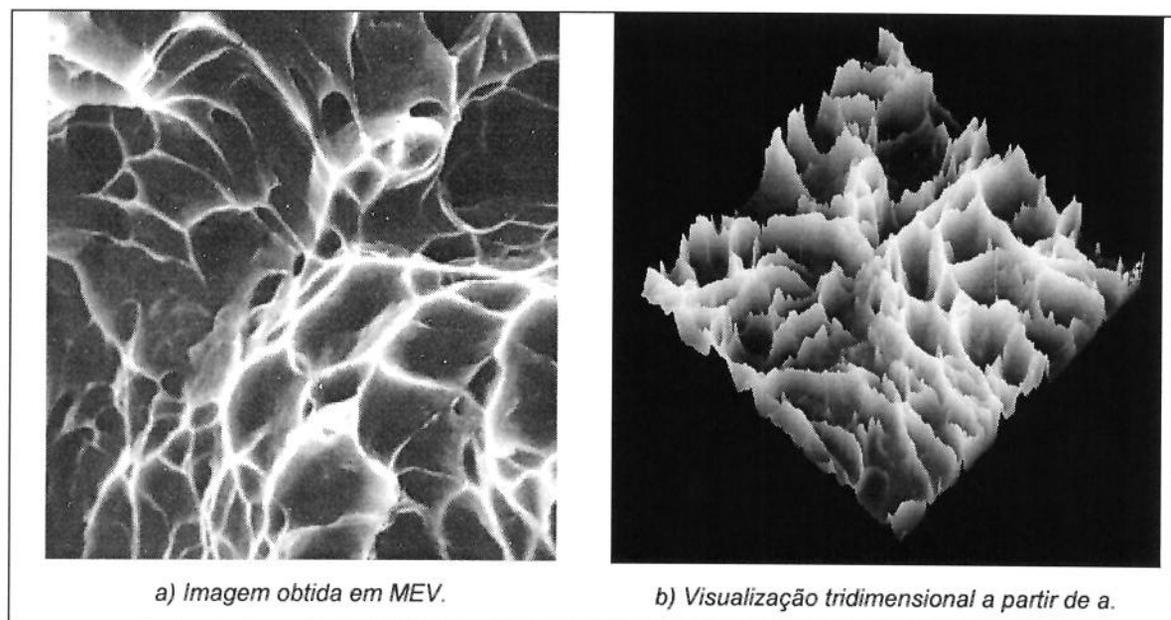


Figura 3.4 Visualização tridimensional por SFS (b) da superfície de fratura por ruptura dúctil (a) em amostra da liga Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, obtida em MEV Cambridge S4-10 (HEIN *et al.*, 1994). (Imagem em a: MEV, elétrons secundários, 4500x, 20kV, dist. de trabalho de 3 mm, inclinação de 45°)

3.3.4 Reconstrução estereoscópica

A grande vantagem da estereoscopia sobre as técnicas de geração de perfis está na descrição da topografia da superfície, permitindo obter sua área por meio de integração numérica, não dependendo de métodos indiretos baseados na medição de outros parâmetros (OGAWA *et al.*, 1993).

O princípio básico da estereoscopia está em obter as coordenadas reais de uma superfície a partir de duas ou mais imagens tomadas de dois ou mais pontos de observação perfeitamente alinhados entre si. Verificam-se, então, deslocamentos laterais, ao comparar pontos característicos nos planos das imagens de projeção, ao longo do eixo de alinhamento dos pontos de observação, com intensidades diferentes mas proporcionais à sua elevação local. Esses deslocamentos são denominados *deslocamentos de paralaxe* ou, simplesmente, *paralaxe*.

Se os dois sistemas de coordenadas, do objeto observado e dos pontos de observação, coincidem, então o plano (x,y) das imagens de projeção é paralelo ao plano de referência (X,Y) do objeto. Dessa forma, as coordenadas de elevação (Z) serão as mesmas para os dois sistemas de coordenadas (FACON, 1993), e o paralaxe no plano (x,y) poderá ser relacionado ao eixo de elevação do objeto.

Esse método, também denominado *método do paralaxe*, implica na necessidade de se identificar objetos correspondentes nas imagens de projeção. No caso mais comum, em que duas imagens de projeção são tomadas à esquerda e à direita da normal ao plano médio da superfície observada (eixo Z), o paralaxe (P), após o alinhamento das imagens em relação ao eixo Y, é calculado como:

$$P = x_{esq} - x_{dir} \quad (3.13)$$

Tomando-se $\Delta\theta$ como a variação total no ângulo de observação, a coordenada z do eixo de elevação no ponto de referência (0,0,0) do sistema sobre o objeto será dada por:

$$z = \frac{P}{2 M \text{sen}(\frac{\Delta\theta}{2})} \quad (3.14)$$

onde M é a ampliação das imagens.

Dessa forma, a variação na elevação (Δz) entre o ponto de referência (origem do sistema de coordenadas) e um ponto sobre um detalhe i qualquer do objeto é:

$$\Delta z = z_i - 0 \quad (3.15)$$

E entre dois pontos quaisquer na superfície analisada:

$$\Delta z = z_1 - z_2 \quad (3.16)$$

Assim, a primeira dificuldade da estereoscopia está em identificar detalhes correspondentes nas imagens de projeção, para determinar os valores de elevação. A resolução da superfície tridimensional obtida será dada em função da quantidade de elementos identificados nas duas (ou mais) imagens de projeção. Então, os meios para identificação de regiões correspondentes constituem o fator diferencial entre as técnicas de reconstrução estereoscópica.

RUSS *et al.* (1986), por exemplo, assinalaram pontos comuns em duas imagens de um par estéreo manualmente, através de uma mesa digitalizadora, e reconstruíram a superfície de um dente humano empregando uma malha de triangularização para associar os valores de elevação obtidos. O objetivo desse procedimento foi contornar o problema da baixa resolução, resultante do pequeno número de regiões amostradas devido à seleção visual.

ROBERTS e PAGE (1981) elaboraram um programa de computador onde, com a seleção dos pontos comuns por meio de mesa digitalizadora, são gerados múltiplos perfis da superfície avaliada. CHEN e WILCOX (1991) também desenvolveram um programa para geração de mapas de elevação a partir de regiões coincidentes entre as imagens de pares estéreos obtidos manualmente, visando obter a distribuição da orientação de planos de clivagem.

A necessidade de ampliar a resolução e automatizar a amostragem de regiões coincidentes faz com que seja estudada a implementação de algoritmos específicos de processamento digital de imagens, denominados *algoritmos para reconhecimento de padrões*, que vêm a ser ferramentas matemáticas para avaliação estatística de semelhanças entre regiões. COSTER e CHERMANT (1983) apresentam um apanhado de diversos trabalhos onde o reconhecimento das regiões semelhantes é feito a partir de rotinas baseadas nos conceitos da teoria de conjuntos da Matemática Morfológica. Essas rotinas, todavia,

esbarram ainda no problema da baixa resolução, decorrente agora da necessidade de se reduzir as imagens para uma representação binária.

KOENIG *et al.* (1987) empregam o conceito de correlação espacial para a identificação de regiões semelhantes, tratando as imagens dentro de sua própria escala de cinza. Mas, embora seja obtida uma alta resolução espacial, o algoritmo proposto por KOENIG não se mostra adequado para a modelagem de superfícies muito irregulares, havendo a necessidade de se corrigir os valores obtidos, relacionando-os com um patamar pré-determinado, visando eliminar picos e vales gerados por falhas de correlação.

Essa abordagem, contudo, mostra-se promissora, por relacionar todas as informações espaciais contidas nas imagens, não interferindo na escala de cinza, e por possibilitar uma alta resolução na definição de pontos dos mapas de elevação.

3.4 O papel das técnicas de processamento e análise de imagens

O processamento e análise de imagens traz significativas vantagens à implementação de métodos de avaliação fractográfica, especialmente quanto a questões como resolução, precisão e produtividade.

A maior resolução nos mapas construídos por algoritmos de processamento digital deve-se ao conceito de que uma imagem pode ser representada numericamente por uma matriz, cujas dimensões e escala de intensidade de seus componentes são definidas pelo sistema de aquisição utilizado. Por exemplo, na microscopia eletrônica o sistema de aquisição se confunde, muitas vezes, com o próprio sistema de formação da imagem, podendo-se obter mapas de elevação com a mesma resolução espacial (ou ainda superior) que a utilizada para observação da superfície (KOENIG, 1987; AMMANN *et al.*, 1995; AMMANN *et al.*, 1996).

Outra vantagem evidente, nesse sentido, está no fato que uma maior quantidade de dados e, principalmente, informações que não poderiam ser obtidas através de métodos manuais, pode ser processada num espaço de tempo relativamente curto com reprodutibilidade de resultados, como afirma RUSS (1991).

Ao permitir a identificação e a separação de características de interesse na superfície de fratura, o processamento digital de imagens possibilita calcular sua área diretamente e com grande precisão, não havendo, por exemplo, a necessidade de se avaliar parâmetros como

fração de pontos (P_p) ou fração linear (L_L), eliminando variações decorrentes da quantidade amostrada, como mostra a figura 3.5.

Ferramentas matemáticas para identificação e separação de estruturas específicas, denominadas *operações de segmentação*, guardam, muitas vezes, uma íntima vinculação com a geometria dessas estruturas (BLEAU *et al.*, 1992). Um exemplo disso está na abordagem de PRETEUX *et al.* (1991), onde o problema de caracterizar a textura da superfície fraturada de uma semi-esfera é desenvolvido através de conceitos da matemática morfológica, orientados pelas características da geometria da superfície de textura granular da fratura frágil.

Finalmente, UNDERWOOD (1990), um dos pioneiros da estereologia quantitativa na engenharia de materiais, considera que os sistemas de análise de imagens modernos, com maior capacidade de processamento, aliados aos microscópios eletrônicos de varredura atuais trouxeram um novo ímpeto ao desenvolvimento da fractografia quantitativa.

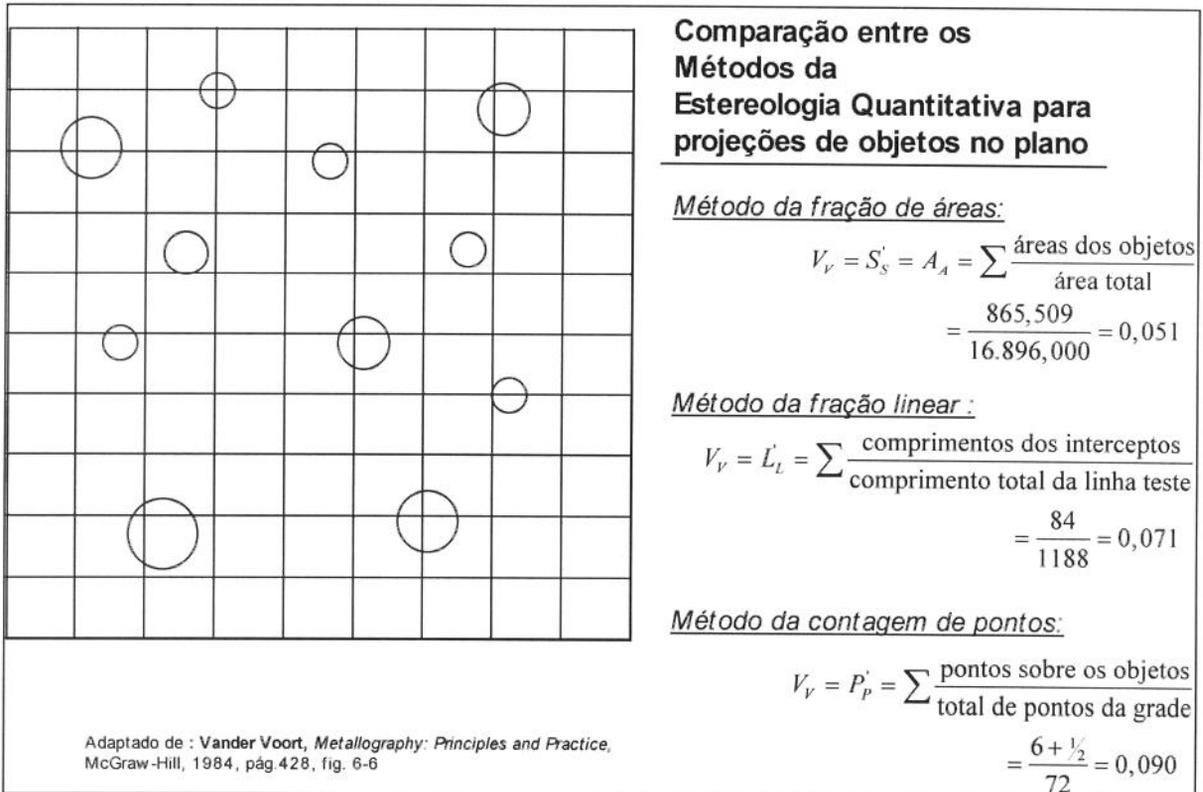


Figura 3.5 Imprecisão dos métodos da estereologia quantitativa. (VANDER VOORT, 1984)

3.5 Perspectiva: Aplicações da fractografia quantitativa na análise de falhas

Em 1993, ROSENFELD e MARSCHALL publicaram um estudo descrevendo o pequeno progresso no desenvolvimento dos métodos de análise de falhas estruturais baseados em conceitos da Mecânica da Fratura, onde fica evidente que a fractografia quantitativa tem, hoje, um papel muito tímido nesse contexto. Esses autores analisaram cerca de 20 publicações sobre investigações e técnicas de análise de falhas, onde, quando utilizadas, as avaliações quantitativas de aspectos da superfície de fratura ficavam restritas à contagem manual de estrias de fadiga.

Em 1994, a revista *Materials Characterization* teve uma edição dedicada à área de análise de falhas onde, por exemplo, MORIN *et al.* destacam a importância do papel qualitativo da fractografia na identificação de mecanismos de fratura e de regiões de início e propagação, mas o único trabalho sobre fractografia quantitativa publicado (CONNORS, 1994) apresenta apenas a técnica de medição do espaçamento de estrias de fadiga envolvendo contagem manual, já empregada em outras ocasiões por diversos outros pesquisadores como UNDERWOOD (1987a) e PUTRA e SCHIJVE (1992). Esse desuso das técnicas de fractografia quantitativa também é observado em publicações dedicadas à análise de falhas em componentes mecânicos, como nos artigos do periódico *Engineering Failure Analysis*.

Esse aparente descaso pode ser explicado pela ausência de modelos realmente representativos da relação entre os micromecanismos de fratura e a mecânica da fratura. Uma abordagem nesse sentido está na introdução da técnica FRASTA (*FR*acture *S*urface *T*opography *A*nalysis), desenvolvida por KOBAYASHI (KOBAYASHI, T., e SHOCKEY, 1991a e b). Essa técnica combina conceitos da análise de perfis, métodos especiais de microscopia e informações das duas superfícies geradas na fratura, para reconstrução tridimensional da topografia, e tem sido usada por diversos pesquisadores na obtenção de dados sobre tenacidade à fratura, taxas de nucleação e crescimento de trincas, etc, em aplicações típicas de análise de falhas (KOBAYASHI, T., *et al.*, 1994; MIYAMOTO *et al.*, 1990; OHTSUKA *et al.*, 1994).

Enfim, há um grande potencial para a aplicação da fractografia no estudo de falhas estruturais, havendo a necessidade de elaboração de modelos consistentes para a correlação entre microestrutura, micromecanismos de fratura e mecânica da fratura.

4. Materiais e Métodos: *Critérios Experimentais*

4.1 Introdução: Etapas do Procedimento

Como foi apresentado, um dos objetivos deste trabalho de pesquisa é desenvolver uma técnica para descrição do relevo da superfície de fratura baseada no processamento digital de imagens de um par estereoscópico. Isso requereu um maior detalhamento no procedimento experimental, implicando na seleção de critérios para cada uma de suas etapas. Assim, de fato, começa aqui a discussão do trabalho, uma vez que toda a metodologia também é um resultado dessa pesquisa.

A figura 4.1 apresenta um fluxograma das etapas do procedimento até a obtenção dos perfis de elevação, a partir dos quais serão analisados parâmetros da morfologia da zona de estiramento. Como se pode observar, as quatro primeiras etapas levam à obtenção de imagens na forma digital, que serão os dados de entrada do programa para reconstrução tridimensional desenvolvido neste trabalho. Esse capítulo compreende, então, uma descrição detalhada dessas etapas, apresentando e discutindo os critérios empregados em sua execução.

O próximo capítulo será dedicado à apresentação dos conceitos de processamento digital de imagens empregados na elaboração do programa, discutindo sua aplicação e abrangência, bem como do sistema KHOROS, que foi o ambiente gráfico utilizado para esse desenvolvimento. O sistema KHOROS, como será detalhado adiante, permite estabelecer a melhor seqüência das sub-rotinas empregadas no processamento das imagens, configurando-se numa ferramenta poderosa para a criação de algoritmos para o estudo de imagens.

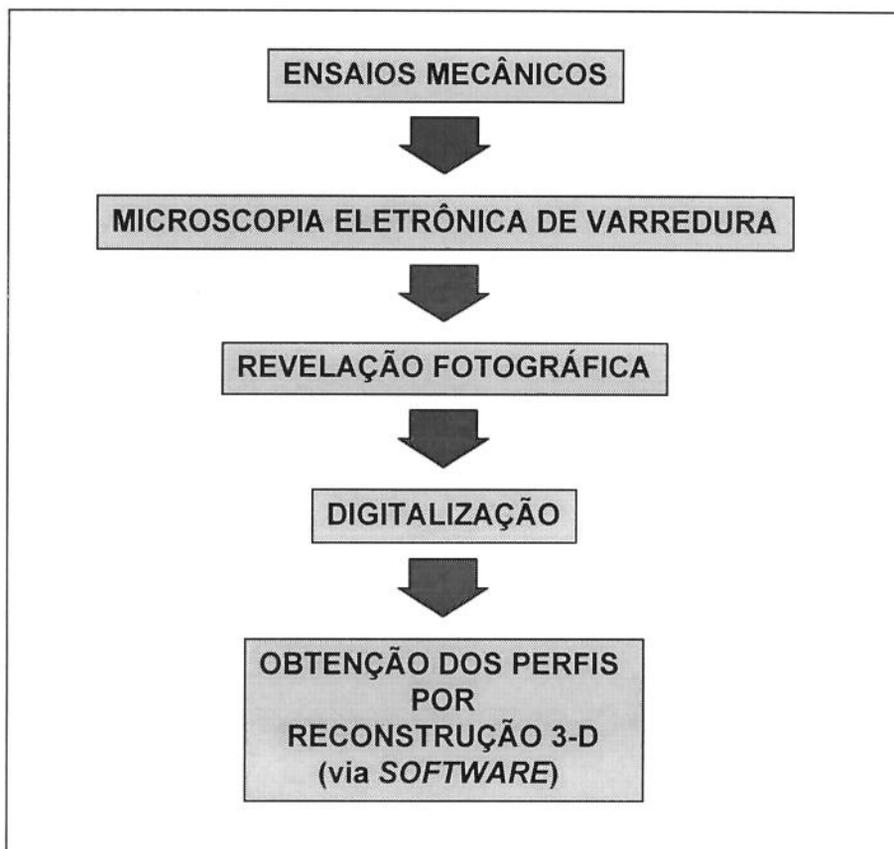


Figura 4.1 Fluxograma das etapas do procedimento experimental.

4.2 Material Utilizado

A escolha de uma liga de Alumínio de alta resistência como a Al-7050 T73651 para este estudo deveu-se, basicamente, à facilidade de identificação de estrias de fadiga, o que favorece a delimitação da zona de estiramento, e à sua boa condutividade elétrica, que permite a obtenção de imagens nítidas por microscopia eletrônica de varredura. Além disso, trata-se de um material amplamente empregado em estruturas mecânicas, especialmente na indústria aeronáutica, sendo de grande relevância na engenharia.

O material empregado consistia de placas laminadas com uma polegada (25,4 mm) de espessura da liga Al-7050, fornecidas na condição T73651 (isso é, solubilizadas e envelhecidas artificialmente, com alívio de tensões por estiramento). Sua composição química, avaliada em espectrômetro de emissão óptica ARL-3560AES do Laboratório Metalúrgico da ALCAN Alumínio do Brasil S.A., é apresentada na tabela 4.1 (ASM, 1979).

Os corpos de prova empregados em todos os ensaios foram cortados de uma mesma placa, e usinados segundo a orientação T-L para a direção do plano da trinca, conforme a norma ASTM E-399-83 (ASTM, 1995), como mostra a figura 4.2.

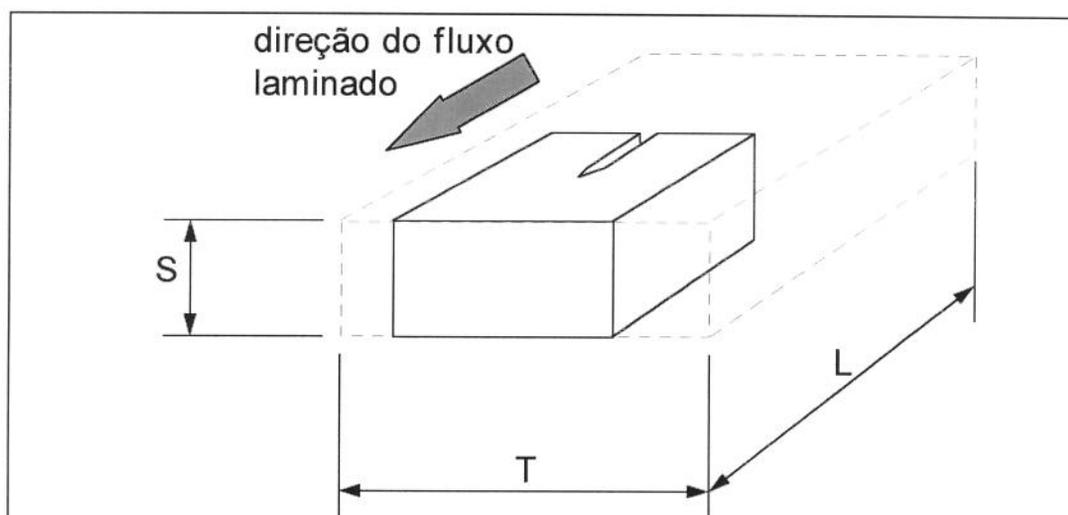


Figura 4.2 Sentido do corte dos corpos de prova a partir da chapa laminada (orientação T-L)

Tabela 4.1 Limites de Composição Química da Liga Al 7050 (AMS 4050; UNS A97050)

Teor (% d)	Zn	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zr	Ti	outros
<i>Previsto</i>	5,7-	2,0-2,6	1,9-2,6	0,10	0,12	0,15	0,04	0,08-	0,06	0,15
	6,7			(máx)	(máx)	(máx)	(máx)	0,15	(máx)	(máx)
<i>Avaliado</i>	5,9	2,2	2,3	0,07	0,08	0,10	0,04	0,14	0,03	0,11

4.3 Ensaios Mecânicos para Determinação de CTOD

Os ensaios mecânicos tiveram dois objetivos: avaliar as condições de tenacidade à fratura do material e obter as superfícies de fratura para investigação da forma da zona de estiramento. Essa segunda meta implicou na restrição de algumas das variáveis dos procedimentos de ensaio, como o emprego de uma razão de carga obrigatoriamente positiva na geração de pré-trincas, para evitar amassamentos e favorecer a visualização de estrias de fadiga.

Os ensaios para determinação do deslocamento crítico da abertura da ponta da trinca foram realizados conforme a norma ASTM E 1290-93 (ASTM, 1995a), utilizando corpos de

prova usinados conforme mostra a figura 4.3. Todos os ensaios para avaliação da tenacidade à fratura foram efetuados na máquina universal servo-hidráulica MTS 810.

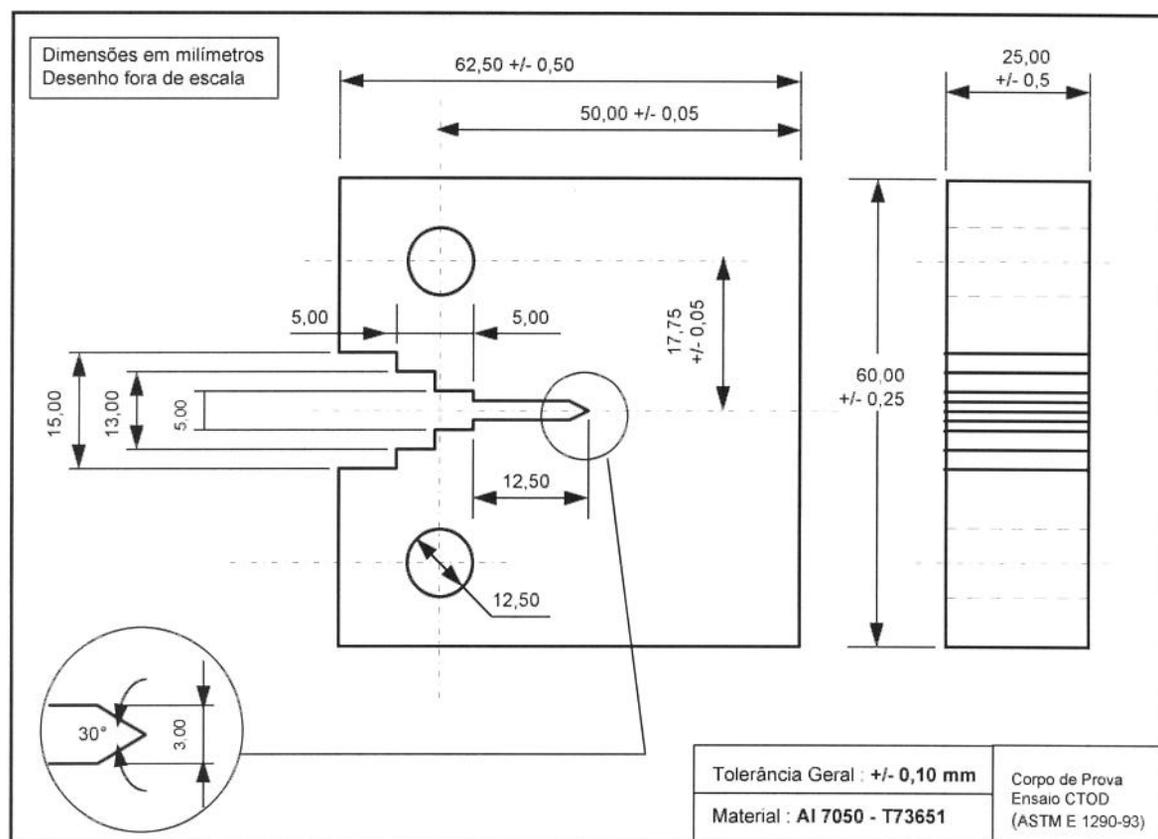


Figura 4.3 Dimensões dos corpos de prova para determinação de CTOD.

As condições para a abertura da pré-trinca por fadiga foram:

- Razão de carga positiva e igual à 0,1
- Frequência de 19 Hz para a oscilação senoidal da carga
- Carga máxima para extensão da pré-trinca de 1.400 kgf (13.734 N), para carga máxima permissível calculada (P_f) de 1.922,5 kgf (18.860,3 N)
- Tamanho da pré-trinca entre 0,45W e 0,55W, medido externamente (W = 50,0 mm)
- Taxa de deslocamento do pistão de 0,30 mm/s

Após o rompimento das amostras, as superfícies de fratura foram protegidas com verniz, para sua posterior observação no microscópio eletrônico de varredura JEOL JXA-840A.

Os valores de comprimento de trinca (a_0) foram medidos sobre a superfície de fratura em nove posições (conforme a ASTM E1290-93), sendo utilizado um projetor óptico de perfis da marca Carl Zeiss-Jena, com ampliação de 50X.

4.4 Observação em microscópio eletrônico de varredura

Como foi apresentado no primeiro capítulo, o uso do microscópio eletrônico de varredura é bastante adequado ao estudo da zona de estiramento. As principais vantagens que apresenta sobre outros meios de observação são a grande profundidade de foco para grandes ampliações, necessárias para a visualização dos limites da região, bem como a dispensa do uso de réplicas, permitindo observar diretamente a superfície fraturada. Entretanto, diversos aspectos devem ser analisados para seu emprego, como será discutido nos próximos itens deste tópico.

4.4.1 Escolha do detector de elétrons

Num microscópio eletrônico de varredura, a composição de imagens fractográficas é feita tipicamente pelo uso de um detector de elétrons secundários (ES) ou de elétrons retroespalhados (ER). A escolha do instrumento utilizado foi definida em termos de dois parâmetros: resolução espacial e contraste.

O primeiro é intrinsecamente limitado pelo volume de excitação (ou profundidade de escape) e pelo espalhamento do feixe eletrônico. A profundidade de escape dos elétrons secundários é significativamente inferior à observada, em média, para os elétrons retroespalhados, resultando em uma melhor resolução espacial, uma vez que reproduz uma superfície com maior fidelidade.

Pelo mesmo motivo, o contraste topográfico é favorecido com o uso do detector de ES. Devido ao maior volume de excitação, os sinais de ER são mais fortemente influenciados pela composição química local que os de ES, deturpando a intensidade de brilho e distorcendo as informações sobre o relevo. Com esses mesmos argumentos, BROOKS e MCGILL (1994) recomendam, enfaticamente, o uso dos sinais de elétrons secundários na observação fractográfica, que parece ser a opção mais adequada também para este estudo.

4.4.2 Definição do nível de ampliação

Como o objetivo deste trabalho é o de determinar o tamanho e a forma da zona de estiramento, entende-se que uma maior precisão nessas avaliações será atingida para as maiores ampliações de imagem que possam ser obtidas sem sinais de perda de foco ou distorções, desde que contendo os limites da zona de estiramento (definidos pela última estria de fadiga e a primeira linha de *dimples*).

EL-SOUDANI (1985) recomenda o emprego de ampliações superiores a 500 vezes para evitar distorções originadas pela diferença de abertura do feixe entre as imagens do par estéreo (projeções gnômônicas). As figuras 4.4 *a* e *b*, de caráter meramente ilustrativo, que mostram um par estéreo da coroa de uma moeda de um centavo de Real, onde esse efeito é bastante evidente. Esse tipo de distorção, bastante sensível em baixas ampliações, prejudica o alinhamento das imagens e é uma fonte certa de erros na reconstrução tridimensional. Assim, embora ampliações da ordem de 500 X permitam a observação dos limites da zona de estiramento, é recomendável empregar aumentos ainda maiores, visando minimizar essas distorções.

Assim, foi empregado um nível de aumento de 1.320 X para a observação da zona de estiramento, por combinar ótimas condições de visualização, minimização dos principais efeitos de distorção e erro aceitável de ampliação (conforme descreve MAUNE, 1976).

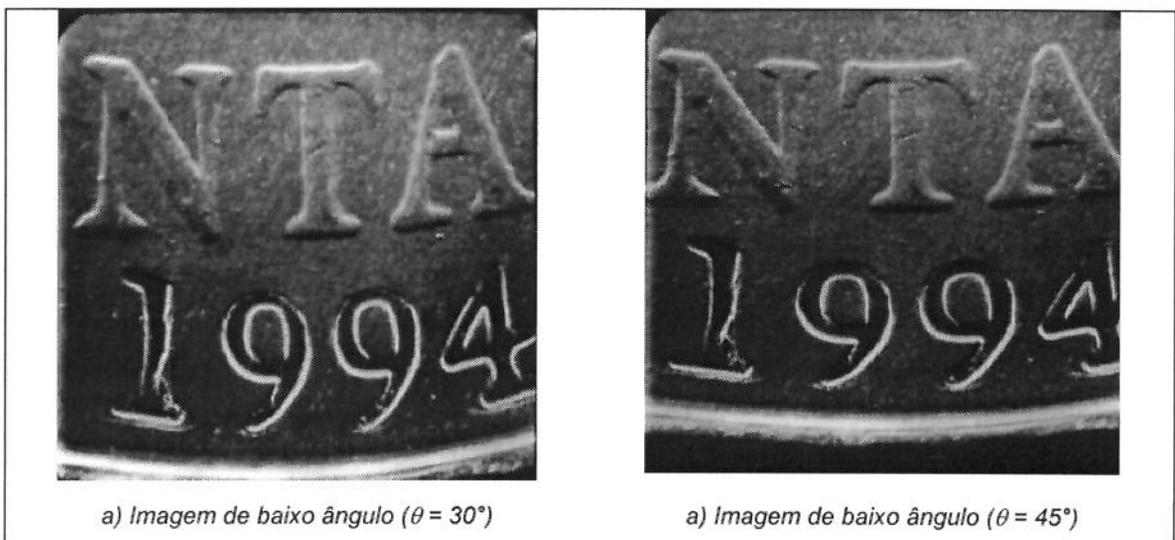


Figura 4.4 Distorção entre as imagens de par estéreo de uma moeda de um centavo de Real. Observe que letras e números na imagem a 45° são menos alongados na vertical e mais largos na horizontal que a imagem tomada a 30°. (MEV, elétrons secundários, dist. de trabalho de 11 mm, inclinações de 30° em *a* e 45° em *b*)

4.4.3 Método para medição de paralaxe: discussão e seleção

Na realização de um par estéreo, de forma geral, convencionou-se denominar a imagem de baixo ângulo (sempre medido em relação ao plano da mesa do porta amostra, que deve ser paralelo ao plano médio da fratura) como *imagem à esquerda* ou *projeção esquerda*, uma vez que deve ser posicionada à esquerda do observador para a fusão visual das imagens (formando uma ilusão tridimensional em seu cérebro). Já a imagem de inclinação mais positiva é denominada *imagem à direita* ou *projeção direita*.

Para ampliações acima de 500X, pode ser considerado que o feixe eletrônico tem seus raios projetados paralelamente contra a superfície observada. Assim, para essas condições, duas configurações podem ser imaginadas para a composição do par estéreo.

A primeira consiste em impor inclinações crescentes num mesmo sentido (positivas, em geral) à amostra, em relação ao plano da mesa do porta-amostra, para a obtenção das imagens, como mostra a figura 4.5a. Nessa configuração, a projeção central resultante, que é a média entre as projeções esquerda e direita, será descrita em torno de um plano médio com inclinação diferente de 0°. Para o esquema da figura 4.5a, as elevações na projeção central seriam, então, dadas por:

$$z_{central} = \frac{1}{M} \left(\frac{x_{esq} - x_{dir}}{2 \operatorname{sen}(\Delta\theta/2)} \right) \quad (4.1)$$

Onde, $(x_{esq} - x_{dir})$ é a medida do paralaxe, P , e M é a ampliação. Entretanto, a superfície formada com os valores de elevação obtidos pela equação (4.1) terá uma inclinação em relação ao plano xy, igual à do plano médio da projeção central. Uma forma de se corrigir essa superfície, como propõem HOWELL e BOYDE (1972), seria calcular as elevações para a projeção de baixo ângulo. Desse modo, no caso da figura 4.5a, onde a inclinação da imagem à esquerda é nula, tem-se:

$$z_{esq} = \frac{1}{M} \left(\frac{x_{esq} \cos \Delta\theta - x_{dir}}{\operatorname{sen} \Delta\theta} \right) \quad (4.2)$$

Sendo que o termo $(x_{esq} \cos \Delta\theta - x_{dir})$ representa o paralaxe, considerando a correção da distorção da imagem esquerda em relação à direita. Outra alternativa seria corrigir a imagem à direita, da forma:

$$z_{esq} = \frac{1}{M} \left(\frac{x_{esq} - x_{dir} / \cos \Delta\theta}{\tan \Delta\theta} \right) \quad (4.3)$$

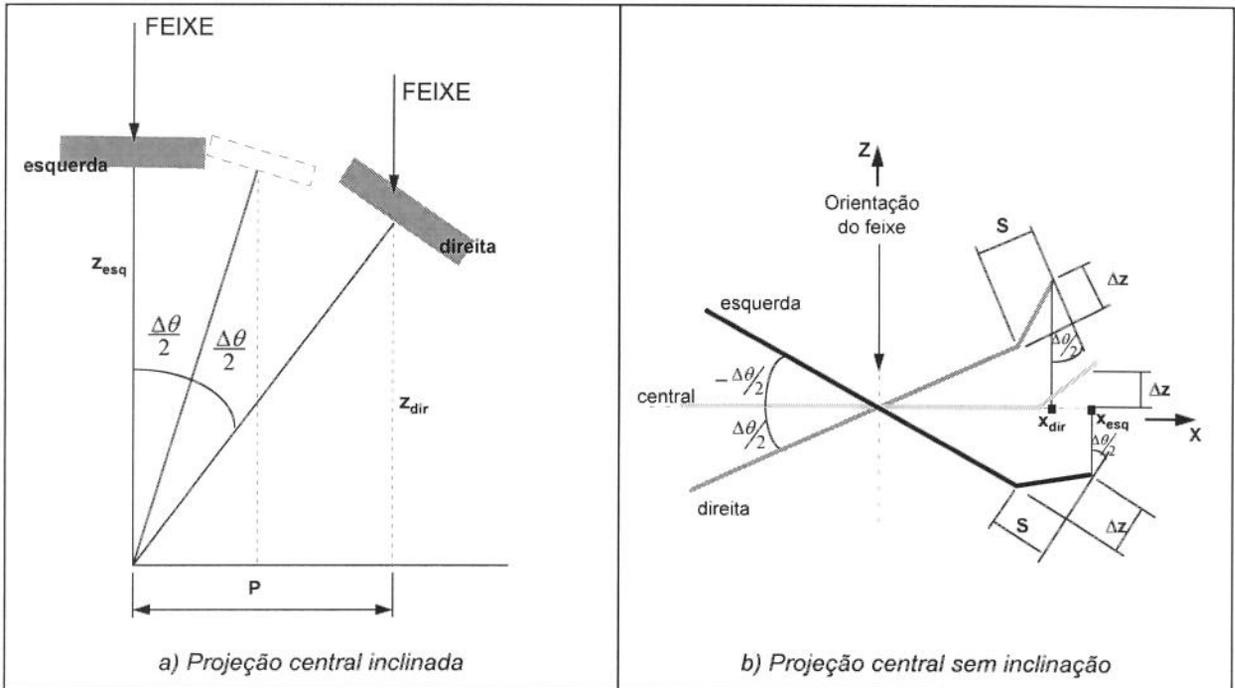


Figura 4.5 Formas de observação estereoscópica com projeções paralelas

Essas correções implicam na necessidade de reduzir ou ampliar uma das imagens, o que, para uma imagem digitalizada, representa adicionar ou eliminar pontos, produzindo uma distorção.

A alternativa mais simples, permitida pelo posicionamento favorável do detector de elétrons secundários do JEOL JXA-840A, é mostrada na figura 4.5b e consiste em impor inclinações de mesmo ângulo e sentidos opostos para a obtenção das projeções. Dessa forma, a projeção central teria seu plano médio disposto paralelamente à mesa do porta-amostra, permitindo-se o emprego da equação (4.1), uma vez que (BROEK, 1974):

$$\frac{x_{esq} - x_{dir}}{M} = P = z_{central} \sin(\Delta\theta/2) + S \cos(\Delta\theta/2) - [S \cos(\Delta\theta/2) - z_{central} \sin(\Delta\theta/2)] \quad (4.4)$$

Resultando em:

$$z_{central} = \frac{1}{M} \left[\frac{x_{esq} - x_{dir}}{2 \operatorname{sen}(\Delta\theta/2)} \right] \quad (4.5)$$

que é idêntica à equação (4.1).

Essa solução, de empregar inclinações de mesmo valor e sentidos opostos na obtenção do par estéreo, é a mais viável e simples para o cálculo das elevações, embora implique, necessariamente, numa diferença no sentido da distorção geométrica entre as imagens do par, devida ao emprego de ângulos próximos a 0° , demonstrada por ONAKA (1995). Essa diferença representa uma maior dificuldade para o alinhamento posterior das imagens, que será discutido no próximo capítulo.

4.4.4 Técnica de obtenção de pares estereoscópicos

A metodologia usada para a obtenção de pares estereoscópicos abrange seis passos (LYMAN *et al.*, 1990):

1. *Definição do eixo de inclinação do porta-amostra* - localização do eixo de rotação/inclinação do porta-amostra, em relação ao detector de elétrons escolhido, de forma que: *a)* sua orientação fique paralela à horizontal da imagem na tela; *b)* a parte superior da imagem tenha maior iluminação; *c)* um aumento no ângulo de inclinação corresponda a um movimento da amostra em direção ao detector de elétrons escolhido.
2. *Centralização do ponto eucêntrico* - ajuste do posicionamento da mesa do porta-amostra para localizar o ponto eucêntrico no centro da imagem, coincidentemente ao eixo óptico do MEV. O eixo óptico pôde ser encontrado centralizando-se todos os controles de ajuste de posicionamento e ampliando-se progressivamente a imagem até o limite, onde a varredura está concentrada sobre o eixo óptico.
3. *Obtenção da imagem a esquerda* - consiste em fotografar/adquirir uma imagem da região de interesse com aumento apropriado e anotar a inclinação do porta-amostra. Gravada a imagem, eram anotados alguns de seus detalhes mais evidentes (pontos

de referência) com uma caneta de ponta porosa diretamente sobre a tela do MEV, para facilitar o alinhamento da próxima imagem, com outro ângulo de inclinação. (Neste trabalho, foram sempre escolhidos detalhes localizados em torno do eixo de inclinação do porta-amostra, visando minimizar efeitos de distorção esférica.)

4. *Inclinação do porta-amostra* - inclinar a amostra em relação ao detector de elétrons por um ângulo conhecido, entre 4° e 10° conforme recomendam LYMAN *et al* (1990) e BROOKS e CHOUDHURY (1993) . A definição desse ângulo foi feita com base em testes preliminares, descritos a seguir.
5. *Restauração do foco e a centralização (alinhamento)* - a segunda imagem foi sempre obtida nas mesmas condições da primeira e, por isso, o novo foco foi ajustado usando-se apenas o controle de ajuste do eixo vertical (z). Não se deve ajustar o controle das lentes objetivas porque isso provoca uma alteração na distância de trabalho, modificando o nível de ampliação e impondo uma rotação na imagem (BOYDE, 1979). Já a centralização foi sempre feita de forma que os pontos de referência ficassem alinhados às marcas feitas no vídeo, ajustando-se os controles de posicionamento em x e y.
6. *Obtenção da imagem a direita* - gravar a imagem de alto ângulo nas mesmas condições empregadas anteriormente.

Adicionalmente, para cada sessão de microscopia eletrônica foram observados os seguintes parâmetros:

- Distância de trabalho, em [mm]
- Tensão de aceleração do feixe, em [kV]
- Ângulos de inclinação, em [graus]
- Ampliação
- Detector de elétrons empregado

4.4.5 Definição dos ângulos de observação

EL-SOUDANI (1985) recomenda inclinações de, no máximo, 45° para os ângulos de observação das imagens do par estéreo, com até 8° de diferença entre as projeções, visando evitar distorções. Entretanto, como ficou definido que as imagens seriam formadas com o

detector de elétrons secundários, a escala de contraste para esse tipo de detector tem um comportamento mais próximo do linear para inclinações menores que 20° , como é o caso deste estudo, onde foi decidido usar um ângulo médio de inclinação de 0° que, além de trazer a vantagem dessa linearidade, implica em mínimas distorções de projeção (GOLDSTEIN *et al.*, 1992).

Os ângulos ótimos de inclinação do porta-amostra foram definidos buscando-se minimizar o efeito de saturação do feixe eletrônico nas regiões de maior elevação, como ilustrado na figura 4.6. A saturação do feixe eletrônico configura uma restrição considerável nessa aplicação. Como a virtude mais desejável para as imagens é um alto contraste, buscou-se impor a maior variação de sinal possível. Mas essa condição implica na saturação e inevitavelmente, em níveis mais elevados de ruído (ZE-JUN e SHIMIZU, 1989). Há, entretanto, um ponto ótimo nessa relação já que, por outro lado, níveis muito baixos de ruído em sinais gerados por elétrons secundários podem ocultar distorções mais pronunciadas na imagem (DAMM e WILHELMI, 1992).



Figura 4.6 Saturação do feixe eletrônico em amostras com variação de relevo. (MEV, elétrons secundários, 22X, 20 kV, distância de trabalho de 11 mm, inclinação de 30°)

Buscou-se posicionar as amostras no porta-amostra de modo que a zona de estiramento ficasse alinhada ao eixo de inclinação, no centro da tela, tendo a região de propagação estável na parte superior da imagem e a região de *dimples* na parte inferior do vídeo do MEV. Essa

orientação visou minimizar os efeitos de distorção sobre a largura da zona de estiramento e eliminar a possibilidade de sombreamento sobre essa região.

Contudo, esse posicionamento implica numa variação relativamente acentuada do relevo ao longo do eixo vertical da imagem gerada, o que favorece o efeito de saturação do feixe, uma vez que a distância de trabalho deve ser mantida. Portanto, os ângulos de inclinação da amostra foram selecionados de forma a se evitar esse efeito no interior da zona de estiramento e na sua periferia.

Conforme citado no item 4.4.4, recomenda-se empregar diferenças da ordem de 4° a 10° entre as inclinações das imagens do par estéreo. Para a seleção desse parâmetro, contudo, devem ser observadas algumas restrições, como (BOYDE, 1973):

- efeitos de distorção
- saturação do feixe eletrônico
- diferenças produzidas por folgas no mecanismo do estágio eucêntrico
- sombreamento
- ocultação de detalhes por efeito de paralaxe

Para a verificação da distorção produzida em função da inclinação, foram realizadas fotomicrografias da superfície fraturada de uma amostra da liga Al 7050 T73651* , retirada de um corpo de prova compacto rompido em ensaio para determinação de K_{Ic} , com inclinações de 0° (condição de referência, figura 2.1.2), e entre 3° e 10° . As figuras 4.7 a e b apresentam essas fotomicrografias.

Como é bastante difícil identificar visualmente as distorções entre as imagens obtidas, foi adotado o seguinte procedimento de análise:

1. As imagens foram digitalizadas nas mesmas condições de orientação (90° em sentido anti-horário) e resolução (150 ppp com 256 níveis de cinza), utilizando o *scanner* HP ScanJet IIP com *software* HP Deskscan 2.0 do Laboratório de Análise de Imagem do DEMA/FEM. Em seguida, foi realizada uma padronização em seu

* Cedido gentilmente pelo Prof. Celso R. Sokei, da FEIS-UNESP, doutorando pelo DEMA-FEM-UNICAMP sob orientação do Prof. Dr. Itamar Ferreira.

- tamanho em 512 por 512 *pixels*[†], através do sistema KHOROS 1.0 pl 5 (DONOHOE, 1992), em estação SUN Sparc 20.
2. Foi feito o alinhamento das imagens com 3° a 10° de inclinação tomando-se como referência a imagem com $\theta = 0^\circ$, empregando-se as funções de translação e rotação, quando necessárias, do sistema KHOROS 1.0 pl 5, em estação SUN Sparc 20. Essas operações foram feitas tomando-se, como referência, dois detalhes evidentes das imagens.
 3. Empregando-se novamente o sistema KHOROS foram eliminados *pixels* externos a uma área central de 256 por 256 *pixels*, em cada imagem.
 4. Em seguida, foi extraída uma linha, orientada horizontalmente, disposta no centro vertical da imagem de referência. O mesmo foi feito nas demais imagens.
 5. Essas linhas permitiram construir diagramas de intensidades de cinza, indicativas das variações de relevo, por posição ao longo da linha. Esses diagramas estão apresentados nas figuras 4.8 a e b.

Os perfis obtidos permitiram observar que:

- não há ocultação de detalhes ou sinais de saturação para inclinações de 3° e 4°, sendo esses perfis bastante semelhantes ao obtido para 0°, não apresentando variações significativas nas elevações;
- os perfis obtidos para 5° e 6° apresentam indícios de saturação e as reproduções do relevo não são tão fiéis ao perfil de 0° como nos casos anteriores;
- os perfis obtidos para 7° e 8° são bastante interessantes para a composição do par estéreo porque não apresentam indícios de saturação, apresentam semelhança no posicionamento de detalhes do relevo e denotam variações representativas nas elevações em relação ao perfil de referência, mas o perfil de 7° aparenta sofrer efeito de sombreamento ou distorção;
- o perfil de 9° é interessante para a composição do par estéreo, embora apresente pequeno indício de saturação;
- o perfil de 10° apresenta fortes indícios de saturação.

[†]*Pixel* é uma palavra derivada da expressão *picture element*, e significa, assim, *ponto ou elemento da imagem*. Um *pixel* é descrito por suas coordenadas espaciais (em termos de sua posição na matriz imagem) e sua intensidade, que é uma medida da energia luminosa da região que representa no objeto observado. Técnicos da IBM utilizam a expressão *pel*, de origem semelhante.

Finalizando, cabe lembrar que, embora esses testes tenham sido realizados com o equipamento Cambridge S4-10, sua validade para o uso do JEOL JXA-840A (onde as imagens finais foram obtidas) se mantém, uma vez que os mecanismos de movimentação da mesa do porta-amostras são semelhantes e o JEOL JXA-840A apresenta recursos ainda mais precisos de ajuste do sistema óptico, reduzindo-se ainda mais os efeitos de distorções e saturação que as imagens feitas no S4-10 denunciavam.

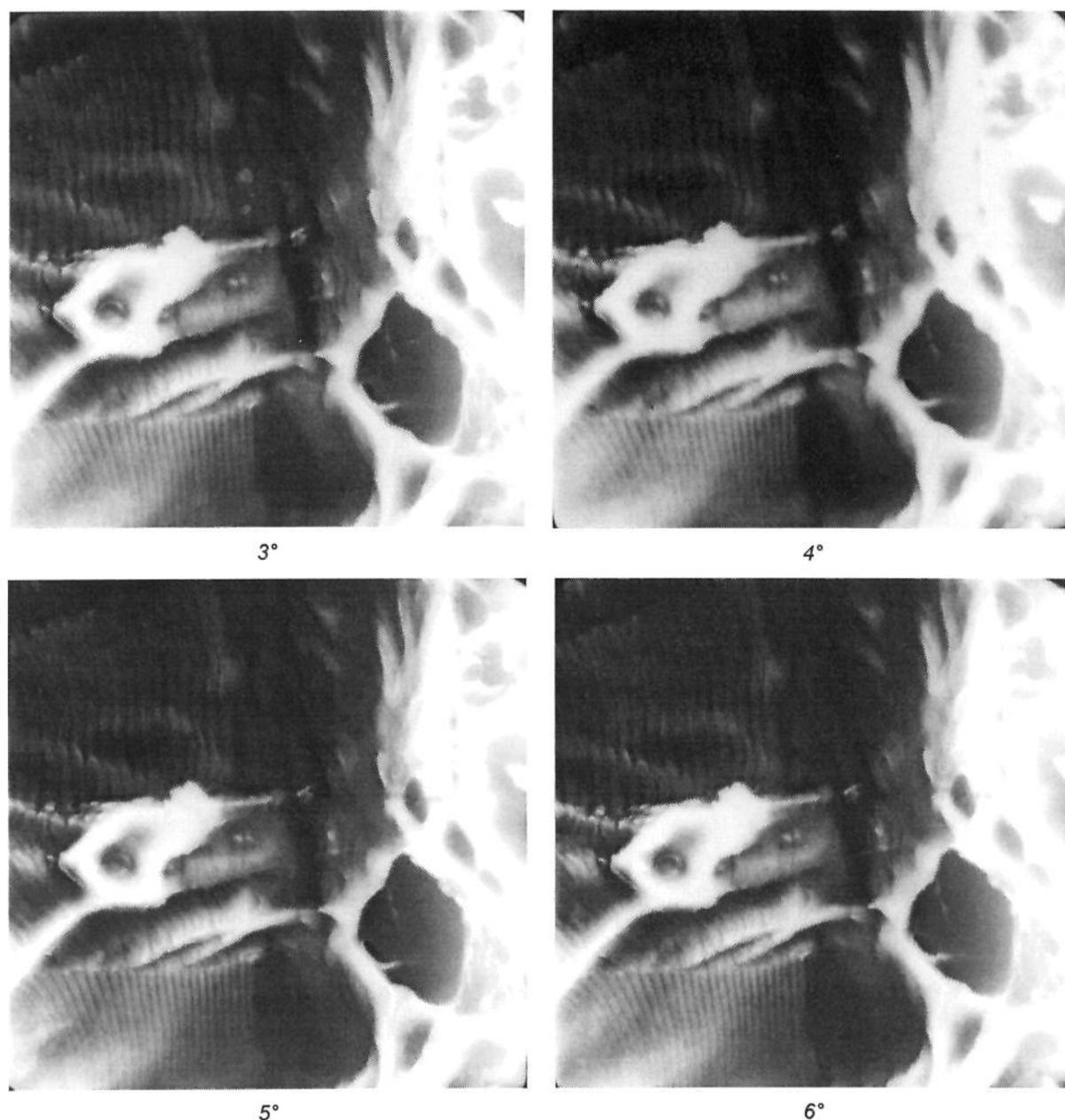


Figura 4.7 a Imagens da zona de estiramento, em liga de Alumínio Al 7050-T73651, obtidas em MEV Cambridge S4-10. Inclinação de 3 a 6°. (MEV, elétrons secundários, 20 kV, distância de trabalho de 7,5 mm)

10μm

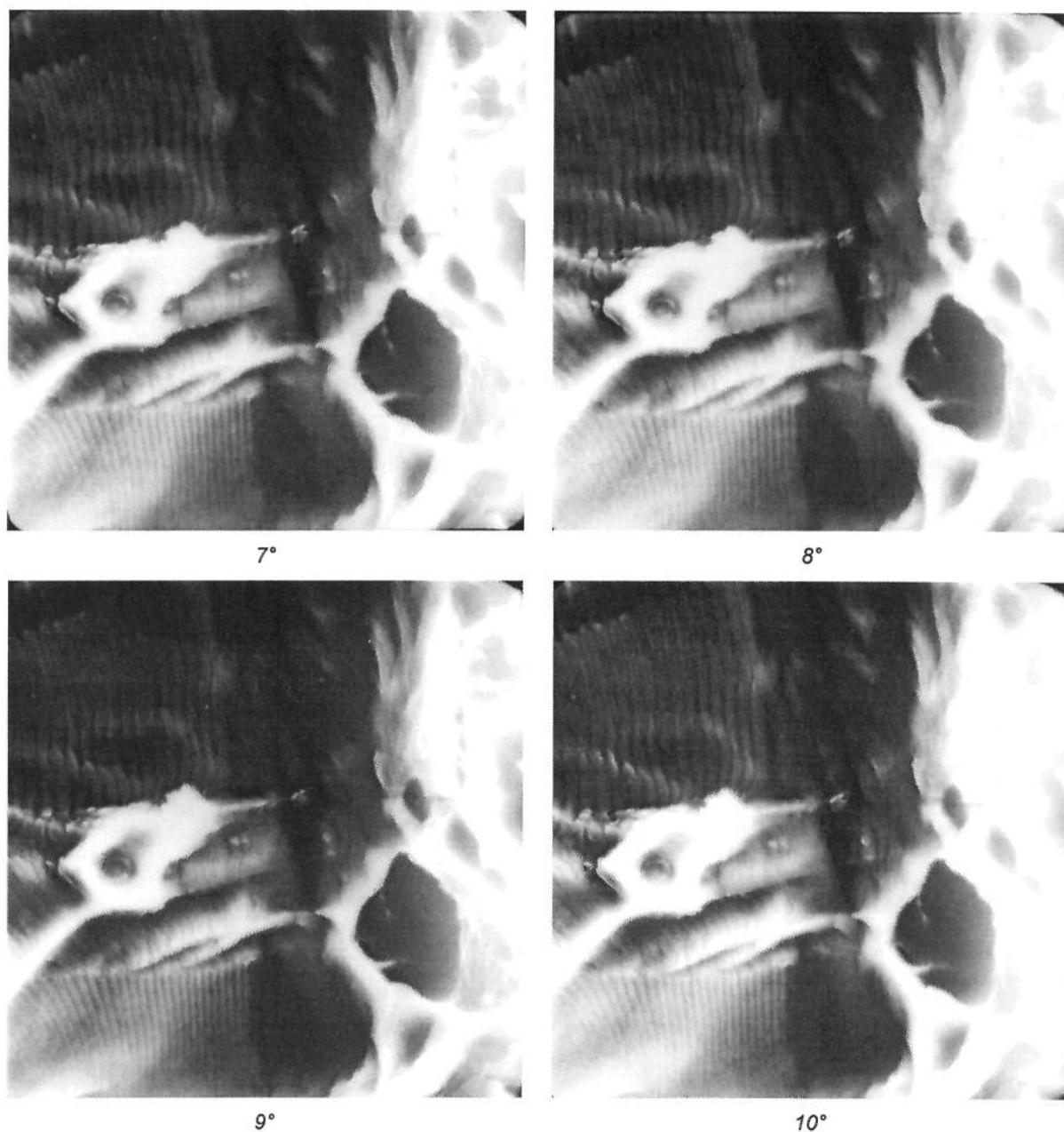


Figura 4.7 b Imagens da zona de estiramento, em liga de Alumínio Al 7050-T73651, obtidas em MEV Cambridge S4-10. Inclinação de 7 a 10°. (MEV, elétrons secundários, 20 kV, distância de trabalho de 7,5 mm)

10 μ m

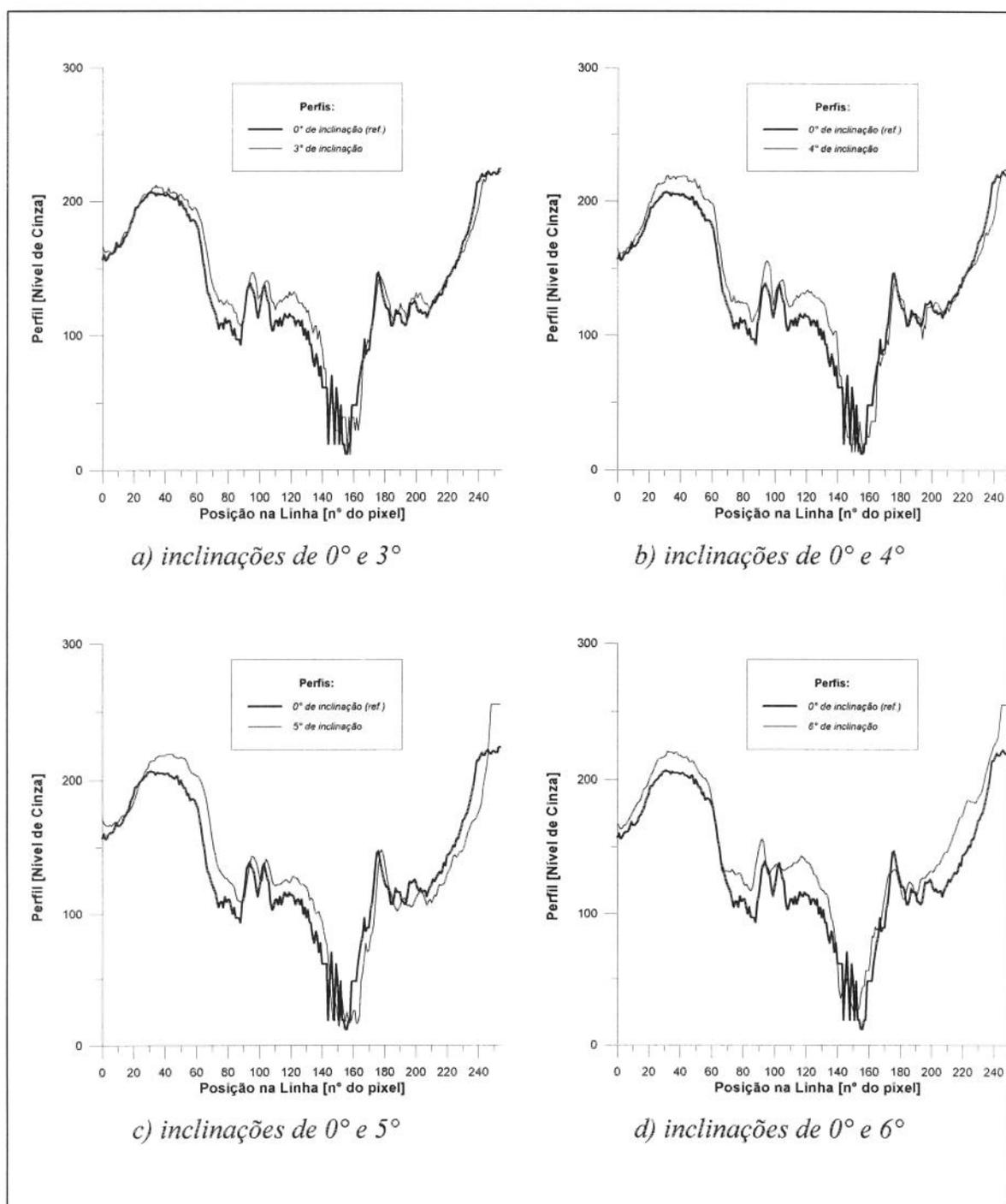


Figura 4.8 a Perfis de variação de relevo entre imagens obtidas com diferentes amplitudes de inclinação do porta-amostra. Perfis tomados horizontalmente, extraídos da linha central das imagens.

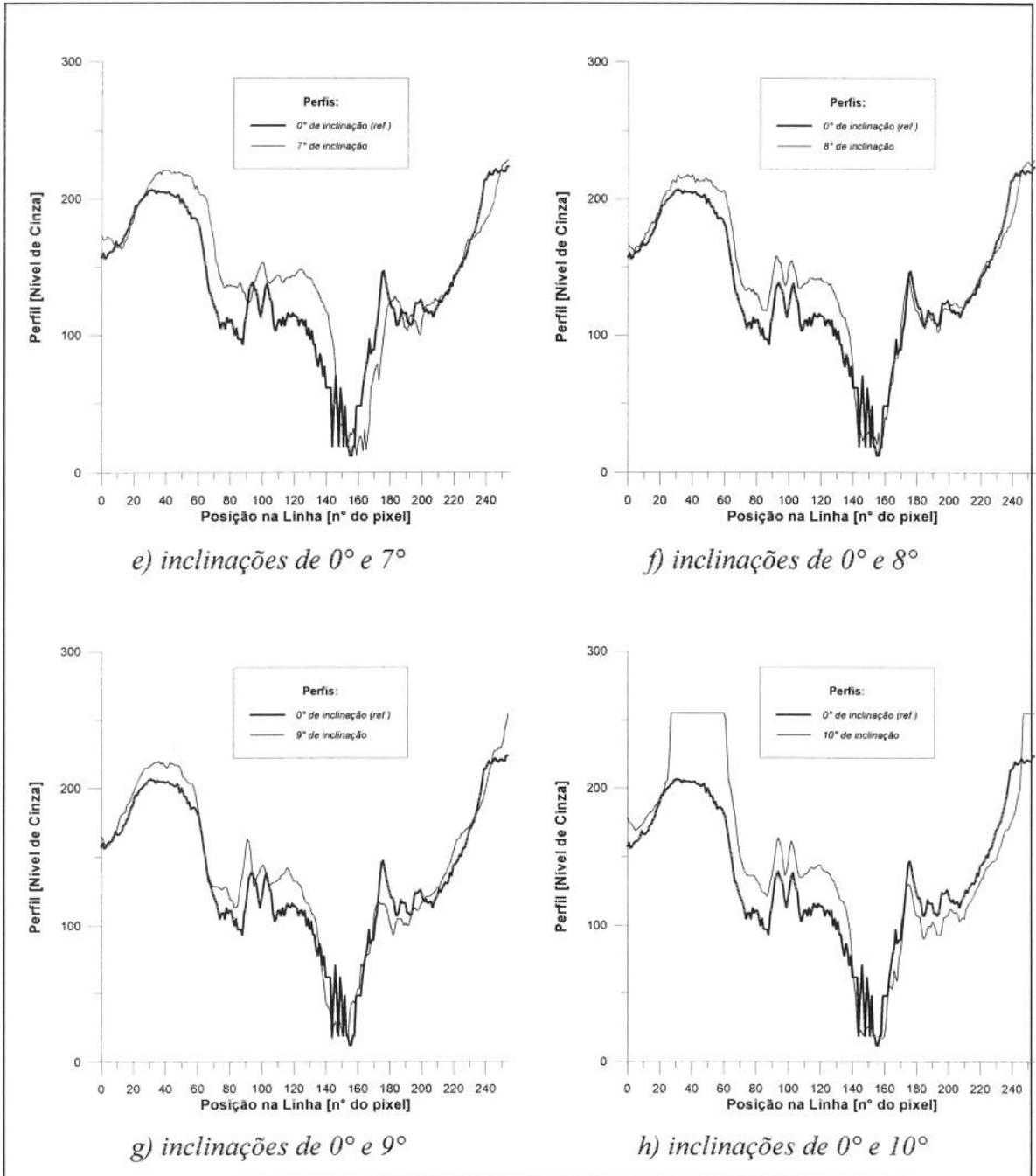


Figura 4.8 b Perfis de variação de relevo entre imagens obtidas com diferentes amplitudes de inclinação do porta-amostra. Perfis horizontais extraídos da linha central das imagens.

Esses resultados permitiram, então, selecionar os valores de $+4^\circ$ para o ângulo da imagem à direita e -4° para a projeção esquerda, resultando em 8° para a variação angular total ($\Delta\theta$), uma vez que essa combinação parece ser a menos afetada pelos efeitos de saturação (devido às inclinações a 4°), sombreamento e distorção (com a abertura de 8°). De qualquer forma, essa solução coincide, em parte, com o procedimento sugerido por EL-SOUDANI (1985).

4.5 Investigação da zona de estiramento

Apenas uma das duas superfícies de fratura de cada uma das amostras rompidas nos ensaios CTOD foi observada no MEV JEOL JXA-840A. Os pares estereoscópicos foram tomados em nove regiões igualmente espaçadas ao longo da largura das amostras, tendo como referência o anel micrométrico do fuso de movimentação em Y da base do porta-amostra, de acordo com o procedimento proposto pelo método EGF P1-87D (SCHWALBE *et al.*, 1993), como descreve a figura 4.9.

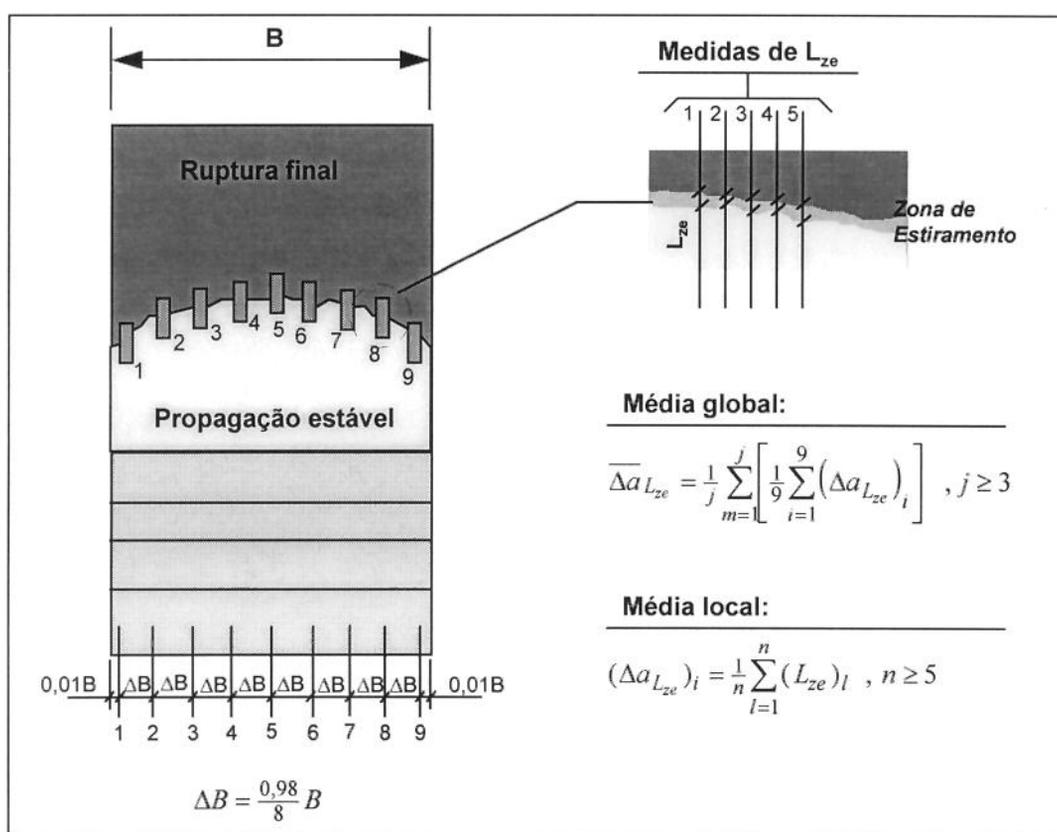


Figura 4.9 Procedimento proposto pelo método EGF P1-87D, para medição da L_{ze} . Adaptada de SCHWALBE *et al.*, 1993. Observe que n é o número de medições por posição e j é o número de amostras avaliadas.

Conforme foi descrito no item anterior, as inclinações utilizadas foram de -4° para a imagem à esquerda e $+4^\circ$ para a imagem à direita. Buscou-se posicionar, quando possível, a zona de estiramento na região central da tela, considerando sempre seus limites entre a última estria de fadiga visível e a primeira formação de alvéolos da ruptura final. O posicionamento da superfície observada foi controlado através dos anéis micrométricos dos eixos do porta-amostra.

4.6 Revelação Fotográfica

A solução ideal para este trabalho, que envolve o uso de técnicas de processamento digital, seria a aquisição das imagens diretamente do MEV. Embora o JEOL JXA-840A disponha do recurso de digitalização, a gravação das imagens é feita num formato próprio de arquivo, incompatível com sistemas operacionais como UNIX, MS-DOS, OS/2, MacOS, etc, o que levou à necessidade de se transferir os pares estereoscópicos para filmes fotográficos, e então para o papel, e finalmente, para a forma digital através de um *scanner*.

É evidente que esse procedimento acrescenta fontes de erros aos resultados finais, relativos a distorções geométricas e de contraste (HOWELL, 1975). O processo de revelação fotográfica exigiu, dessa forma, uma série de cuidados para minimizar esses erros. A técnica desenvolvida consistiu dos seguintes passos:

- As imagens foram registradas em filmes negativos de 120 mm, ISO 125 (Kodak VP120), observando-se ajustes constantes de brilho e contraste no MEV, definidos previamente em testes.
- Os negativos foram revelados sempre nas mesmas condições, também pré-definidas em testes das condições de revelação.
- A exposição em papel (Kodak Kodabrome F3) foi feita por contacto, visando evitar distorções geométricas devido ao uso do ampliador (HOWELL, 1975). Imagens de um mesmo par foram expostas conjuntamente, para minimizar efeitos de translação e rotação. Para isso, foi construído um dispositivo simples, com um vidro plano e uma mesa, possibilitando a exposição de até 4 pares ao mesmo tempo, permitindo um correto alinhamento dos negativos.

4.7 Digitalização

As imagens foram digitalizadas utilizando-se um *scanner* Hewlett-Packard HP Scanjet 3C com resolução espacial óptica de 200 pontos por polegada (ppp), resolução de profundidade de 256 níveis de cinza e escala linear de contraste, resultando assim em imagens com dimensões de 514 *pixels* de largura por 328 *pixels* de altura.

A resolução de 200 ppp foi considerada adequada para a representação das regiões de alto e baixo contraste das imagens, tendo em vista os resultados de testes e os princípios de funcionamento do programa de reconstrução tridimensional desenvolvido.

5. Resultados e Discussão:

Parte I - O Algoritmo Desenvolvido para Reconstrução 3-D

5.1 Sobre sua Concepção

Como foi visto no segundo capítulo, métodos estereoscópicos permitem avaliar diretamente as elevações de uma superfície irregular, como a de uma fratura, mas sua principal limitação está na identificação de regiões semelhantes entre as imagens de um par estéreo. Então, para garantir uma alta resolução na descrição, é necessário empregar uma técnica que permita reconhecer o maior número possível de áreas similares entre as duas projeções, para que seja realizada uma grande quantidade de medições de paralaxe, o que é inviável por meios manuais (AMMANN *et al*, 1995; AMMANN *et al*,1996). Outra vantagem clara nesse procedimento deve ser a garantia da automação do processo, visando minimizar erros de julgamento e de adoção de referenciais, comuns em métodos manuais.

Assim, o núcleo do algoritmo proposto consiste numa rotina para reconhecimento de áreas semelhantes de pares de imagens, com características de contraste bastante variadas, como as projeções da zona de estiramento, que apresentam regiões de alto contraste (como as formações de alvéolos) e de baixo contraste (como o próprio estiramento). Essa rotina fornece, então, os deslocamentos relativos em X de pequenas *janelas*, como serão denominadas as áreas de amostragem retiradas de uma imagem, tomadas de uma das projeções do par em relação à outra. Esses deslocamentos representam, na prática, as medidas de paralaxe (isso é, $x_{esq} - x_{dir}$), permitindo a construção, ponto por ponto, de um

mapa real de elevação. Assim, a partir da equação (4.1), obtém-se a matriz que representa o mapa de elevação, da forma $[z]_{i,j} = \frac{1}{M} \left[\frac{x_{esq} - x_{dir}}{2 \text{sen}(\Delta\theta/2)} \right]_{i,j}$, onde i e j são as coordenadas (linhas e colunas) de seus elementos.

5.2 O Ambiente de Projeto

Para o desenvolvimento do algoritmo foi utilizado o módulo *CANTATA* do programa *KHOROS* versão 1.0, revisão 5 (*KHOROS* 1.0.5), cuja estrutura é desenvolvida por pesquisadores da Universidade do Novo México (University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, EUA). Esse programa, como define DONOHOE (1992), consiste em *um ambiente aberto para processamento de informações, dados, visualização e desenvolvimento de 'software'* para o tratamento de imagens digitalizadas, escrito em códigos C e Fortran (ver figura 5.1). Sendo um ambiente aberto e de uso (não-comercial) irrestrito para instituições de pesquisa, é encorajada a participação de toda a comunidade científica na elaboração de novas rotinas, aplicação e otimização de sua estrutura, o que garante sua versatilidade.

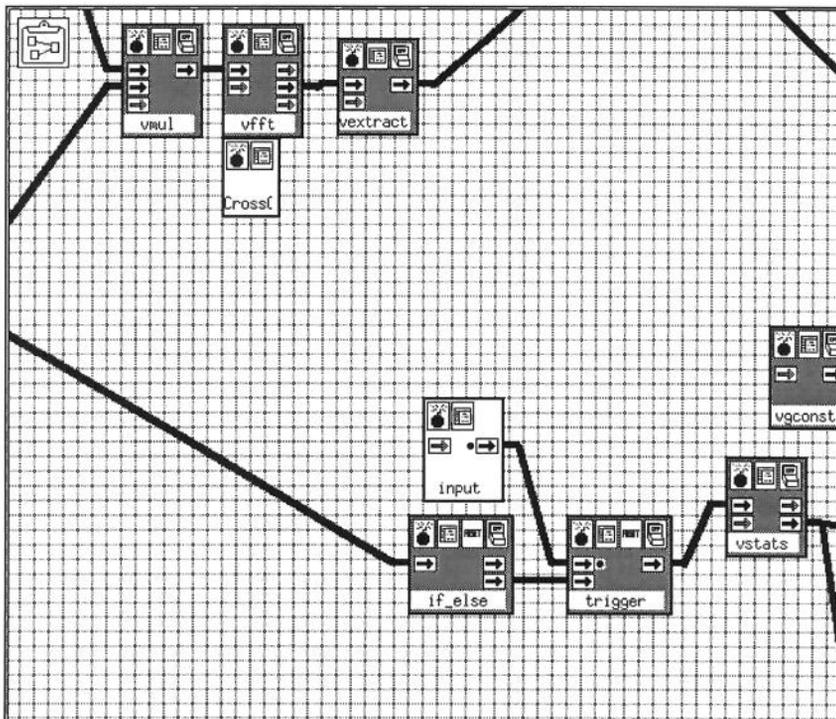


Figura 5.1 Tela do módulo *CANTATA* do software *KHOROS* 1.0.5, para programação visual.

O *KHOROS* foi desenvolvido para o sistema operacional UNIX, sendo que neste trabalho é utilizada, principalmente, uma versão compilada para o sistema SUN OS 4.1.3 no ambiente de visualização gráfica OpenWindows 3.0 GXTRA, em estação SUN Sparc 20 com 64 Mb de memória RAM. Como exemplo de sua concepção multi-plataforma, algumas ilustrações desse texto foram geradas em estações IBM RS6000/3AT (com 128 Mb de RAM) e IBM RS6000/43P (32 Mb de RAM) e sistema operacional AIX 4.1.4.

O módulo *CANTATA* consiste numa ferramenta de criação, através de uma linguagem visual de programação, baseada no conceito de *programação orientada por objetos*. Apresenta-se assim como uma espécie de *quadro-negro* onde centenas de rotinas básicas, reconhecidas por pequenos retângulos (*ícones*), podem ser dispostas ordenadamente em fluxogramas, compondo o programa.

Como é um ambiente de programação, essas rotinas podem ser executadas, individual ou seqüencialmente, com a ativação de teclas *liga-desliga* dispostas em ícones, que também apresentam *botões* para a seleção de parâmetros de funções (como tamanho de matrizes, coeficientes de expressões, valores de translação e rotação, cálculos de dados estatísticos, etc), para a eliminação da rotina selecionada e em alguns casos, reinicialização (ver SILVA, 1996). A figura 5.1 apresenta um exemplo de tela do *CANTATA*.

Essa concepção, apesar de diversas limitações, permite testar rapidamente alternativas de projeto, possibilitando otimizar algoritmos em um espaço de tempo relativamente curto.

5.3 Rotinas para Reconhecimento de Padrões

O problema da seleção da técnica de reconhecimento de padrões de imagem pode ser resolvido através das respostas para três questões básicas:

- A técnica escolhida é adequada às características das imagens?
- A técnica é suficientemente precisa, em qualquer caso, para a aplicação desejada?
- O método escolhido pode ser implementado computacionalmente?

A primeira pergunta requer, então, o conhecimento das características das imagens. As imagens digitalizadas são definidas por uma amostragem discreta com freqüência constante e, no caso deste trabalho, com intensidades de luminosidade medidas numa escala de cinza com 256 níveis (0-255). Apresentam, também neste caso, variações, praticamente aleatórias,

de contraste em toda a sua extensão e não têm padrões característicos de forma bem definidos.

Há duas classes básicas de problemas de reconhecimento de padrões. A primeira, onde a comparação é feita em relação a um padrão previamente conhecido (como no algoritmo de um leitor de código de barras, na interpretação de placas de veículos, etc), é dita reconhecimento *a priori*. Na segunda categoria, que abrange o caso deste estudo, não há um padrão de imagens já composto, configurando o denominado reconhecimento *a posteriori* pois os resultados serão indicados após medições tanto na imagem de referência como na imagem avaliada.

Conforme descreve SCHALKOFF (1992), existem três abordagens principais para o desenvolvimento de rotinas para reconhecimento de padrões que são:

- abordagem estatística;
- abordagem sintática;
- abordagem neural.

Na abordagem estatística, as condições de decisão estão vinculadas a relações de probabilidades, dadas por métodos paramétricos ou não-paramétricos, de tal forma que o reconhecimento se dá pela comparação, *a priori* ou *a posteriori*, entre as medições da distribuição de probabilidades feitas em ambas as imagens.

A abordagem sintática consiste em comparar as características de uma imagem com uma estrutura (ou *sintaxe*) pré-estabelecida, isto é, trata exclusivamente de situações de reconhecimento *a priori*.

No tratamento neural, há uma realimentação dos critérios de decisão durante o próprio processo de medição dos parâmetros (derivados das abordagens anteriores), que são adaptados às características das imagens. Pode, assim tratar de problemas adotando ou não uma estrutura de referência, sendo capaz de, até mesmo, desenvolver um padrão durante o processamento.

Esses conceitos ajudam a responder a segunda pergunta para o problema deste estudo: não há um padrão pré-definido de geometria, brilho e contraste, inviabilizando a abordagem sintática. Já a terceira questão determina a exclusão da abordagem neural, ao menos no presente, pois a implementação de um algoritmo baseado nesse conceito seria bastante complexa em relação aos objetivos do trabalho.

Dessa forma, decidiu-se optar por um algoritmo próximo dos conceitos relativos ao tratamento estatístico e que não requer a definição de elementos estruturantes e não implica

em iterações, que consiste no reconhecimento de regiões através da correlação cruzada (GONZALEZ e WOODS, 1992) que, embora não se configure propriamente como de fundamento estatístico, é um método *a posteriori*, baseado na comparação de parâmetros .

5.4 Alinhamento de Imagens

Para minimizar os possíveis efeitos de translação e rotação entre as imagens do par gerados durante a própria obtenção no microscópio, a revelação fotográfica e a digitalização, foi necessário realizar um alinhamento prévio entre as imagens, ilustrado na figura 5.2. Esse alinhamento foi realizado no ambiente *KHOROS*, mas os parâmetros de translação e rotação foram obtidos de forma interativa, através da leitura da posição e intensidade dos pontos das imagens por meio de um cursor controlado pelo *mouse*. Embora sua precisão possa ser questionada, o alinhamento manual de imagens propiciou, nesse caso e no trabalho de PRESTON *et al.* (1995), resultados mais consistentes que a implementação de técnicas baseadas na correlação cruzada, como a de SAXTON (1994), devido à presença de distorções geométricas (geradas pelo próprio paralaxe e outros efeitos).

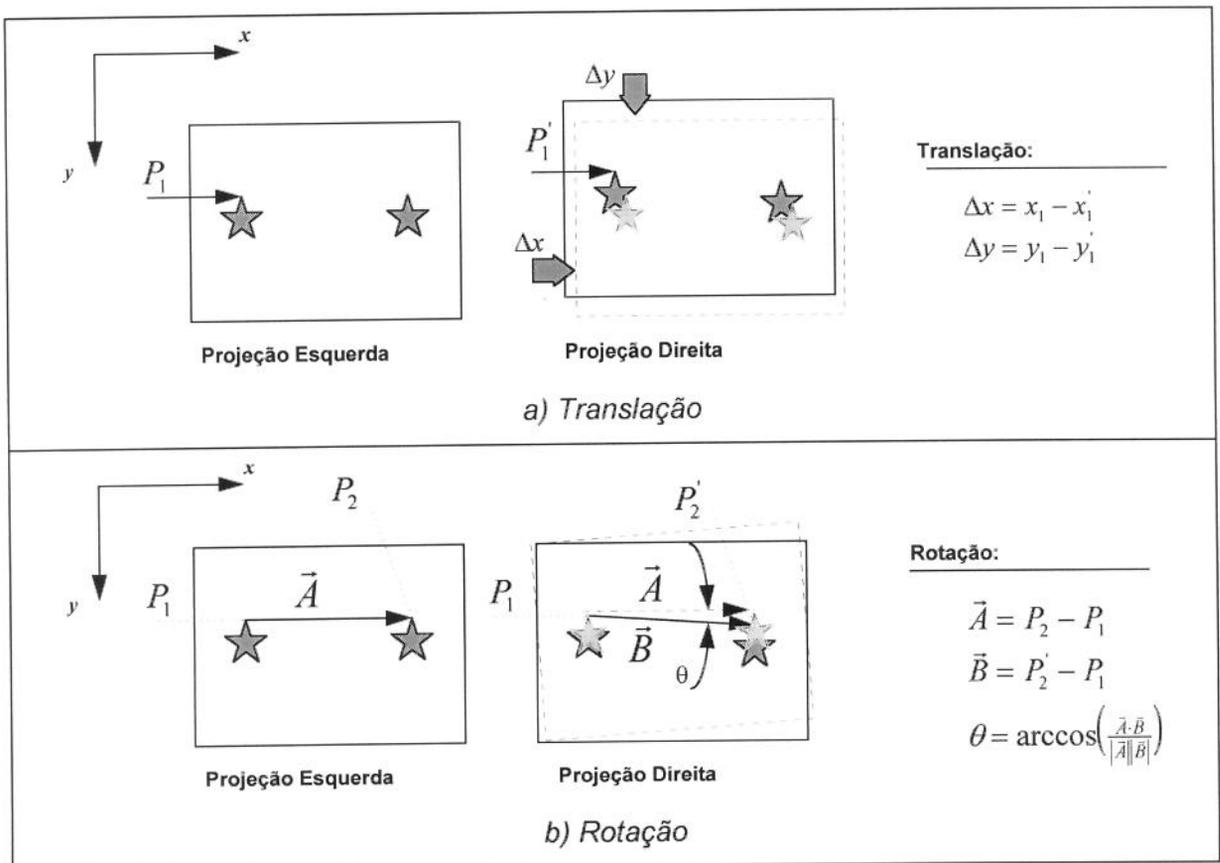


Figura 5.2 Descrição das operações de translação e rotação, para o pré-alinhamento das imagens.

Esse procedimento compreende dois passos (figura 5.2):

- *Translação* - tomando um detalhe comum às duas imagens, obtém-se um ponto de referência (P_1) para a correção da componente de translação, sobre a imagem da projeção esquerda. Em seguida, a imagem da projeção direita é corrigida por translação, tendo como parâmetros de deslocamento as diferenças, em x e y , entre as coordenadas do ponto de referência e o ponto correspondente na imagem direita.
- *Rotação* - tomando-se um segundo ponto de referência, P_2 , sobre a imagem da projeção esquerda, pode ser definido o vetor \vec{A} , como mostra a figura 5.2. Com as coordenadas do ponto similar P_2' , obtém-se o vetor \vec{B} . O ângulo de rotação (θ) pode, então, ser definido como o ângulo entre os vetores \vec{A} e \vec{B} (obtido da definição de produto escalar entre dois vetores), e o centro de rotação tem as coordenadas do ponto de referência P_1 .

5.5 Melhoria de imagens

Para o melhoramento do contraste, necessário apenas nos casos em que havia grande diferença de contraste entre as imagens do par, foi empregada uma função de *equalização de histograma* dos níveis de cinza. A *equalização de histograma* é uma operação pontual, ou seja, onde a alteração de cada *pixel* da imagem depende apenas de seu valor original (JAIN, 1989). Seu objetivo é obter uma densidade uniforme dos níveis de cinza da imagem melhorada, equalizando a distribuição de probabilidades de ocorrência de cada intensidade de luminosidade. Na prática, obtém-se um maior espalhamento dos picos do histograma da imagem melhorada em relação ao da original, como mostra a figura 5.3.

A vantagem de se trabalhar com uma operação pontual, nesse caso, está em preservar as informações sobre o contraste, uma vez que a distribuição de brilho permanece equivalente à original, mas com ampliação do contraste. O resultado da aplicação dessa função foi, como mostra o exemplo da figura 5.4, uma maior semelhança entre os padrões de contraste das projeções esquerda e direita de um mesmo par estéreo, aumentando a eficiência da rotina de reconhecimento de padrões.

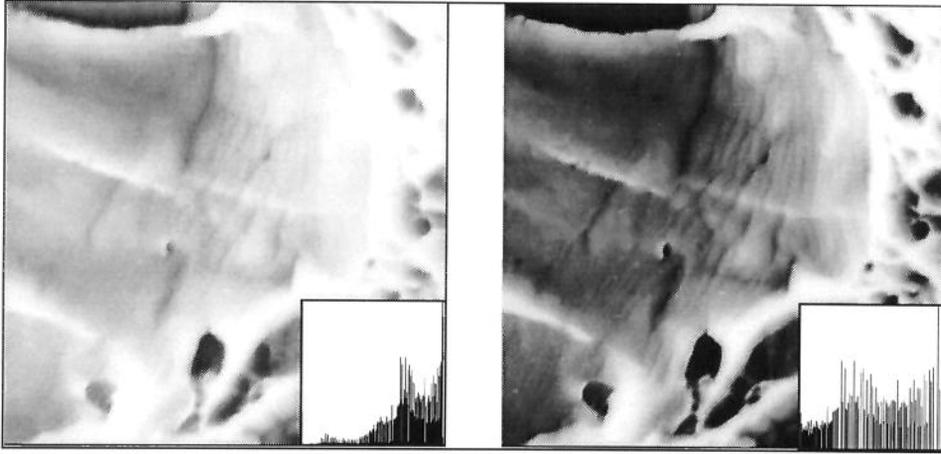


Figura 5.3 Efeito da função de equalização de contraste. Observe que o histograma da imagem à esquerda (de pior contraste) é mais denso para níveis de cinza mais elevados, resultando numa imagem mais brilhante. A equalização leva a uma ampliação dinâmica do contraste, demonstrada pelo histograma da imagem mostrada à direita, com melhor contraste.

5.6 Implementação da correlação cruzada para a medição de paralaxe

A técnica da correlação cruzada (ou, simplesmente, correlação) é, conceitualmente, bastante simples.

Considere duas funções contínuas contidas no espaço \mathcal{R}^n , f e g , e que possuem alguma similaridade. A correlação de f “sobre” g (terminologia sugerida por BRACEWELL, 1995) representa, conceitualmente, uma varredura de g pela função f , tal que ambas são comparadas entre si num dado intervalo em \mathcal{R}^n . Dessa forma, a correlação entre duas funções em uma dimensão será dada por:

$$f(x) \circ g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha) \cdot g(x + \alpha) d\alpha \quad (5.1)$$

Onde $f^*(x)$ é o conjugado complexo de $f(x)$ e α é uma variável muda para integração.

Portanto, para o cálculo da correlação, $g(x)$ “desliza” por $f(x)$, obtendo-se o produto da integração de α no intervalo $(-\infty, \infty)$ para cada valor do deslocamento x . A figura 5.5, adaptada de GONZALEZ e WOODS (1992), ilustra esse processo.

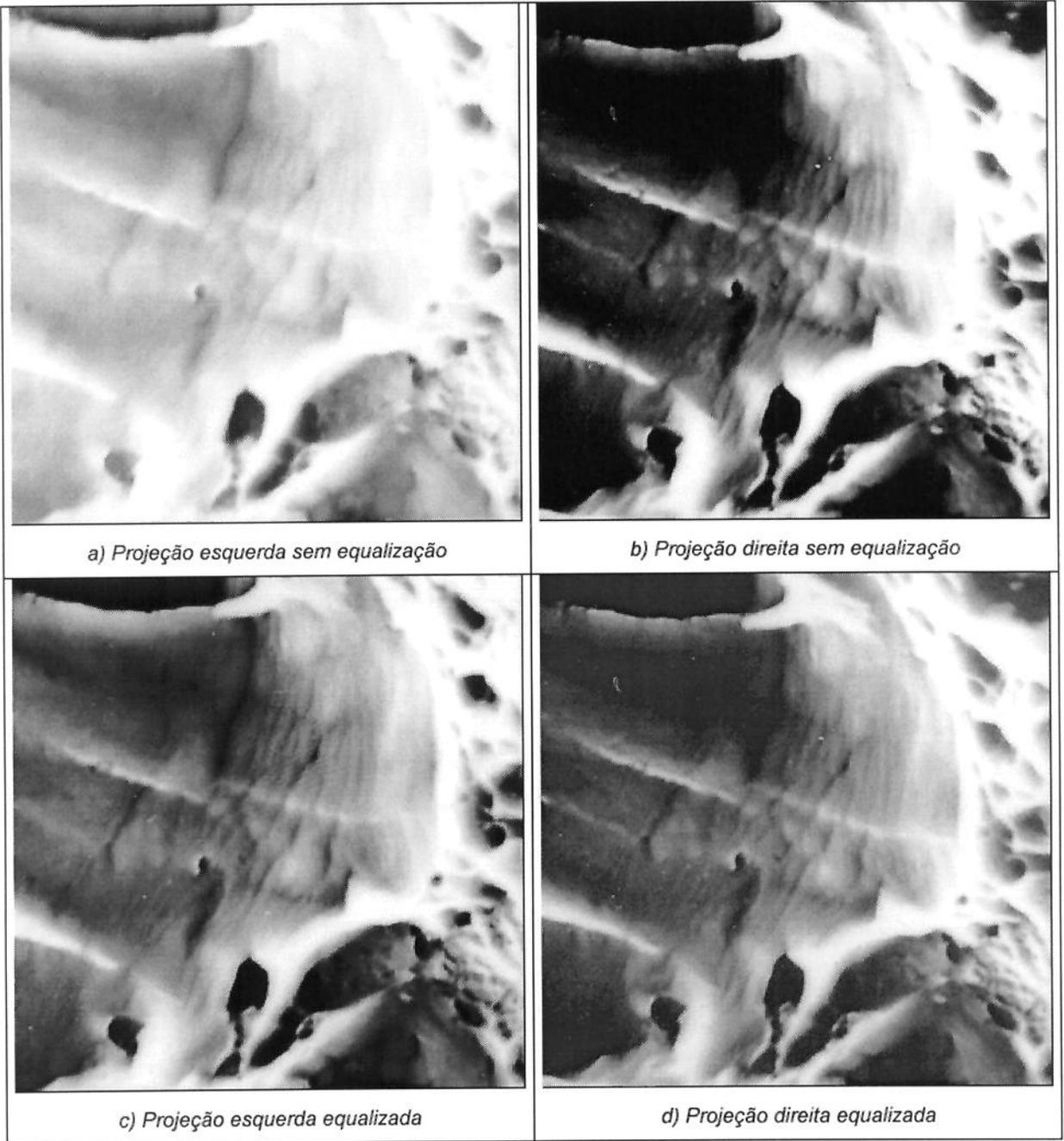


Figura 5.4 Homogeneização do contraste por efeito da equalização.

A forma bidimensional da correlação espacial é dada por:

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha, \beta) g(x + \alpha, y + \beta) d\alpha. d\beta \quad (5.2)$$

Enquanto que, no caso discreto:

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m, n) g(x+m, y+n) \quad (5.3)$$

Onde $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ e $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

A correlação também pode ser obtida através da transformada de Fourier (BRIGHAM, 1988). O teorema da correlação estabelece que:

$$f(x, y) \circ g(x, y) \Leftrightarrow F^*(u, v) G(u, v) \quad (5.4)$$

e,

$$f^*(x, y) g(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) \circ G(u, v) \quad (5.5)$$

Então, na implementação da correlação cruzada, é válida a relação:

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} \left[F(f(x, y))^* \cdot F(g(x, y)) \right] \quad (5.6)$$

onde \mathfrak{F}^{-1} representa, neste texto, o operador da transformada inversa de Fourier. A expressão 5.6 consiste numa maneira mais simples de se avaliar, computacionalmente, a correlação de matrizes de grandes dimensões e é, por esse motivo, a forma empregada no algoritmo desenvolvido neste trabalho.

É importante observar que as expressões (5.4), (5.5) e (5.6) são válidas também no caso do emprego da transformada rápida de Fourier, cuja implementação é vantajosa quanto ao tempo gasto para o processamento de imagens, mesmo para aquelas com dimensões relativamente pequenas, como 32 por 32 *pixels* (PRESS *et al*, 1992).

Como mostra a figura 5.5, o melhor alinhamento de duas funções é verificado na posição onde ocorre um máximo na correlação. Na verdade, pode-se afirmar que é na posição de alinhamento que as funções (imagens) apresentam maior semelhança. Então, as coordenadas do ponto de máximo correspondem ao deslocamento relativo entre duas imagens (funções) semelhantes no espaço.

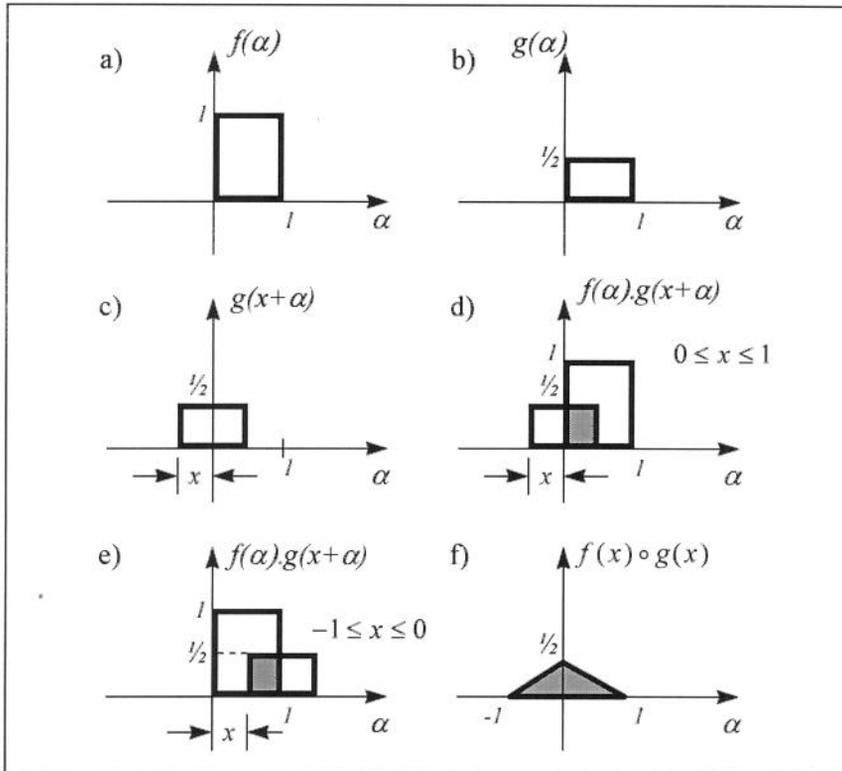


Figura 5.5 Representação gráfica da correlação unidimensional. Regiões em cinza representam produtos não nulos da correlação $f(x) \circ g(x)$. Adaptado de GONZALEZ e WOODS (1992).

Baseado nesse princípio, a técnica implementada neste trabalho (figura 5.6) consiste na extração de pequenas regiões (ou *janelas*) do par de imagens, comparando seu alinhamento, de maneira semelhante à adotada por KOENIG *et al* (1987). Nesse caso, é tomada uma janela de referência sobre a imagem esquerda do par, que é comparada a diversas janelas tomadas sobre a imagem direita. As janelas da imagem direita, aqui denominadas *janelas da varredura*, são extraídas com a mesma coordenada vertical da janela de referência, mas com coordenadas horizontais sucessivamente defasadas de 1 *pixel* dentro de uma faixa de valores pré-definida (*faixa de varredura*).

Como mostra a figura 5.6, o objetivo desse procedimento é encontrar, junto à origem do espectro no espaço real (domínio do espaço), um máximo global da correlação. Na posição correspondente à esse máximo global, verifica-se que as janelas têm maior similaridade. Dessa forma, a diferença, medida em relação ao referencial da imagem da projeção esquerda, entre as coordenadas horizontais das origens da janela de referência e da janela da varredura que apresentar o máximo valor de correlação, corresponderá, em *pixels*, ao paralaxe horizontal ($x_{esq} - x_{dir}$) entre as imagens do par estéreo no ponto correspondente à região considerada pela janela tomada sobre a imagem esquerda.

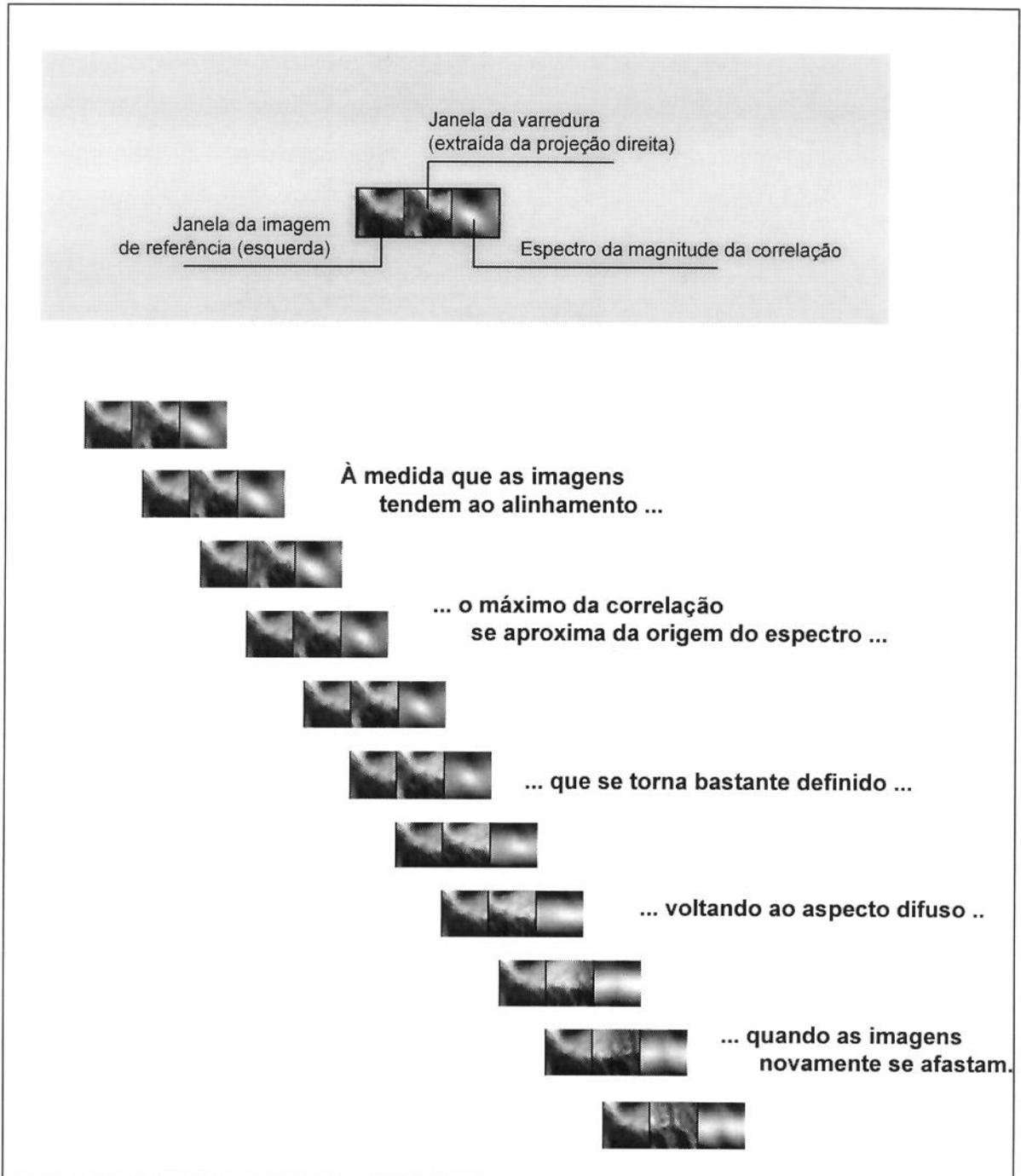


Figura 5.6 Evolução do espectro de correlação no alinhamento de imagens.

5.6.1 Normalização dos valores de correlação

O ponto-chave da eficiência da correlação cruzada como ferramenta de reconhecimento de padrões consiste, no caso desse problema, na normalização das amplitudes dos valores de

correlação. O objetivo dessa rotina é o de comparar, numa mesma escala, os valores de correlação obtidos em cada posição da varredura, para encontrar o máximo relativo que corresponderá à posição de alinhamento entre as sub-regiões das imagens do par.

Como existem expressões, conceitualmente diferentes, propostas na literatura para a normalização dos valores de correlação, foi necessário verificar a adequação dessas opções a essa aplicação. A seguir, serão apresentadas as metodologias para normalização da correlação e discutidos os resultados de sua avaliação.

5.6.1.1 Expressões para normalização da correlação cruzada

A seleção do critério de normalização da correlação cruzada, adotado neste trabalho, baseou-se nos resultados de um teste onde, tomando uma das projeções de um dos pares obtidos, foram medidos os deslocamentos entre a imagem original dessa projeção e a imagem obtida com sua translação, por 32 *pixels* em X, dentro da estrutura do algoritmo de reconstrução tridimensional. Desse modo, o resultado correto da correlação normalizada seria a obtenção de um mapa de elevação cujos valores levariam a um plano horizontal em $Z=32$ *pixels*. Os resultados desse teste, para as alternativas apresentadas a seguir, estão na figura 5.7.

GONZALEZ e WOODS (1992) apresentam a seguinte equação para o cálculo do coeficiente de correlação:

$$c_g(\alpha, \beta) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)][g(x - \alpha, y - \beta) - \bar{g}(x, y)]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [g(x - \alpha, y - \beta) - \bar{g}(x, y)]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5.7)$$

Observe que $\bar{f}(x, y)$ e $\bar{g}(x, y)$ são os valores médios de f e g no espaço, calculados uma única vez para cada posição (α, β) no domínio do espaço, e que os somatórios são dados para coordenadas (x, y) comuns para f e g . A amplitude do coeficiente de correlação será normalizada, então, para a faixa de valores entre -1 e 1, independentemente das amplitudes de f e g .

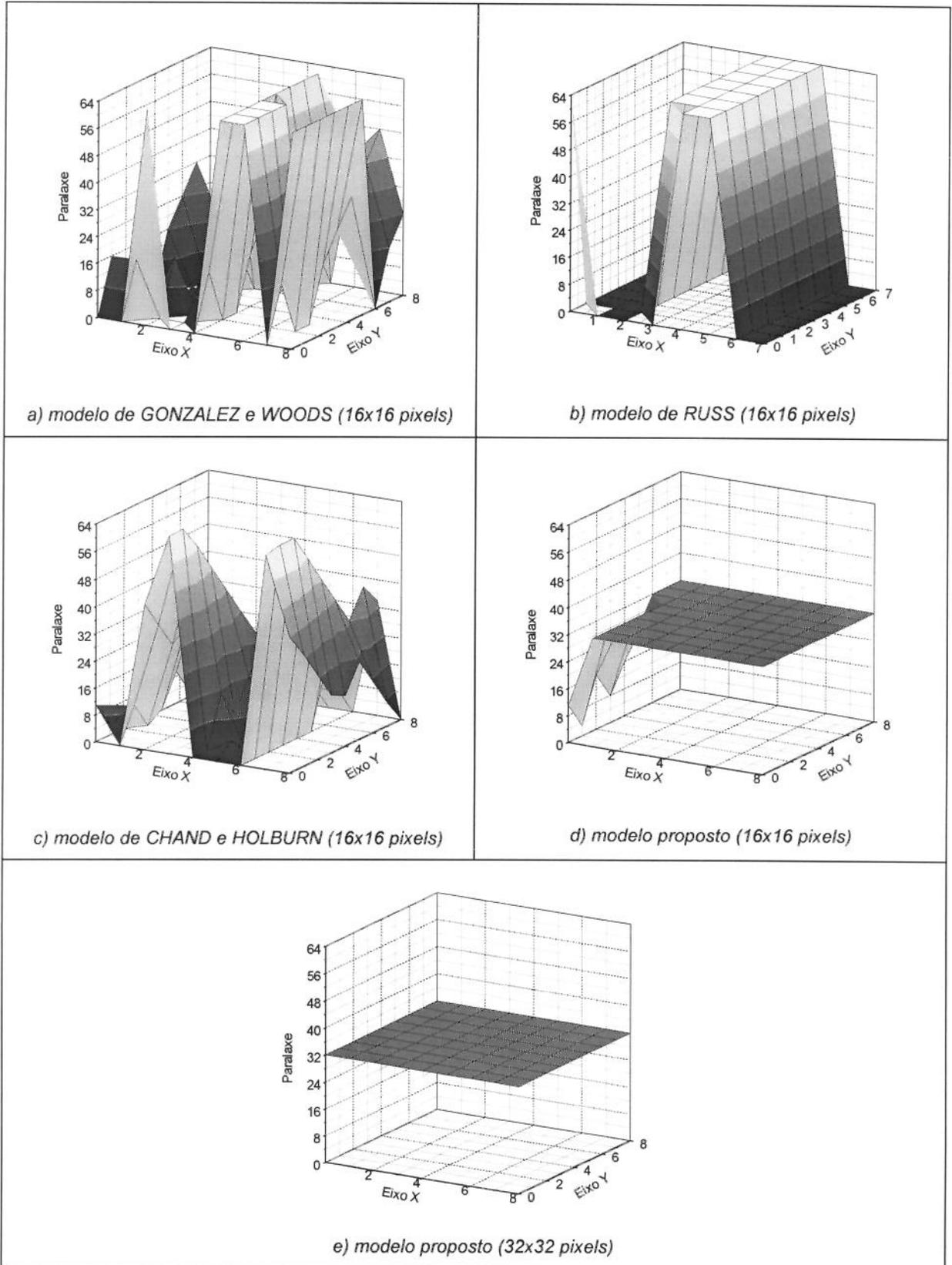


Figura 5.7 Resultados dos testes das expressões de normalização da correlação.

A representatividade do emprego de correções com os valores médios $\bar{f}(x,y)$ e $\bar{g}(x,y)$ é discutível, pois a questão importante para o reconhecimento de padrões reside na distribuição (e não na média) das amplitudes. Essa deficiência implica em distorções quanto à definição do alinhamento, principalmente quando existem variações muito grandes no contraste ao longo da imagem, ou para posições (α,β) próximas aos limites do intervalo de correlação (figura 5.7a), efeito agravado nesse teste pelo emprego proposital de grandes intervalos de varredura. Essa expressão também é sensível à presença de rotação entre as janelas. Embora as condições do teste não permitam avaliar efeitos de distorções geométricas, pode-se observar que a relação de GONZALEZ e WOODS é bastante influenciada pelos máximos de correlação para posições de comparação junto aos limites do intervalo.

Outra relação para a normalização da correlação cruzada é descrita por RUSS (1990), como:

$$c_R(\alpha,\beta) = \frac{\sum_x \sum_y f(x,y) \cdot g(x+\alpha, y+\beta) - \bar{f}(x,y) \bar{g}(x+\alpha, y+\beta)}{\sigma_{f(x,y)} \cdot \sigma_{g(x+\alpha, y+\beta)}} \quad (5.8)$$

Nesse caso, $\bar{f}(x,y)$ e $\sigma_{f(x,y)}$ são a média e o desvio padrão dos pontos da imagem da janela de referência, e $\bar{g}(x+\alpha, y+\beta)$ e $\sigma_{g(x+\alpha, y+\beta)}$ representam o valor médio e o desvio padrão da janela de varredura. Novamente, a distribuição espacial do contraste das imagens não está representada, podendo provocar erros na interpretação do alinhamento, o que pode explicar os resultados apresentados na figura 5.7b, também fortemente influenciados pelos limites do intervalo de varredura.

Outro método, proposto por CHAND e HOLBURN (1993), apresenta uma correção da amplitude da correlação, no domínio da frequência, através da *autocorrelação* da imagem (função) da janela de varredura. A *autocorrelação* é definida como a correlação de uma função por seu próprio conjugado, isto é:

$$f(x) \circ f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha) \cdot f(x+\alpha) d\alpha \quad (5.9)$$

Para funções bidimensionais, analogamente, tem-se:

$$f(x,y) \circ f(x,y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha,\beta) f(x+\alpha, y+\beta) d\alpha d\beta \quad (5.10)$$

E, através da transformada de Fourier, pode-se calcular a autocorrelação por:

$$f(x,y) \circ f(x,y) \Leftrightarrow F^*(u,v)F(u,v) \quad (5.11)$$

Observe que a autocorrelação descreve, basicamente, o comportamento da magnitude de uma função e não representa suas freqüências (YELLOT e IVERSON, 1992; SCHULZ e SNYDER, 1992). Na verdade, a correlação cruzada de duas imagens de mesma origem pode ser representada pela convolução das autocorrelações de cada uma dessas imagens, podendo-se desprezar a parcela de ruído (ALI e FRANK, 1980). A expressão de CHAND e HOLBURN (1993), que é representada pelo espectro da potência da transformada de Fourier, tem a seguinte forma:

$$N(u,v) = F^*(u,v).G(u,v).|G(u,v)|^2 \quad (5.12)$$

onde $|G(u,v)|^2$, nesse caso, representa a autocorrelação da imagem da janela de varredura, relativa ao espectro da potência no domínio da freqüência e $N(u,v)$ é a função de correlação normalizada, expressa pelas coordenadas (u,v) no espaço de Fourier.

A vantagem desse método seria, segundo CHAND e HOLBURN, a de considerar a distribuição de ruído e o efeito de distorções contidas na janela de varredura. Ao multiplicar a autocorrelação da janela de varredura pela correlação, esses efeitos são ser atenuados em relação a características comuns às duas funções (janelas).

Nesse caso, entretanto, os resultados ainda sofreram fortes aberrações em função das distorções geométricas originadas por efeito do paralaxe (figura 5.7c), atenuando a intensidade dos picos de correlação nas posições de varredura próximas ao alinhamento, como explicam ARNOT e SAXTON (1979). Isso fica mais evidente nos limites da varredura, onde são verificados picos intensos de correlação distantes da origem do espectro, produzindo falsos máximos.

Como nenhum dos métodos apresentados apresentou a acurácia necessária, foi elaborado um outro modelo descrito pela expressão:

$$N_m(\alpha, \beta) = \frac{\mathfrak{F}^{-1}\left[F^*(u, v) \cdot G(u, v)\right]_{(0,0)}}{\sqrt{\mathfrak{F}^{-1}\left[G^*(u, v) \cdot G(u, v)\right]_{(0,0)}}} \quad (5.13)$$

Essa proposta consiste em dividir a intensidade na origem do espectro da magnitude (no domínio do espaço) de correlação cruzada das janelas pelo máximo do espectro de autocorrelação (que ocorre, necessariamente, em sua origem) da imagem da janela de varredura. Assim, o máximo entre os valores normalizados calculados durante a varredura corresponderia à posição de melhor alinhamento, já que, nesse caso, o pico de correlação cruzada ocorre na origem do espectro (SAXTON, 1994), como mostra a figura 5.6, uma vez que as duas janelas estariam superpostas.

Ao considerar apenas as intensidades na origem dos espectros de correlação cruzada e autocorrelação, a parcela de ruído pode ser desprezada e, principalmente, a ocorrência de picos de correlação fora da origem não é considerada. Método semelhante é adotado por HIBBARD *et al.* (1993) e RUSS (1995), embora considerem todos os pontos dos espectros (e não apenas suas origens) para o cálculo da correlação normalizada.

Os resultados obtidos com esse modelo (figura 5.7d), para janelas de 16 por 16 *pixels*, foram bastante superiores aos obtidos nos casos anteriores, embora 6 em 81 pontos não correspondessem ao valor correto, $Z=32$. Ampliando as dimensões das janelas para 32 por 32 *pixels*, obteve-se 100% de acurácia, como mostra a o gráfico da figura 5.7e. Neste ponto, cabe discutir a validade do teste, uma vez que não são avaliados os efeitos da presença de ruído e distorções geométricas.

Segundo ARNOT e SAXTON (1979) e SEGMAN (1992), distorções geométricas não têm efeito sobre a posição dos picos de correlação, embora atenuem sua intensidade. Ainda, diversos autores concordam que o efeito do ruído sobre a correlação é pequeno, podendo afetar a forma, e não a posição dos picos de correlação cruzada (SAXTON e FRANK, 1977; AL-ALI e FRANK, 1980; VAN HEEL, 1987; KUMAR *et al.*, 1992; FRANK e McEWEN, 1992).

As maiores restrições à aplicação da correlação residem na avaliação de regiões de baixa frequência (baixo contraste), onde podem ser verificados picos de correlação em

posições diferentes da condição de alinhamento (SHAW, 1990), e no emprego de intervalos de comparação muito grandes, que podem levar à produção de máximos secundários com intensidade superior à correspondente ao alinhamento (VAEZY e CLARK, 1994).

Neste estudo, em particular, as imagens apresentam um bom contraste, favorecido pelas condições de digitalização e pelo melhoramento por equalização, e o critério de se comparar apenas os valores tomados junto à origem dos espectros elimina a questão do intervalo de varredura, que consiste na principal fonte de erros dos demais modelos no teste realizado, já que os máximos secundários ocorrem longe dessa posição e não são considerados.

5.7 A Estrutura do Programa

Como apresenta a figura 5.8, a estrutura do programa pode ser dividida em duas partes principais: a primeira compreende a adequação das imagens, através de operações de melhoramento do contraste (necessárias apenas em alguns casos) e correção do alinhamento, enquanto que a segunda é composta pelo processo de comparação das janelas por correlação cruzada.

Já na primeira parte, a projeção esquerda é adotada como a imagem de referência, impondo-se uma translação negativa (*ytrans*) e equivalente à metade do intervalo de varredura à janela da projeção direita. Observe que essa translação é necessária para a obtenção de valores de paralaxe negativos, indicativos de depressões medidas em relação ao ponto de referência (origem da imagem), localizado no canto superior esquerdo da projeção esquerda. Na segunda parte, o processo impõe iterações, e o algoritmo é composto por três laços sobrepostos (figura 5.8). O laço mais externo (LAÇO 1) representa deslocamentos (varredura) em *x* das janelas, definindo as distâncias entre os perfis extraídos.

O laço intermediário (LAÇO 2) permite deslocar as janelas em *y*, calculando-se o conjugado da transformada rápida de Fourier da janela de referência a cada nova posição (*y,x*), definindo, assim, os perfis. Esse laço contém o terceiro (LAÇO 3), governado pela variável *yvarr*, que é a variável que define a posição da janela de varredura em torno da posição *x* da janela de referência, permitindo o cálculo da transformada rápida de Fourier da janela de varredura e de seu máximo de autocorrelação.

Com esse procedimento, obtém-se valores da correlação normalizada entre as janelas de referência e de varredura, durante a migração dessa última em *yvarr*. Esses valores são

armazenados em um vetor, de onde é extraído o valor máximo. A posição y_{varr} desse máximo corresponde ao paralaxe local e é armazenada no ponto (y,x) da matriz correspondente ao mapa de elevação. Ao final do processo, o mapa de elevação é corrigido, subtraindo-se y_{trans} e multiplicando o resultado por um fator de conversão da escala em *pixels* para micrometros.

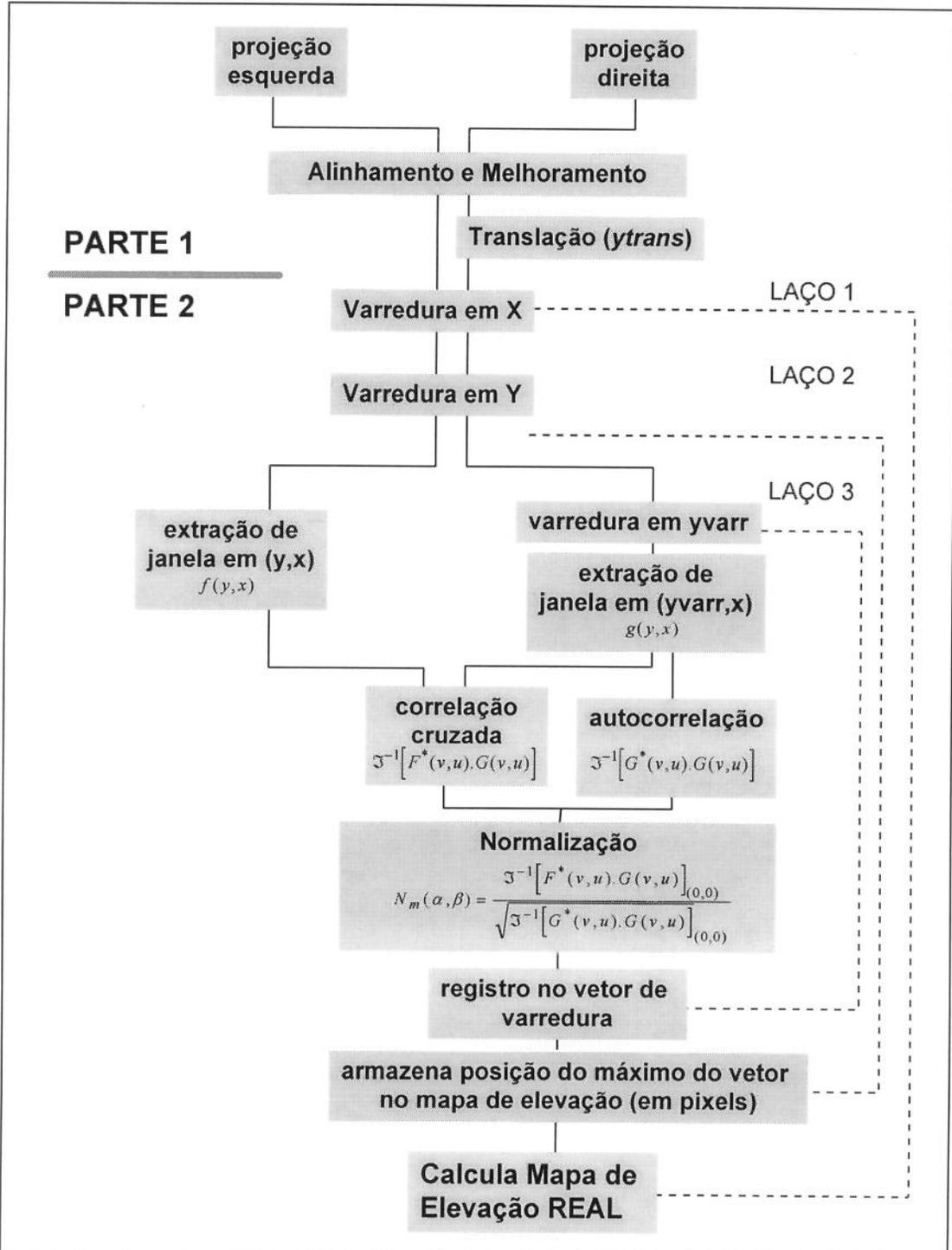


Figura 5.8 Representação esquemática da estrutura do algoritmo para reconstrução 3-D

5.8 Aplicação do programa para a avaliação da zona de estiramento

Os itens desse tópico descrevem as questões específicas da aplicação do algoritmo desenvolvido para o estudo da zona de estiramento.

5.8.1 Seleção das regiões de interesse

A seleção das regiões para análise é feita diretamente sobre a imagem digital da projeção esquerda do par, através da rotina de visualização do KHOROS, observando-se as coordenadas dos *pixels* que representam a área que contém os detalhes morfológicos de interesse.

O primeiro perfil, ou a primeira linha da reconstrução, é gerado a partir da coordenada *y* do limite inferior da região escolhida, que será aquela de menor valor, pois a origem do sistema de coordenadas está situada no canto superior esquerdo da imagem. O espaçamento entre as linhas de reconstrução será definido através da razão entre o intervalo em *y* dado pelos limites da região e o número de linhas desejado, definindo-se a resolução espacial em *y*.

No caso da observação da zona de estiramento, foram selecionadas as regiões das imagens que melhor evidenciavam a presença de estrias de fadiga e que continham a primeira linha de formação de *dimples*. Ocorrências isoladas de alvéolos, entre os limites da zona de estiramento, foram desprezadas.

5.8.2 Obtenção dos perfis

Os perfis foram obtidos a partir das linhas horizontais do mapa de elevação, em *pixels*, resultante da reconstrução tridimensional. Foram reconstruídas 5 linhas por par estéreo, obedecendo-se ao procedimento proposto no método EGF P1-87D (SCHWALBE *et al.*, 1993). Esse método propõe uma amostragem mínima de cinco medições da largura da zona de estiramento para cada uma das nove posições (ver figura 4.9). A posição de amostragem dos perfis foi definida caso a caso, de forma que os perfis representassem as elevações de

regiões das imagens onde eram visíveis os sinais de início e término da zona de estiramento.

5.8.3 Critério de amostragem para as medições de elevação

A maior restrição ao uso da correlação para a reconstrução tridimensional, a partir de pares estereoscópicos, tem sido o elevado tempo de processamento. Essa limitação também existiu neste trabalho, embora houvessem sido adotadas algumas estratégias de otimização.

Como, para as condições do problema, a obtenção de cada ponto do mapa de elevação consumia cerca de 150 segundos na SUN Sparc 20, foi necessário adotar um critério para o posicionamento em x das janelas, tal que permitisse preservar, da melhor forma, as informações que estariam contidas em perfis obtidos com a máxima resolução espacial possível nesse algoritmo (isso é, uma medição de elevação para cada *pixel* da linha amostrada sobre a imagem de referência). Assim, buscou-se definir o valor do maior incremento em y (Δy) para o posicionamento das janelas que permitisse a melhor reprodução de perfis obtidos com $\Delta y = 1$.

Questões dessa natureza são comuns em outras aplicações do processamento digital de imagens, como na área de sensoriamento remoto (RICHARDS, 1986). Nesses casos, o critério mais conhecido baseia-se no teorema da amostragem, derivado da taxa de amostragem de Nyquist (BELLANGER, 1980), e consiste em tratar o resultado discreto da condição de máxima resolução, onde $\Delta y = 1$, da mesma forma que um sinal analógico avaliado por um sensor digital.

Genericamente, o teorema da amostragem estabelece que para uma função $f(x)$, uniformemente discretizada em Δx e de banda limitada, pode ser recomposta sem erros a partir dos valores de amostragem $f(m\Delta x)$, desde que a taxa de amostragem seja maior que a frequência de Nyquist, isto é:

$$\frac{1}{\Delta x} > 2B_x \quad (5.13)$$

onde B_x é a largura de banda da função $f(x)$, o que significa que a transformada de Fourier de $f(x)$, $F(u)$, tem amplitude nula para $|u| > |B_x|$.

Dessa forma, $f(x)$ pode ser reconstruída a partir de $f(m\Delta x)$ através da fórmula de interpolação:

$$f(x) = \sum_m^{\infty} f(m\Delta x) \left(\frac{\sin\left(\frac{x}{\Delta x} - m\right)\pi}{\left(\frac{x}{\Delta x} - m\right)\pi} \right) \quad (5.14)$$

Assim, a condição de amostragem foi definida a partir do resultado de teste. Tomando-se, aleatoriamente, um dos pares estéreos obtidos neste estudo, foi feita a reconstrução de um perfil com, no caso, $\Delta y = 1$. Em seguida, foi calculada a transformada rápida de Fourier do perfil obtido (figura 5.9) e determinada sua largura de banda, B_y . Como se observa na figura 5.9, $B_y \approx 0,1 \text{ pixel}^{-1}$, resultando em $\Delta y < 5$, para a definição do incremento máximo. Portanto, a condição ótima de amostragem, considerando as variáveis tempo de processamento e incremento máximo, é dada por $\Delta y = 4$. Essa condição ótima foi empregada na obtenção de todos os perfis avaliados neste estudo.

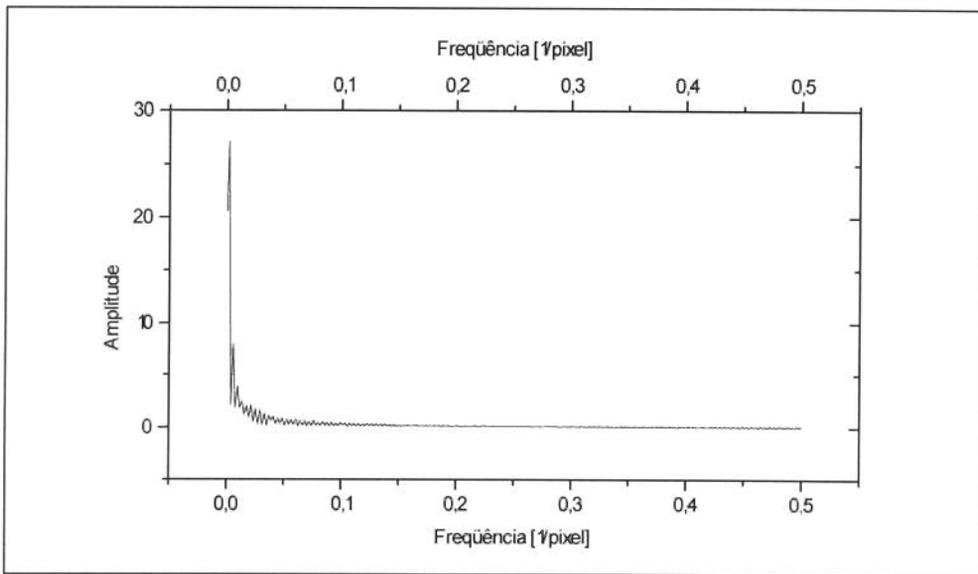


Figura 5.9 Espectro da magnitude da transformada rápida de Fourier para perfil obtido com incremento $\Delta y = 1$.

5.8.4 Correções para o cálculo das elevações

As elevações foram calculadas de acordo com a equação (4.1). De cada ponto no mapa de elevação foi subtraída a intensidade de y_{trans} . Em seguida, as correções da escala foram obtidas através dos seguintes dados:

- Ampliação das imagens: 1320 X (ou: 1 mm na imagem correspondendo a 0,758 μm na amostra)
- Resolução espacial de digitalização: 200 pontos por polegada (horizontal e vertical)
- Variação angular total entre as projeções ($\Delta\theta$): 8°

Isso significa que, em todas as imagens, a distância entre dois pontos das imagens digitalizadas equivalia à 0,096 μm , enquanto, pela equação (4.1), cada unidade no mapa de elevação de todos os perfis correspondia à 0,690 μm . Essas correções foram efetuadas em um *software* de planilha eletrônica, a partir de arquivos ASCII gerados pelo programa no sistema *KHOROS*.

5.9 Comentários adicionais sobre a técnica de reconstrução 3-D

A possibilidade de se ampliar a sensibilidade das medições, através da adoção de uma maior resolução espacial na etapa de digitalização das imagens e de incrementos unitários na obtenção dos perfis de elevação, provoca uma discussão sobre as limitações da técnica elaborada neste trabalho.

Há um compromisso entre o grau de resolução possível de se obter e o próprio contraste da imagem, pois as condições de digitalização dependerão da qualidade de contraste. Um aumento na resolução de digitalização deve ser visto com reservas, uma vez que um maior número de pontos amostrados para as dimensões fixas de uma fotografia tendem a produzir uma suavização do contraste. Essa redução no contraste implica, como afirma RUSS (1990), numa menor eficiência da correlação cruzada na identificação do correto alinhamento das imagens, por implicar na comparação de janelas de baixo contraste.

Desse modo, há um limite superior prático para a seleção do nível de resolução óptica empregado na digitalização. Esse limite, por sua vez, dependerá do nível de contraste do relevo investigado, sendo, por exemplo, normalmente maior em superfícies contendo formações de *dimples* que para imagens de grande ampliação de superfícies de clivagem ou estrias de fadiga, quando impostas as mesmas condições de observação.

Quanto à adoção de incrementos de amostragem unitários ($\Delta x = \Delta y = 1 \text{ pixel}$) para a obtenção do mapa de elevação completo, ou de perfis, há uma relação entre custo, em termos de tempo de processamento, e benefício, dado pelo aumento na sensibilidade de medição.

O processamento das imagens, por esse algoritmo, exige consumo de tempo aceitável para processos iterativos, sendo que, para a SUN Sparc 20, cada perfil reconstruído demandava cerca de 3,2 horas. O uso de estações com maior capacidade de processamento, como a IBM RS/6000 43P, permitiu uma redução nesse tempo para cerca de 1,1 horas, o que representa uma boa perspectiva.

Outras medidas podem ser tomadas para a redução do tempo de processamento, como a otimização da compilação dos programas fonte do *KHOROS* de acordo com o *hardware* específico da estação RISC em uso, a adoção de placas aceleradoras gráficas, ampliação da memória RAM, etc. Contudo, dois caminhos parecem ser mais promissores:

- A transcrição do algoritmo para uma linguagem de programação (como C++ ou Fortran 90), evitando o uso intensivo da parte gráfica. No *KHOROS*, para cada execução de uma rotina, são processados comandos para a exibição da ativação e desativação dessa rotina, o que é desnecessário. Essa transcrição também pode levar a uma otimização do armazenamento dinâmico de dados na memória, ampliando a capacidade de processamento.
- Otimização do processo de varredura. Embora o algoritmo elaborado já apresente alguns artifícios de otimização do processamento, ainda é possível melhorar sua concepção. Entretanto, devem ser considerados prováveis efeitos das ações de otimização sobre a acurácia do programa.

Na maior parte dos casos, contudo, o ganho na sensibilidade com uma amostragem unitária não trará modificações consideráveis na ordem de grandeza das medidas de elevação. Assim, o aumento da amostragem deve ser avaliado caso a caso, tendo em vista os benefícios obtidos com seu emprego e a maior demanda de tempo decorrente.

6. Resultados e Discussão:

Parte II - Análise da zona de estiramento

6.1 Ensaios mecânicos

Os ensaios para determinação de CTOD crítico foram considerados válidos conforme a norma ASTM E 1290-93 (ASTM, 1995), uma vez que a diferença máxima na amplitude entre o tamanho da trinca em cada posição medida (a_i) e o tamanho médio da trinca (\bar{a}_0) não ultrapassou 10% de \bar{a}_0 .

Tabela 6.1 Resultados Obtidos nos Ensaios CTOD

Ensaio	Tamanho médio da trinca (\bar{a}_0) [mm]	$(a_i - \bar{a}_0)_{MÁX}$ em porcentagem de \bar{a}_0	Relação entre o tamanho médio da trinca e a largura (\bar{a}_0/W)	Coeficiente de intensidade de tensão (Y)	
1	25,56	-4,53	0,51	10,00	
2	25,88	-6,62	0,52	10,22	
3	26,55	-5,05	0,53	10,66	
Média	26,00	-5,40	0,52	10,29	
Ensaio	Fator de rotação plástica (r_p)	Carga crítica (P_c) [kN]	Fator K [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	Abertura crítica do clip gage (v_c) [mm]	COD (δ_c) [mm]
1	0,46	19,130	34,221	0,076	0,025
2	0,46	19,031	34,793	0,076	0,025
3	0,46	17,560	33,485	0,073	0,023
Média	0,46	18,574	34,166	0,075	0,024

Esses valores apresentam ordem de grandeza condizente com os obtidos por outros pesquisadores, como SOKEI e FERREIRA (1994) e BROEK (1974a).

6.2 Sobre a definição dos limites da zona de estiramento

Uma das maiores fontes de erro na medição da zona de estiramento está na indefinição de referenciais para os seus limites, como mostra o trabalho de HALIM *et al* (1988), citado no segundo capítulo desse texto. De forma geral, esses pontos são definidos visualmente a partir de imagens de projeção da região, implicando num aumento na dispersão dos resultados em função de diferenças de julgamento a cada medição. Como a reconstrução tridimensional da superfície da zona de estiramento permite a obtenção de perfis de elevação tomados verticalmente, no sentido de seu crescimento a partir da pré-trinca, os resultados obtidos neste trabalho possibilitaram a elaboração de critérios que visam ampliar a reprodutibilidade na definição dos referenciais de medição, reduzindo a influência do fator humano.

BROEK (1974a), visando definir procedimentos para medição da largura e da altura da zona de estiramento, descreveu três formações possíveis para seu perfil, representadas na figura 6.1. A classificação de BROEK mostra que a zona de estiramento, por representar uma transição entre a região de propagação estável da trinca e a ruptura final, sempre apresenta sensíveis modificações na orientação do crescimento da elevação em seus limites naturais, permitindo a adoção de critérios de fundamento matemático para a definição dessas fronteiras. A partir dessa afirmativa, apresenta-se neste estudo uma proposta nesse sentido.

Analisando a figura 6.1, observa-se que a zona de estiramento tem início com uma modificação na tendência de crescimento do perfil a partir da propagação estável. De forma geral, o início da formação da zona de estiramento impõe uma alteração bastante evidente na curvatura do perfil, caracterizada por um ponto de inflexão. Então, o procedimento proposto para definição do referencial para o início da região consiste em:

1. Identificar, sobre a imagem da projeção esquerda do par estéreo, uma faixa que contenha, na altura de extração do perfil, sinais de propagação estável (estrias de fadiga) e da zona de estiramento. A largura dessa faixa deve ser a mais estreita possível, desde que a identificação dessas características topográficas seja evidente (figura 6.2).

2. Obter o diagrama da derivada da elevação em relação à posição no perfil (dz/dy).
3. Identificar o ponto crítico mais evidente (máximo ou mínimo, de acordo com o comportamento do perfil de elevação) dentro da faixa delimitada no passo 1. Anotar a abscissa desse ponto (figura 6.2.).
4. Traçar, sobre o diagrama do perfil de elevação, uma reta paralela ao eixo das ordenadas, passando pelo valor de abscissa obtido no passo anterior. Anotar as coordenadas do ponto de intersecção entre essa reta e a curva do perfil. As coordenadas y e z do início da zona de estiramento serão, respectivamente, a abscissa e a ordenada desse ponto.

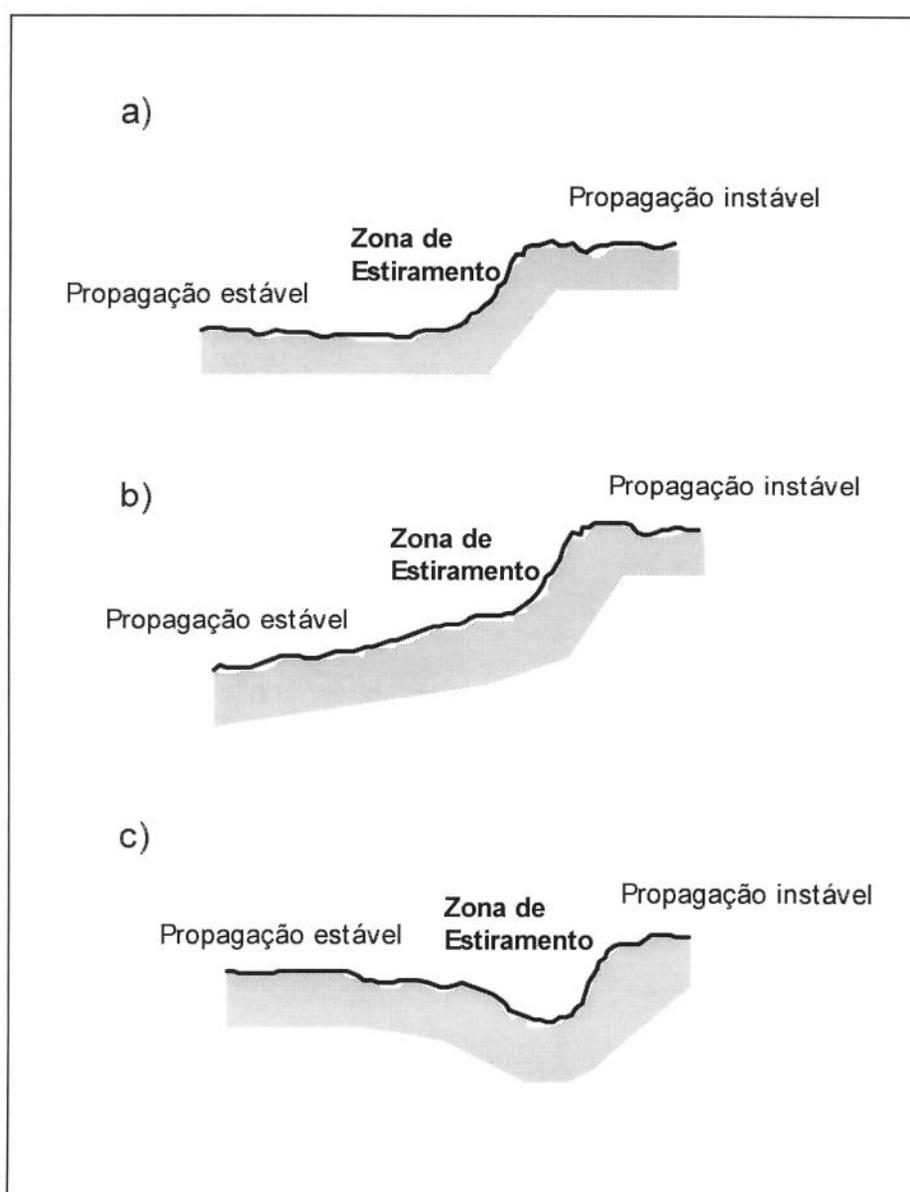


Figura 6.1 Representação das três formações possíveis para o perfil da zona de estiramento. Adaptada de BROEK (1974a).

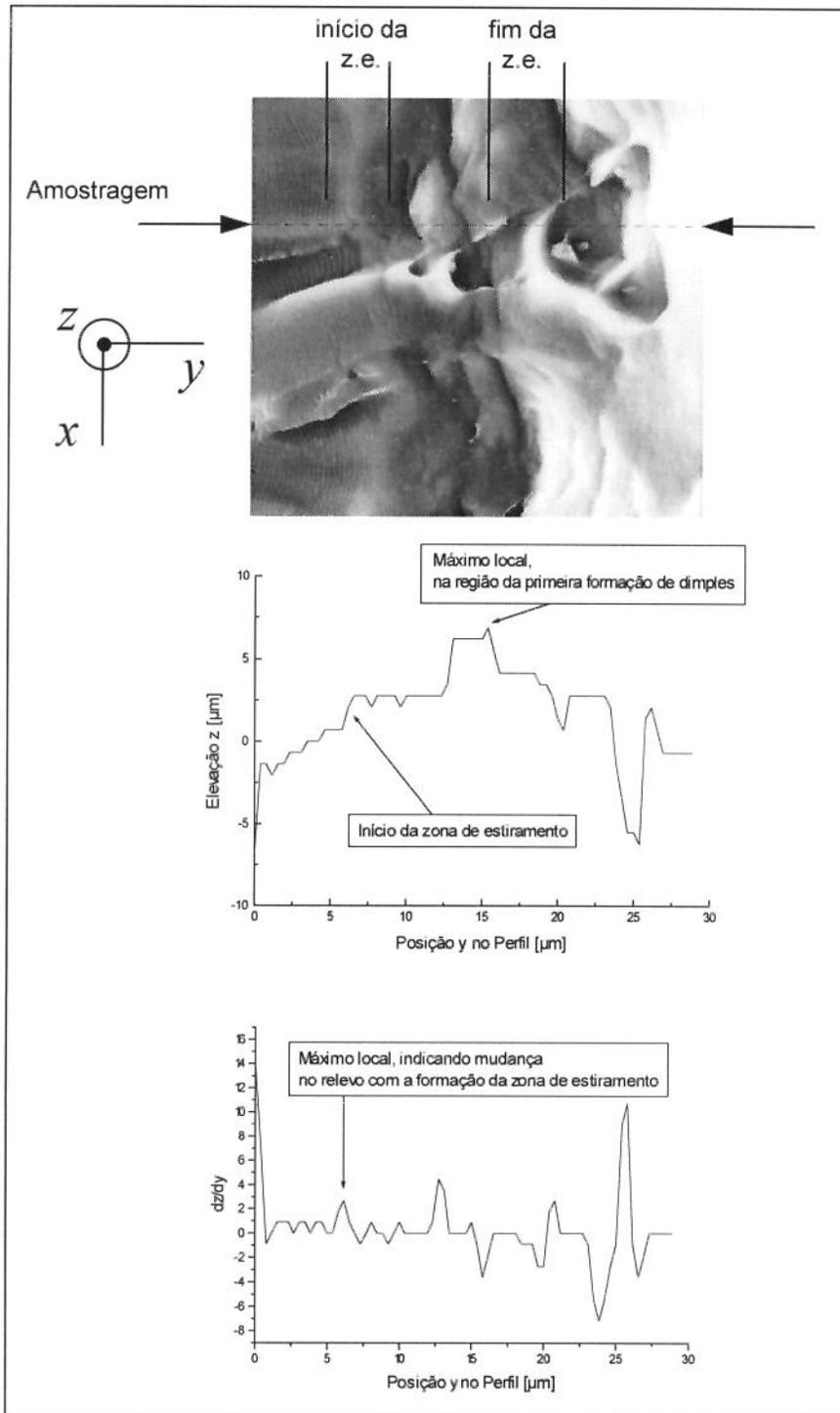


Figura 6.2 Critérios para adoção de referenciais para medição da zona de estiramento. Note que as informações contidas na outra imagem de projeção do par estéreo também têm influência sobre o comportamento do perfil de elevação, o que justifica o fato de que o posicionamento dos referenciais nem sempre corresponde exatamente ao observado apenas na imagem esquerda, como nesse caso.

Já a definição do final da zona de estiramento pode ser dada de forma mais simples, desde que a resolução empregada para a medição do perfil de elevações seja suficientemente elevada.

Considerando que a ruptura final é caracterizada por *dimples*, então o limite da região pode ser dado sobre as paredes da primeira linha de alvéolos, conjugadas à zona de estiramento. Como essas paredes são formadas por estricção até a sua ruptura, então o limite entre a zona de estiramento e a região de propagação instável pode ser definido por um ponto de máximo no perfil de elevações dentro da faixa correspondente, identificada sobre a imagem da projeção esquerda do par estéreo (figura 6.2).

6.3 A evolução do relevo da zona de estiramento ao longo da frente da trinca

UGUZ e MARTIN (1995), avaliando a zona de estiramento para a liga Al 7005, observaram que a zona de estiramento tem formação muito irregular ao longo da frente da pré-trinca, verificando-se muitas regiões do relevo onde sua ocorrência não pode ser definida.

Essa heterogeneidade no comportamento do relevo da zona de estiramento e de sua vizinhança também foi observada neste trabalho, como mostra a figura 6.3, e pode ser explicada pela presença bastante intensa de precipitados, bem como pela heterogeneidade na orientação e tamanho dos grãos. Cabe ressaltar que esses fatores, de natureza metalúrgica, têm efeito similar em toda a extensão da superfície da zona de estiramento.

Outro fator importante consiste na transição entre os estados de tensão plana (verificado junto às bordas laterais dos corpos de prova) e de deformação plana (na região central da frente da trinca), que influencia diretamente na ativação de sistemas de deslizamento e sobre os sítios de propagação de trincas. Variações na distribuição de tensões, por outro lado, produzem efeitos diferenciados sobre o relevo da fratura.

Como mostra a figura 6.3, o relevo da zona de estiramento, como ocorre em sua vizinhança, tende a ser mais acidentado em regiões mais afastadas do centro da amostra, evidenciando o efeito do estado de tensão plana sobre sua morfologia. As figuras 6.4 e 6.5 apresentam, de forma esquemática, uma visão quantitativa desse comportamento, avaliada através do programa de reconstrução tridimensional. Por esses resultados, pôde-se observar, efetivamente, que as elevações e depressões tendem a ser mais pronunciadas em regiões mais próximas das bordas que no terço central da frente da trinca.

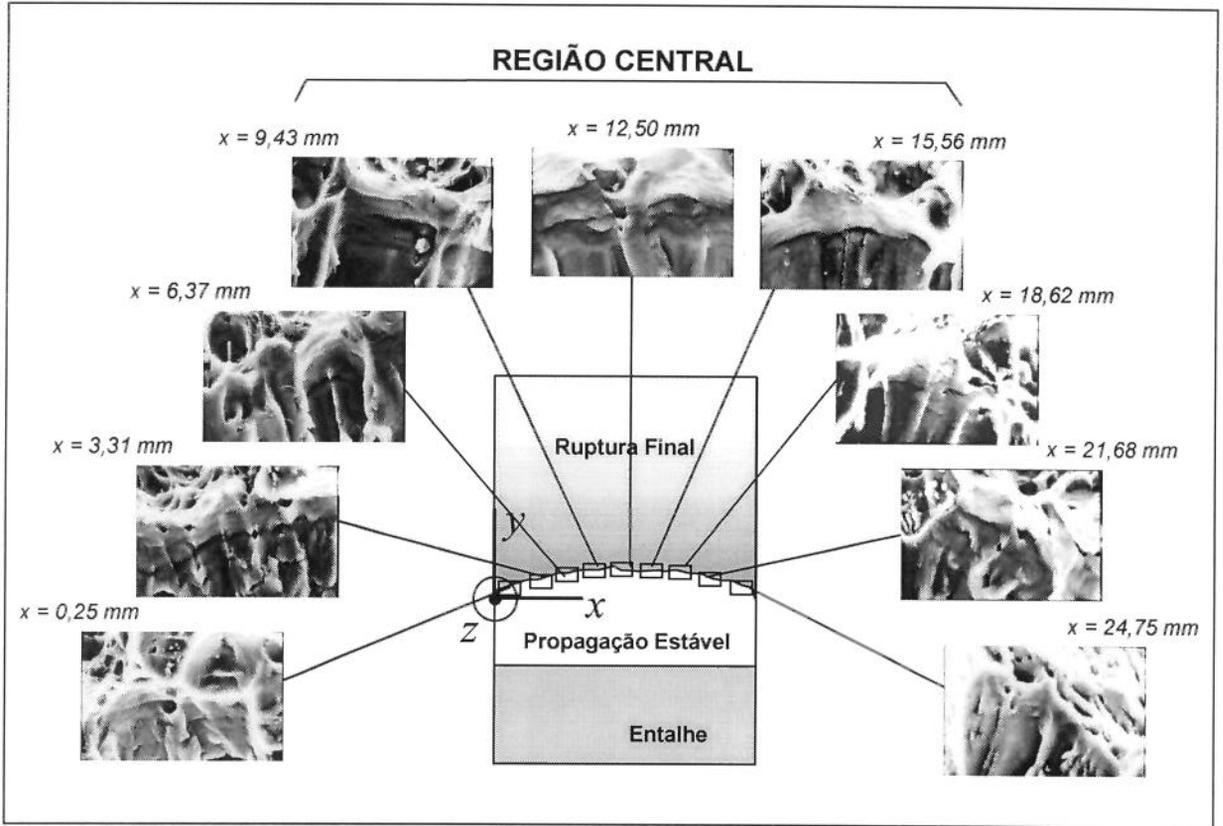


Figura 6.3 Comportamento do relevo da zona de estiramento ao longo da frente da trinca.

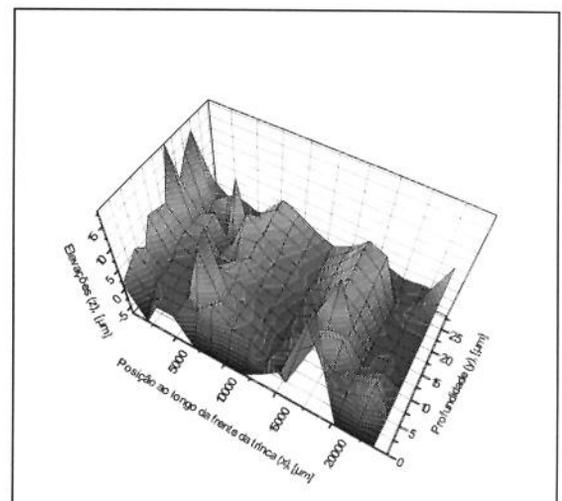
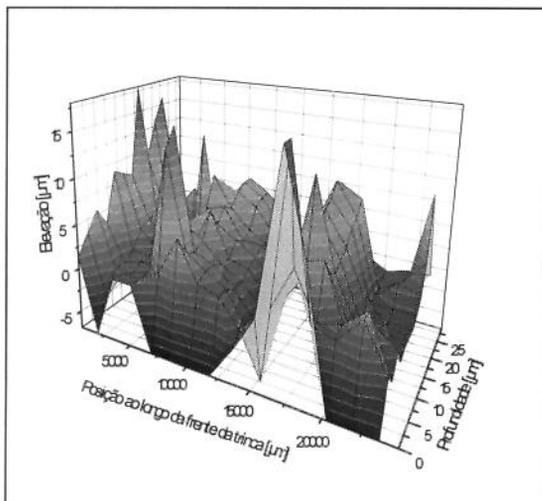


Figura 6.4 Representações, no espaço 3-D, da evolução dos perfis obtidos ao longo da frente da trinca, contendo a zona de estiramento. Observe que as elevações e depressões são menos pronunciadas no terço central da frente da trinca, isto é, para posições x entre $9430 \mu\text{m}$ e $15560 \mu\text{m}$. (Resoluções de varredura para cada posição: $1,536 \mu\text{m}$ em x , $0,096 \mu\text{m}$ em y e $0,690 \mu\text{m}$ em z)

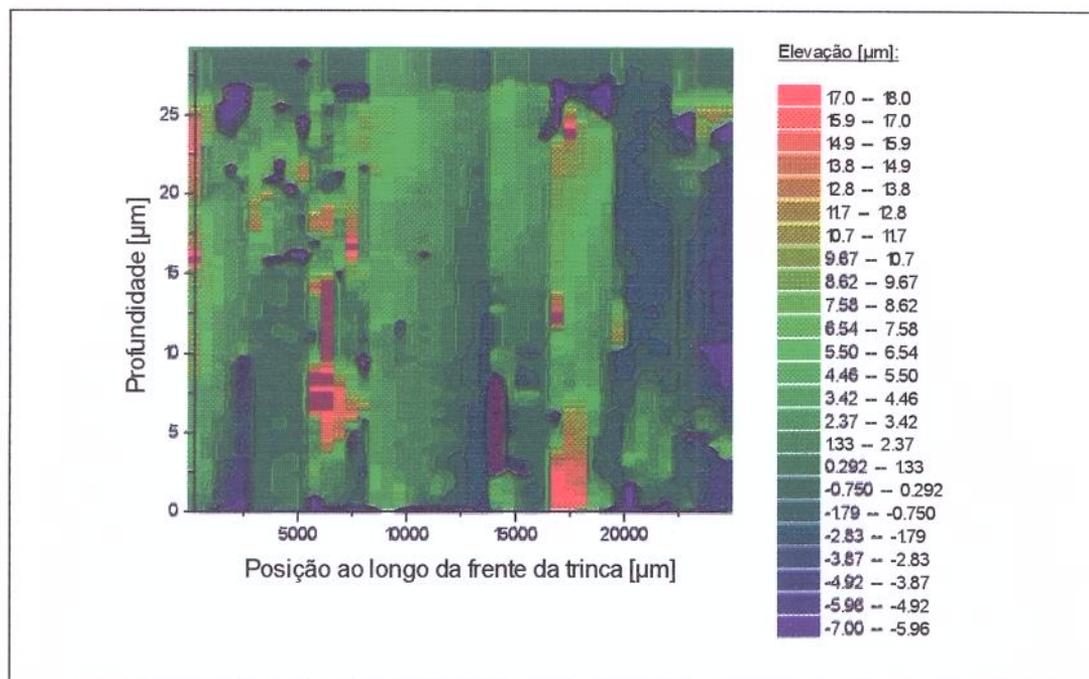


Figura 6.5 Mapa de elevação esquemático da evolução dos perfis ao longo da frente da trinca. Todos os perfis contêm a zona de estiramento. Note que os valores de elevação estão associados à escala de cores. (Resoluções de varredura para cada posição: $1,536 \mu\text{m}$ em x , $0,096 \mu\text{m}$ em y e $0,690 \mu\text{m}$ em z)

A figura 6.6 apresenta os perfis completos obtidos para cada uma das nove posições avaliadas ao longo da frente da trinca para a amostra nº 2. Observe que o comportamento das curvas é mais homogêneo para as posições centrais (x entre $9,43 \text{ mm}$ e $15,56 \text{ mm}$, figuras 6.6 *d*, *e* e *f*), denunciando o efeito do estado de tensão plana sobre a formação da zona de estiramento e de sua vizinhança. Essas evidências levam ao questionamento sobre a validade de se medir as dimensões da zona de estiramento, em posições próximas às bordas do corpo de prova, como sugere o método EGF P1-87-D (ESIS P1-90/P1-92) apresentado por SCHWALBE *et al* (1993).

A deformação intensa nas bordas, em função do estado de tensões, provoca uma estrição macroscópica mesmo em materiais em condições de tenacidade moderada, o que, a nível microscópico, se traduz em acentuada irregularidade da formação da zona de estiramento. Essa irregularidade é descrita pela presença de alvéolos ocasionais, nervuras e ressaltos acentuados e por aspectos topográficos de cisalhamento que impedem a identificação precisa da zona de estiramento, como também observaram GILMORE *et al* (1983).

Tais características levam a uma maior dispersão nas medições do tamanho da zona de estiramento próximas das bordas, em relação aos valores obtidos junto à região central da amostra, na frente da trinca. As figuras 6.7 e 6.8 ilustram esse efeito, com os dados obtidos

para uma mesma amostra. Ainda, como mostra a tabela 6.2, observa-se uma sensível redução na largura da zona de estiramento, acompanhada de uma ampliação em sua altura (avaliada segundo o critério adotado por BROEK¹, 1974a), junto às bordas (ver figura 6.8).

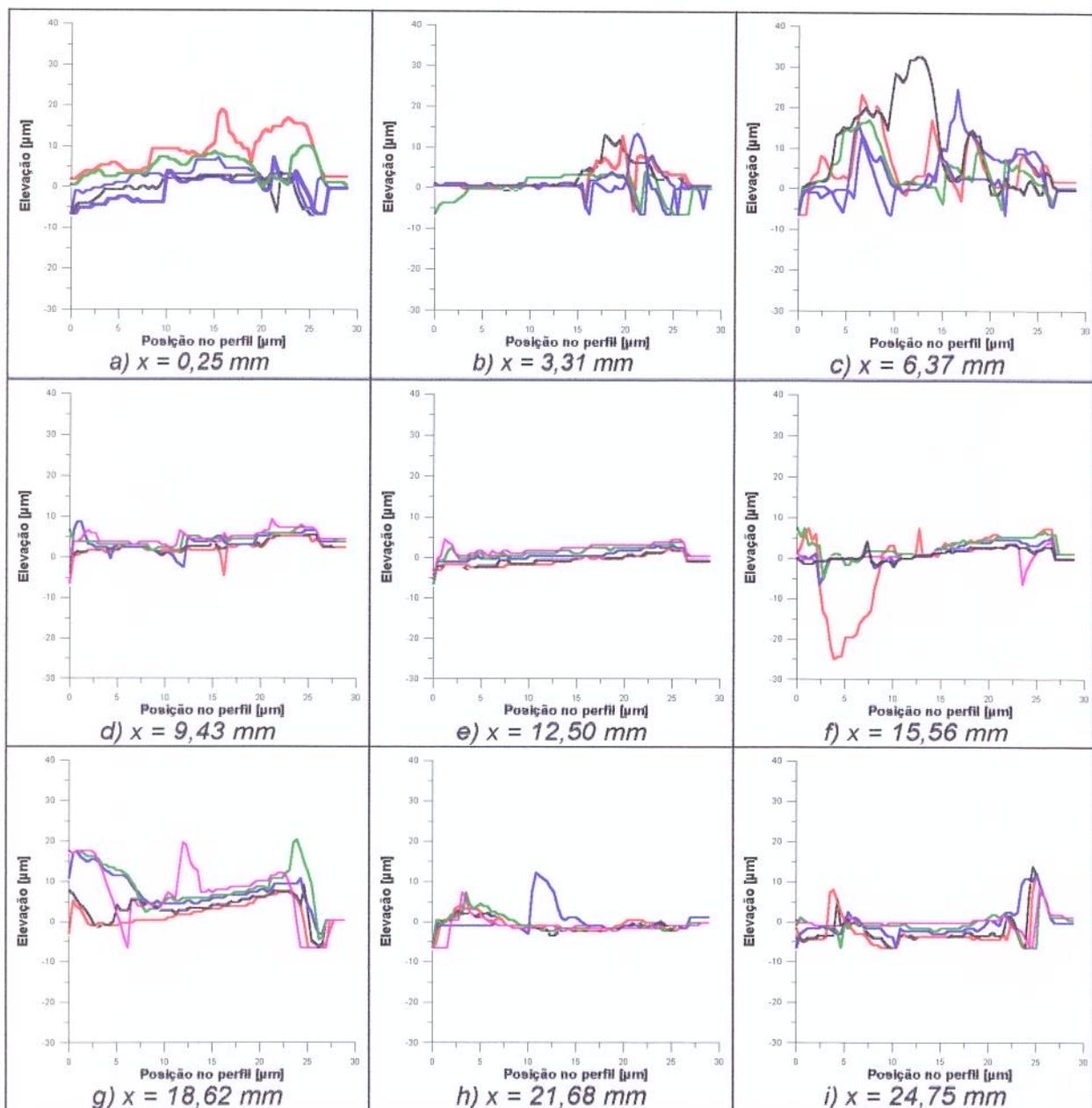


Figura 6.6 Evolução dos perfis obtidos, de acordo com a posição de amostragem ao longo da frente da trinca. (Resoluções de varredura: $1,536 \mu m$ em x , $0,096 \mu m$ em y e $0,690 \mu m$ em z)

¹ O critério de BROEK (1974a), apresentado detalhadamente adiante, para a medição da altura da zona de estiramento considera apenas a diferença das elevações entre os limites da região, desprezando a possibilidade de ocorrência de um vale (formação c da figura 6.1). Essa limitação foi imposta, em parte, pela dificuldade em avaliar, de forma sistemática e precisa, elevações no interior da região, àquela época.

Tabela 6.2 Comparação das medidas do tamanho da zona de estiramento, em regiões de uma mesma amostra

Região avaliada	Total de medições	L_{ze} [μm]		H_{ze} [μm]		L_{ze}/H_{ze}	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1 ^o terço (x entre 0,25 e 6,37 mm)	15	8,929	3,421 (38,3%)	13,307	6,227 (46,8%)	0,891	0,648 (72,7%)
terço central (x entre 9,43 e 15,56 mm)	15	14,496	2,597 (17,9%)	5,517	1,933 (35,0%)	3,002	1,356 (45,2%)
3 ^o terço (x entre 18,62 e 24,75 mm)	15	11,315	5,569 (49,2%)	7,954	5,769 (72,5%)	2,569	2,449 (95,3%)
somente bordas (1 ^o e 3 ^o terços)	30	10,122	4,701 (46,4%)	10,630	6,496 (61,1%)	1,730	1,956 (113,1%)
toda a frente (conforme EGF P1-87-D)	45	11,580	4,589 (39,6%)	8,926	5,911 (66,2%)	2,154	1,864 (86,5%)

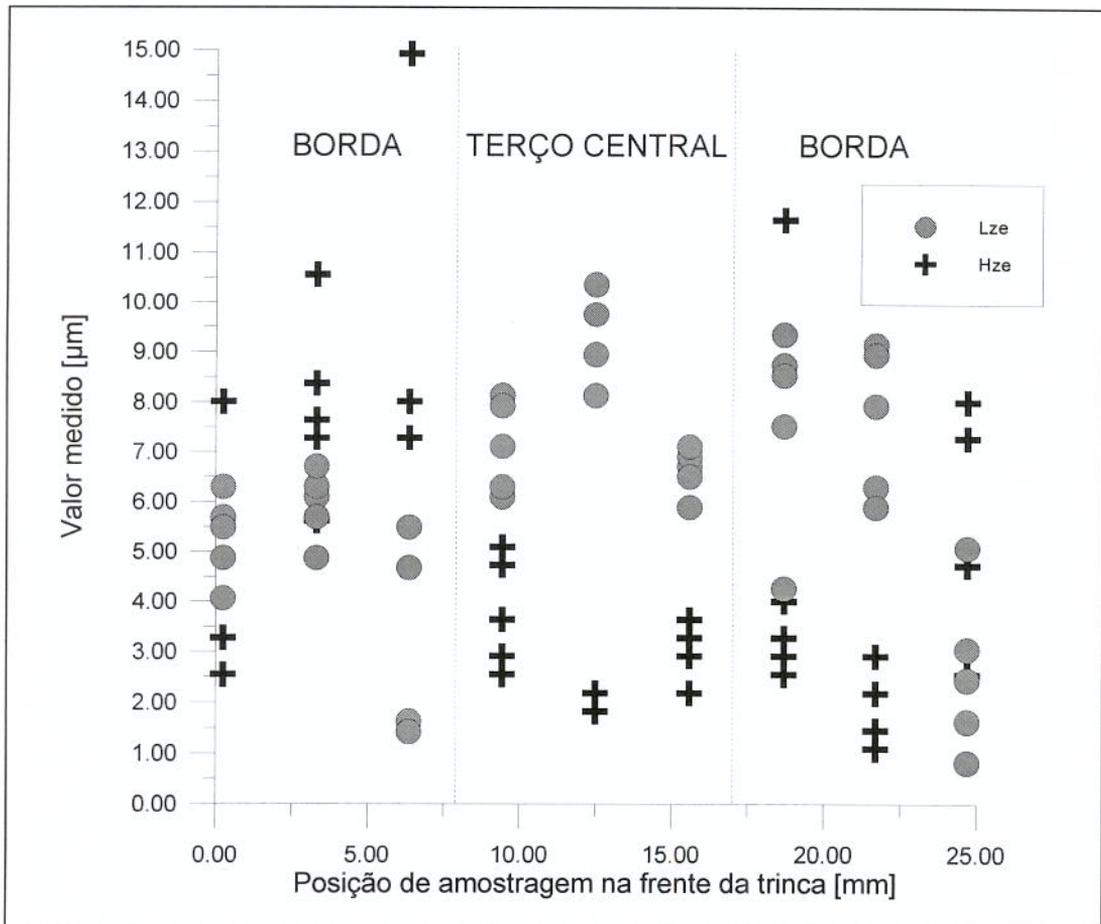


Figura 6.7 Distribuição dos valores de L_{ze} e H_{ze} medidos ao longo da frente da trinca de uma mesma amostra, segundo o posicionamento previsto no método EGF P1-87-D. Medições de H_{ze} realizadas conforme a proposta de BROEK (1974a).

Em vista dessa dispersão, diversos pesquisadores adotam a prática de considerar apenas as medições na região central da frente da trinca para a determinação do tamanho da zona de estiramento, como KOBAYASHI *et al* (1983), PUTATUNDA e RIGSBEE (1985) KOLEDNIK e STÜWE (1985), SRINIVAS *et al* (1994) e DRAR (1995). HYATT e MATTHEWS (1994) justificam esse procedimento com o argumento de que o pronunciado desvio nas medidas, devido a irregularidade da zona de estiramento junto às bordas, inviabiliza a adoção do tamanho dessa região como parâmetro para estimativa do CTOD, criticando o método EGF P1-87-D.

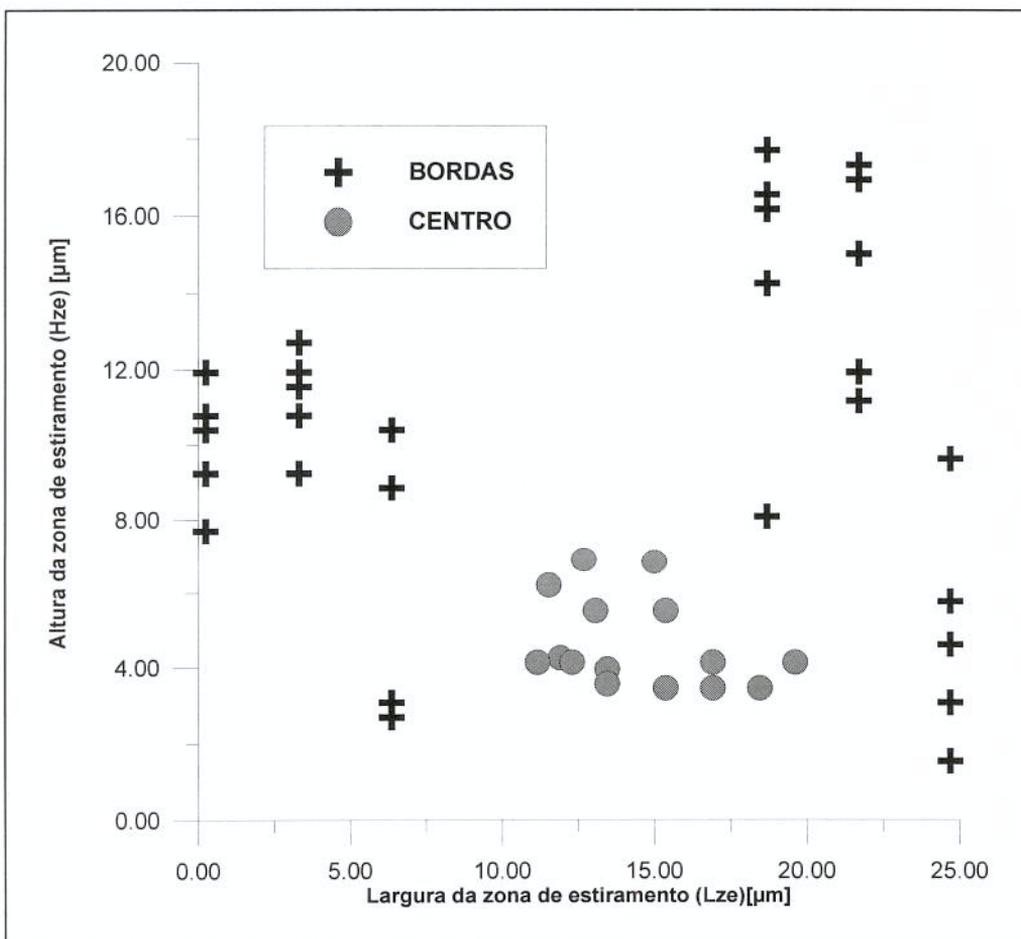


Figura 6.8 Dispersão da relação entre os parâmetros L_{ze} e H_{ze} ao longo da frente da trinca de uma única amostra. Posições medidas no centro: 9,43 mm, 12,50 mm e 15,56 mm. Bordas: de 0,25 mm a 6,37mm, e de 18,62 mm a 24,75 mm.

Os resultados obtidos neste estudo reforçam essas críticas, levando à decisão de se considerar apenas as medições realizadas junto ao terço central da frente da trinca (isto é, para pares tomados a partir de posições em x iguais a 9,43 mm, 12,50 mm e 15,56 mm) para a avaliação da zona de estiramento.

6.4 Medidas do tamanho da zona de estiramento

Conforme comentário anterior, o critério adotado por BROEK (1974a) considera apenas as coordenadas dos limites da região para a estimativa de sua largura (L_{ze}) e altura (H_{ze}). Assim, como mostra a figura 6.9, a L_{ze} é dada a partir da diferença entre as abscissas y do final e do início da zona de estiramento, respectivamente, enquanto que a H_{ze} é medida pela diferença entre as ordenadas z desses pontos. Esse critério também tem sido adotado por outros pesquisadores, em trabalhos recentes, como PLUVINAGE e LANVIN (1993), SRINIVAS *et al* (1994) e UGUZ e MARTIN (1995). Alguns autores, como BASSIM *et al.* (1992), empregam equações para correção desses valores, mas realizam suas medidas a partir desses mesmos pontos.

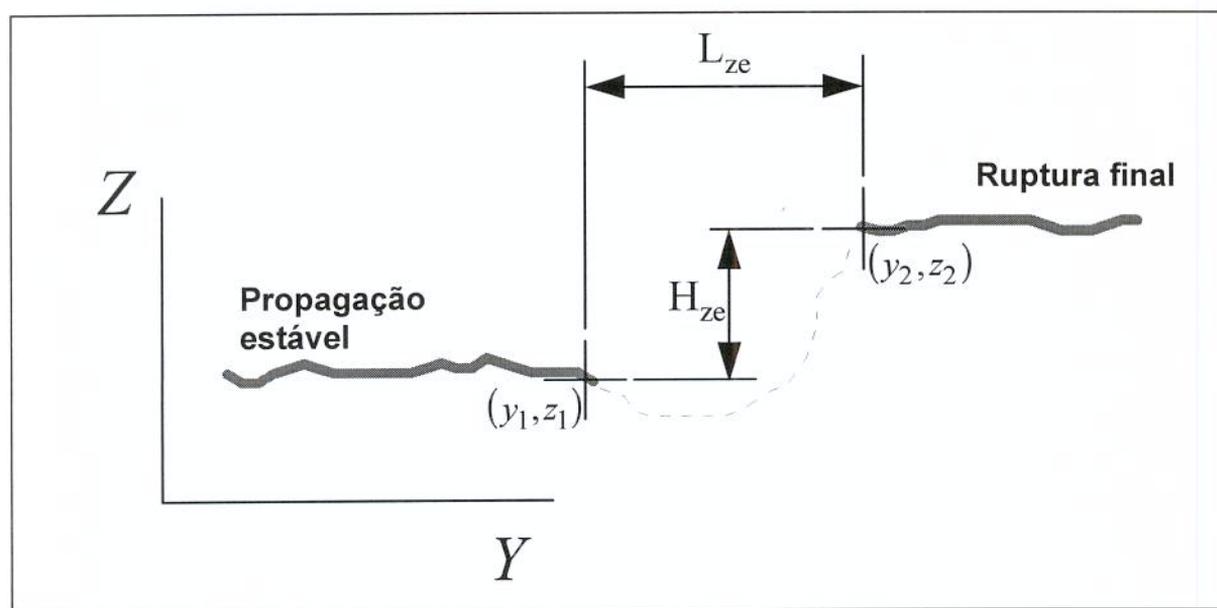


Figura 6.9 Critério adotado na literatura para medição do tamanho da zona de estiramento. (Adaptada de BROEK, 1974a)

Pelo critério de BROEK (1974a), despreza-se a presença de um vale entre os limites da região, embora, neste estudo, 55,6% dos perfis avaliados no terço central da frente da trinca apresentaram essa característica. Embora uma depressão não influa na medição da L_{ze} , altera significativamente os resultados da avaliação da H_{ze} . Dois fatores explicam a adoção desse procedimento:

- a) a dificuldade em se avaliar, por estereoscopia, elevações no interior da zona de estiramento, através de medições manuais;
- b) a maior representatividade da altura da zona de estiramento, dada como metade da abertura crítica da ponta da trinca. Nesse sentido, a H_{ze} é associada diretamente ao arredondamento produzido pelo estiramento.

Adotando esse procedimento, foram obtidas as medidas do tamanho da zona de estiramento, resumidas na tabela 6.3. Observe que a dispersão em torno da média é significativamente superior, em termos percentuais, para a medição de H_{ze} do que para L_{ze} .

Esse fato não pode ser atribuído ao programa de reconstrução tridimensional, uma vez que a ocorrência de erros de correlação foi minimizada com a estratégia de se avaliar apenas os valores junto à origem do espectro da magnitude da correlação cruzada, o que diminui a possibilidade da leitura incorreta de posições de alinhamento entre as imagens.

Assim, essa variação das medidas de altura da zona de estiramento é explicada como uma característica natural do relevo da região, dada em função da inclinação da região de propagação estável, lateralmente à orientação de crescimento da trinca, e da própria dispersão do comportamento do material com relação ao processo de ruptura dúctil.

Tabela 6.3 Medidas do tamanho da zona de estiramento, realizadas na região central (x entre 9,43 e 15,56 mm) das 3 amostras, de acordo com o critério adotado por BROEK (1974a).

	L_{ze}	H_{ze}	L_{ze}/H_{ze}
Total de medições	45	45	45
Média [μm]	12,63	5,55	3,1
Desvio Padrão [μm]	3,309 (26,2%)	3,21 (57,9%)	1,9 (62,5%)
Mínimo [μm]	6,54	1,38	0,7
Máximo [μm]	19,63	15,17	8,6

Essa forte variação no comportamento da altura da zona de estiramento é ilustrada nas figuras 6.11 e 6.12, que apresentam uma reconstrução tridimensional completa de um par estéreo (figura 6.10), obtida com a mesma resolução espacial dos perfis. Observe que há uma pronunciada variação no relevo ao longo da região de ruptura dúctil, bem como uma certa inclinação no crescimento lateral da região de propagação instável.

Embora as dispersões nas medições sejam bastante elevadas, os resultados obtidos para as medidas do tamanho da zona de estiramento, bem como para a relação L_{ze}/H_{ze} ,

um procedimento de medição mais criterioso em relação aos adotados por outros pesquisadores.



Figura 6.10 Par estéreo tomado da região central da frente da trinca da amostra 1. Imagens originais com 256 por 256 *pixels*, ampliadas em 50% para melhor visualização.

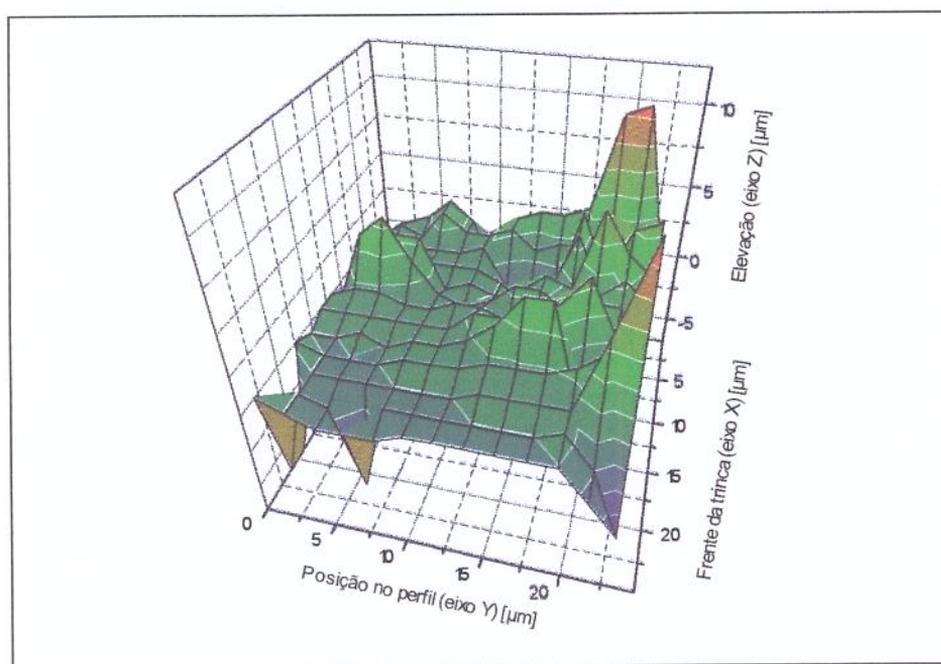


Figura 6.11 Vista em perspectiva da superfície reconstruída a partir do par estéreo da figura 6.9. (Resoluções: $0,096 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixel}}$ em x , $0,096 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixel}}$ em y e $0,690 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixel}}$ em z)

BROEK (1974a), medindo o paralaxe de forma manual sobre microfotografias, obteve valores médios de $6,7 \mu\text{m}$ para a H_{ze} e de 1,4 para $\frac{L_{ze}}{H_{ze}}$, para a liga Al 7079. Já SOKEI e FERREIRA (1994), também fazendo medições sobre papel fotográfico, obtiveram resultados

na faixa entre 8 e 12 μm para a L_{ze} da liga Al 7050, enquanto o European Group on Fracture observou valores médios da ordem de 8 μm para a L_{ze} da liga Al 2024 T351 (HEERENS *et al*, 1988).

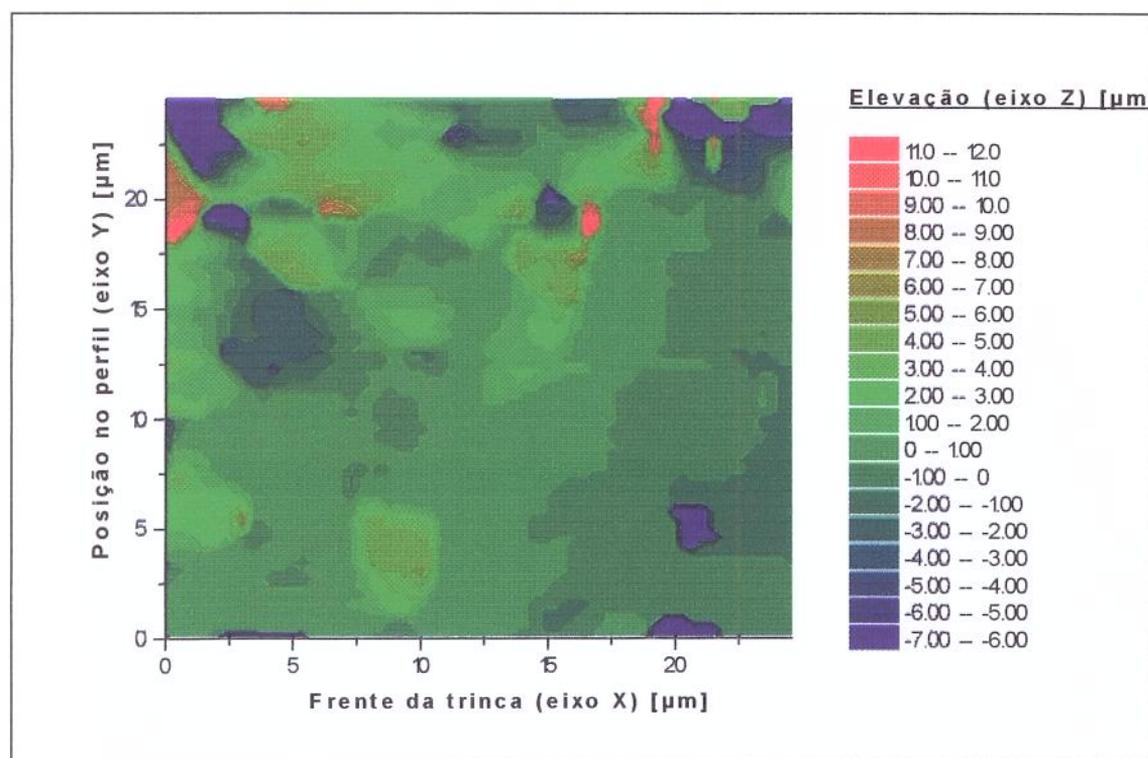


Figura 6.12 Mapa de elevações obtido a partir do par estéreo da figura 6.9.

Outro ponto importante está na dispersão dos resultados obtidos. HEERENS *et al* (1988) obtiveram dispersões de até 75% nas medições da L_{ze} feitas por 12 laboratórios ligados ao European Group on Fracture (EGF) em amostras de diversos materiais, onde 90% das medições apresentaram desvio padrão da ordem de 35%. Nesse trabalho, porém, os pesquisadores avaliaram materiais diversos, com zonas de estiramento bem maiores que as verificadas para a liga Al 7050 T73651, o que permitiu observações no microscópio com menor grau de ampliação, reduzindo a sensibilidade das medições de forma significativa.

Contudo, as medições da largura da região realizadas pelo EGF realizadas para a liga Al 2024 T351 indicaram valores médios da ordem de 8 μm , com desvio padrão superior a 50%. BROEK (1974a), por exemplo, obteve dispersões da ordem de 67,5% para a H_{ze} da liga Al 7079.

Esses dados demonstram que a adoção dos referenciais contribuiu para uma redução na dispersão dos resultados, minimizando a parcela de erro atribuída à definição visual dos

limites da zona de estiramento. Por outro lado, a grande sensibilidade da técnica desenvolvida permite afirmar que a maior fonte de dispersões nas medições da largura e da altura da zona de estiramento vem a ser a o próprio comportamento irregular de seu relevo.

6.5 Análise da geometria da zona de estiramento

6.5.1 Primeira consideração: parametrização dos perfis da zona de estiramento por H_{ze} e L_{ze}

Uma das propostas iniciais deste trabalho consistia em avaliar a geometria da zona de estiramento, que se julgava ser possível devido à medição das elevações em um número significativo de pontos no interior da zona de estiramento, graças ao uso da técnica de reconstrução tridimensional. Para analisar a geometria da região, uma vez definidos seus limites sobre os perfis obtidos e tendo em vista seus parâmetros dimensionais, foi adotado o seguinte procedimento:

- a) adotou-se, para cada perfil, o limite entre a região de propagação estável e a zona de estiramento como seu limite inferior, e o limite entre a zona de estiramento e a região de ruptura final como limite superior, eliminando todos os pontos fora desse intervalo, para cada curva amostrada.
- b) corrigiu-se todo o perfil, subtraindo de cada ponto os valores das coordenadas do limite inferior adotado no passo anterior. Dessa forma, todos os perfis passam a ter início em (0,0), desprezando-se os efeitos de curvatura da frente de propagação da trinca e de inclinações laterais do relevo, e as coordenadas do último ponto de cada perfil são dadas por (L_{ze}, H_{ze}) .
- c) corrigiu-se, para cada posição, os valores de suas coordenadas, parametrizando-se as elevações por $z_p = z/H_{ze}$ e as abscissas por $y_p = y/L_{ze}$. Desta forma, o último ponto de cada perfil parametrizado apresenta as coordenadas (1,1).
- d) verificou-se o polinômio que melhor ajustava a curva, observadas as restrições impostas pelos pontos (0,0) e (1,1) como condições de contorno para a proposição de um modelo do comportamento do perfil médio da zona de estiramento na região central das amostras.

O ajuste mais adequado foi obtido com um polinômio de 2^o grau, da forma:

$$z = (1,051 \frac{H_{ze}}{L_{ze}^2})y^2 - (0,051 \frac{H_{ze}}{L_{ze}})y \quad (6.1)$$

A figura 6.13 ilustra esse resultado. Observe que o modelo proposto na equação (6.1) sugere que a geometria média do perfil pode ser estimada a partir dos valores das dimensões da largura e altura da zona de estiramento, obtidos junto ao terço central das amostras e portanto, apresenta validade apenas para essa região, descrevendo a influência do estado de deformação plana.

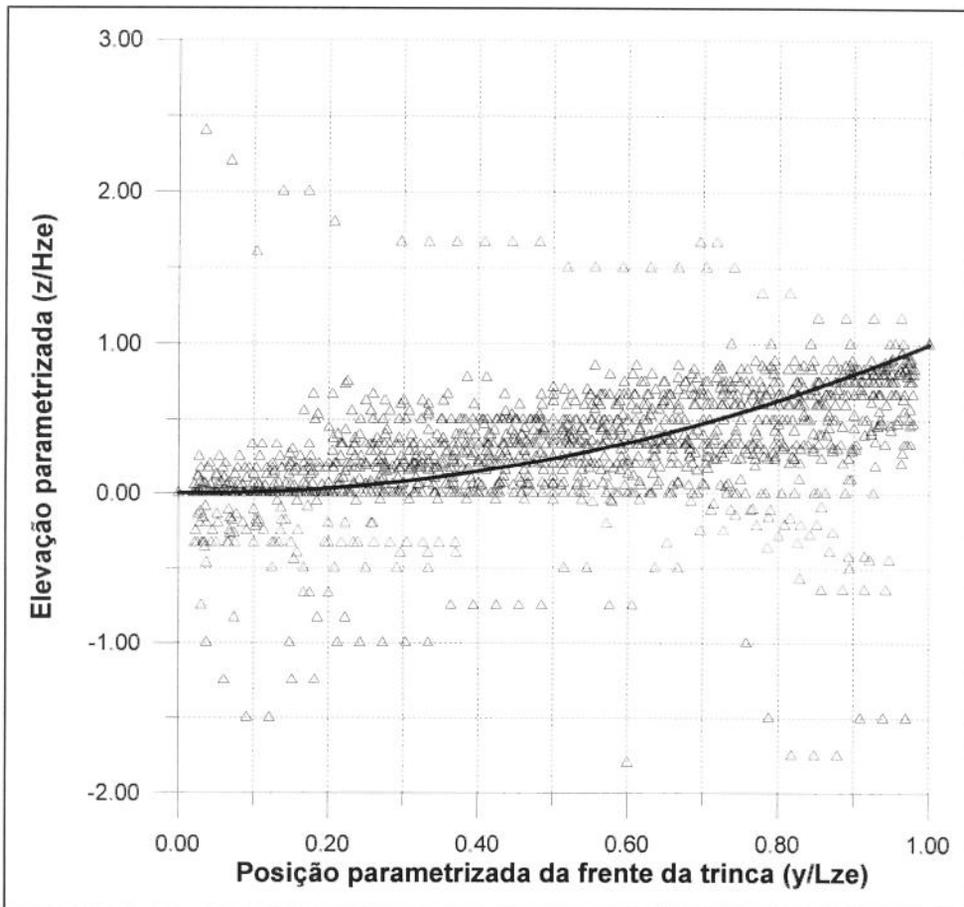


Figura 6.13 Relação entre as elevações (parametrizadas pelo critério para H_{ze} definido por BROEK) e as posições da frente da trinca (parametrizadas por L_{ze}) no interior da zona de estiramento, para perfis tomados junto ao terço central de 3 amostras.

Este modelo propõe que, observadas essas restrições, a geometria do perfil da zona de estiramento se aproxima de uma semi-parábola. Ajustando-se os perfis, um a um, por polinômios de segundo grau, obtiveram-se coeficientes de correlação (R_{cor}) acima de 0,80

para 33 dos 45 perfis avaliados (73,3%), o que é um forte indicativo da validade deste modelo.

6.5.2 Validade dos parâmetros da zona de estiramento: L_{ze} versus H_{ze}

UGUZ e MARTIN (1995) afirmam que, dada a elevada dispersão na medição das dimensões da zona de estiramento, não seria possível estabelecer uma medida representativa do tamanho da região. Efetivamente, mesmo com a adoção de critérios reprodutivos para a delimitação de suas fronteiras, a zona de estiramento apresenta-se bastante irregular, para a liga Al 7050, implicando numa grande dificuldade em se estabelecer definições precisas a respeito de suas dimensões.

Assim, não é possível empregar medidas da zona de estiramento isoladamente na avaliação da tenacidade desse material, da forma como sugeria BROEK (1974b). Mas pode-se obter uma noção bastante aproximada do CTOD se for empregado um número significativo de medições (acima de 25, como propõem PUTATUNDA e RIGSBEE, 1985).

Outra questão importante: qual parâmetro é mais representativo? L_{ze} ou H_{ze} ?

BROEK (1974a) expõe que a altura da zona de estiramento tem relação direta com o arredondamento da ponta da trinca, enquanto que a sua largura não tem significado físico tão evidente. Essa questão se torna discutível sob dois aspectos:

- a) a zona de estiramento pode apresentar vales pronunciados, que são desprezados na avaliação de H_{ze} .
- b) a dispersão nas medições de H_{ze} foi significativamente superior à observada para as medidas de L_{ze} , como mostram as tabelas 6.2 e 6.3.

A questão da presença de depressões no interior da região é bastante complexa. Como foi verificada uma elevada dispersão nos valores medidos para a altura da zona de estiramento, e o método de reconstrução tridimensional permitiu obter perfis com grande quantidade de pontos entre os limites da região, houve o interesse de investigar outra proposta de critério para a medição de H_{ze} , considerando-se a presença de vales.

Essa proposta consistia em considerar a diferença entre os extremos (máximo e mínimo) das elevações contidas no intervalo entre os limites da zona de estiramento. Nesse

caso, o ponto de mínima elevação seria dado ou pelo limite da região com a superfície formada pelo crescimento da trinca por fadiga, ou por um ponto no fundo de um vale contido na zona de estiramento. Por outro lado, o ponto de máxima elevação seria sempre representado pelo referencial situado na fronteira entre a região e a ruptura final.

Entretanto, a primeira dificuldade para a adoção desse critério estava em sua representatividade. A ocorrência de trincas secundárias ou o descolamento de precipitados e inclusões formam depressões que não podem ser consideradas, conceitualmente, como características inerentes ao relevo da zona de estiramento, uma vez que podem ser observadas indistintamente em posições aleatórias ao longo da superfície de fratura.

Então, buscou-se eliminar o efeito de sua presença através da adoção de um filtro passa-baixa, para corrigir os perfis. O filtro escolhido consistia em, para um dado ponto sobre o perfil, substituir a elevação desse ponto pela média com os quatro pontos vizinhos (isso é, dois pontos anteriores e dois posteriores). Nesse caso, o valor de um ponto é substituído pela média de 5 pontos, atenuando variações bruscas no comportamento do perfil. Como cada *pixel*, sobre as imagens de projeção, representa 0,096 μm e ao incremento de amostragem foi de 4 *pixels*, então a faixa de atenuação de 5 pontos corresponde a 1,92 μm , suficiente para eliminar a presença de trincas secundárias ou atenuar depressões e ressaltos ocasionados por partículas de segunda fase.

Como mostra a tabela 6.4, tanto o critério de se considerar o ponto de mínima elevação no interior da região, quanto o procedimento de correção desse critério por um filtro passa-baixa, não possibilitaram reduções na dispersão verificada para a medição de H_{ze} em relação aos resultados obtidos com o critério usado por BROEK (1974a), o que já era esperado em função da natureza do relevo da zona de estiramento (figuras 6.13 e 6.14).

Tabela 6.4 Comparação entre os critérios para medição de H_{ze} . Perfis amostrados junto às regiões centrais de 3 amostras (15 perfis por amostra, sendo avaliados 5 perfis em 3 posições diferentes) .

	Hze (BROEK)	Lze/Hze (BROEK)	Hze (mínima elevação)	Lze/Hze (mínima elevação)	Hze (filtro)	Lze/Hze (filtro)
Total de medições	45	45	45	45	45	45
Média [μm]	5,55	3,1	6,88	2,5	6,00	2,8
Desvio Padrão [μm]	3,21 (57,9%)	1,9 (62,5%)	4,27 (62,0%)	1,5 (61,5%)	3,68 (61,3%)	1,6 (56,4%)
Mínimo [μm]	1,38	0,7	2,76	0,6	1,80	0,6
Máximo [μm]	15,17	8,6	18,62	6,4	16,65	6,4

Por outro lado, como mostram as tabelas 6.1 e 6.3, as médias dos valores obtidos para δ_c (24 μm) e L_{ze} (12,63 μm) apontaram para a relação $\delta_c \approx 2L_{ze}$ proposta por diversos pesquisadores, como KOBAYASHI *et al* (1983) e PUTATUNDA e RIGSBEE (1985), enquanto que o valor médio de H_{ze} ficou bem distante do previsto por BROEK (1974b), onde se teria, necessariamente, $\delta_c \approx 2H_{ze}$. Além disso, a dispersão, dada pelo desvio padrão, nas medidas de L_{ze} no terço central ao longo da frente da trinca foi significativamente inferior àquela observada nas medições de H_{ze} .

Assim, para a liga Al 7050 T73651, a representatividade da largura da zona de estiramento, como parâmetro para avaliação da sua tenacidade, é, embora discutível, mais evidente que a observada na adoção de medidas de sua altura. Essa afirmativa concorda com a proposição do European Group on Fracture, que sugere a adoção da L_{ze} (HALIM *et al*, 1988), e leva a um questionamento sobre a validade do modelo proposto na equação (6.1), uma vez que os valores de H_{ze} são considerados nessa expressão.

6.5.3 Segunda consideração: Perfis parametrizados apenas por L_{ze}

A menor representatividade das medições da H_{ze} leva à proposição de outro modelo para descrever a geometria dos perfis da zona de estiramento, dependente apenas de L_{ze} . Nesse caso, o procedimento adotado para seu estudo é semelhante ao apresentado no item 6.5.1, exceto pelo fato de que o eixo das elevações não é parametrizado quanto a H_{ze} , de modo que o último ponto de cada perfil apresenta coordenadas (1, z). Assim, a única condição de contorno que deve ser observada, para a obtenção, da expressão é a de que para $y = 0, z = 0$.

O modelo obtido descreve, como no caso anterior, a condição de melhor ajuste dos pontos no interior da zona de estiramento, tomados de um total de 45 perfis medidos em 3 posições na região central em relação à espessura das 3 amostras (5 perfis por posição, 15 perfis por amostra), refletindo sua formação sob deformação plana.

Como mostra a figura 6.14, a geometria do perfil da zona de estiramento pode ser descrita pela expressão (6.2), da forma:

$$z = \frac{1,66}{L_{ze}^2} y^2 + \frac{1,49}{L_{ze}} y \quad (6.2)$$

Uma restrição a esse modelo está no próprio valor médio de H_{ze} . Quando $y = L_{ze}$, tem-se, necessariamente, $z = H_{ze} = 3,15\mu\text{m}$, que é 43,2% menor que o valor médio de H_{ze} avaliado neste trabalho ($\bar{H}_{ze} = 5,55\mu\text{m}$), embora dentro da dispersão (não-uniforme) observada nas medições. Esta restrição demonstra que, apesar da menor representatividade das medições de H_{ze} , o modelo da expressão (6.1) é mais consistente, uma vez que é preservada a relação entre os valores médios de L_{ze} e H_{ze} .

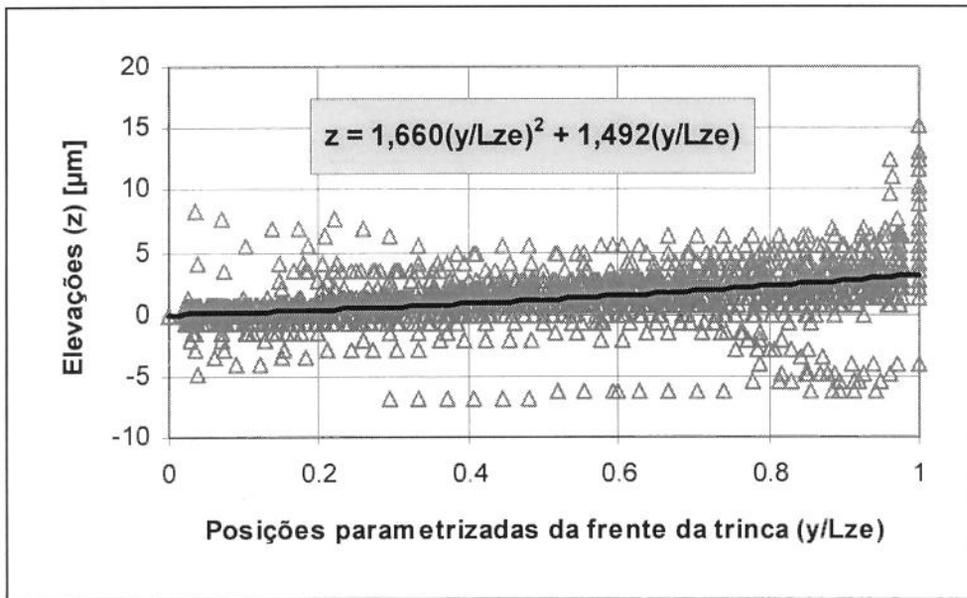


Figura 6.14 Distribuição das elevações dos perfis da zona de estiramento (tomados junto ao terço central das 3 amostras) em relação a posições da frente da trinca parametrizadas por y/L_{ze} .

De qualquer forma, as expressões (6.1) e (6.2) demonstram que o perfil médio da zona de estiramento na região sujeita ao estado de deformação plana pode ser descrito por semi-parábolas da família:

$$z = Ay^2 + By, \quad \forall y \in [0, L_{ze}]; \quad A > 0 \quad (6.3)$$

Observe que, nesses modelos, a origem do sistema cartesiano (z,y) está fixada sobre a referência para o início da zona de estiramento tomada sobre uma das superfícies formadas pelo processo de fratura.

7. Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

7.1 Conclusões

Em função das observações realizadas para o desenvolvimento da técnica de reconstrução tridimensional e dos resultados obtidos a respeito da investigação da zona de estiramento, para a liga Al 7050 T73651, as seguintes conclusões foram estabelecidas:

a) *Sobre a técnica de reconstrução tridimensional:*

- O emprego do algoritmo desenvolvido é viável, uma vez que conduz à obtenção de mapas de elevação representativos, demonstrando ter um grande potencial para a fractografia quantitativa.
- A rotina desenvolvida para a normalização dos valores de correlação cruzada,

da forma
$$N_m(\alpha, \beta) = \frac{\mathfrak{F}^{-1}\left[F^*(u, v).G(u, v)\right]_{(0,0)}}{\sqrt{\mathfrak{F}^{-1}\left[G^*(u, v).G(u, v)\right]_{(0,0)}}},$$
 apresenta-se como a

principal contribuição deste trabalho no campo da reconstrução tridimensional, tendo sido demonstrada sua eficiência na identificação da posição de alinhamento entre duas imagens de um par estereoscópico em relação a outros modelos.

b) *Sobre a zona de estiramento na liga Al 7050 T73651:*

- A análise dos perfis obtidos permitiu a definição de critérios para a identificação dos limites da zona de estiramento. A fronteira entre a região de propagação estável da trinca e a zona de estiramento é dada pelo ponto crítico mais evidente (máximo ou mínimo) tomado sobre a curva da primeira derivada do perfil, dentro de intervalo pré-definido a partir da imagem de referência do par estéreo. Já o limite entre a zona de estiramento e a superfície formada pela ruptura final é definida pelo máximo local, tomado diretamente sobre o perfil, também dentro da faixa correspondente, obtida a partir da imagem de referência. Esses critérios se mostraram eficazes para a determinação reprodutiva dos limites.
- O relevo da zona de estiramento na liga Al 7050 é extremamente acidentado, o que provoca grande dispersão nos resultados. Regiões próximas às bordas dos corpos de prova apresentaram superfícies mais complexas, com maior alternância entre elevações e depressões, que as regiões centrais, em virtude do estado de tensão plana. Assim, questiona-se a validade da proposta do European Group on Fracture, através do método EGF P1-87-D, que propõe o cômputo de medições junto às bordas para a avaliação da largura da zona de estiramento.
- Foi possível estabelecer um modelo para a geometria média dos perfis da zona de estiramento, válido somente dentro da região da superfície formada sob o estado de deformação plana. O modelo obtido sugere que o perfil médio da zona de estiramento pode ser descrito por semi-parábolas da família $z = Ay^2 + By$, tal que $y \geq 0$ e $A > 0$.
- As medidas da altura da zona de estiramento (H_{ze}) apresentaram dispersão muito superior às medidas da largura da região (L_{ze}). Assim, embora a associação entre a H_{ze} e a abertura da ponta da trinca seja mais evidente, o parâmetro L_{ze} tem maior representatividade em função de sua menor variação. Ainda, os valores médios obtidos apontaram para a relação $\delta_c \approx 2L_{ze}$, proposta na literatura.

7.2 Sugestões para os próximos trabalhos

O desenvolvimento da técnica de reconstrução tridimensional a partir do processamento digital de imagens de um par estereoscópico terá continuidade através de ações para otimização de sua eficiência e desempenho (em termos do tempo de processamento). Tais ações, sugeridas aqui para a comunidade científica e tecnológica, vêm a ser:

- Desenvolvimento de rotinas de otimização do processo de varredura, para verificação do alinhamento entre as janelas.
- Transcrição do algoritmo desenvolvido para linguagens de programação como C++ ou Fortran 90, ou mesmo para o ambiente Microsoft Visual Basic, com a eliminação da interface de interação gráfica do sistema *KHOROS* e otimização do armazenamento de dados em arquivos temporários e na memória RAM.
- Estudo da relação entre a resolução óptica de digitalização e a amostragem de pontos para obtenção de mapas de elevações, visando obter combinações ótimas para o procedimento.
- Estudo de outras técnicas alternativas para a reconstrução tridimensional do relevo de fraturas a partir do processamento digital de imagens. Nesse sentido, especial atenção está sendo dada, no momento, ao conceito de *shape-from-shading*.

Quanto ao estudo da zona de estiramento, são propostas as seguintes linhas de pesquisa:

- Aplicação da técnica a outros materiais, como aços *maraging*, aços-ferramenta e outros, visando avaliar a seguinte questão: o tamanho da zona de estiramento pode mesmo ser um parâmetro de tenacidade?
- Avaliar a geometria do perfil da zona de estiramento para outros materiais, visando determinar uma tendência de comportamento.
- Descrever o processo de formação da zona de estiramento a partir da evolução da geometria de seus perfis.

8. Referências Bibliográficas

- AL-ALI, L., FRANK, J., Resolution estimation in electron microscopy, *Optik*, v. 56, nº 1, 1980, p. 31-40
- AMMANN, J.J., HEIN, L.R.O., NAZAR, A.M., Implementation of a 3-D technique for fracture surface analysis, *Proceedings of the International Metallography Conference (MC 95)*, Colmar, França, 10-12 de maio de 1995, p. 101-106
- AMMANN, J.J., HEIN, L.R.O., NAZAR, A.M., Implementation of a 3-D technique for fracture surface analysis, *Materials Characterization*, a ser publicado
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 1290-93, *Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness*, 1993, *Annual Book of ASTM Standards*, v. 03.01, 1995
- AMERICAN SOCIETY OF METALS, *Metals Handbook: Volume 2 - Properties and Selection: Non-Ferrous Metals and Pure Alloys*, 8ª ed., OHIO: American Society of Metals, 1979, p. 126
- ARNOT, N.R., SAXTON, W.O., Improvement of cross-correlation peaks by image filtering, *Optik*, v. 53, nº 4, 1979, p. 271-279
- AVERBACH, B.L., Recent developments in quantitative fractography, *JOM*, outubro, 1990, p.9
- BADDELEY, A.J., GUNDERSEN, H.J.G., CRUZ-ORIVE, L.M., Estimation of surface area from vertical sections, *Journal of Microscopy*, v. 142 Pt 3, 1986, p. 259-276
- BARON, A.A., The relationship between fracture toughness, stretched zone width and mechanical properties in tensile test, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 49, nº 3, 1994, p. 445-450

- BASSIM, M.N., MATTHEWS, J.R., HYATT, C.V., Evaluation of fracture toughness of HSLA80 steel at high loading rates using stretch zone measurements, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 43, n° 2, 1992, pp. 297-303
- BEIL, W., CARLSEN, I.C., A combination of topographical contrast and stereoscopy for the reconstruction of surface topographies in SEM, *Journal of Microscopy*, v. 157 Pt 1, 1990, p. 127-133
- BELLANGER, M., *Traitement numérique du signal - Théorie et pratique*, Paris: Masson, 1980, 414p.
- BLEAU, A., GUISE, J., LEBLANC, A.R., A new set of fast algorithms for mathematical morphology - II: Identification of topographic features on grayscale images, *CVGIP: Image Understanding*, v. 56, n° 2, 1992, p. 210-229
- BOYDE, A., Quantitative photogrammetric analysis and qualitative stereoscopic analysis of SEM images, *Journal of Microscopy*, vol.98, Pt. 3, 1973, p. 452-471
- BOYDE, A., The perception and measurement of depth in SEM, *Scanning Electron Microscopy*, v. II, 1979, p. 67-78
- BRACEWELL, R.N., *Two-dimensional imaging*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995, 689p.
- BRIGHAM, E.O., *The fast Fourier transform and its applications*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988, 448 p.
- BROEK, D., Correlation between stretch zone size and fracture toughness, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 6, 1974a, pp.173-181
- BROEK, D., Some contributions of electron fractography to the theory of fracture, *International Metallurgical Reviews*, vol. 19, 1974b, pp. 135-182
- BROOKS, C.R., CHOUDHURY, A., *Metallurgical failure analysis*, 1^a ed., 1993, New York: McGraw-Hill, 409p.
- BROOKS, C.R., MCGILL, B.L., The application of scanning electron microscopy to fractography, *Materials Characterization*, v. 33, 1994, p. 195-243
- CHAND, G., HOLBURN, D.M., Method for crosscorrelating images in the presence of geometric distortion, *IEEE Electronics Letters*, v. 29, n° 12, 1993, p. 1078-1080
- CHEN, P., WILCOX, R.C., Stereographic technique for quantitative analysis for cleavage plane orientation, *Materials Characterization*, v. 26, 1991, p. 9-15
- CONNORS, W.C., Fatigue striation spacing analysis, *Materials Characterization*, v. 33, 1994, p. 245-253

- COSTER, M., CHERMANT, J.L., Recent developments in quantitative fractography, *International Metals Reviews*, v. 28, n^o 4, 1983, p. 228-250
- DAMM, T., WILHELMI, B., Optimum recording conditions in scanning microscopes, *Journal of Microscopy*, v. 165 Pt 1, 1992, p. 71-80
- DEFRISE, M. Solution to three-dimensional image reconstruction problem from the two-dimensional parallel projections, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 10, n^o 5, 1993, p. 869-877
- DOIG, P., SMITH, R.F., FLEWITT, P.E.J., The use of stretch zone width measurements in the determination of fracture toughness of low strength steels, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 19, n^o 4, 1984, pp. 653-664
- DONOHUE, G.W., *Image Processing - Short Course with KHOROS*, Notas de Curso, University of New Mexico, 1992
- DOWLING, N.E., *Mechanical Behaviour of Materials - Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, 1^a ed, Prentice-Hall Inc., 1993, 773p.
- DRAR, H., Dynamic initiation toughness and stretch zone, *Journal of Materials Science Letters*, v. 14, 1995, p. 88-90
- EL-SOUDANI, S.M., Theoretical basis for the quantitative analysis of fracture surfaces, *Metallography*, v. 7, 1974, p. 271-311
- EL-SOUDANI, S.M., The fundamental equation of quantitative microstructural analysis, *Metallography*, v. 8, 1975, p. 297-327
- EL-SOUDANI, S.M., On the applicability of the Tomkeieff equation to truncated multiphase systems, *Metallography*, v. 10, 1977, p. 27-41
- EL-SOUDANI, S.M., Profilometric analysis of fractures, *Metallography*, v. 11, 1978, p. 247-336
- EL-SOUDANI, S., Applications of fracture surface profilometry to fracture toughness testing, Proceedings of the International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 85), Los Angeles, CA, 21 a 23 de outubro de 1985, pp. 311-343
- EL-SOUDANI, S.M., Correction of scanning electron image distortions for specimen tilt and fracture surface roughness, *Proceedings of the International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 85)*, Los Angeles, CA, 21 a 23 de outubro de 1985, pp.232-249
- EL-SOUDANI, S.M., Quantitative fractography and fracture mechanics characterization, *JOM*, outubro, 1990, p.20-27

- FACON, J., *Processamento e análise de imagens*, 1^a ed., Córdoba: Universidade Nacional de Córdoba - VI Escola Brasileiro-Argentina de Informática, 1993, 198p.
- FOSTER, B., FOOKES, B., Image analysis for materials science, *Advanced Materials and Processes*, v. 149, n^o 2, 1996, p. 23-25
- FRANK, J., McEWEN, B.F., *Electron tomography: Three-dimensional imaging with the transmission electron microscope*, New York: Plenum Press, 1992, Cap. 9: Alignment by cross-correlation, p. 205-213
- GILMORE, C.M., *et al.*, Influence of thickness and temperature on stretched zone size in J_{Ic} tests, *Metal Science*, v. 17, 1983, p. 177-185
- GOKHALE, A.M., DRURY, W.J., A general method for estimation of fracture surface roughness: Part II. Practical considerations, *Metallurgical Transactions A*, v. 21A, 1990, p. 1201-1207
- GOKHALE, A.M., UNDERWOOD, E.E., A general method for estimation of fracture surface roughness: Part I. Theoretical aspects, *Metallurgical Transactions A*, v. 21A, 1990, p. 1193-1199
- GOLDSTEIN, J.I., *et al.*, *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: a text for biologists, materials scientists, and geologists*, 2^a ed., New York: Plenum Press, 1992, 820 p.
- GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E., *Digital image processing*, 2^a ed., Reading: Addison Wesley, 1992, 716 p.
- GRIFFIS, C.A., SPRETNAK, J.W., A suggestion on the nature of the “plastic stretch zone” in prefatigued plane strain fracture toughness specimens, *Metallurgical Transactions*, v. 1, 1970, p. 550-551
- HALIM, A., DAHL, W., HAGEDORN, K.E., Measurements of stretched zone width (SZW) - a round robin program of European Group on Fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 31, n^o 5, 1988, pp. 857-866
- HEERENS, J., CORNEC, A., SCHWALBE, K.H., Results of a round robin on stretch zone width determination, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, v. 11, n^o 1, 1988, p. 19-29
- HEIN, L.R.O., NAZAR, A.M.M., QUEZADO, P.C.M., AMMANN, J.J., Visualização tridimensional de aspectos fractográficos de materiais metálicos, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 11, 1994, Águas de São Pedro, *Anais...*, São Paulo: EPUSP, 1994, v. 1, p. 163-166

- HIBBARD, L.S., *et al.*, Computed three-dimensional reconstruction of median-eminence capillary modules: image alignment and correlation, *Journal of Microscopy*, v. 171 Pt. 1, 1993 p. 39-56
- HOELZER, D.T., ALI, J.A., EBRAHIMI, F., A study of the correlation between crack tip opening displacement (CTOD) and stretch zone width (SZW), *Scripta Metallurgica*, v. 20, 1986, p. 1575-1580
- HORN, B.K.P., BROOKS, M.J., The variational approach to shape from shading, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, v. 33, 1986, p. 174-208
- HORN, B.K.P., Height and gradient from shading, *International Journal of Computer Vision*, n^o 5, 1990, p. 584-595
- HORNBOGEN, E., Fractals in microstructure of metals, *International Materials Reviews*, v. 34, n^o 6, 1989, p. 277-296
- HOWELL, P.G.T., A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry, *Scanning Electron Microscopy*, v. I, 1975, p. 199-206
- HOWELL, P.G.T., BOYDE, A., Comparison of various methods for reducing measurements from stereo-pair scanning electron micrographs to "real 3-D data", *Scanning Electron Microscopy*, v. I, 1972, p. 233-240
- HYATT, C.V., MATTHEWS, J.R., Variation of stretch zone width with J, loading rate, temperature and pre-crack depth, *International Journal of Fracture*, n^o 66, 1994, p. 19-32
- JAIN, A.K., *Fundamentals of digital image processing*, 1^a ed., Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989, 569 p.
- JIANG, X., CHU, W., HSIAO, C., Relationship between J_{Ic} and fractal value of fracture surface of ductile materials, *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 42, n^o 1, 1994, p. 105-108
- KANEDA, K., *et al.*, Image processing and synthesis for extended depth of field of optical microscopes, *Visual Computer*, v. 8, 1992, p. 351-360
- KIM, B., BURGER, P., Depth and shape from shading using the photometric stereo method, *CVGIP: Image Understanding*, v. 54, n^o 3, 1991, p. 416-427
- KOBAYASHI, H., NAKAMURA, H., NAKAZAWA, H., Evaluation of blunting line and elastic-plastic fracture toughness, In: *Elastic-plastic fracture: Second Symposium, Volume II - Fracture resistance curves and engineering applications*, ASTM STP 803 -

- SHIH, C.F., GUDAS, J.P. (eds.), Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1983, p. II-420-II-438
- KOBAYASHI, T., SHOCKEY, D.A., Fracture analysis via FRASTA, *Advanced Materials and Processes*, n^o 12, 1991, p. 24-32
- KOBAYASHI, T., SHOCKEY, D.A., FRASTA: a new way to analyze fracture surfaces, *Advanced Materials and Processes*, n^o 11, 1991, p. 28-34
- KOBAYASHI, T. *et al.*, Deducing crack history in an aged boiler tube from fracture surface topography, *Journal of Testing and Evaluation*, v. 22, n^o 4, 1994, p. 309-317
- KOENIG, G. *et al.*, Digital stereophotogrammetry for processing SEM data, *Scanning*, v. 9, 1987, p. 185-193
- KOLEDNIK, O., Loading conditions may influence the shape of J- Δa curves, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 41, n^o 2, 1992, p. 251-255
- KOLEDNIK, O., STÜWE, H.P., The stereophotogrammetric determination of critical crack tip opening displacement, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 21, n^o 2, 1985, p. 145-155
- KRASOWSKY, A.J., VAINSHTOK, V.A., On a relationship between stretched zone parameters and fracture toughness of ductile structural steels, *International Journal of Fracture*, vol. 17, n^o 6, 1981, pp. 579-592
- KUMAR, B.V.K., DICKEY, F.M., DeLAURENTIS, J.M., Correlation filters minimizing peak location errors, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 9, n^o 5, 1992, p. 678-682
- LANDES, J.D., BEGLEY, J.A., The results from J-integral studies: An attempt to establish a J_{Ic} testing procedure, in *Fracture Toughness, STP 514*, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1974, p. 170-186
- LANDES, J.D., The blunting line in elastic-plastic fracture, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, v. 18, n^o 11, 1995, p. 1289-1297
- LEE, K.M., KUO, C.C.J., Surface reconstruction from photometric stereo images, *Journal of Optical Society of America A*, v.10, n^o 5, 1993, p. 855-868
- LEE, K.M., KUO, C.C.J., Shape from shading with perspective projection, *CVGIP: Image Understanding*, v. 59, n^o 2, 1994, p. 202-212
- LEI, W., CHEN, B., Fractal characterization of some fracture phenomena, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 50, n^o 2, 1995, p. 149-155

- LI, X., *et al.*, Quantitative analysis of fracture surface by roughness and fractal method, *Scripta Metallurgica et Materialia*, v. 33, n^o 5, 1995, p. 803-809
- LIU, G., Applied stereology in materials science and engineering, *Journal of Microscopy*, v. 171 Pt. 1, 1993, p. 57-68
- LIU, Q., VARGA, T., The relationship between CTOD, J and microstructural inhomogeneity, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 49, n^o 3, 1994, p. 435-444
- LOUIS, P., GOKHALE, A.M., Can the average particle section size in a metallographic plane be larger than the true average particle size in a three-dimensional microstructure?, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 26A, 1995, p. 1741-1744
- LYMAN, C.E. *et al.*, *Scanning electron microscopy, x-ray microanalysis, and analytical electron microscopy - A laboratory workbook*, New York: Plenum Press, 1990, 407 p.
- MANDELBROT, B.B., PASSOJA, D.E., PAULLAY, A.J., Fractal character of fracture surface of metals, *Nature*, n^o 308, 1984, p. 721-722
- MAUNE, D.F., Photogrammetric self-calibration of scanning electron microscopes, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 42, 1976, p. 1161-1172
- MILLS, W.J., On the relationship between stretch zone formation and the J integral for high strain-hardening materials, *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 9, n^o 1, 1981, p. 56-62
- MIYAMOTO, M., KIKUCHI, M., KAWAZOE, T., A study on the ductile fracture of Al-alloys 7075 and 2017, *International Journal of Fracture*, v. 42, 1990, p. 389-404
- MORRISON, J., KARISALLEN, K.J., An experimental comparison of J and CTOD estimation formulas, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 51, n^o 1, 1995, p. 145-149
- MU, Z.Q., LUNG, C.W., Studies on fractal dimension and fracture toughness of steel, *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 21, 1988, p. 848-850
- OGAWA, T., TOKAJI, K., OHYA, K., The effect of microstructure and fracture toughness on fatigue crack propagation in a Ti-6Al-4V alloy, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, v. 16, n^o 9, 1993, p. 973-982
- OHJI, K., OTSUKA, A., KOBAYASHI, H., Evaluation of several J_{Ic} testing procedures recommended in Japan, In: *Elastic-plastic fracture: Second Symposium, Volume II - Fracture resistance curves and engineering applications*, ASTM STP 803 - SHIH, C.F., GUDAS, J.P. (eds.), Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1983, p. II-398-II-419

- OHTSUKA, N., *et al.*, Application of fracture surface topographic analysis technique to thermal fatigue crack extension in stainless steel vessel, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 49, n° 6, 1994, p. 859-869
- OLIENSIS, J., Shape from shading as a partially well-constrained problem, *CVGIP: Image Understanding*, v. 54, n° 2, 1991, p. 163-183
- ONAKA, S., Determination of the aspect ratio of a spheroidal particle by stereo observation, *Materials Characterization*, v. 34, 1995, p. 167-172
- PANDEY, R.K., SUNDARAM, P., KUMAR, A.N., A stretched zone method for CTOD evaluation, *International Journal of Fracture*, vol. 47, 1991, pp. R29-R32
- PANDEY, R.K., SUNDARAM, P., KUMAR, A.N., Critical assessment of methods for J_{Ic} determination, *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 20, n° 2, 1992, p. 106-113
- PICKENS, J.R., GURLAND, J., Metallographic characterization of fracture surface profiles on sectioning planes. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR STEREOLOGY, 4, 1976, National Bureau of Standards Special Publication 431, 1976, p. 269-272
- PISARENKO, G.S., *et al.*, The combined micro- and macro-fracture mechanics approach to engineering problems of strength, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 28, n° 5/6, 1987, pp. 539-554
- PLUVINAGE, G., LANVIN, A., Stretch zone geometrical measurement, a particular way to measure fracture toughness, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol. 16, n° 9, 1993, pp. 955-972
- PRESS, W.H., *et al.*, *Numerical recipes in FORTRAN - The art of scientific computing*, 2^a ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1992, 963 p.
- PRESTON, K., *et al.*, Three-dimensional reconstruction of the human renal glomerulus, *Journal of Microscopy*, v. 177 Pt. 1, 1995 p. 7-17
- PRETEUX, F., OECONOMOS, J.N., CHAPPELIER, J.C., Caractérisation de la fracturation d'une demi-sphère métallique en expansion par analyse d'image, *Journal de Physique IV*, v. 1, 1991, p. C3-459 - C3-464
- PREZA, C., *et al.*, Regularized linear method for reconstruction of three-dimensional microscopic objects from optical sections, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 9, n° 2, 1992, p. 219-228
- PUTATUNDA, S.K., RIGSBEE, J.M., Influence of specimen size on the crack-opening stretch zone, *Materials Science and Engineering*, n° 70, 1985, p. 111-122

- PUTRA, I.S., SCHIJVE, J., Crack opening stress measurements fo surface cracks in 7075-T6 aluminium alloy plate specimen through electron fractography, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, v. 15, n^o 4, 1992, p. 323-338
- RANGANATH, V.R., PANDEY, R.K., KUMAR, A.N., A comparative study of various approaches for CTOD toughness evaluation, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 37, n^o 5, 1990, p. 1059-1069
- RICHARDS, J.A., *Remote sensing digital image analysis*, Berlin: Springer-Verlag, 1986, 386p.
- ROBERTS, S.G., PAGE, T.F., A microcomputer-based system for stereogrammetric analysis, *Journal of Microscopy*, v. 124 Pt. 3, 1981, p. 77-88
- RUSS, J.C., *et al.*, SEM low magnification stereoscopic technique for mapping surface contours: application to measurement of volume differences in human teeth due to polishing, *Journal of Microscopy*, v. 144 Pt. 3, 1986, p. 329-338
- RUSS, J.C., *Computer-assisted microscopy - The measurement and analysis of images*, New York: Plenum Press, 1990, 453p.
- RUSS, J.C., Computer-aided quantitative microscopy, *Materials Characterization*, v. 27, 1991, p. 185-197
- RUSS, J.C., *The image processing handbook*, Boca Raton: CRC Press, 1995, 674p.
- SAXTON, W.O., FRANK, J., Motif detection in quantum noise-limited electron micrographs, *Ultramicroscopy*, v. 2, 1977, p. 219-227
- SAXTON, W.O., Accurate alignment of sets of images, *Journal of Microscopy*, v. 174 Pt. 2, 1994, p. 61-68
- SCHALKOFF, R., *Pattern recognition - Statistical, structural and neural approaches*, 1^a ed., New York: John Wiley, 1992, 364p.
- SCHULZ, T.J., SNYDER, D.L., Image recovery from correlations, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 9, n^o 8, 1992, p. 1266-1272
- SCHWALBE, K.H., NEALE, B.K., INGHAM, T., Draft EGF recommendations for determining the fracture resistance of ductile materials: EGF Procedure EGF P1-87D, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol. 11, n^o 6, 1988, pp. 409-420
- SCHWALBE, K.H., *et al.*, Validation of the fracture mechanics test method EGF P1-87D (ESIS P1-90 / ESIS P1-92), *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, v. 16, n^o 11, 1993, p. 1231-1284

- SEGMAN, J., Fourier cross correlation and invariance transformations for an optimal recognition of functions deformed by affine groups, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 9, nº 6, 1992, p. 895-902
- SHAO, M., *et al.*, Reconstructing a 3-D depth map from one or more images, *CVGIP: Image Understanding*, v. 53, nº 2, 1991, p. 219-226
- SHAW, P.J., Three-dimensional optical microscopy using tilted views, *Journal of Microscopy*, v. 158 Pt 2, 1990, p. 165-172
- SILVA, F.A.S., *Aplicação das técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de materiais*, Tese de Doutorado, Campinas: UNICAMP, 1996, 288 p.
- SMITH, K.C.A., *et al.*, Gradient image processing using an on-line digital computer, *Scanning Electron Microscopy*, v. 1, 1977, p. 49-56
- SOKEI, C. R., FERREIRA, I., Correlação entre os valores de Tenacidade à Fratura da Liga de Alumínio 7050 T76, em Termos do Parâmetro COD e a Zona Estirada, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 11, 1994, Águas de São Pedro, *Anais...*, São Paulo: EPUSP, 1994, v. 1, p. 187-190
- SRINIVAS, M., MALAKONDAIAH, G., RAMA RAO, P., Influence of polycrystal grain size on fracture toughness of and fatigue threshold in Armco iron, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 28, nº 5/6, 1987, pp. 561-576
- SRINIVAS, M., KAMAT, S.V., RAMA RAO, P., A fractographic technique for the estimation of initiation fracture toughness J_{Ic} for ductile materials, *Journal of Testing and Evaluation*, v. 22, nº 4, 1994, p. 302-308
- SZELISKI, R., Fast shape from shading, *CVGIP: Image Understanding*, v. 53, nº 2, 1991, p. 129-153
- UGUZ, A., MARTIN, J.W., A note on stretch zones in an Al-Zn-Mg alloy, *Materials Characterization*, v. 34, 1995, p. 217-220
- UNDERWOOD, E.E., BANERJI, K., Quantitative fractography. In: ASM, *Metals Handbook - Volume 12: Fractography*. Metals Park: American Society for Metals, 1987. Cap. 7: Quantitative Fractography, p. 193-210 (a)
- UNDERWOOD, E.E., BANERJI, K., Fractal analysis of fracture surfaces. In: ASM, *Metals Handbook - Volume 12: Fractography*. Metals Park: American Society for Metals, 1987. Cap. 7: Quantitative Fractography, p. 211-215 (b)
- UNDERWOOD, E.E., The new quantitative fractography for analyzing metallic surfaces, *JOM*, 1990, p. 10-15

- VAEZY, S., CLARK, J.I., Quantitative analysis of the microstructure of the human cornea and sclera using 2-D Fourier methods, *Journal of Microscopy*, v. 175 Pt 2, 1994, p. 93-99
- VAN HEEL, M., Similarity measures between images, *Ultramicroscopy*, v. 21, 1987, p. 95-100
- VANDER VOORT, G.F., *Metallography - Principles and Practice*, 1^a ed., New York: McGraw-Hill, 1984, 752p.
- WASÉN, J., HAMBERG, K., KARLSSON, B., The influence of grain size and fracture surface geometry on the near-threshold fatigue crack growth in ferritic steels, *Materials Science and Engineering A*, n^o 102, 1988, p. 217-226
- WOJNAR, L., KUMOSA, M., Advanced quantitative analysis of fracture surfaces, *Materials Science and Engineering*, A128, 1990, p. 45-53
- WRIGHT, K., KARLSSON, B., Topographic quantification of non-planar localized surfaces, *Journal of Microscopy*, v. 130 Pt 1, 1983, p. 37-51
- YELLOTT, J.I., IVERSON, G.J., Uniqueness properties of higher-order autocorrelation functions, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 9, n^o 3, 1992, p. 388-404
- ZE-JUN, D., SHIMIZU, R., Theoretical study of the ultimate resolution of SEM, *Journal of Microscopy*, v. 154 Pt 3, 1989, p. 193-207

Índice de Citações**A**

AL-ALI.....	69
ALI.....	68
AMMANN.....	31; 54
AMOZOVI.....	87
ARNOT.....	68; 69
ASM.....	35
ASTM.....	36; 38
AVERBACH.....	26

B

BADDELEY.....	25
BANERJI.....	20; 21; 25
BARON.....	12; 13
BASSIM.....	8; 15; 87
BEGLEY.....	13; 15
BEIL.....	27
BELLANGER.....	73
BLEAU.....	32
BOYDE.....	40; 43; 45
BRACEWELL.....	60
BRIGHAM.....	62
BROEK.....	6; 7; 10; 11; 41; 78; 79; 84; 85; 87; 89; 93; 94
BROOKS.....	3; 28; 38; 43
BURGER.....	28

C

CARLSEN.....	27
CHAND.....	67; 68
CHEN.....	26; 30
CHERMANT.....	23; 30
CHOUDHURY.....	3; 43
CLARK.....	70
CONNORS.....	33
COSTER.....	23; 30

D

DAMM.....	44
DEFRISE.....	26
DOIG.....	7; 10
DONOHUE.....	46; 55
DOWLING.....	11
DRAR.....	8; 9; 86
DRURY.....	24

E

EL-SOUDANI.....	5; 19; 20; 21; 23; 25; 39; 43; 50
-----------------	-----------------------------------

F

FACON.....	29
FERREIRA.....	78; 89
FOOKES.....	1
FOSTER.....	1
FRANK.....	68; 69

G

GILMORE.....	8; 83
GOKHALE.....	23; 24; 27
GOLDSTEIN.....	44
GONZALEZ.....	58; 60; 65
GRIFFIS.....	4
GURLAND.....	21

H

HALIM.....	16; 95
HEERENS.....	17; 90
HEIN.....	27
HIBBARD.....	69
HOELZER.....	8
HOLBURN.....	67; 68
HORN.....	27; 28
HORNBOGEN.....	25

HOWELL 40; 52
 HYATT 8; 86

I

IVERSON 68

J

JAIN 59
 JIANG 26

K

KANEDA 26
 KARISALLEN 13
 KARLSSON 23
 KIM 28
 KOBAYASHI 86
 KOBAYASHI, H. 14
 KOBAYASHI, T. 33
 KOENIG 31; 63
 KOLEDNIK 16; 86
 KRASOWSKY 7; 8; 12
 KUMAR 69
 KUMOSA 23
 KUO 28

L

LANDES 13; 15
 LANVIN 7; 9; 12; 16; 87
 LEE 28
 LEI 26
 LI 24
 LIU 13; 20
 LOUIS 27
 LUNG 26
 LYMAN 43

M

MANDELBROT 25
 MARSCHALL 33
 MARTIN 81; 87; 93

MATTHEWS 8; 86
 MAUNE 39
 McEWEN 69
 McGILL 38
 MILLS 14; 15
 MIYAMOTO 33
 MORIN 33
 MORRISON 13
 MU 26

O

OGAWA 29
 OHJI 16
 OHTSUKA 33
 OLIENSIS 27

P

PAGE 30
 PANDEY 7; 10; 15
 PICKENS 21
 PISARENKO 8
 PLUVINAGE 7; 9; 12; 16; 87
 PRESS 62
 PRESTON 58
 PRETEUX 32
 PREZA 26
 PUTATUNDA 8; 86; 93
 PUTRA 33

R

RANGANATH 11
 RICHARDS 73
 RIGSBEE 8; 86; 93
 ROBERTS 30
 ROSENFELD 33
 RUSS 26; 27; 30; 31; 67; 69; 75

S

SAXTON 58; 68; 69
 SCHALKOFF 57

SCHIJVE.....	33
SCHULZ.....	68
SCHWALBE.....	1; 16; 51; 72; 83
SEGMAN.....	69
SHAO.....	28
SHAW.....	69
SHIMIZU.....	44
SHOCKEY.....	33
SILVA.....	56
SMITH.....	27
SNYDER.....	68
SOKEI.....	78; 89
SPRETNAK.....	4
SRINIVAS.....	6; 9; 15; 86; 87
STÜWE.....	86
SZELISKI.....	27

U

UGUZ.....	81; 87; 93
UNDERWOOD.....	20; 21; 23; 24; 25; 32; 33

V

VAEZY.....	70
VAINSHTOK.....	7; 8; 12
VAN HEEL.....	69
VANDER VOORT.....	19; 20
VARGA.....	13

W

WASÉN.....	23
WILCOX.....	30
WILHELMI.....	44
WOJNAR.....	23
WOODS.....	58; 60; 65
WRIGHT.....	23

Y

YELLOT.....	68
-------------	----

Z

ZE-JUN.....	44
-------------	----