

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Caracterização da Superfície de Fratura Gerada por Fadiga em
Soldas Subaquáticas Molhadas

Autora: Natália Maia Fonseca

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Coorientador: Prof. Ariel Rodríguez Arias

Fevereiro/2018

Natália Maia Fonseca

Caracterização da Superfície de Fratura Gerada por Fadiga em Soldas Subaquáticas Molhadas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Metalurgia de transformação

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Coorientador: Prof. Ariel Rodríguez Arias

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2018

Para meus pais

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio de sempre.

Ao meu orientador, professor Paulo Modenesi, pela orientação, apoio, disponibilidade e pelos muitos ensinamentos.

Ao Ariel pela ajuda e esclarecimentos.

Ao Centro de Microscopia, principalmente aos professores Wagner e Karla pela colaboração, ao Marcelo, Priscila e Henrique pelas análises pelo MEV e à Karina e Raquel pelo suporte na preparação das amostras.

Ao professor Marcelo Câmara do Departamento de Engenharia Mecânica e ao Anderson pela execução das análises por perfilometria de contato no Laboratório de Superfícies.

Ao professor Dagoberto por disponibilizar o seu laboratório para algumas análises no estereomicroscópio.

A CAPES pelo apoio financeiro

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| LISTA DE FIGURAS | vi |
| LISTA DE TABELAS | ix |
| LISTA DE NOTAÇÕES | x |
| RESUMO | xi |
| ABSTRAT | xii |
| 1 Introdução | 1 |
| 2 Justificativa e Objetivos | 3 |
| 3 Revisão bibliográfica | 4 |
| 3.1 Propagação de trincas por fadiga em materiais porosos | 4 |
| 3.2 Métodos de análise da superfície de fratura | 7 |
| 3.2.1 Fractografia | 8 |
| 3.2.2 Estereofotogrametria via MEV | 9 |
| 3.2.3 Avaliação da rugosidade da superfície | 14 |
| 3.2.3.1 Parâmetros de textura superficial em análise bidimensional | 14 |
| 3.2.3.2 Parâmetros de textura superficial em análise tridimensional | 15 |
| 3.2.3.3 Filtragem | 17 |
| 3.2.3.4 Caracterização fractal | 19 |
| 3.2.3.5 Perfilometria | 21 |
| 4 Materiais e Métodos | 22 |
| 4.1 Introdução | 22 |
| 4.2 Materiais e equipamentos | 22 |
| 4.2.1 Materiais | 22 |
| 4.2.2 Equipamentos | 24 |
| 4.3 Metodologia | 25 |
| 4.3.1 Mapeamento dos corpos de prova | 25 |
| 4.3.2 Coleta das imagens estereoscópicas | 26 |
| 4.3.3 Reconstrução via MeX | 27 |
| 4.3.4 Comparação com resultados de perfilometria | 28 |
| 5 Resultados e Discussão | 29 |
| 5.1 Características das superfícies de fratura | 29 |
| 5.2 Definição das regiões de análise | 31 |
| 5.3 Reconstrução via MeX | 36 |
| 5.4 Comparação com resultados de perfilometria | 44 |
| 5.5 Caracterização das superfícies reconstruídas | 52 |
| 6 Conclusões | 60 |
| 7 Relevância dos resultados | 62 |
| 8 Sugestões para trabalhos futuros | 63 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| APÊNDICE A | 69 |
| APÊNDICE B | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Representação do comportamento do crescimento da trinca por fadiga _____ | 6 |
| Figura 3.2: Definição geométrica na superfície da amostra relativa ao ponto P: (a) plano focal do MEV e (b) consequência da inclinação eucêntrica. A distância de trabalho, d , não está mostrada em escala _____ | 10 |
| Figura 3.3: Superfície de fratura de um ferro fundido nodular reconstruída tridimensionalmente pelo software MeX _____ | 12 |
| Figura 3.4: Análise quantitativa do perfil da superfície de fratura mostrada na Figura 3.3 ____ | 12 |
| Figura 3.5: Influência do valor do filtro <i>cut-off</i> . Exemplos de um perfil primário e perfis de rugosidade com diferentes valores de <i>cut-off</i> _____ | 18 |
| Figura 3.6: Gráfico da área relativa <i>versus</i> a resolução lateral para obtenção da dimensão fractal _____ | 20 |
| Figura 4.1: Corpos de prova de fadiga de solda subaquática selecionados, na ordem CC10, RC10, CC90 e RC90 _____ | 23 |
| Figura 4.2: Amostra de níquel microssinada com sulcos de 30 e 50 micrômetros de profundidade usada na verificação da coordenada z dos modelos reconstruídos via MeX. A avaliação foi realizada na área marcada de 2x3 mm (amostra fornecida pelo Prof. Marcelo Câmara do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG) _____ | 24 |
| Figura 5.1: Mapeamento dos corpos de prova: (a) cp CC10, (b) cp RC10, (c) cp CC90 e (d) cp RC90 (os números acima da imagem indicam as posições em que os valores de ΔK foram mapeados, conforme Tabela 5.1; as dimensões dos corpos de prova também são apresentadas) _____ | 31 |
| Figura 5.2: Esquema mostrando a definição dos locais para análise _____ | 33 |
| Figura 5.3: Formato simétrico e assimétrico da frente da trinca durante propagação por fadiga _____ | 33 |
| Figura 5.4: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp CC10 (a seta indica a direção de propagação da trinca) _____ | 34 |
| Figura 5.5: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp RC10 (a seta indica a direção de propagação da trinca) _____ | 34 |
| Figura 5.6: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp CC90 (a seta indica a direção de propagação da trinca) _____ | 35 |
| Figura 5.7: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp RC90 (a seta indica a direção de propagação da trinca) _____ | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.8: Diferenças nos modelos construídos a partir de trios de imagens com ± 5 e $\pm 10^\circ$ de inclinação, respectivamente: (a) região RC90/12a, mostrando elevações verticais semelhantes para ambos os ângulos e (b) região CC10/41a, mostrando elevações verticais consideravelmente distintas _____ | 39 |
| Figura 5.9: Exemplo de modelo tridimensional em que houve erro no processo de reconstrução pelo software. Modelo da posição CC90/20b obtido com $\pm 5^\circ$ de inclinação, mostrando inversão da topografia (as setas indicam algumas regiões que deveriam ser representadas como poros, como pode ser visto comparando com a imagem da Figura 5.6) _____ | 41 |
| Figura 5.10: Modelo tridimensional da posição CC10/32a obtido com ± 5 e $\pm 10^\circ$ de inclinação em que houve erro no processo de reconstrução pelo software, observa-se que a coordenada z está exagerada na segunda imagem _____ | 42 |
| Figura 5.11: Vista frontal da região reconstruída da amostra de Ni: (a) antes e (b) após ajuste no <i>Workpiece Coordinate System</i> _____ | 43 |
| Figura 5.12: Vista superior-frontal-lateral direita da superfície de fratura da posição RC90/25b: (a) antes e (b) após ajuste no <i>Workpiece Coordinate System</i> _____ | 43 |
| Figura 5.13: Topografia tridimensional obtida pelo perfilômetro da amostra de Ni microssinada: (a) região inspecionada de 2x3 mm e (b) zoom em uma região de 1,3x0,5 mm _____ | 45 |
| Figura 5.14: Modelo tridimensional reconstruído para a amostra de Ni microssinada a partir do MeX _____ | 45 |
| Figura 5.15: Imagem obtida pelo MEV da região selecionada da reconstrução da Figura 5.14 _____ | 45 |
| Figura 5.16: Referências para a obtenção dos perfis de rugosidade para extração dos parâmetros para a amostra de Ni: (a) perfilômetro de contato (as linhas tracejadas vermelhas indicam a região em comum com as análises feitas pelo MeX), e (b) MeX _____ | 46 |
| Figura 5.17: Topografia tridimensional obtida pelo perfilômetro da superfície de fratura da região RC10/25a, mostrada na Figura 5.5 _____ | 47 |
| Figura 5.18: Modelo tridimensional reconstruído para a superfície de fratura região RC10/25a com ângulo de inclinação de: (a) $\pm 5^\circ$ e (b) $\pm 10^\circ$ _____ | 48 |
| Figura 5.19: Referências para a obtenção dos perfis de rugosidade para extração dos parâmetros para a região RC10/25a: (a) perfilômetro de contato, (b) MeX ± 5 e (c) MeX ± 10 _____ | 49 |
| Figura 5.20: Parâmetros de rugosidade Rq e Sq para as regiões reconstruídas com ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$ _____ | 51 |
| Figura 5.21: Razão da área real pela área projetada para as regiões reconstruídas com ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$ _____ | 52 |
| Figura 5.22: Comparação entre os parâmetros de perfil de amplitude Ra e Rq e seus equivalentes superficiais Sa e Sq _____ | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.23: Relação entre os parâmetros S_a e S_q e ΔK para as superfícies avaliadas das soldas nas profundidades de: (a) 10 m e (b) 90 m | 55 |
| Figura 5.24: Relação entre a razão entre as áreas medida e projetada e ΔK para as superfícies avaliadas | 55 |
| Figura 5.25: Relação entre a rugosidade representada pelos parâmetros de textura superficial S_a e S_q e a quantidade de poros presente nas regiões avaliadas | 56 |
| Figura 5.26: Relação entre a dimensão fractal e o ΔK | 58 |
| Figura 5.27: Relação entre a dimensão fractal e o tamanho da trinca | 58 |
| Figura 5.28: Relação entre a dimensão fractal e a quantidade de poros presente nas regiões avaliadas | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1: Seleção do filtro <i>cut-off</i> (ISO 4288, ASME B46.1) ⁽³⁴⁾ _____ | 18 |
| Tabela 4.1: Condições dos corpos de prova selecionados _____ | 23 |
| Tabela 5.1: Valores de ΔK nas posições indicadas pelos valores numéricos na Figura 5.1 (a distância a (tamanho da trinca) foi medida com relação à linha do entalhe) _____ | 32 |
| Tabela 5.2: Codificação para as regiões de interesse _____ | 32 |
| Tabela 5.3: Porcentagem de poros nas regiões das superfícies de fratura avaliadas _____ | 36 |
| Tabela 5.4: Regiões que puderam ser reconstruídas com coerência a partir do MeX _____ | 40 |
| Tabela 5.5: Parâmetros de rugosidade obtidos para a amostra de Ni pelas técnicas de perfilometria de contato e estereofotogrametria _____ | 46 |
| Tabela 5.6: Parâmetros de rugosidade obtidos para a superfície da região RC10/25a pelas técnicas de perfilometria de contato e estereofotogrametria _____ | 48 |
| Tabela 5.7: Dimensão fractal e dados dos ensaios de propagação de trinca para as regiões analisadas _____ | 57 |

LISTA DE NOTAÇÕES

| | |
|-------------|---|
| ANSI | American National Standards Institute |
| ASTM | American Society of Testing Materials |
| DEM | Digital Elevation Model |
| INT | Instituto Nacional de Tecnologia |
| ISO | International Standardization Organization |
| LABMET | Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico |
| LRSS | Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| a | Tamanho da trinca |
| cp | Corpo de prova |
| d | Distância de trabalho |
| da/dN | Taxa de propagação de trinca por fadiga [mm/ciclo] |
| Df | Dimensão fractal |
| ln | Comprimento de avaliação do perfil |
| lr | Comprimento de amostragem do perfil |
| Ra | Rugosidade média |
| Rq | Rugosidade média quadrática |
| Rz | Rugosidade de dez pontos |
| Sa | Altura média da superfície |
| Sq | Altura quadrática média da superfície |
| Sz | Altura máxima da superfície |
| z | Coordenada vertical dos modelos tridimensionais |
| ΔK | Amplitude do fator de intensidade de tensão [MPa.m ^{1/2}] |
| λ_c | Filtro <i>cut-off</i> |

RESUMO

A reconstrução tridimensional de superfícies tem sido muito utilizada na área de fratura de materiais devido à necessidade de melhor compreensão dos fenômenos relacionados a este processo e os mecanismos que levam a falha do material. Superfícies de fratura geradas por fadiga em soldas subaquáticas molhadas foram então caracterizadas por reconstrução tridimensional usando estereofotogrametria em um microscópio eletrônico de varredura. Este trabalho apresenta, portanto, o desenvolvimento de uma metodologia para caracterizar as superfícies de fratura gerada por fadiga de soldas subaquáticas molhadas. Amostras de soldas foram selecionadas com o intuito de se avaliar o efeito de diferentes populações de porosidade e também o efeito da sollicitação mecânica produzida pelos ensaios de fadiga. Para este fim, análises de perfil, rugosidade e dimensão fractal foram conduzidas. Verificou-se que o parâmetro de rugosidade superficial S_q como mais eficiente para descrever e comparar as superfícies estudadas do que a dimensão fractal. Além disso, pôde-se confirmar a aplicabilidade da técnica usada e da metodologia desenvolvida para o estudo proposto com a ressalva de que um estudo mais aprofundado é necessário para compreender os mecanismos de propagação de trinca por fadiga em soldas subaquáticas molhadas.

ABSTRAT

Three-dimensional reconstruction of surfaces has been widely used in the field of materials fracture due to the need of better understand the phenomena related to this process and the mechanisms that lead to the material failure. Fatigue fracture surfaces in wet underwater welds were then characterized by means of three-dimensional reconstructions using stereophotogrammetry in a scanning electron microscope. This work proposes, therefore, the development of a methodology to characterize the fatigue fracture surfaces of underwater wet welds. Samples of welds have been selected in order to evaluate the effect of different porosity populations and also the effect of the mechanical response caused by the fatigue tests. For this purpose, profile, roughness and fractal dimension analyses were carried out. It could be seen the areal roughness parameter S_q as more effective than the fractal dimension to describe and compare the studied surfaces. In addition, it was possible to endorse the pertinence of the used technique and the developed methodology for the proposed study. Nevertheless, it is stated that further study is required in order to fully understand the mechanisms of fatigue crack propagation in wet underwater welds.

1 Introdução

Atividades com a exploração de óleo e gás *offshore* tornaram necessária a soldagem de estruturas e componentes dentro da água, principalmente para reparo e manutenção. Por sofrerem de solicitações mecânicas variáveis, devido a o movimento das ondas e correntes oceânicas, essas instalações estão sujeitas a sofrerem falha por fadiga e regiões como o cordão de solda e a zona termicamente afetada são mais susceptíveis.

As soldas subaquáticas molhadas, mais especificamente, são caracterizadas por proporções grandes de descontinuidades (poros principalmente) inerentes ao processo de soldagem devido à absorção de gases, ações pelo metal líquido e à alta taxa de resfriamento a que a poça de fusão fica submetida nesse tipo de ambiente.

Como a porosidade pode ser um fator para a redução das propriedades mecânicas de um material, o estudo do comportamento em fadiga de soldas subaquáticas molhadas vem aumentando.

A maior parte dos estudos feitos para investigar os danos causados por porosidade em materiais submetidos à fadiga é baseada em observações das superfícies de fratura realizadas via microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV). As informações obtidas a partir da análise da superfície de fratura são usadas para avaliar as causas da falha e os fatores que a influenciam, podendo ser usadas para então prevenir futuras falhas.

Atualmente, técnicas mais avançadas, envolvendo caracterização tridimensional, têm sido empregadas para se entender os mecanismos de fratura de materiais dúcteis e também as características dos danos causados por fadiga.

Na estereofotogrametria (ou reconstrução estereoscópica), por exemplo, um par (ou trio) de imagens estereoscópicas da superfície de fratura geradas no MEV é processado em um software gerando uma imagem tridimensional da superfície estudada. Além da obtenção do modelo tridimensional da superfície estudada, essa técnica também permite a obtenção de seus perfis topográficos e de parâmetros de rugosidade e dimensão fractal, que podem auxiliar no estudo dessas superfícies.

De maneira geral, técnicas de análise são combinadas, dependendo dos objetivos de cada pesquisa, do material analisado e dos recursos disponíveis. Nesse sentido, este trabalho

propõe o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar e caracterizar a superfície de fratura gerada por fadiga em materiais com descontinuidades.

2 Justificativa e Objetivos

A soldagem subaquática molhada é um processo comum na reparação de estruturas *offshore* e na indústria naval. Por ser um processo simples e econômico existe grande interesse na sua aplicação. No entanto, as soldas produzidas tendem a ser de qualidade inferior quando comparadas às soldas realizadas em condições a seco, tendendo a apresentar uma densa rede de poros. Em adição, ainda existem poucos estudos a respeito do comportamento da solda subaquática molhada sob carregamento cíclico.

Nesse contexto, no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG vêm sendo conduzidas pesquisas com relação ao comportamento em fadiga de soldas subaquáticas focadas principalmente no estudo da velocidade de propagação da trinca.

O presente trabalho teve, portanto, como foco estudar a aplicação de técnicas de caracterização da topografia de superfícies no estudo da superfície de fratura de corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga, visando complementar informações relativas à propagação das trincas. Para isto, foram usados corpos de prova de solda subaquática molhada ensaiados por fadiga em pesquisa anterior por Arias⁽¹⁾. Os objetivos são:

- Desenvolver uma metodologia para avaliar as superfícies de fratura de materiais com descontinuidades submetidos a ensaio de fadiga.
- Avaliar as amostras a partir da técnica de estereofotogrametria para caracterizar superfícies de fratura por fadiga e correlacioná-las com resultados de ensaios de crescimento de trinca.
- Avaliar a aplicabilidade das técnicas usadas e da metodologia desenvolvida para identificar os mecanismos de propagação de fadiga nos corpos de prova.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Propagação de trincas por fadiga em materiais porosos

Descontinuidade é definida como uma imperfeição ou interrupção das características ou estruturas esperadas de uma peça. As descontinuidades em materiais metálicos são comumente divididas em três categorias de acordo com sua origem^(2,3): (1) inerentes, (2) de processamento e (3) de serviço. As descontinuidades inerentes originam-se durante o processo de solidificação dos metais e são resultados do enchimento incorreto dos moldes, das temperaturas envolvidas, dos sistemas de vazamentos do metal, da retenção dos gases, etc. Assim, alguns exemplos de descontinuidades que podem ser encontradas nas peças fundidas são: porosidade, rechupes, segregação, inclusões, gotas frias. No segundo grupo encontram-se as descontinuidades relacionadas com os diferentes processos de fabricação, como processos de conformação em geral (laminação, trefilação, forjamento, extrusão, etc.), processos de soldagem, tratamentos térmicos, usinagem, e outros relacionados. Os tipos de descontinuidades são específicos para cada processo. Por exemplo, na soldagem é usual encontrar inclusões, poros, falta de fusão, falta de penetração, mordedura, retração e trincas (a frio e a quente). Por fim, o último grupo refere-se às descontinuidades geradas devido às condições de serviço (carregamento, ambiente corrosivo, solicitações mecânicas e sua variação com o tempo, pressão, temperatura, etc.). Exemplos desse tipo englobam, por exemplo, diversos tipos de trincas geradas por fadiga, fluência, corrosão e hidrogênio.

Usualmente para aplicações de engenharia de modo geral materiais com a menor quantidade possível de descontinuidades são almejados por fornecerem melhores propriedades mecânicas. Entretanto, para alguns tipos de materiais, apesar dos esforços e pesquisas empregados, descontinuidades (porosidade, inclusões, trincas, etc.) são difíceis de serem evitadas e sua presença pode estar intimamente relacionada com o processo de produção. Assim, materiais obtidos via fundição, metalurgia do pó e soldagem, por exemplo, são susceptíveis a vários tipos de descontinuidades em sua estrutura.

A porosidade especificamente tem efeito negativo nas propriedades mecânicas do material. Para o comportamento a fadiga, em particular, as trincas podem iniciar rapidamente nos poros e a vida em fadiga fica, então, dominada pela fase de propagação da trinca, que, por sua vez, também é influenciada pela porosidade. Nesse sentido, a presença de porosidade causa

redução da vida em fadiga^(4,5,6,7,8,9) e também provoca considerável dispersão de sua duração⁽⁸⁾. Além disso, as características da porosidade como a aleatoriedade na distribuição, tamanho, quantidade, forma e conectividade e distância entre poros adjacentes tornam o estudo da fratura de materiais porosos mais difícil de ser estudado^(7,10).

Sabe-se que, na maioria dos casos, a nucleação de trinca por fadiga ocorre na superfície. Entretanto, muitos pesquisadores^(4,8,11) reportaram iniciação da trinca ocorrendo não somente na superfície, mas também em poros situados logo abaixo da superfície. Essas ocorrências foram verificadas para ligas fundidas e sinterizadas, por exemplo.

Em soldagem subaquática molhada a porosidade é uma das principais descontinuidades encontradas no cordão. A formação dos poros ocorre pela presença de gases (H_2 , O_2 , CO) na poça de fusão, que, ao sofrer resfriamento, causa a redução das solubilidades desses gases no metal líquido e bolhas de gases são, então, formadas. Devido à elevada taxa de resfriamento da soldagem subaquática, essas bolhas ficam retidas na solda, formando os poros^(8,12,13). Segundo Liu, citado por Arias e Bracarense⁽¹⁴⁾, os principais fatores que afetam a quantidade de porosidade no cordão são a profundidade, o tipo de revestimento do eletrodo e a estabilidade do arco.

Foi mostrado⁽¹⁵⁾ que, para o caso da liga de alumínio A356 ($AlSi_7Mg$), uma fração volumétrica de 1% de porosidade acarreta na redução de 50% da vida em fadiga quando comparado com a mesma liga na ausência de poros. Yan et al.⁽⁵⁾, estudando o comportamento da liga sinterizada Ti-6Al-4V, determinaram que, quando a densidade sinterizada aumenta de 95 para 99%, o limite de resistência à fadiga aumenta em 20%.

Por outro lado, Tsay et al. citados por Wu et al.⁽⁸⁾ estudaram os efeitos da porosidade em solda a laser de liga de alumínio por fractografia e verificaram que a porosidade pode reduzir a taxa de crescimento, pois à medida que a trinca avança em direção a poros adjacentes, ocorre um efeito de embotamento. Em contrapartida, segundo Zhang et al., citados por Wu et al.⁽⁸⁾, a trinca ao se aproximar dos poros pode se conectar rapidamente com eles, causando pequenas acelerações e retardos do seu crescimento.

Nesse mesmo sentido, Arias⁽¹⁾, em seu estudo sobre propagação de trincas em soldas subaquáticas molhadas, observou que, com o aumento da porosidade na solda, a taxa de propagação reduz em ensaios de fadiga com valores de ΔK (amplitude do fator de intensidade de tensões) baixos a intermediários (14 a 26 $MPa \cdot m^{1/2}$). A influência da porosidade é negativa

para valores maiores de ΔK em que se observa redução da resistência à fadiga. No primeiro caso, acredita-se que tanto a ramificação e deflexão da trinca pela sua interação com poros, quanto à propagação simultânea de trincas secundárias e o fechamento da trinca induzido por rugosidade sejam fatores que expliquem esse comportamento. Já para o caso de ΔK elevado (26 a 30 MPa.m^{1/2}), a maior ocorrência de nucleação de microtrincas a partir dos poros explica o aumento da taxa de propagação observado.

Matlock et al. citados por Lorenzo⁽¹⁶⁾ também chegaram à mesma conclusão sobre a propagação de trincas por fadiga em soldas subaquáticas. Segundo eles, para o caso de baixos valores de ΔK os poros fixam a frente da trinca, retardando o seu crescimento. Por outro lado, quando os valores de ΔK são mais elevados a tensão local na ponta da trinca aumenta pela presença da porosidade.

O fator de intensidade de tensões, K , empregado na Mecânica da fratura linear elástica, descreve a magnitude do estado de tensões existente na ponta da trinca, e é usado na interpretação quantitativa do comportamento da propagação da trinca por fadiga. A Figura 3.1 mostra um esquema da relação entre a taxa de crescimento da trinca de fadiga (da/dN) e a amplitude do fator de intensidade de tensões (ΔK), diferença entre um K_{max} e um K_{min} , onde se verifica a existência de três regiões distintas.

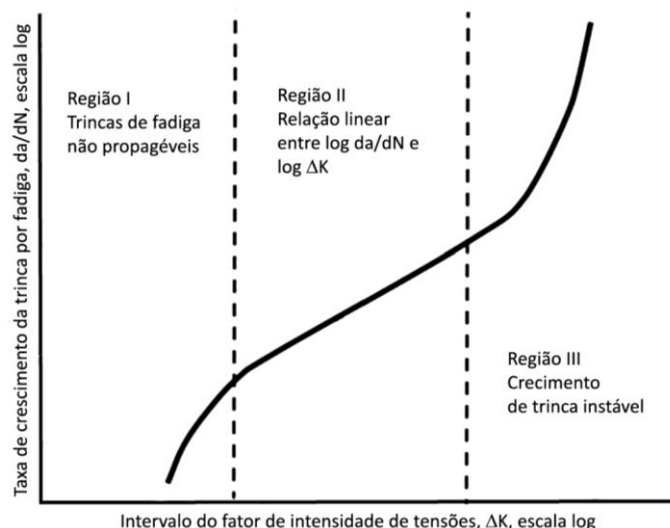


Figura 3.1: Representação do comportamento do crescimento da trinca por fadiga (modificado de Dieter⁽¹⁷⁾).

Na região I a velocidade de propagação é muito sensível a ΔK , tendendo para valores muito baixos quando este diminui, logo as trincas preexistentes tendem a não propagar. É possível, então, definir o valor ΔK_{th} (th, do inglês, *threshold*), abaixo do qual não há crescimento observável. A região II é representada pela Equação (3.1), chamada equação de Paris.

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m \quad (3.1)$$

onde A e m são constantes que dependem do material e das condições de ensaio, $K = F\sigma\sqrt{\pi a}$ (F é o fator geométrico, σ a tensão normal aplicada e a o tamanho da trinca) e ΔK é o intervalo de intensidade de tensões calculado como $K_{m\acute{a}x}$ menos $K_{m\acute{i}n}$, valores obtidos, respectivamente, para $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$.

Apesar de apresentar limitações, como não considerar a razão de carregamento, R , essa equação é a mais utilizada no estudo de propagação de trincas de fadiga, mas existem outras desenvolvidas por outros pesquisadores. Por fim, na região III, a propagação da trinca tende a se tornar instável.

3.2 Métodos de análise da superfície de fratura

Na análise de falha de materiais, um procedimento padrão é investigar a superfície de fratura para determinar o local de iniciação da trinca, bem como outras características do processo de propagação. A partir das informações obtidas é possível identificar os mecanismos de fratura e determinar sua causa, agindo para que novas falhas possam ser prevenidas. Essa avaliação é conduzida pela observação da superfície de fratura e também por outros métodos, alguns dos quais serão apresentados.

De maneira geral, mais de uma técnica de análise é combinada, dependendo dos objetivos de cada pesquisa, do material analisado e dos recursos disponíveis. Além disso, a caracterização, independentemente da metodologia adotada, é apenas uma parte da avaliação dos mecanismos que levam a falha. As informações obtidas pela caracterização, pelo ensaio de fratura, bem como com suas condições, devem ser avaliadas em conjunto para a definição dos mecanismos de nucleação e propagação da trinca de fadiga.

3.2.1 Fractografia

A fractografia é o estudo das superfícies de fatura de materiais para se determinar as causas de falha de estruturas e componentes de engenharia e baseia-se no estudo das características da superfície. Por meio de avaliação visual e microscopia óptica é possível identificar alguns aspectos como possíveis modos de falha e locais de iniciação da trinca. Análise mais refinada pode ser conduzida via microscopia eletrônica de varredura, por exemplo, por fornecer uma faixa de ampliações, resolução e profundidade de campo adequadas para a caracterização de superfícies de fratura; e, sendo, portanto, mais comumente empregada para esta finalidade.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra ponto a ponto. Esse feixe é acelerado pela alta tensão criada (1 a 50 kV) entre uma fonte de elétrons, por exemplo, um filamento aquecido de tungstênio, e o ânodo. Ele é então focalizado sobre a amostra por uma série de lentes eletromagnéticas. Quando o feixe de elétrons atinge a amostra, são emitidos elétrons e fótons pelos átomos componentes da amostra que são coletados por detectores para produzir imagens e informações importantes para a análise da falha do material. Dentre os sinais emitidos estão os elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X e elétrons Auger, sendo o primeiro mais utilizado na fractografia.

A microscopia eletrônica de varredura apresenta várias vantagens para o estudo de falhas devido a alta resolução (2 a 5 nm, podendo alcançar valores menores que 1 nm dependendo do equipamento), profundidade de foco (permitindo obter imagens com aparência tridimensional) e possibilidade de análise de microrregiões e mapeamento químico da superfície analisada⁽¹⁸⁾. Contudo, devido à alta resolução, a área analisada é pequena e, assim, o estudo da fratura pode ser complexo.

A qualidade e a resolução da imagem adquirida dependem de uma série de fatores que devem ser adequadamente ajustados em conjunto, entre eles, a área do feixe de elétrons em contato com a amostra (*spot size*), ampliação e tensão de aceleração. Uma redução do *spot size*, por exemplo, acarreta em aumento de resolução. Maiores tensões de operação, por sua vez, resultam em menores resoluções e, além disso, estruturas superficiais tornam-se menos claras (o volume de interação do feixe de elétrons é maior, assim informações abaixo da superfície também são adquiridas), têm-se mais efeitos de borda (maiores emissões de elétrons a partir de arestas e picos na amostra), além de maiores chances de se danificar a amostra pela

exposição ao feixe de maior energia. Já maiores ampliações também promovem maior resolução, com a desvantagem de se obter um menor campo de visão.

3.2.2 Estereofotogrametria via MEV

Apesar da aparência tridimensional, as micrografias obtidas pelo MEV não fornecem dados tridimensionais para a caracterização quantitativa de superfícies. Uma maneira de superar essa limitação é por meio do processamento de estereografias obtidas a partir do MEV, o que permite a reconstrução tridimensional de características superficiais. Essa técnica é baseada em estereofotogrametria e é também denominada reconstrução estereoscópica, reconstrução por paralaxe ou ainda correspondência estereoscópica.

A estereofotogrametria tem sido largamente empregada na avaliação de superfícies de fratura^(19,20,21,22). O princípio desse procedimento é baseado na obtenção de um par ou trio estereoscópico de imagens. Essas imagens são obtidas normalmente por meio do MEV de uma mesma região da amostra sob perspectivas diferentes, o que é alcançado pela inclinação eucêntrica da amostra. Os pontos correspondentes nessas duas imagens são detectados por algoritmos e as alturas desses pontos são determinadas pelas disparidades observadas nas imagens. Disparidade refere-se à diferença de localização de uma determinada característica nas duas imagens do par estereoscópico, conhecida como movimento de paralaxe.

A técnica pode ser explicada usando as definições geométricas da Figura 3.2, assumindo que o plano focal coincida com o plano xy de referência⁽²³⁾. Na Figura 3.2a, P é o ponto elevado em relação ao plano de referência por uma quantidade desconhecida z_p e com coordenadas laterais também desconhecidas x_p e y_p . A projeção do ponto P no plano de referência é P' e φ_p é um ângulo de fase que descreve a posição angular da superfície para o ponto P relativo à inclinação.

Quando rotações eucêntricas de $-\Delta\varphi$ e $+\Delta\varphi$ são realizadas com a amostra, as projeções do ponto P no plano de referência experimentam uma paralaxe de Δy (Figura 3.2b). Um modelo dado pelas equações (3.2), (3.3) e (3.4), derivadas do modelo desenvolvido por Piazzesi⁽²⁴⁾, pode, então, ser definido para derivar topografia da superfície a partir do par estereoscópico.

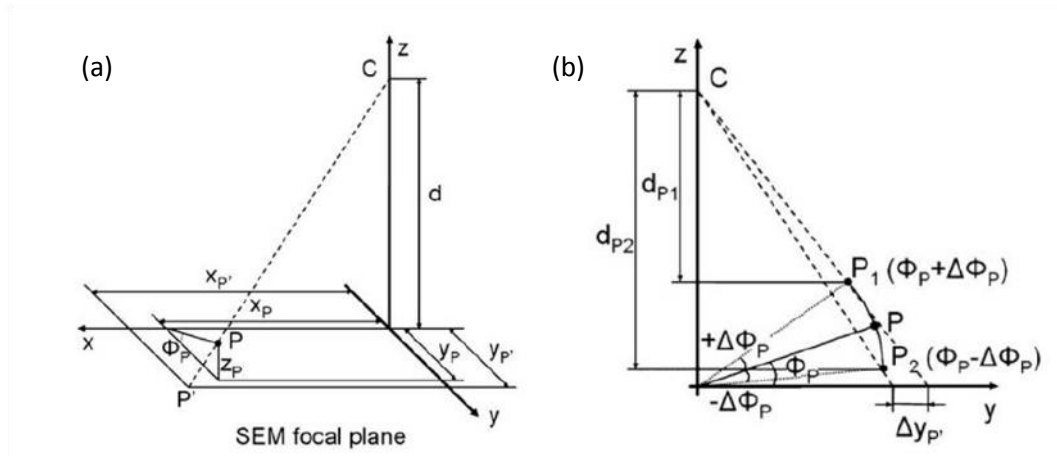


Figura 3.2: Definição geométrica na superfície da amostra relativa ao ponto P: (a) plano focal do MEV e (b) consequência da inclinação eucêntrica. A distância de trabalho, d , não está mostrada em escala (Marinello et al. citados por Carli ⁽²³⁾).

$$z = \frac{(y_1 - y_2) \cos \Delta\varphi + \frac{2y_1y_2}{d} \sin \Delta\varphi}{\left(1 + \frac{y_1y_2}{d^2}\right) \sin 2\Delta\varphi + \frac{y_1 - y_2}{d} \cos 2\Delta\varphi} \quad (3.2)$$

$$\xi = \frac{2d - 2z \cos \Delta\varphi}{\frac{d}{x_1} + \frac{d}{x_2}} \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{(y_1 + y_2)(z \cos \Delta\varphi - d)}{(y_1 - y_2) \sin \Delta\varphi - 2d \cos \Delta\varphi} \quad (3.4)$$

onde, os índices 1 e 2 referem-se a primeira imagem (inclinada por $-\Delta\varphi$) e a segunda imagem (com inclinação $+\Delta\varphi$), respectivamente, z , ξ e η são as coordenadas do ponto P e, d , a distância de trabalho, definida como a distância entre o centro de projeção e o plano de referência ideal (que normalmente coincide com a superfície da amostra), é mantida constante para o par.

Tendo em vista que, destas, a coordenada z é crucial para estabelecer medidas de rastreabilidade ^(23,25), Bariani et al. ⁽²⁵⁾ investigaram a incerteza da elevação vertical (coordenada z) em modelos reconstruídos pela técnica da estereofotogrametria por meio de um software comercial. Eles descobriram que sua precisão depende principalmente da

precisão do ângulo de inclinação e da calibração da ampliação das imagens e criaram uma equação descrevendo a incerteza teoricamente determinada dessa coordenada. Além disso, como obtiveram valores das medidas laterais dos modelos tridimensionais em boa concordância com os valores nominais, eles confirmaram que as coordenadas ξ e η são de fato menos críticas que z .

Muitos pesquisadores desenvolvem seus próprios algoritmos e softwares para realizar a reconstrução tridimensional através de um par estereoscópico de imagens. Tanaka et al. ⁽²⁰⁾, por exemplo, reconstruíram a superfície de fratura de uma liga Cu-Be através da correspondência estereoscópica utilizando um programa computacional desenvolvido em Visual Basic. Com o intuito de confirmar o resultado obtido, eles obtiveram as dimensões fractais dos contornos e dos perfis da superfície de fratura reconstruída e compararam com as da superfície real. Como os resultados obtidos foram próximos, eles puderam concluir que o método de reconstrução estereoscópica é capaz de reproduzir superfícies de fratura adequadamente. Com isso, a dimensão fractal pode ser usada não apenas para caracterizar tais superfícies como será visto adiante, mas também para comparar os resultados de imagens reconstruídas com o da morfologia real da superfície.

Em outro estudo ⁽²⁶⁾, os mesmos pesquisadores caracterizaram a superfície de fratura por fadiga de um aço austenítico. Para o estágio II foram identificadas estriações como característica da superfície, enquanto finos degraus de deslizamento foram observados na região do estágio I. A dimensão fractal dessas superfícies foi estimada e o mesmo valor (2,2) foi obtido para os dois estágios, indicando que o mesmo mecanismo de fratura (escorregamento) dominou nos dois estágios.

No entanto, existem no mercado alguns softwares capazes de realizar esse procedimento, identificando automaticamente os pontos em cada imagem que correspondem ao mesmo ponto da amostra e, a partir deles, obter as coordenadas tridimensionais do ponto observado. Esse procedimento é realizado para cada pixel das imagens, permitindo a construção de um modelo tridimensional. Entre estes, podem ser citados o MountainsMap da Digital Surf e o MeX da Alicona Imaging GmbH ⁽²⁷⁾, tendo este último sido adotado neste trabalho. Além da reconstrução tridimensional de superfícies, este software permite a obtenção de perfis topográficos, parâmetros de rugosidade e análises de área e volume em conformidade com normas ISO, como as 4287, 4288 e 11562, por exemplo.

Cavallini et al. ⁽²⁸⁾, com o intuito de investigarem os micromecanismos responsáveis pelos danos de fadiga em ferro fundido nodular, empregaram o software MeX para reconstruir tridimensionalmente a superfície de fratura. A partir das superfícies reconstruídas eles realizaram uma análise quantitativa visando esclarecer os mecanismos de decoesão dos nódulos de grafita. Um exemplo da superfície de fratura obtida pelo MeX pode ser vista na Figura 3.3. Já a Figura 3.4 mostra o perfil dessa superfície.

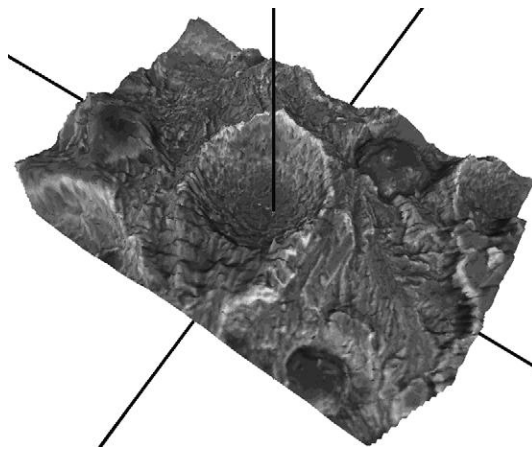


Figura 3.3: Superfície de fratura de um ferro fundido nodular reconstruída tridimensionalmente pelo software MeX ⁽²⁸⁾.

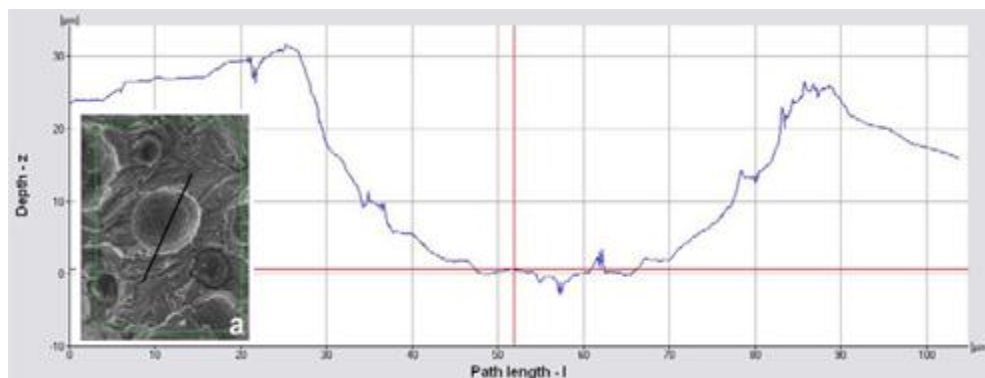


Figura 3.4: Análise quantitativa do perfil da superfície de fratura mostrada na Figura 3.3 (modificado de Cavallini ⁽²⁸⁾).

Diversos fatores podem influenciar a precisão das reconstruções obtidas pela técnica de estereofotogrametria via MEV, como a qualidade das imagens do par ou trio, os parâmetros de

configuração do instrumento e o procedimento de medição. Com relação ao primeiro fator, as imagens obtidas via MEV idealmente devem ser nítidas, sem ruídos e apresentar um balanço ótimo entre brilho e contraste, para assim propiciar a melhor correspondência entre as imagens; caso contrário, o software apresentará problemas para superpor as imagens.

Nesse sentido, Marinello et al. ⁽²⁹⁾ investigaram alguns fatores relacionados as configurações e operações do MEV (ângulo de inclinação, ampliação, eucentricidade, distância de trabalho), bem como a qualidade das imagens, que, segundo eles, representa maior criticidade na utilização do MEV para caracterizações tridimensionais. Em condições ideais, a variação dos valores da elevação vertical das reconstruções tridimensionais em relação aos valores tomados por referência está dentro de 5%. Entretanto, esse erro pode ser maior que 30% devido à calibração incorreta do instrumento e a desvios da condição de eucentricidade, por exemplo. Com relação à qualidade das imagens, eles afirmam que ainda são necessárias pesquisas objetivando o desenvolvimento de um método único para definir as melhores condições para obtenção das imagens para a estereofotogrametria via MEV.

Como resultado da densa nuvem de pontos obtida na estereofotogrametria, algumas operações de processamento, antes da extração de informações, podem fazer-se necessárias, como, por exemplo, corte, remoção de *outliers* e filtragem. Porém, segundo Carli ⁽²³⁾, ainda não há normas que estabeleçam procedimentos para essas operações e, como consequência, cada software implementa um algoritmo específico, levando a divergências de resultados e muitas vezes impossibilitando comparações dos resultados. Ainda, existe outra limitação quanto à calibração da coordenada z, que é crucial para estabelecer rastreabilidade de medições.

As operações de corte e filtragem são muito importantes já que modificam a forma da nuvem de pontos original. Além disso, o corte, que é normalmente realizado de forma manual, depende fortemente das escolhas do operador. A remoção de *outliers* é opcional e vai depender da existência de características indesejadas na superfície reconstruída. Após essas operações, a presença de ruídos é esperada, como consequência dos ruídos das imagens, por sua vez causados por vibrações, carregamento elétrico das amostras, entre outros fatores.

3.2.3 Avaliação da rugosidade da superfície

Textura superficial se refere aos desvios repetitivos ou aleatórios da superfície que forma a topografia tridimensional da superfície e inclui rugosidade, ondulação, imperfeições e orientação das irregularidades⁽³⁰⁾. A rugosidade é caracterizada por microirregularidades geométricas deixadas na superfície decorrentes do seu processo de obtenção, ao passo que a ondulação é caracterizada pelo componente de maior espaçamento da textura e é normalmente causada por vibrações e trepidações do processo. Imperfeições são interrupções não desejadas na topografia da superfície e a orientação das irregularidades diz respeito à direção principal da camada da superfície determinada pelo processo de sua geração.

O estudo da textura de superfícies, também chamado de metrologia de superfícies pode auxiliar no entendimento de fenômenos importantes, a avaliação da rugosidade mais especificamente pode quantificar ou classificar uma superfície, por exemplo.

Li et al.⁽³¹⁾ estudaram a correlação entre a rugosidade de superfícies de fratura e as propriedades de fadiga de compósitos de SiC/Al. Eles foram capazes de conectar o mecanismo responsável pela fratura nesse material com um parâmetro de rugosidade e, ainda, chegaram a conclusão de que este parâmetro é mais indicado para caracterizar sua superfície de fratura do que a dimensão fractal para o caso estudado.

3.2.3.1 Parâmetros de textura superficial em análise bidimensional

Os parâmetros de rugosidade podem ser divididos em três grupos de acordo com sua funcionalidade: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos⁽³²⁾, sendo os parâmetros de amplitude considerados mais importantes. Dentre estes, segundo Bhushan⁽³⁰⁾, os parâmetros rugosidade média (Ra) e rugosidade quadrática média (Rq) descritos pelo American National Standards Institute (ANSI) e pela International Standardization Organization (ISO) são os mais empregados na caracterização de topografias de superfície.

O parâmetro Ra é definido como a média aritmética dos valores de desvios verticais absolutos a partir da linha média ao longo do perfil. Já o parâmetro Rq é obtido pela raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios verticais a partir da linha média. Representa, assim, o desvio padrão da distribuição de alturas da superfície e, por isso, é mais sensível a

grandes desvios da linha média e usado em análises estatísticas⁽³²⁾. A definição matemática desses dois parâmetros é dada pelas equações (3.5) e (3.6) e a equação (3.7) traz outro parâmetro, a rugosidade de dez pontos (R_z), que é mais sensível do que R_a a ocasionais picos altos ou vales profundos. Este é definido como a diferença em altura entre a média dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais baixos ao longo do comprimento de perfil avaliado. Além destes, Gadelmawla et al.⁽³²⁾ trazem a definição de mais de 50 parâmetros usados para análise de rugosidade.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (3.5)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \{y(x)\}^2 dx} \quad (3.6)$$

$$R_z = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (3.7)$$

onde, L é o comprimento do perfil, $y(x)$ são os desvios verticais a partir da linha média e n é o número de amostras.

3.2.3.2 Parâmetros de textura superficial em análise tridimensional

Os primeiros parâmetros para a caracterização da textura superficial de uma área foram desenvolvidos nos anos 1990 como extensão dos parâmetros empregados em métodos de caracterização 2D⁽³³⁾. A análise tridimensional apresenta vantagens frente à caracterização bidimensional como melhor visualização da superfície e melhor detecção e análise. Entretanto, de acordo com Oliveira⁽³⁴⁾, a visualização é mais subjetiva.

Blunt e Jiang⁽³³⁾ fazem uma descrição detalhada desses parâmetros, que aqui será limitada apenas aos avaliados no presente trabalho. O parâmetro S_a (altura média da área selecionada), por exemplo, frequentemente usado na descrição de superfícies, é a média

aritmética dos valores absolutos dos desvios da superfície a partir do plano médio ou de referência (Equação (3.8)). Entretanto, por ser muito simples, não deve ser usado para diferenciar ou descrever superfícies de modo preciso. Desvios na estrutura da superfície podem ser detectados com esse parâmetro, cuja variação sugere mudanças no processo de produção⁽³⁵⁾. O parâmetro S_q (altura quadrática média da superfície), por sua vez, é um parâmetro de dispersão definido como o valor médio quadrático dos desvios da superfície analisada (Equação (3.9)). É um parâmetro amplamente usado e, em estatística, é o desvio padrão da amostra. Já S_z (altura máxima da superfície) é, por definição, a soma do pico mais alto e do vale mais profundo da área em estudo, ou seja, a soma dos parâmetros S_p (maior altura de pico a partir da superfície de referência) e S_v (valor da maior profundidade a partir da superfície de referência) (Equação (3.10)). Esse parâmetro é afetado por um único ponto de medição e é especialmente útil se picos e vales extremos são esperados nessa área.

$$S_a = \frac{\int \int_a |Z(x,y)| dx dy}{A} \quad (3.8)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{\int \int_a \{Z(x,y)\}^2 dx dy}{A}} \quad (3.9)$$

$$S_z = (|S_p| + |S_v|) \quad (3.10)$$

onde, $Z(x,y)$ é a função de altura representando os desvios ponto a ponto a partir da superfície média e A é a área de avaliação.

A caracterização de topografia seja por perfil ou área, 2D ou 3D, está condicionada a duas operações a que a superfície analisada deve ser submetida, nivelamento e remoção de forma. A primeira consiste em remover a inclinação do perfil, e a segunda em tornar uma superfície côncava ou convexa em plana⁽³⁶⁾. Tais operações são necessárias uma vez que as especificações são feitas para superfícies planas, independentemente de sua forma geométrica inicial, pois os parâmetros dependem de uma referência (linha média ou plano médio) para a detecção de vales e picos ou para o cálculo de valores médios. A ISO 4287 define essa referência para o perfil primário como a linha determinada pelo ajuste dos mínimos quadrados à linha da forma nominal do perfil.

3.2.3.3 Filtragem

Filtros para análise de textura superficial geralmente são usados para, por exemplo, correção do efeito da ponta do equipamento nos dados, remoção de *outliers* de dados obtidos por meios ópticos ou ainda para comparação de dados obtidos por diferentes métodos. No entanto, a razão principal, segundo Blateyron⁽³⁷⁾, é separar os componentes de comprimentos de ondas inferiores ou superiores ao valor selecionado do filtro, separando, desse modo, ondulação (perfil W) de rugosidade (perfil R) e possibilitando o cálculo dos parâmetros pertinentes de acordo com as especificações adotadas.

Nesse sentido, um filtro do tipo Gaussiano, também chamado comprimento de onda de corte (*cut-off* ou λ_c), filtra os comprimentos de onda acima ou abaixo do comprimento de *cut-off* adotado. Dessa maneira, um filtro de rugosidade com *cut-off* de 0,8 mm permite a análise dos comprimentos de onda menores que 0,8 mm. Comprimentos de onda superiores a 0,8mm são então atribuídos ao perfil de ondulação. A filtragem Gaussiana, normalizada pela ISO 11562:1996 e ASME B46.1-2002, baseia-se na função de ponderação dada na Equação (3.11)⁽³⁸⁾ que possui a forma de uma função de densidade de probabilidade normal.

$$S(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha\lambda_c} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

onde, $\alpha = \sqrt{\ln 2/\pi}$, x é a posição a partir da origem da função de ponderação e λ_c , o comprimento de onda de corte do filtro. Assim, a rugosidade é obtida como a diferença entre o perfil primário (perfil medido) e a linha média determinada com o filtro de perfil Gaussiano, que, por sua vez, representa o perfil de ondulação.

Este filtro também atenua em 50% a amplitude original dos componentes com comprimento de onda igual ao *cut-off*. Além disso, a fim de se evitar efeitos de borda, 10% do perfil primário (perfil P) do início e do fim não são incluídos nos perfis filtrados^(35,39).

Segundo Bhushan⁽³⁰⁾ e Blateyron⁽³⁷⁾, os valores de corte padronizados internacionalmente pela ISO 4288 são 0,08, 0,25, 0,8, 2, e 8 mm. A seleção do filtro mais adequado deve ser baseada em informações sobre a natureza da textura e de suas características, pois afeta o resultado final da medição, como mostrado na Figura 3.5. A Tabela 3.1 apresenta a padronização do filtro *cut-off* em relação aos parâmetros de rugosidade Ra e Rz de acordo com

a ISO 4288. O comprimento de avaliação l_n refere-se ao comprimento total do perfil da superfície e o comprimento de amostragem l_r corresponde ao valor do *cut-off*. De acordo com a norma ISO 4288 o comprimento de avaliação deve ser igual a 5 vezes o comprimento de amostragem. Dessa forma, os parâmetros são obtidos para cada um dos cinco seguimentos do perfil, ou seja, para cada comprimento de amostragem e, em seguida, a média entre eles é calculada, resultando no valor final.

Caso o *cut-off* indicado não puder ser aplicado devido à falta de comprimento de avaliação, a norma permite adoção de um valor próximo ao especificado, chamado *short cut-off*, que deve ser devidamente reportado.

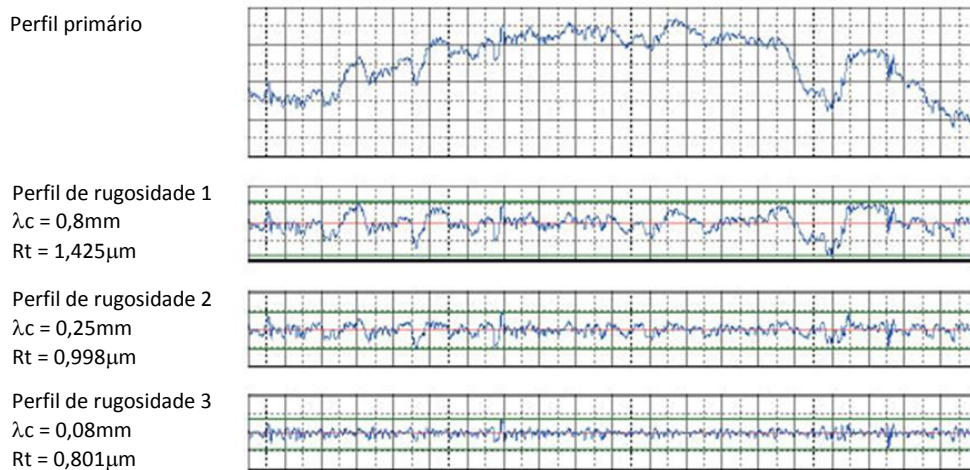


Figura 3.5: Influência do valor do filtro *cut-off*. Exemplos de um perfil primário e perfis de rugosidade com diferentes valores de *cut-off*⁽⁴⁰⁾.

Tabela 3.1: Seleção do filtro *cut-off* (ISO 4288, ASME B46.1)⁽³⁴⁾.

| Perfis periódicos | Perfis não periódicos | | <i>Cut-off</i> | Comprimento de amostragem/avaliação |
|-------------------|-----------------------|--------------|----------------|-------------------------------------|
| | Rsm [mm] | Rz [μm] | | |
| > 0,013 a 0,04 | 0,1 | 0,02 | 0,08 | 0,08/0,4 |
| >0,04 a 0,13 | > 0,1 a 0,5 | > 0,02 a 0,1 | 0,25 | 0,25/1,25 |
| >0,13 a 0,4 | > 0,5 a 10 | > 0,1 a 2 | 0,8 | 0,8/4 |
| >0,4 a 1,3 | > 10 a 50 | > 2 a 10 | 2,5 | 2,5/12,5 |
| >1,3 a 4 | > 50 | > 10 | 8 | 8/40 |

3.2.3.4 Caracterização fractal

Como a rugosidade da superfície depende da resolução do instrumento usado nas medições e dos filtros utilizados, as variações das elevações da superfície e outros parâmetros de rugosidade não são únicos para uma dada superfície. Superfícies rugosas podem possuir uma propriedade que permite que a informação de rugosidade em todas as escalas seja mantida e que, se ampliada repetidamente, o aumento de detalhes da rugosidade é observado até a nanoescala⁽³⁰⁾. Esse comportamento é descrito pela geometria fractal que é capaz de caracterizar a rugosidade da superfície por parâmetros independentes da escala, fornecendo informações sobre rugosidade em todas as escalas de comprimento que exibem o comportamento fractal.

Como explicado anteriormente, a fractografia (qualitativa) é uma forma de caracterizar superfícies de fratura por meio da sua observação em microscópio, usualmente o MEV. Atualmente, esse estudo está sendo complementado por essa abordagem da geometria fractal, onde a dimensão fractal é usada como indicador quantitativo da rugosidade ou do perfil dessas superfícies^(19,41,42,43,44). Em outras palavras, a geometria fractal fornece parâmetros que caracterizam a fratura a partir de dados medidos por algumas das técnicas apresentadas anteriormente.

A geometria fractal é um conceito desenvolvido pelo matemático francês Benoît Mandelbrot com o intuito de se estudar elementos com geometria complexa e de difícil caracterização pela geometria tradicional euclidiana. Marques⁽⁴⁵⁾ definiu os fractais como sendo objetos geométricos que podem ser divididos em partes, cada uma das quais semelhantes ao objeto original, podendo então ser gerados pela repetição de um fragmento padrão. Assim, os fractais são caracterizados por terem infinitos detalhes que mantêm a dimensão característica independente da escala e pela autossimilaridade^(41,45).

A dimensão fractal, por sua vez, é caracterizada por números não inteiros, que indicam o grau de complexidade e irregularidade do fractal. A geometria do fractal é considerada como a transição entre duas geometrias regulares. Dessa forma, uma curva fractal tem uma dimensão entre uma linha reta e um plano, ou seja, $1 < D_f < 2$, uma superfície fractal, por sua vez, tem dimensão entre um plano e um volume, $2 < D_f < 3$ ^(41,43,46).

Uma vez que superfícies de fratura apresentam, de modo geral, rugosidade elevada e autossimilaridade em uma larga escala de ampliações, a dimensão fractal é aplicada com muita

frequência na sua caracterização. Ainda, por esta independência quanto à escala de investigação, que as medidas diretas de rugosidade não apresentam, a dimensão fractal está sendo mais pesquisada e empregada como parâmetro dimensional na caracterização de relevos ⁽⁴⁵⁾.

Um método tipicamente empregado para obtenção da dimensão fractal de superfícies é mostrado na Figura 3.6, onde a área relativa, razão da superfície tridimensional por sua área projetada, é plotada em função da resolução lateral em coordenadas logarítmicas. A dimensão fractal da superfície é avaliada com relação à inclinação, k , da linha tracejada ajustada na região linear dos pontos de dados seguindo a Equação (3.12). Outros métodos para o cálculo da dimensão fractal podem ser vistos no trabalho de Annadhasan ⁽⁴⁷⁾.

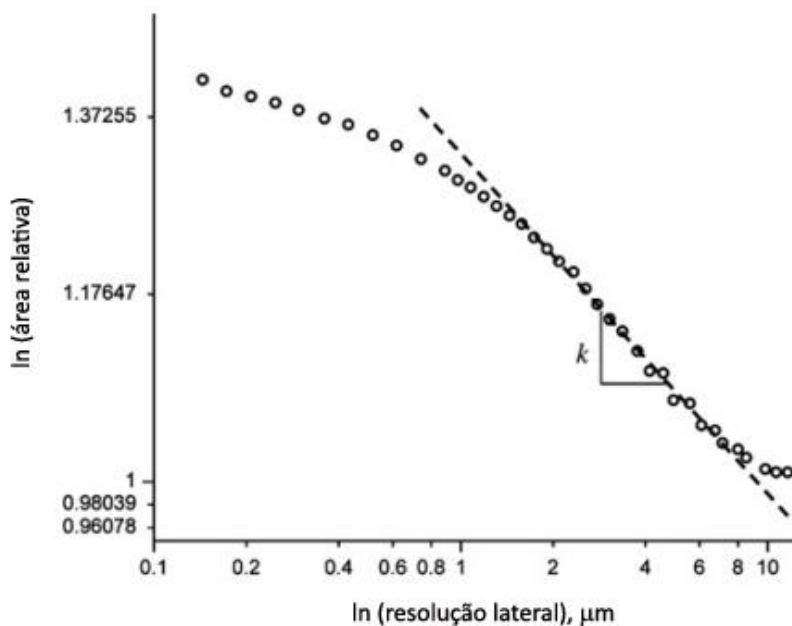


Figura 3.6: Gráfico da área relativa *versus* a resolução lateral para obtenção da dimensão fractal ⁽⁴⁸⁾.

$$Df = 2 - k \quad (3.12)$$

Tang e Wang ⁽⁴⁹⁾ usaram o conceito de fractais aplicado a fractografia quantitativa para caracterizar a superfície de fratura de aço por impacto. Eles acharam uma correlação positiva entre a rugosidade da superfície e a dimensão fractal e entre esta e a tenacidade do material. Além disso, o tipo de fratura pôde ser relacionado com a dimensão fractal.

3.2.3.5 Perfilometria

Perfilometria é uma técnica que permite a medição do perfil de uma superfície por meio de métodos de contato e óptico. No primeiro a determinação do perfil é feita pelo movimento de uma ponta de diamante, ou de outro material duro, que percorre a superfície estudada, exercendo uma força controlada sobre esta. Os sinais dos deslocamentos verticais são registrados, amplificados e enfim analisados. No método óptico baseado no princípio da interferência, que é o mais utilizado atualmente, um feixe de luz é dividido em um espelho e parte do feixe incide então em uma referência plana (feixe de referência) e a outra parte incide na amostra (feixe de medição). Ambos os feixes são refletidos na direção de um detector, onde é produzido e detectado um padrão de interferência que está relacionado com as informações relativas à altura da amostra em estudo.

Segundo Ameli et al. ⁽⁵⁰⁾ a perfilometria por contato apresenta as desvantagens de uma taxa de aquisição relativamente lenta (~ 10 Hz) e a possibilidade de danos na superfície causada pela ponta de contato. Os perfilômetros ópticos não apresentam tais desvantagens e possuem resolução na escala de alguns micrômetros, possibilitando a obtenção quantitativa da rugosidade de superfícies de fratura. Além disso, de maneira mais geral, fatores relacionados ao ambiente (vibração, por exemplo) e ao equipamento (calibração, limpeza) podem afetar o perfil medido.

De maneira geral, a perfilometria é empregada juntamente com outras técnicas de análises de forma a complementar os dados obtidos. Assim sendo, Magalhães et al. ⁽⁵¹⁾ objetivando entender os mecanismos de fadiga por contato em discos de ferro fundido nodular, inspecionaram as amostras por MEV, vídeo microscópio e perfilômetro.

Outros métodos para avaliação da rugosidade de superfícies estão disponíveis. Bhushan ⁽³⁰⁾ traz a descrição de vários deles, que inclui, por exemplo, métodos por sondas de varredura e por microscopia eletrônica. A escolha do tipo de instrumento adotado dependerá da natureza da superfície analisada, propósito da pesquisa, disponibilidade de recursos, etc.

4 Materiais e Métodos

4.1 Introdução

O presente trabalho incluiu as seguintes etapas principais:

- Análise preliminar das amostras com o intuito de mapear a superfície de fratura dos corpos de prova e selecionar regiões de interesse para análises mais aprofundadas.
- Caracterização da superfície de fratura de corpos de prova de soldas subaquáticas molhadas em regiões com diferentes níveis de sollicitação.
- Avaliação dos resultados.

4.2 Materiais e equipamentos

4.2.1 Materiais

Os corpos de prova de ensaios de fadiga de solda subaquática são provenientes de um estudo realizado no LRSS ^(1,14). O metal base (aço ASTM A36) foi soldado com eletrodo rutílico (AWS E6013) dentro de uma câmara hiperbárica, simulando pressões hidrostáticas de até 90 m e utilizando um dispositivo mecanizado para soldagem em conjunto com uma fonte projetada para soldagem subaquática.

Estes corpos de prova foram ensaiados por dois métodos para a determinação da taxa de crescimento de trincas por fadiga adotados por Arias ⁽¹⁾ e padronizados pela norma ASTM E647-15, sendo método de amplitude de carga constante e redução de carga (ΔK decrescente).

As seguintes condições foram avaliadas:

1. Efeito das condições de soldagem:
O efeito de diferentes populações de porosidade pela análise da superfície de fratura de soldas subaquáticas em diferentes profundidades (10 e 90 m) foi avaliado.

2. Efeito da sollicitação:

Para cada condição proposta acima se realizou uma comparação das superfícies de fratura obtidas a partir de dois métodos de ensaio de fadiga, objetivando-se o estudo da propagação da trinca na região II (método de amplitude de carga constante) e próximo do limiar (método de redução de carga ou ΔK decrescente).

Dessa forma, quatro corpos de prova de ensaios de fadiga de solda subaquática (Figura 4.1) foram selecionados do trabalho de Arias⁽¹⁾ de forma a se poder estudar esses efeitos, conforme descrito na Tabela 4.1.



Figura 4.1: Corpos de prova de fadiga de solda subaquática selecionados, na ordem CC10, RC10, CC90 e RC90.

Tabela 4.1: Condições dos corpos de prova selecionados.

| Corpo de prova | Profundidade de soldagem [m] | Método de ensaio |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| CC10 | 10 | Amplitude de carga constante |
| RC10 | 10 | Redução de carga |
| CC90 | 90 | Amplitude de carga constante |
| RC90 | 90 | Redução de carga |

Com o objetivo de se validar os resultados obtidos no software MeX, principalmente com respeito à coordenada z, foi realizada a reconstrução de uma região de uma amostra (Figura 4.2), em que as dimensões de suas irregularidades superficiais fossem conhecidas.



Figura 4.2: Amostra de níquel microusinada com sulcos de 30 e 50 micrômetros de profundidade usada na verificação da coordenada z dos modelos reconstruídos via MeX. A avaliação foi realizada na área marcada de 2x3 mm (amostra fornecida pelo Prof. Marcelo Câmara do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG).

4.2.2 Equipamentos

A fim de se mapear a superfície dos corpos de prova, previamente às análises tridimensionais, foi utilizado o estereomicroscópio Zeiss Stemi 2000 do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (LABMET). As amostras foram submetidas à inspeção com baixa ampliação (4x) e imagens foram coletadas.

Foi usado também o microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 3D FEG do Centro de Microscopia da UFMG a fim de se adquirir os pares de imagens estereoscópicas para a reconstrução 3D por meio do software MeX. O MEV é equipado com um detector de elétrons secundário do tipo Everhart–Thornley. O instrumento foi operado com tensão de aceleração de 10 e 15 kV e corrente do feixe de 1 nA.

O software MeX, instalado em um computador no Centro de Microscopia, foi empregado para reconstruir tridimensionalmente superfícies de fratura a partir de um trio estereoscópico de imagens. Segundo o catálogo do software MeX⁽²⁷⁾, independente da ampliação, é possível a obtenção de perfis de superfície de fratura, parâmetros de rugosidade e dimensões fractais,

além de promover o entendimento de parâmetros de tenacidade à fratura, crescimento e propagação de trinca e resistência à fratura.

Imagens topográficas das superficiais estudadas foram obtidas por meio da técnica de perfilometria de contato. O perfilômetro T4000 da HOMMELWERKE, do Laboratório de Superfícies do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG foi utilizado. Este equipamento possui resolução de 1 μm na direção x (varredura horizontal), 0,5 μm na direção y (varredura referente ao passo lateral) e 2 μm na direção z (altura). A obtenção das imagens dos perfis topográficos foram realizados pelo software HommelMap Expert 6.2 e usadas como referência para os modelos calculados pelo software MeX.

4.3 Metodologia

4.3.1 Mapeamento dos corpos de prova

Inicialmente, realizou-se a caracterização de toda a superfície das amostras em estudo com baixa ampliação usando microscopia óptica de baixa ampliação, com o estereomicroscópio. Macrografias com ampliação de 4x foram obtidas das superfícies de fratura, resultando em cerca de 60 imagens para cada corpo de prova. Como o estereomicroscópio não possui uma mesa para movimentação controlada da amostra, foi usada uma mesa de outro instrumento do laboratório. As imagens foram coletadas de forma a se obter uma área em comum com as imagens adjacentes, tomando-se como referência para a movimentação da amostra uma malha quadriculada. Por fim, essas imagens foram unidas automaticamente utilizando um software de edição de imagens.

A seleção das áreas de interesse foi baseada nas condições do ensaio de propagação de trincas realizado por Arias ⁽¹⁾. Valores de ΔK foram mapeados a partir das curvas $\log \Delta K$ vs. $\log(da/dN)$ e as regiões para análise foram escolhidas com base em valores semelhantes deste parâmetro para os diferentes corpos de prova com o intuito de se realizar posterior comparação entre os resultados.

4.3.2 Coleta das imagens estereoscópicas

Após a seleção das áreas de interesse, as imagens estereoscópicas foram obtidas no Centro de Microscopia pelo microscópio eletrônico de varredura. Previamente à coleta das imagens pelo MEV foi realizada a limpeza ultrassônica dos corpos de prova para remoção de óxidos e do revestimento aplicado para preservar as superfícies após os ensaios de fadiga, deixando as características da superfície de fratura inalteradas.

Alguns cuidados foram observados para a captura das imagens. A qualidade das imagens traduzida em brilho, contraste e nitidez, por exemplo, é essencial para o correto cálculo das informações 3D. O ajuste de brilho e contraste foi auxiliado pela ferramenta histograma do MEV, que mostra a escala de cinza dos pixels que compõem a imagem. Então, após ajuste do foco é possível, com o auxílio desse histograma, determinar o melhor ajuste de brilho e contraste onde os pixels variam ao longo de toda a escala de cinza, ou seja, entre 0 (preto) e 255 (branco), sendo preciso evitar imagens saturadas, o que significa a presença de áreas totalmente brancas, com níveis de cinza em 255.

O software MeX apresenta a ferramenta *Image Quality Analyzer*, que avalia contraste, ruído e textura das imagens e os classifica em uma escala de baixo a alto; gerando um aviso se a qualidade da imagem for ruim de acordo com as necessidades do software.

Além disso, é necessário garantir que a inclinação dos corpos de prova sob análise seja feita de forma eucêntrica, que é condição necessária para obter os pares estereoscópicos. O MEV utilizado permite fazer uma calibração que garante que o centro da imagem seja mantido quando a amostra é inclinada. A manutenção da mesma ampliação e distância de trabalho também são condições necessárias para a obtenção de imagens adequadas à reconstrução.

Outros parâmetros devem ser selecionados de forma a se obter imagens adequadas para a reconstrução. A tensão de operação, por exemplo, deve ser escolhida de forma que as imagens obtidas forneçam a informação superficial almejada. A tensão utilizada foi de 10 e 15 kV, dependendo da amostra, a partir da análise dos sinais de elétrons secundários. A distância de trabalho também é importante, pois impacta na profundidade de campo e na resolução; quanto maior a distância de trabalho, menor é o *spot size* e maior é, por conseguinte, a profundidade de campo. O valor de 10 mm foi selecionado para a distância de trabalho, pois é a distância que o equipamento permite fazer inclinações eucêntricas e também garante bons resultados. A ampliação foi selecionada de forma a se obter

informações relevantes na imagem, objetivando avaliar a interação trinca-poro. Já para o ângulo foram testados inicialmente os valores de ± 3 , ± 5 , ± 7 e $\pm 10^\circ$, ângulos comumente reportados na literatura ^(28,52,53,54,55).

As imagens foram salvas como arquivo TIFF para que não houvessem perdas de informações e são compostas de 2048x1886 pixels, o que significa que quase 4 milhões de pixels estão disponíveis para realizar as reconstruções em 3D. Entre estes cerca de 220 mil pixels são usados na barra inferior que contém as informações relativas a imagem e cerca de 1,2 milhões foram excluídos durante a escolha da região de interesse (ROI – *region of interest*). Assim, a dimensão efetiva da superfície para a reconstrução é de aproximadamente 2,4 milhões de pixels, o que corresponde a uma quantidade enorme de dados para serem processados, tornando o processo de reconstrução e análises posteriores demorados.

A quantidade de porosidade nessas imagens foi determinada com o software de processamento de imagens ImageJ. A área total reconstruída (ROI) foi medida e também foi determinada a área total de poros, obtendo-se assim a porcentagem de porosidade para cada região analisada.

4.3.3 Reconstrução via MeX

Inicialmente, foi realizada a reconstrução dos modelos a partir das imagens coletadas com ângulos de inclinação de ± 3 , ± 5 , ± 7 e $\pm 10^\circ$. Ambos os modos de reconstrução apresentados pelo MeX (*Stereo Creator* e *AutoCalibration*) foram empregados a princípio. Como melhores resultados foram obtidos a partir do modo *AutoCalibration*, a reconstrução das superfícies de fratura foi realizada usando-se o modo *Auto Calibration* do MeX em que são usadas três imagens da superfície de fratura (com inclinações $+\varphi$, 0 e $-\varphi$) obtidas por meio do MEV de forma eucêntrica. A vantagem desse modo é que, como os ângulos são calculados automaticamente, não há influência do usuário e da calibração adequada da inclinação obtida no MEV. No APÊNDICE A encontra-se a descrição de ambos os métodos bem como suas aplicabilidades.

Após a escolha do método *Auto Calibration*, alguns parâmetros e ações são necessários para obtenção dos modelos tridimensionais das superfícies analisadas. O procedimento detalhado para a utilização do software pode ser visto no APÊNDICE A.

A partir dos modelos obtidos, foi então possível realizar algumas análises das superfícies, como obtenção de parâmetros de rugosidade, dimensão fractal e perfil topográfico. Tendo como base a Tabela 3.1, foi selecionado um *short cut-off* de 800 μm , limitado pelo comprimento de avaliação. Para todas as medições de rugosidade 2D foi utilizado comprimento de análise de cerca de 1,6 mm (comprimento do perfil), o que resultou em comprimentos do perfil de rugosidade de 1,3 mm, já que 10% do perfil primário do início e do fim não são incluídos nos perfis filtrados. Já para as medições de rugosidade 3D, a área avaliada foi de 2,3 x 2,1 mm e aqui também o *cut-off* empregado foi de 800 μm para manter a coerência entre as análises.

4.3.4 Comparação com resultados de perfilometria

Com o intuito de verificar a reprodutibilidade das reconstruções obtidas pelo MeX com respeito à coordenada z, foi realizada a reconstrução de uma região de uma amostra com irregularidades superficiais conhecidas e com diferentes profundidades de sulcos para testar diferentes condições. Para isso, primeiramente uma amostra de níquel (Ni) microusinada (Figura 4.2), com sulcos de 30 e 50 micrômetros de profundidade, teve uma área de 2x3 mm analisada por meio do perfilômetro de contato e, em seguida, foi realizada a reconstrução no MeX a partir das imagens obtidas no MEV da mesma área.

Para a reconstrução dos modelos tridimensionais dessa amostra, adotaram-se os mesmos parâmetros para as superfícies de fratura; ângulos de $\pm 5^\circ$ e $\pm 10^\circ$ de inclinação para a coleta das imagens e distância de trabalho de 10 mm. Para a ampliação foram usados os valores de 100 e 200x que possibilitaram a coleta de imagens da mesma região estudada pela perfilometria de contato.

Procedimento semelhante foi realizado para uma superfície de fratura de fadiga de solda subaquática, em que áreas de 2x2 mm com diferentes graus de rugosidade foram selecionadas para reconstrução pelo MeX a partir de imagens com inclinações $\pm 5^\circ$ e $\pm 10^\circ$ e ampliação de 130x, tendo a mesma região sido avaliada por perfilometria.

5 Resultados e Discussão

5.1 Características das superfícies de fratura

A partir da operação de obtenção de imagens no estereomicroscópio e posterior tratamento das mesmas no software de edição de imagens obteve-se um mapeamento das superfícies (conforme mostra a Figura 5.1). Algumas imagens ficaram distorcidas, principalmente nas bordas, possivelmente devido a deficiências no algoritmo de casamento das imagens, mas sem prejuízos para o objetivo da avaliação.

É possível verificar que o aumento da pressão hidrostática na soldagem subaquática molhada acarreta em aumento da porosidade, conforme relatado por diversos autores^(1,56,57). As amostras soldadas a 90 m de profundidade (CC90 e RC90) apresentam maior rede de poros nas superfícies de fratura do que as amostras obtidas a 10 m de profundidade (CC10 e RC10), conforme mostram as imagens da Figura 5.1. A partir da observação dessas superfícies é também possível verificar que esses poros não se distribuem de forma uniforme e também não possuem uniformidade de tamanho e forma.

Além disso, observa-se que a topografia da superfície de fratura é mais acidentada para as soldas com quantidade maior de poros devido à interação entre a trinca e esses. De acordo com os estudos de Arias⁽¹⁾, essa interação é mais acentuada para valores mais elevados de ΔK . Ainda segundo esse pesquisador, ocorrem ramificações ou trincas secundárias ao longo do caminho da trinca, sendo esse processo mais acentuado para soldas produzidas a maior profundidade, consequência também das interações entre trincas e poros.

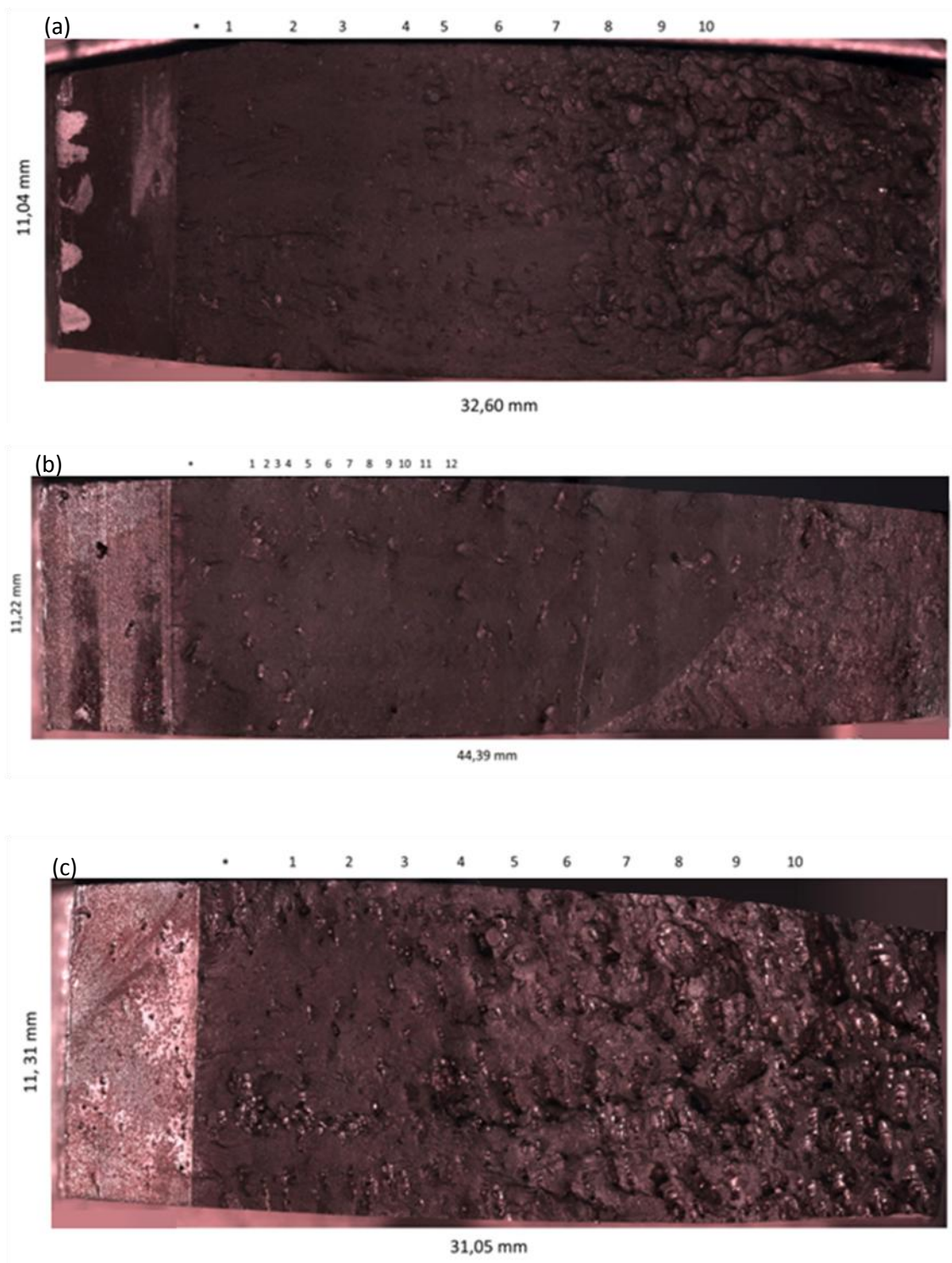


Figura 5.1: Mapeamento dos corpos de prova: (a) cp CC10, (b) cp RC10, (c) cp CC90 e (d) cp RC90 (os números acima da imagem indicam as posições em que os valores de ΔK foram mapeados, conforme Tabela 5.1; as dimensões dos corpos de prova também são apresentadas), (continua na próxima página).

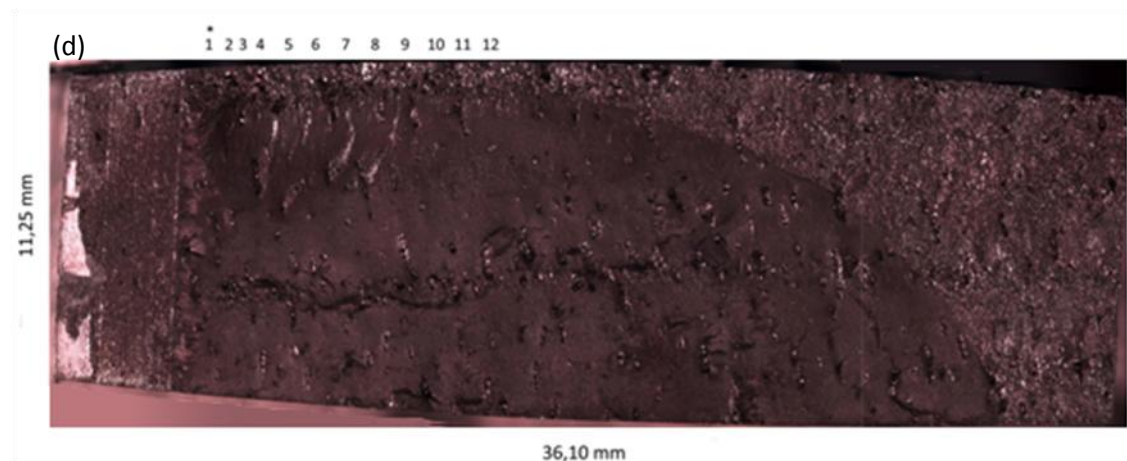


Figura 5.1: Mapeamento dos corpos de prova: (a) cp CC10, (b) cp RC10, (c) cp CC90 e (d) cp RC90 (os números acima da imagem indicam as posições em que os valores de ΔK foram mapeados, conforme Tabela 5.1; as dimensões dos corpos de prova também são apresentadas).

5.2 Definição das regiões de análise

Com base nesse mapeamento, algumas regiões de interesse em cada amostra foram selecionadas para serem submetidas à reconstrução por estereofotogrametria. Essas regiões foram selecionadas com base nas condições do ensaio de propagação de trincas, mais especificamente com base no valor de ΔK apresentado. A Tabela 5.1 mostra os valores de ΔK , mapeados a partir das curvas $\log \Delta K$ vs. $\log(da/dN)$, ao longo dos corpos de prova nas posições indicadas pelos números na Figura 5.1. Procurou-se selecionar regiões com valores próximos de ΔK para as amostras obtidas a partir do mesmo método de ensaio para possibilitar comparações de resultados. Seguindo essa ideia, para os corpos de prova ensaiados pelo método de amplitude carga constante CC10 e CC90, três regiões foram escolhidas e, para os corpos de prova ensaiados por redução de carga RC10 e RC90 foram duas. Essas posições estão destacadas na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 é dada a nomenclatura para as mesmas. Em cada posição, duas regiões a 4 mm da borda superior e a 4 mm da borda inferior do corpo de prova foram avaliadas, conforme é mostrado esquematicamente na Figura 5.2.

Nos cps ensaiados pelo método de redução de carga (RC10 e RC90), as trincas não propagaram de forma simétrica (Figura 5.3) devido à própria condição do teste. É reportado⁽⁵⁸⁾ que valores mais elevados de ΔK contribuem para a redução da assimetria da propagação das trincas, razão essa que pode explicar a não ocorrência de assimetria nos cps CC10 e CC90. A assimetria

na propagação da trinca tem influência na representatividade do comprimento da trinca que foi determinado visualmente a partir do mapeamento das superfícies de fratura em conjunto com os dados dos ensaios de propagação de trinca por fadiga; o comprimento da trinca, por sua vez, foi empregado na escolha das regiões de interesse pelo valor de ΔK podendo então ter afetado algumas das relações indicadas na Tabela 5.1. No entanto, o objetivo de se correlacionar os resultados obtidos pelas técnicas de reconstrução de superfícies com os resultados de ensaios de crescimento de trinca não foi prejudicado.

Tabela 5.1: Valores de ΔK nas posições indicadas pelos valores numéricos na Figura 5.1 (a distância a (tamanho da trinca) foi medida com relação à linha do entalhe).

| ** | CC10 | | RC10 | | CC90 | | RC90 | |
|----------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
| | ΔK [MPa.m ^{1/2}] | a [mm] | ΔK [MPa.m ^{1/2}] | a [mm] | ΔK [MPa.m ^{1/2}] | a [mm] | ΔK [MPa.m ^{1/2}] | a [mm] |
| * (pré-trinca) | - | 1,0 | - | 1,0 | - | 1,0 | - | 1,0 |
| 1 | 13,48 | 2,0 | 15,02 | 4,1 | 20,24 | 3,4 | 15,59 | 1,0 |
| 2 | 21,05 | 4,1 | 18,49 | 4,8 | 23,59 | 5,4 | 18,32 | 1,7 |
| 3 | 23,75 | 6,1 | 21,45 | 5,3 | 26,24 | 7,4 | 19,24 | 2,1 |
| 4 | 26,31 | 8,0 | 24,04 | 5,8 | 29,25 | 9,4 | 26,00 | 2,7 |
| 5 | 29,27 | 10,0 | 22,71 | 6,8 | 32,63 | 11,4 | 23,92 | 3,7 |
| 6 | 32,73 | 12,0 | 21,27 | 7,8 | 36,48 | 13,4 | 22,37 | 4,7 |
| 7 | 36,77 | 14,0 | 19,66 | 8,8 | 41,33 | 15,4 | 20,98 | 5,7 |
| 8 | 41,51 | 16,0 | 18,31 | 9,8 | 46,77 | 17,4 | 19,34 | 6,7 |
| 9 | 48,03 | 18,0 | 17,1 | 10,8 | 58,03 | 19,4 | 17,85 | 7,7 |
| 10 | 53,78 | 19,6 | 16,17 | 11,6 | 66,36 | 21,6 | 16,45 | 8,7 |
| 11 | - | - | 16,67 | 12,6 | - | - | 15,51 | 9,7 |
| 12 | - | - | 10,48 | 13,8 | - | - | 14,41 | 10,7 |

** Números indicados na Figura 5.1.

Tabela 5.2: Codificação para as regiões de interesse.

| | | | | |
|-------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| CC10 | a [mm] Regiões | 4,1 CC10/20a e b | 12,0 CC10/32a e b | 16,0 CC10/41a e b |
| RC10 | a [mm] Regiões | 5,8 RC10/25a e b | 13,8 RC10/12a e b | - |
| CC90 | a [mm] Regiões | 3,4 CC90/20a e b | 11,4 CC90/32a e b | 15,4 CC90/41a e b |
| RC90 | a [mm] Regiões | 2,7 RC90/25a e b | 10,7 RC90/12a e b | - |

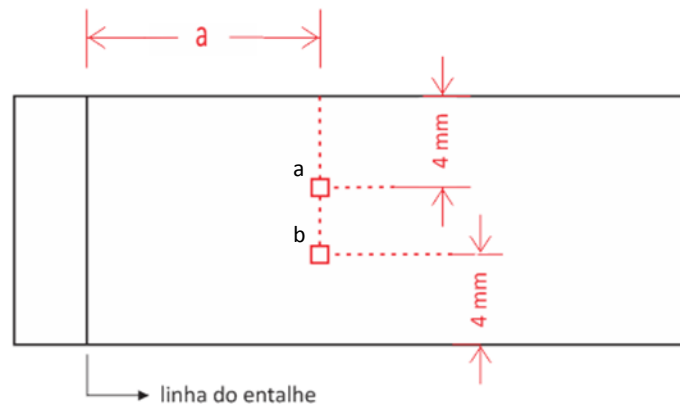


Figura 5.2: Esquema mostrando a definição dos locais para análise.

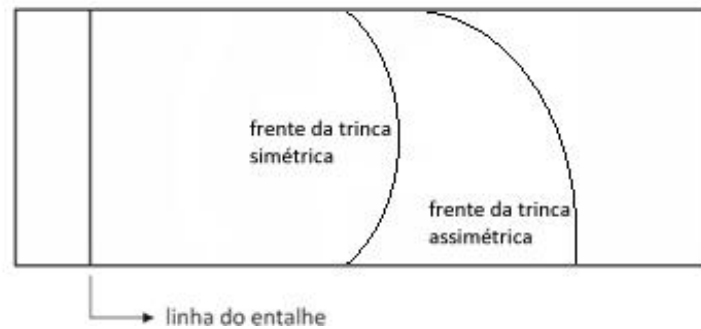


Figura 5.3: Formato simétrico e assimétrico da frente da trinca durante propagação por fadiga.

As imagens da superfície de fratura coletadas via MEV dessas regiões de interesse para a reconstrução no software MeX são mostradas nas Figura 5.4 a Figura 5.7. Em cada uma dessas regiões foram obtidos trios estereoscópicos com ampliação de 120 ou 130x.

A partir dessas imagens das superfícies de fratura estudadas pode-se novamente verificar, de maneira geral, maior presença de poros para as amostras produzidas a 90 m de profundidade, apesar de que, como apenas algumas regiões das superfícies dos corpos de prova selecionadas foram avaliadas, algumas regiões dos cps CC10 e RC10 apresentam maior porosidade que algumas dos cps CC90 e RC90 soldados a maior profundidade, como indica a Tabela 5.3. Verifica-se também que, de maneira geral, a topografia depende da quantidade de poros e do valor de ΔK , sendo mais irregular onde a porosidade é maior e/ou onde ΔK é mais elevado.

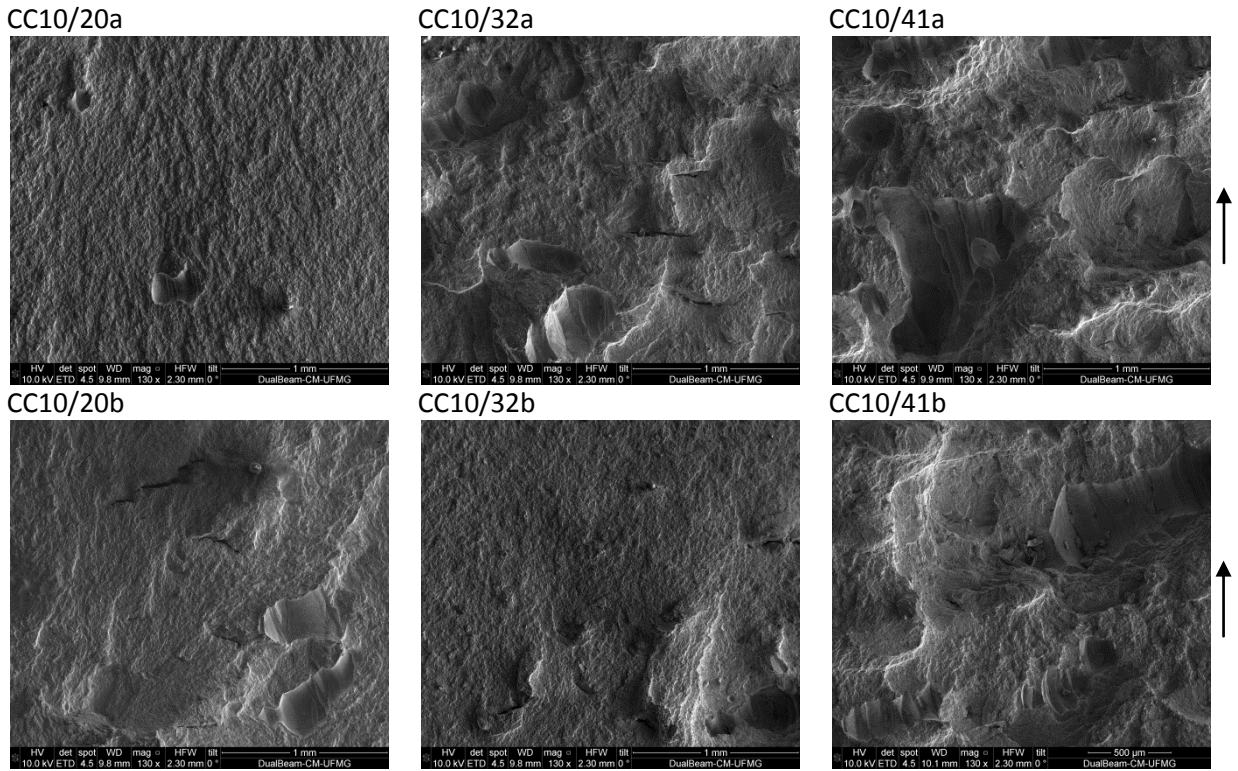


Figura 5.4: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp CC10 (a seta indica a direção de propagação da trinca).

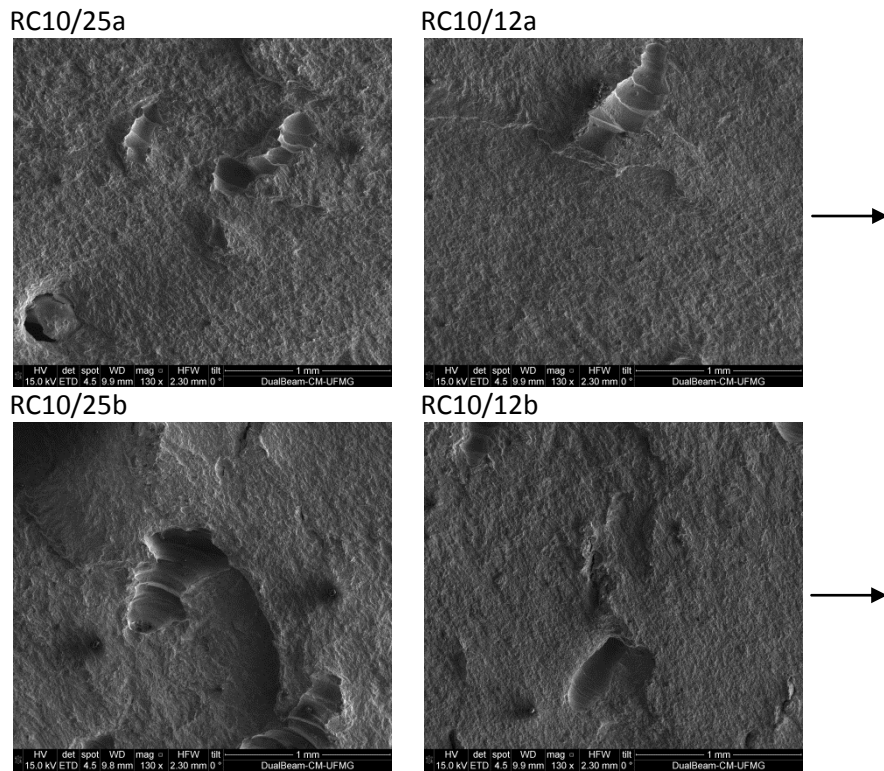


Figura 5.5: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp RC10 (a seta indica a direção de propagação da trinca).

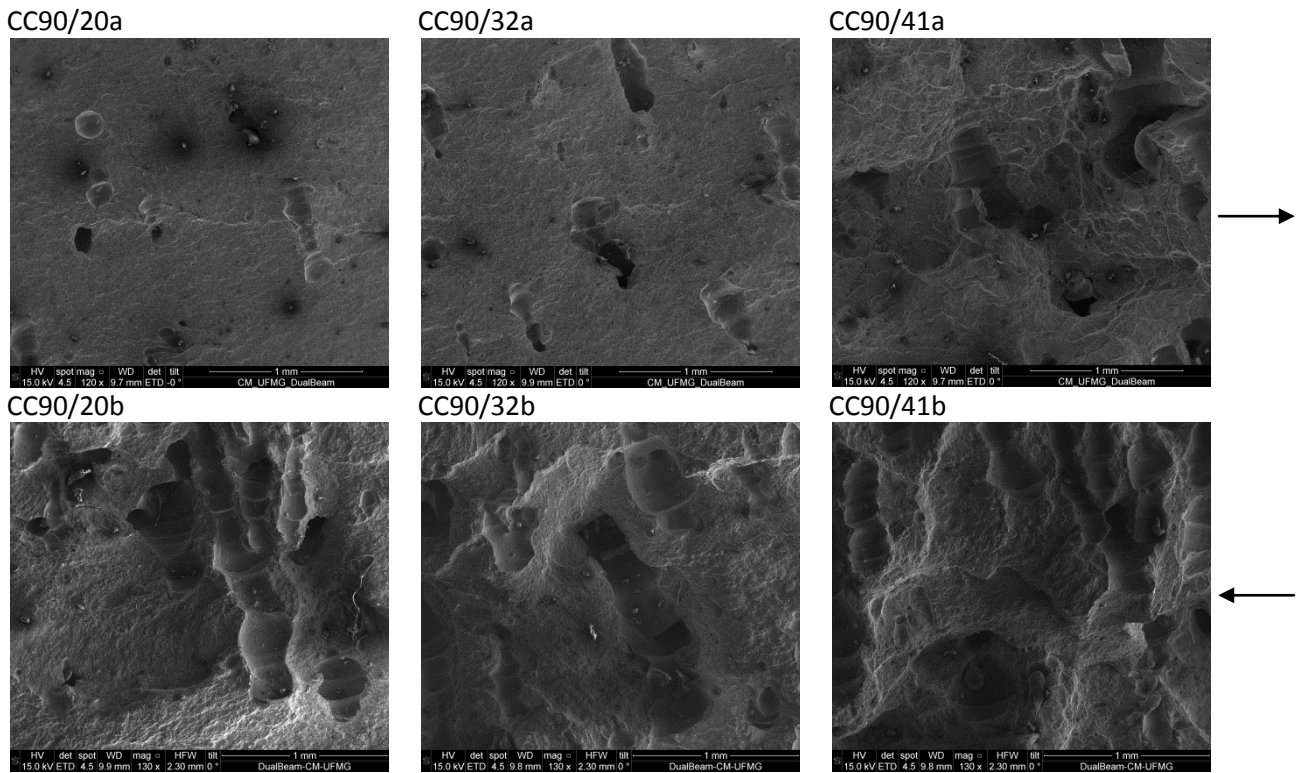


Figura 5.6: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp CC90 (a seta indica a direção de propagação da trinca).

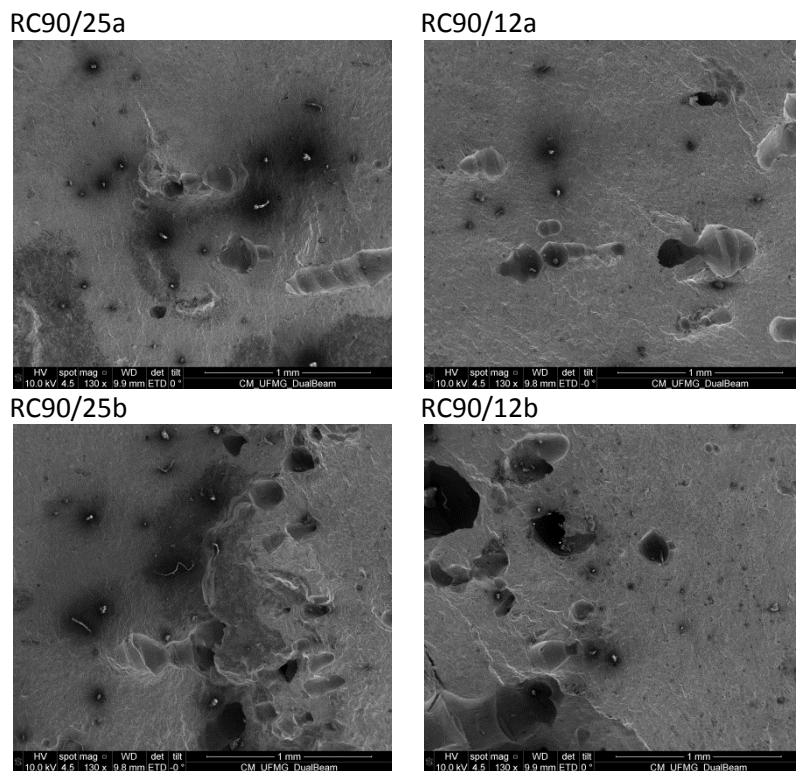


Figura 5.7: Imagens da superfície de fratura obtidas por MEV para as posições selecionadas do cp RC90 (a seta indica a direção de propagação da trinca).

Com relação à qualidade das imagens, condição imprescindível para o bom desempenho do processo de reconstrução das superfícies pelo software MeX, nota-se algumas dessas superfícies não ficaram com o equilíbrio de brilho e contraste adequados. As irregularidades acentuadas das topografias de algumas dessas, resultado da presença de poros e também do caminho da trinca, implicam em regiões que ficam muito escuras em comparação com o restante da imagem (como, por exemplo, nas regiões CC90/32a e RC90/12b). Há ainda algumas superfícies que, pela presença de óxidos, ficaram com algumas regiões saturadas devido ao carregamento elétrico dos mesmos (por exemplo, as regiões RC90/25a e RC90/25b).

Tabela 5.3: Porcentagem de poros nas regiões das superfícies de fratura avaliadas.

| Amostra / Região | Porosidade (%) |
|-------------------------|-----------------------|
| CC10/32a | 8,7 |
| CC10/32b | 2,4 |
| CC10/41a | 20,1 |
| CC10/41b | 17,9 |
| RC10/25a | 7,7 |
| RC10/25b | 10,3 |
| RC10/12a | 4,3 |
| RC10/12b | 2,6 |
| CC90/20a | 4,3 |
| CC90/32a | 8,0 |
| CC90/32b | 27,8 |
| CC90/41a | 17,5 |
| CC90/41b | 23,7 |
| RC90/25a | 6,9 |
| RC90/25b | 10,2 |
| RC90/12a | 10,1 |
| RC90/12b | 16,0 |

5.3 Reconstrução via MeX

A partir da reconstrução dos modelos das superfícies, foi observado que os modelos construídos com imagens inclinadas de $\pm 3^\circ$ não fornecem informações de altura suficientes, indicando que um ângulo maior deve ser adotado para que as disparidades entre as imagens sejam maiores e, com isso, promovam uma melhor correspondência dos pontos em comum do par de imagens alimentado. Vale ressaltar que para esse caso foi empregado somente o modo *Stereo Creator*, em que é usado o par, ao invés do trio de imagens. Dessa forma, o problema

também pode não ser devido à escolha incorreta do ângulo de inclinação e sim à calibração do *stage* do MEV que pode não estar fornecendo os valores de inclinação com a precisão necessária.

Já para os demais ângulos foi adotado o modo *Auto Calibration* em que não há preocupação quanto à precisão dos ângulos fornecidos pelo MEV, já que com a inclusão de mais uma imagem além das inclinadas positiva e negativamente com relação ao eixo x, os ângulos são calibrados durante o processamento das imagens pelo software MeX.

Verificou-se que os ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$ podem fornecer informações consideravelmente diferentes no modelo 3D construído dependendo da região avaliada com relação aos valores da coordenada z, conforme mostrado na Figura 5.8. No primeiro caso (Figura 5.8a), o parâmetro de rugosidade S_q foi de 25,1 e 22,4 μm , respectivamente para os modelos construídos a partir de imagens inclinadas por ± 5 e $\pm 10^\circ$, já para o segundo caso (Figura 5.8b), S_q foi de 33,1 e 44,5 μm , respectivamente. A inclinação de $\pm 7^\circ$ resultou em resultados semelhantes ao de $\pm 10^\circ$. Levando essas observações em consideração decidiu-se coletar imagens com ± 5 e $\pm 10^\circ$, obtendo-se assim os resultados extremos.

Os modelos tridimensionais obtidos pelo MeX para as regiões apresentadas nas Figura 5.4 a Figura 5.7 encontram-se no APÊNDICE B. Algumas das regiões indicadas na Tabela 5.2 não puderam ser reconstruídas coerentemente, ou seja, alguns dos modelos tridimensionais não reproduziram as características topográficas em concordância com as imagens obtidas pelo MEV.

A Tabela 5.4 resume as regiões onde foi possível obter modelos tridimensionais coerentes com as superfícies analisadas quando comparados com as respectivas imagens da superfície de fratura. Acredita-se que existam duas razões principais para a impossibilidade de obter os modelos em determinadas regiões. Algumas das áreas selecionadas não apresentam características topográficas acentuadas o que pode ter dificultado o algoritmo de identificar as regiões em comum no trio de imagens alimentado. Para tais áreas talvez fosse necessário mudar alguns parâmetros para a aquisição das imagens, como aumentar o ângulo de inclinação para obter maior disparidade ou aumentar a distância de trabalho e, assim, a profundidade de foco das imagens das superfícies de fratura.

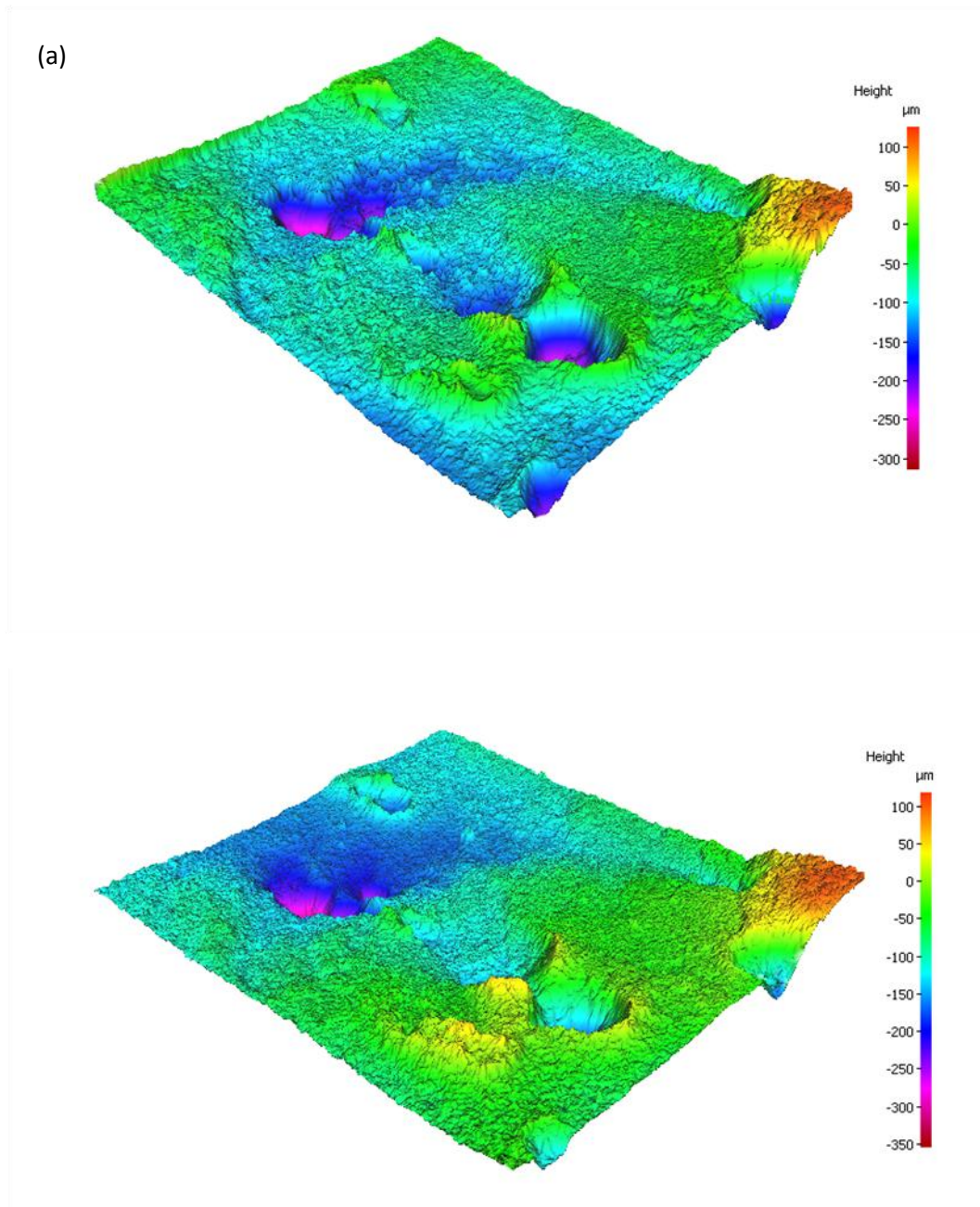


Figura 5.8: Diferenças nos modelos construídos a partir de trios de imagens com $\pm 5^\circ$ e $\pm 10^\circ$ de inclinação, respectivamente: (a) região RC90/12a, mostrando elevações verticais semelhantes para ambos os ângulos e (b) região CC10/41a, mostrando elevações verticais consideravelmente distintas (continua na próxima página).

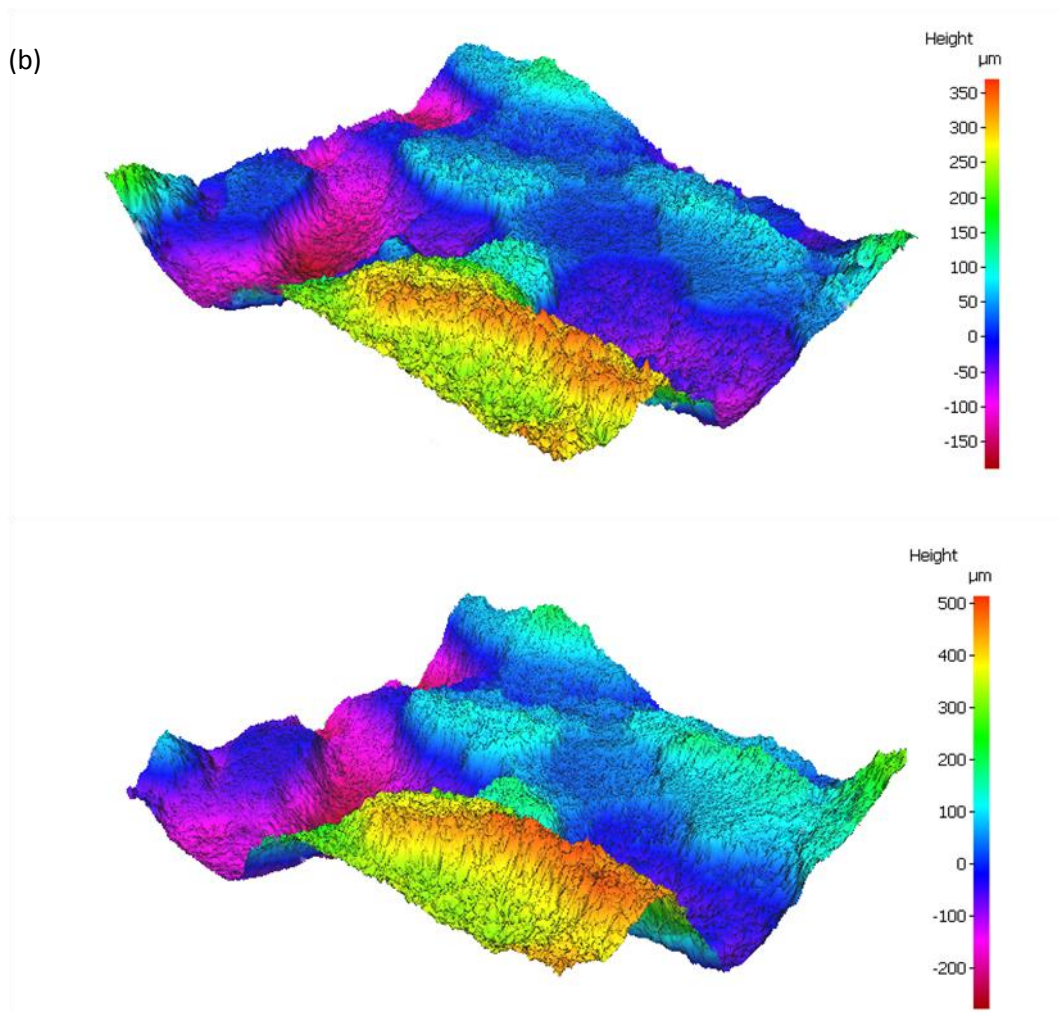


Figura 5.8: Diferenças nos modelos construídos a partir de trios de imagens com $\pm 5^\circ$ e $\pm 10^\circ$ de inclinação, respectivamente: (a) região RC90/12a, mostrando elevações verticais semelhantes para ambos os ângulos e (b) região CC10/41a, mostrando elevações verticais consideravelmente distintas.

Outro motivo pode ser a qualidade não adequada das imagens, o que pode explicar erros em alguns dos modelos tridimensionais, onde se obteve algumas vezes um modelo invertido, onde poros foram retratados como elevações na superfície, por exemplo (ver Figura 5.9).

Como explicado anteriormente, as imagens devem possuir um ajuste ótimo de brilho e contraste a fim de poderem ser processadas adequadamente pelo software. Em algumas das posições selecionadas para se realizar as análises, a topografia da superfície em regiões localizadas é muito acidentada, o que pode gerar diferenças de brilho e contraste grandes em uma mesma imagem. Por exemplo, quando há um poro muito profundo, a região ocupada por ele tende a ficar muito escura, o que traz prejuízos para a reconstrução.

Além disso, alguns modelos tiveram a coordenada z visivelmente fora de proporção. Neste último caso, o problema foi observado apenas para 3 dos modelos reconstruídos com ângulo de inclinação de $\pm 10^\circ$. A Figura 5.10 mostra um exemplo, comparando os resultados obtidos para uma superfície reconstruída ± 5 e $\pm 10^\circ$.

Foi observado também que os modelos 3D obtidos apresentavam-se inclinados, como por exemplo, para a reconstrução da amostra de referência da Figura 4.2 visto na Figura 5.11a. Como esse fato poderia causar interpretações errôneas de parâmetros obtidos para a superfície reconstruída, foram realizados os ajustes necessários na ferramenta *Workpiece Coordinate System*, sendo então possível obter superfícies mais fiéis à geometria da amostra em questão, conforme ilustra a Figura 5.11b.

Então, essa operação foi também empregada nos modelos das superfícies de fratura analisadas. O procedimento (descrição mais detalhada no APÊNDICE A) adotado para tal foi, a partir do método manual dessa ferramenta, a realização das rotações necessárias nos eixos identificando a melhor posição em concordância com a imagem da superfície da região. Por conseguinte, algumas regiões ficaram mais evidenciadas e a superfície ficou mais coerente com relação às imagens obtidas pelo MEV, como mostra a Figura 5.12, além de se ter eliminado o efeito da inclinação na determinação de alturas das superfícies.

Tabela 5.4: Regiões que puderam ser reconstruídas com coerência a partir do MeX (continua)

| CP | Posição | Ângulo | Modelo 3D | CP | Posição | Ângulo | Modelo 3D |
|------|----------|---------|-----------|------|----------|---------|-----------|
| CC10 | CC10/20a | 5 10 | | CC90 | CC90/20a | 5 10 | X |
| | CC10/20b | 5 10 | X | | CC90/20b | 5 10 | |
| | CC10/32a | 5 10 | X | | CC90/32a | 5 10 | X |
| | CC10/32b | 5 10 | X | | CC90/32b | 5 10 | X X |
| | CC10/41a | 5 10 | X X | | CC90/41a | 5 10 | X X |
| | CC10/41b | 5 10 | X | | CC90/41b | 5 10 | X X |

Tabela 5.4: Regiões que puderam ser reconstruídas com coerência a partir do MeX (continuação)

| | | | | | | | |
|------|----------|----|---|------|----------|----|---|
| RC10 | RC10/25a | 5 | X | RC90 | RC90/25a | 5 | X |
| | | 10 | X | | | 10 | |
| | RC10/25b | 5 | X | | RC90/25b | 5 | X |
| | | 10 | X | | | 10 | X |
| | RC10/12a | 5 | X | | RC90/12a | 5 | X |
| | | 10 | X | | | 10 | X |
| | RC10/12b | 5 | X | | RC90/12b | 5 | X |
| | | 10 | X | | | 10 | X |

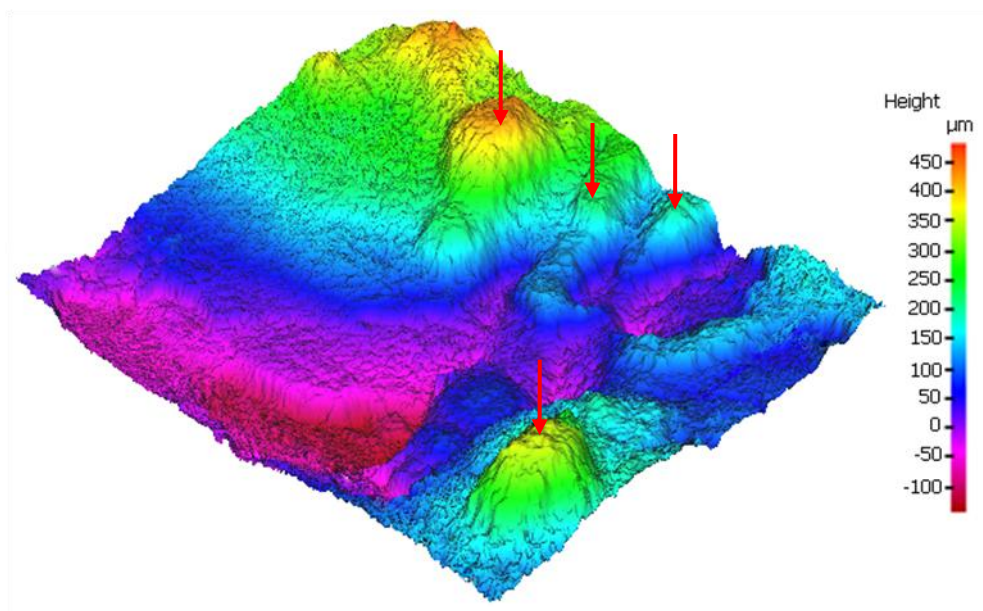


Figura 5.9: Exemplo de modelo tridimensional em que houve erro no processo de reconstrução pelo software. Modelo da posição CC90/20b obtido com $\pm 5^\circ$ de inclinação, mostrando inversão da topografia (as setas indicam algumas regiões que deveriam ser representadas como poros, como pode ser visto comparando com a imagem da Figura 5.6).

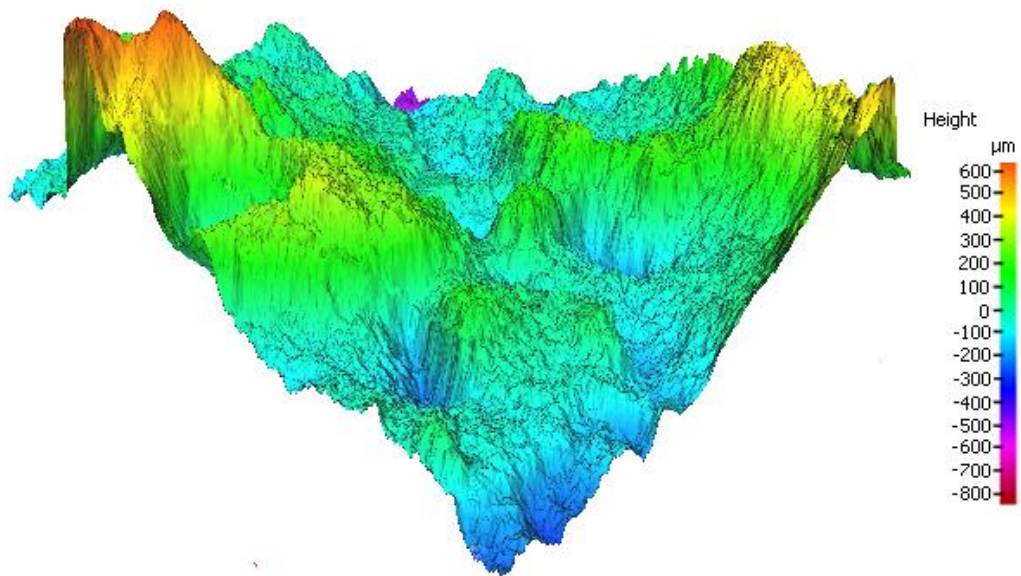
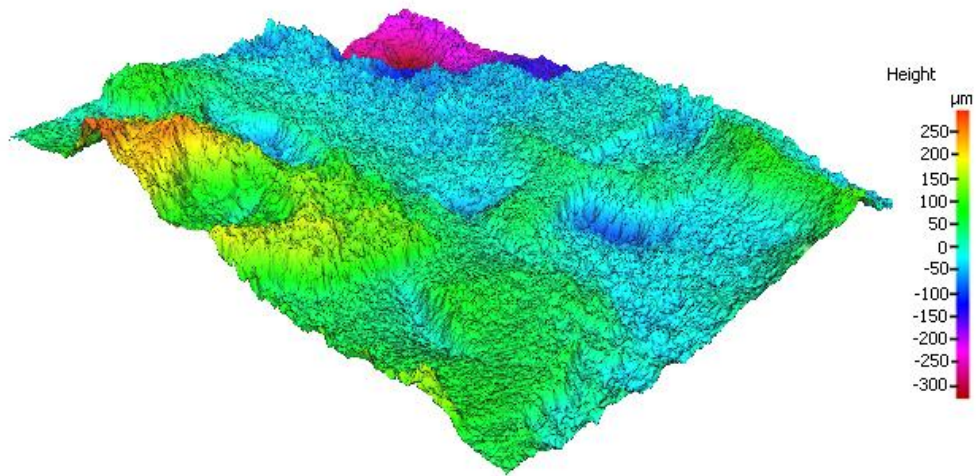


Figura 5.10: Modelo tridimensional da posição CC10/32a obtido com ± 5 e $\pm 10^\circ$ de inclinação em que houve erro no processo de reconstrução pelo software, observa-se que a coordenada z está exagerada na segunda imagem.



Figura 5.11: Vista frontal da região reconstruída da amostra de Ni: (a) antes e (b) após ajuste no *Workpiece Coordinate System*.

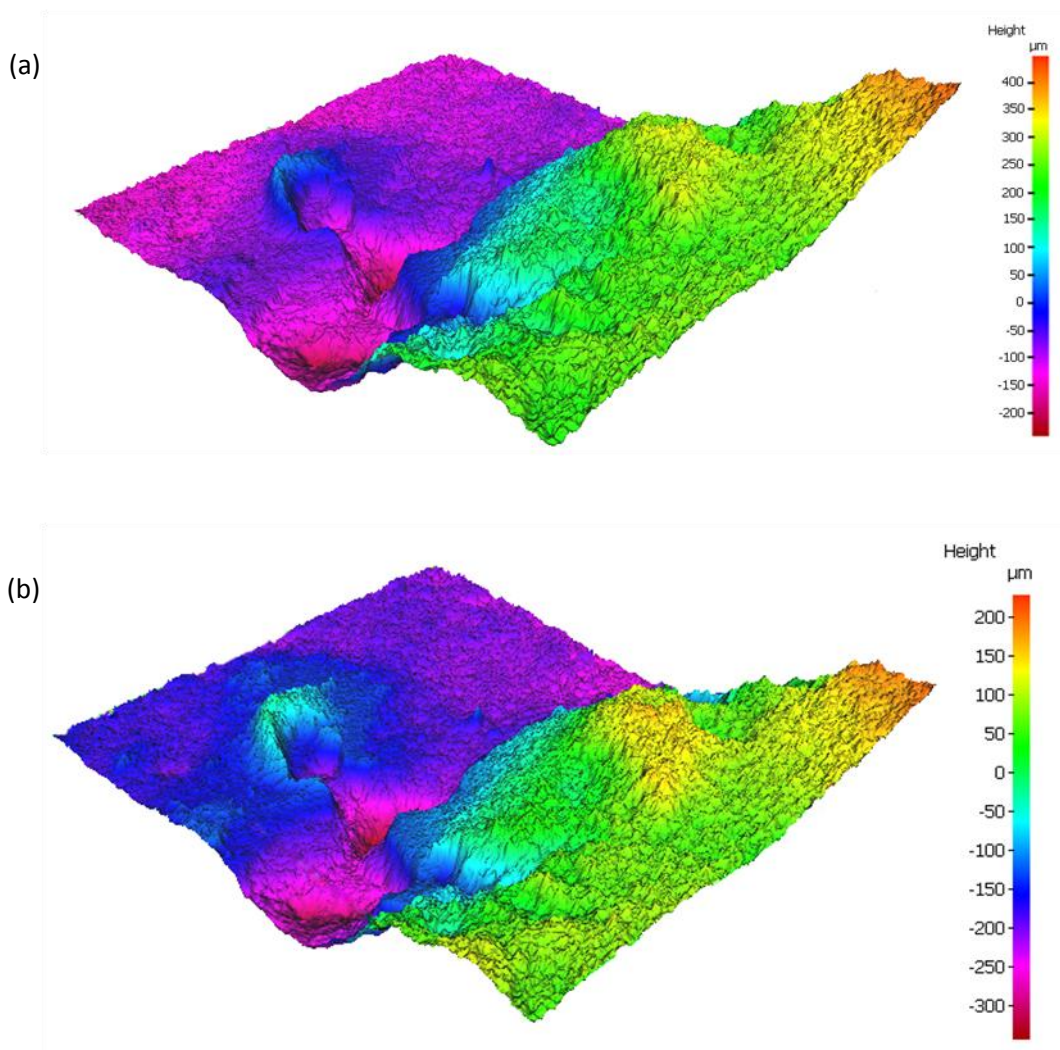


Figura 5.12: Vista superior-frontal-lateral direita da superfície de fratura da posição RC90/25b: (a) antes e (b) após ajuste no *Workpiece Coordinate System*.

5.4 Comparação com resultados de perfilometria

A Figura 5.13 apresenta os resultados obtidos por meio de um perfilômetro de contato para a amostra de níquel microssinada mostrada na Figura 4.2. Já na Figura 5.14 é possível ver o resultado obtido pelo software MeX para a mesma região. Esta foi reconstruída a partir de 3 imagens com ângulos 5, 0 e -5° (Figura 5.15) e ampliação de 200x. A Tabela 5.5, por sua vez, mostra os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos para essa superfície por ambas as técnicas. O *cut-off* adotado foi de $800\ \mu\text{m}$ e os parâmetros de perfil foram obtidos conforme indica a Figura 5.16.

O modelo apresentado na Figura 5.14 foi o único dentre essas condições em que foi obtido resultado satisfatório. De maneira geral, a inversão da superfície ocorreu ou obteve-se coordenada z maior do que a obtida pela perfilometria. Não se observou, entretanto, conexão entre este último caso e os ângulos. Por outro lado, os resultados obtidos pela perfilometria estão condizentes com as profundidades dos sulcos informadas para a amostra e indicadas na Figura 4.2.

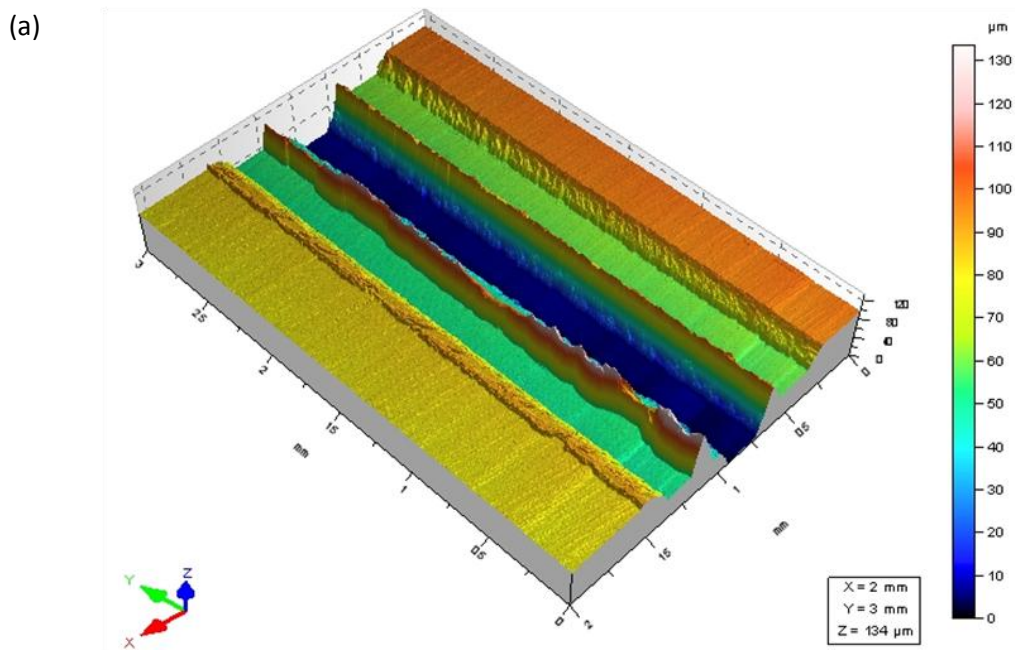


Figura 5.13: Topografia tridimensional obtida pelo perfilômetro da amostra de Ni microssinada: (a) região inspecionada de $2 \times 3 \text{ mm}$ e (b) zoom em uma região de $1,3 \times 0,5 \text{ mm}$ (continua na próxima página)

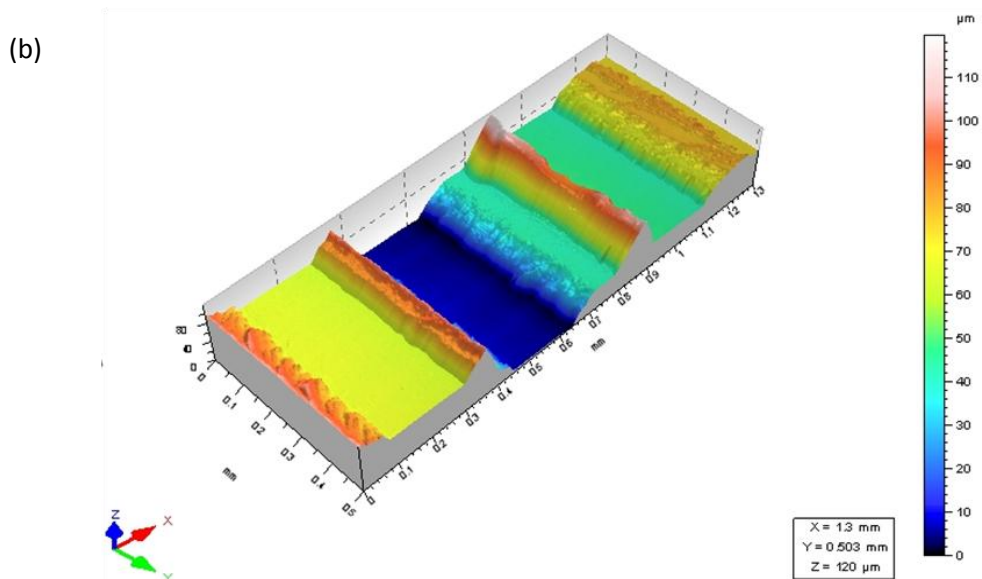


Figura 5.13: Topografia tridimensional obtida pelo perfilômetro da amostra de Ni microssinada: (a) região inspecionada de 2x3mm e (b) zoom em uma região de 1,3x0,5mm.

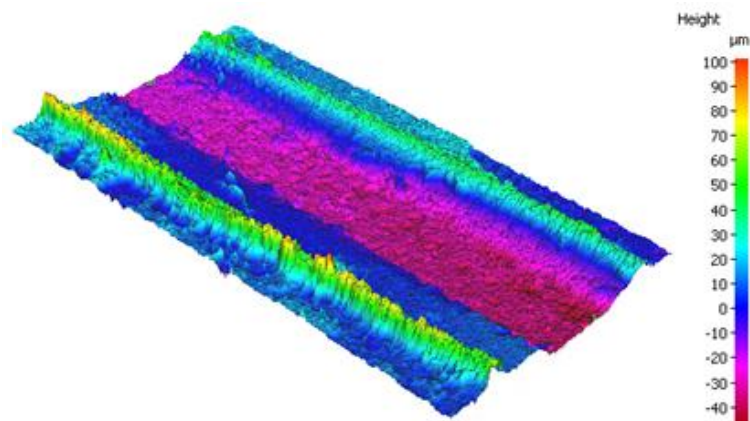


Figura 5.14: Modelo tridimensional reconstruído para a amostra de Ni microssinada a partir do MeX.

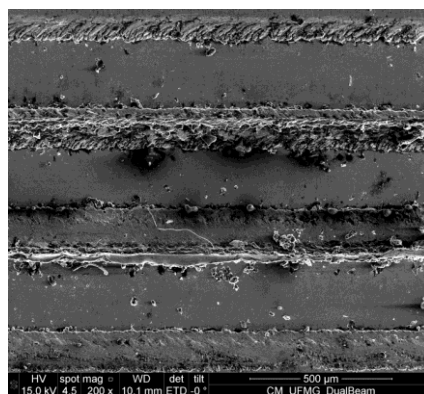


Figura 5.15: Imagem obtida pelo MEV da região selecionada da reconstrução da Figura 5.14.

Tabela 5.5: Parâmetros de rugosidade obtidos para a amostra de Ni pelas técnicas de perfilometria de contato e estereofotogrametria.

| Parâmetros de rugosidade [μm] | Perfilometria | MeX |
|--|---------------|------|
| Ra | 16,1 | 16,7 |
| Rq | 21,0 | 20,6 |
| Rz | 77,6 | 34,4 |

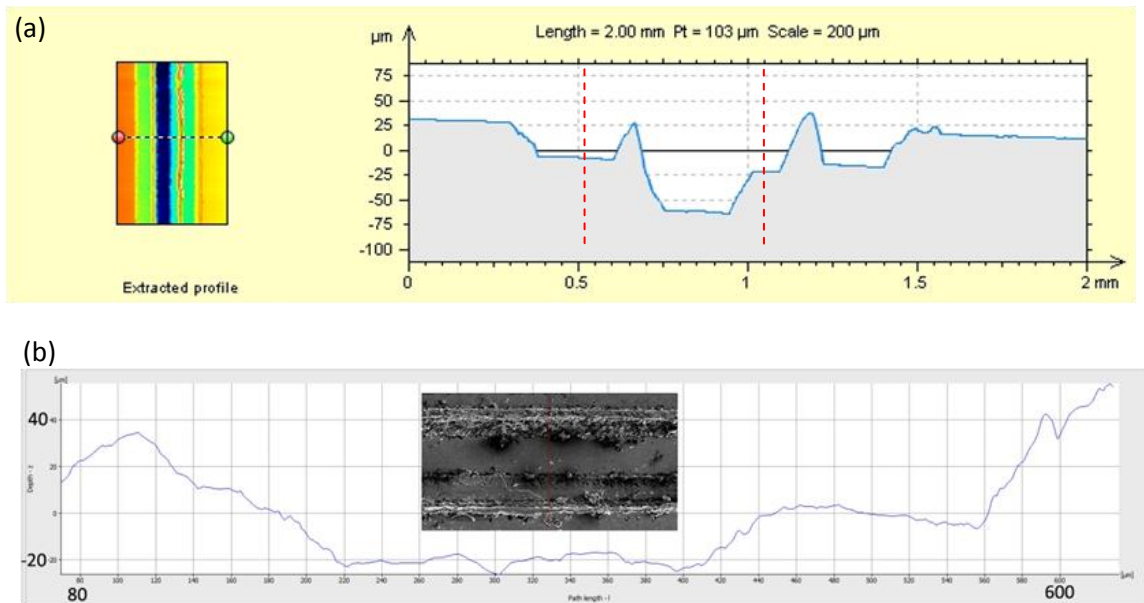


Figura 5.16: Referências para a obtenção dos perfis de rugosidade para extração dos parâmetros para a amostra de Ni: (a) perfilômetro de contato (as linhas tracejadas vermelhas indicam a região em comum com as análises feitas pelo MeX), e (b) MeX.

Para a região RC10/25a da superfície de fratura de mostrada na Figura 5.5, os resultados são apresentados na Figura 5.17 para a perfilometria e na Figura 5.18 para o MeX. Na Tabela 5.6 são apresentados os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos para essa superfície por ambas as técnicas. O *cut-off* adotado foi de 800 μm e os parâmetros de perfil foram obtidos conforme indica a Figura 5.19.

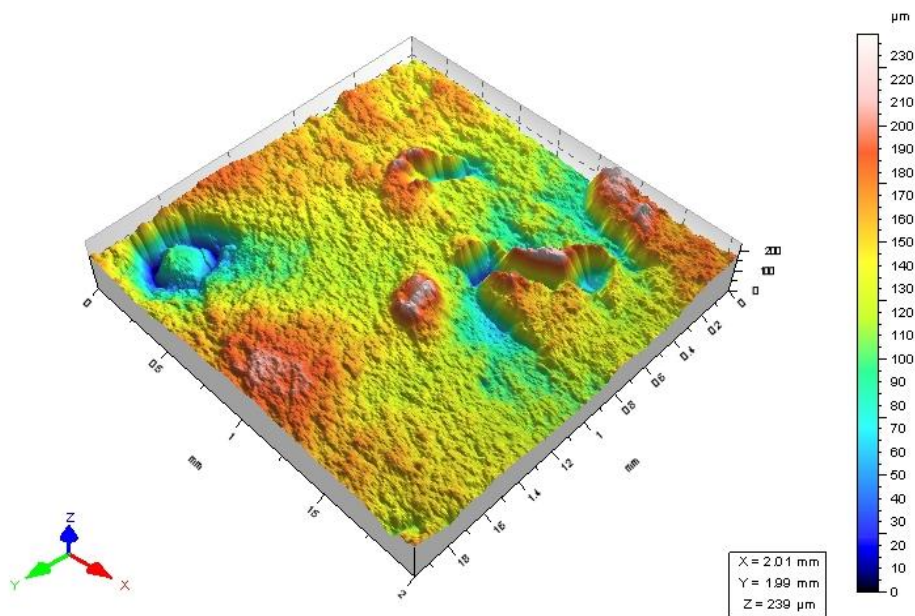


Figura 5.17: Topografia tridimensional obtida pelo perfilômetro da superfície de fratura da região RC10/25a, mostrada na Figura 5.5.

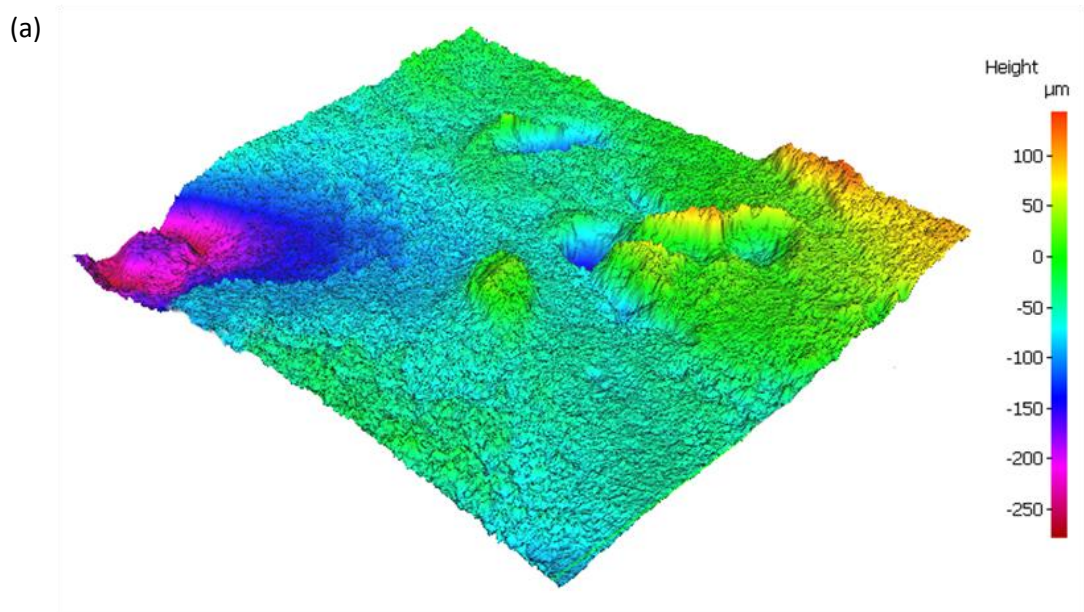


Figura 5.18: Modelo tridimensional reconstruído para a superfície de fratura região RC10/25a com ângulo de inclinação de: (a) $\pm 5^\circ$ e (b) $\pm 10^\circ$ (continua na próxima página).

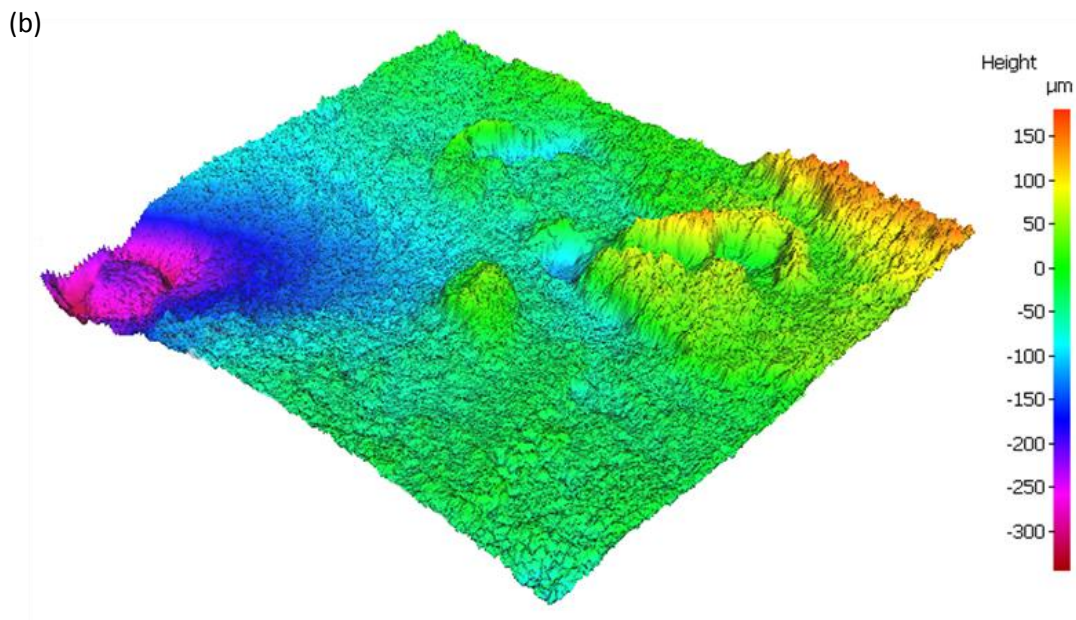


Figura 5.18: Modelo tridimensional reconstruído para a superfície de fratura região RC10/25a com ângulo de inclinação de: (a) $\pm 5^\circ$ e (b) $\pm 10^\circ$.

Tabela 5.6: Parâmetros de rugosidade obtidos para a superfície da região RC10/25a pelas técnicas de perfilometria de contato e estereofotogrametria.

| Parâmetros de rugosidade [μm] | Perfilometria | MeX | |
|--|---------------|---------------|----------------|
| | | $\pm 5^\circ$ | $\pm 10^\circ$ |
| Ra | 14,4 | 15,6 | 18,4 |
| Rq | 19,7 | 22,3 | 25,2 |
| Rz | 99,6 | 70,5 | 79,9 |
| Sa | 24,5 | 10,4 | 12,7 |
| Sq | 31,0 | 16,4 | 18,7 |
| Sz | 239,0 | 219,7 | 211,0 |

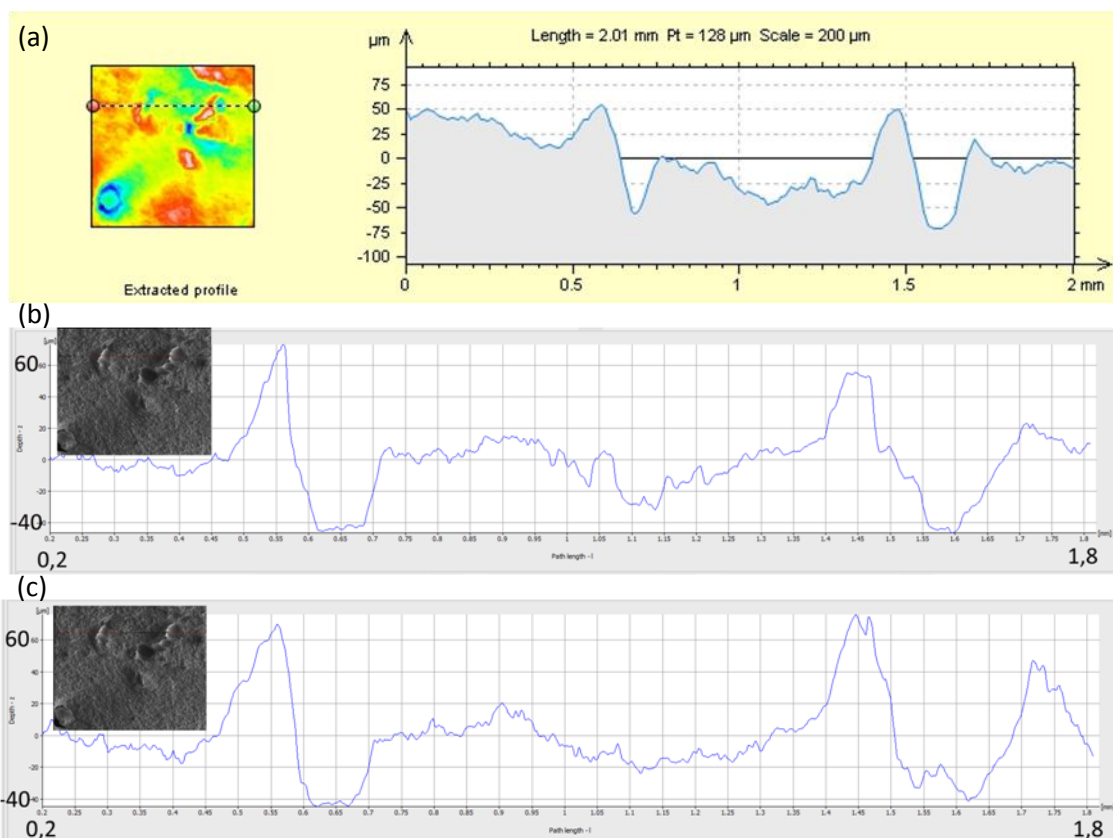


Figura 5.19: Referências para a obtenção dos perfis de rugosidade para extração dos parâmetros para a região RC10/25a: (a) perfilômetro de contato, (b) MeX ± 5 e (c) MeX ± 10 .

Para a amostra de Ni, a diferença de altura (diferença entre a maior e a menor coordenada) entre os resultados obtidos pelo perfilômetro e pelo MeX é de aproximadamente 25%. Já no caso da amostra de superfície de fratura, verifica-se qualitativamente que os formatos dos perfis topográficos estão semelhantes, sendo que o modelo de $\pm 5^\circ$ apresentou um perfil mais próximo. De maneira quantitativa, uma diferença de altura de cerca de 12% foi encontrada para a coordenada z. De acordo com Marinello et al. ⁽²⁹⁾, idealmente a elevação vertical em relação aos valores tomados por referência não deve ser maior do que 5% e indica que erros maiores podem ter relação com a calibração incorreta do MEV, a desvios da condição de eucentricidade ou ainda a problemas de qualidade das imagens coletadas. No entanto, a primeira fonte de erro sugerida não deve ser a causa do problema apresentado neste trabalho, uma vez que, com o uso do trio de imagens, é realizada uma calibração automática dos ângulos de inclinação quando do processamento das imagens no MeX.

Com relação aos parâmetros de rugosidade calculados por ambos os métodos, percebe-se boa concordância entre Ra e Rq, principalmente para o caso da amostra de Ni. Para a superfície de

fratura, as diferenças foram maiores, com o parâmetro Ra para o modelo reconstruído com ângulo de inclinação de $\pm 5^\circ$ tendo menor diferença (8%) com relação à perfilometria. A discrepância de Rz entre as técnicas para a amostra de Ni foi a mais acentuada, mas como este parâmetro relaciona-se com a diferença de picos e vales extremos, ele é mais sensível as diferenças da coordenada z observada.

Além disso, a diferença na resolução das técnicas, tanta na altura (direção z) como no plano (direções x e y) também pode ser uma fonte adicional dessas diferenças nos resultados.

De maneira geral, os resultados obtidos pelo MeX são condizentes com os da perfilometria, com diferenças importantes a serem consideradas para a coordenada z, o que resulta em algumas das discrepâncias encontradas para os parâmetros de rugosidade calculados por ambas as técnicas. Nesse sentido, acredita-se que mais testes devam ser executados a fim de se determinar as melhores condições para a coleta das imagens para a estereofotogrametria, principalmente com relação ao ângulo de inclinação mais adequado para a topografia das superfícies analisadas, uma vez que se percebem diferenças acentuadas entre as elevações verticais dos modelos produzidos a partir das imagens com inclinações de ± 5 e $\pm 10^\circ$.

Por fim, uma comparação entre a rugosidade apresentada para as superfícies reconstruídas a partir das imagens inclinadas com os ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$ foi realizada a fim de se observar quantitativamente a diferença entre esses modelos. A Figura 5.20 apresenta a comparação dos parâmetros de rugosidade Rq e Sq e a Figura 5.21, comparação da razão da área real pela área projetada, onde é possível observar que as superfícies reconstruídas com imagens com inclinação de $\pm 10^\circ$ apresentam valores superiores de rugosidade. Matematicamente, por meio do teste de hipótese com nível de confiança de 5% confirma-se que tanto a rugosidade Sq quanto a razão das áreas medida e projetada são maiores para as superfícies reconstruídas com $\pm 10^\circ$. Para o parâmetro Rq, entretanto, a tendência observada na Figura 5.20 não é corroborada pelo teste estatístico.

Tendo como base os resultados obtidos por essa verificação de coordenada, pela visualização dos modelos tridimensionais e pelos parâmetros de rugosidade, resultados mais coerentes foram obtidos, de modo geral, com o ângulo de $\pm 5^\circ$, embora ainda se observe diferenças significativas principalmente com relação aos valores da coordenada z.

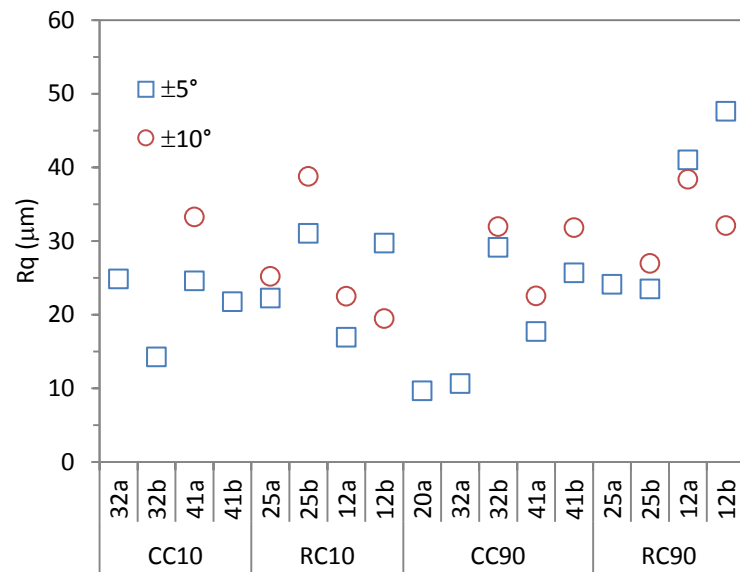


Figura 5.20: Parâmetros de rugosidade Rq e Sq para as regiões reconstruídas com ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$ (continua na próxima página).

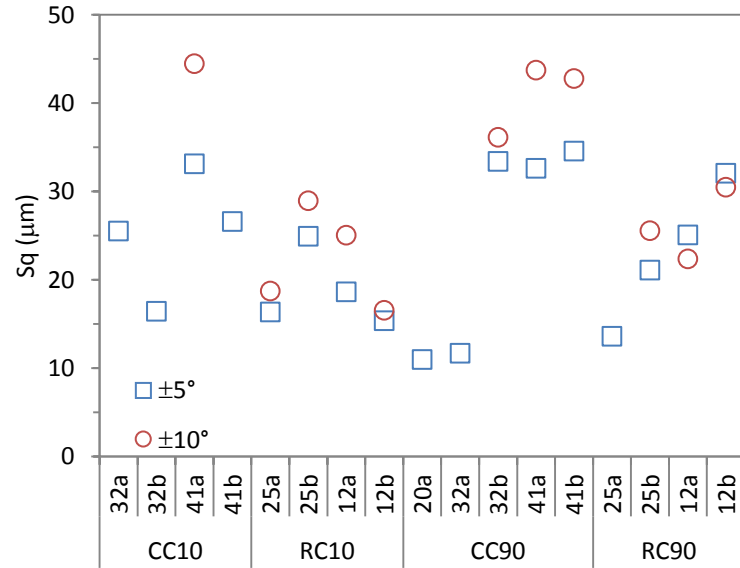


Figura 5.20: Parâmetros de rugosidade Rq e Sq para as regiões reconstruídas com ângulos de ± 5 e $\pm 10^\circ$.

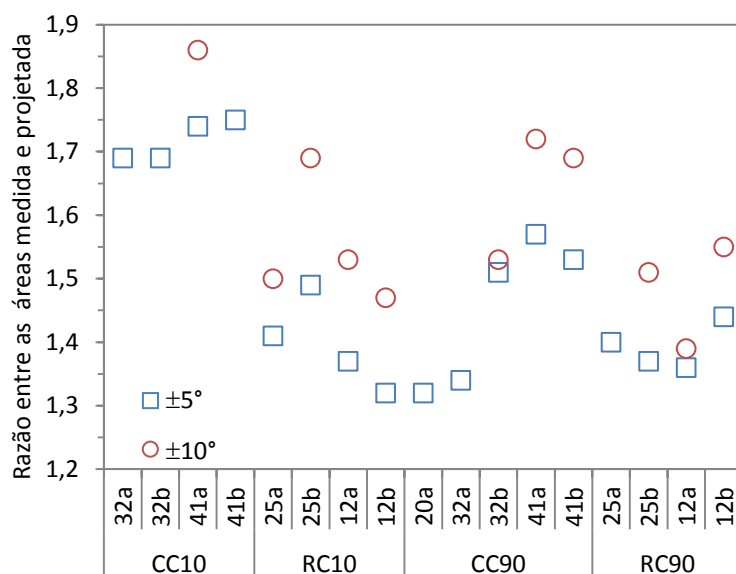


Figura 5.21: Razão da área real pela área projetada para as regiões reconstruídas com ângulos de $\pm 5^\circ$ e $\pm 10^\circ$.

5.5 Caracterização das superfícies reconstruídas

Comparando-se os valores de rugosidade obtidos por medições 2D e 3D, observa-se que não existe um padrão entre elas (Figura 5.22). Se, por um lado, são esperados maiores valores para os parâmetros 3D já que nessas medições mais pontos de dados são coletados, aumentando-se a chance de medir asperidades mais extremas⁽⁵⁹⁾. Por outro lado, pode-se explicar a obtenção de valores mais elevados de R_a e R_q em comparação com os seus equivalentes tridimensionais S_a e S_q para algumas regiões a partir do fato de que para a obtenção dos perfis de rugosidade foi traçada a linha de referência em regiões com muitas mudanças topográficas, sobre porosidade, por exemplo. Segundo Ohlsson et al.⁽⁵⁹⁾ dispersões nas medidas de perfil 2D são bem conhecidos e aceitas, sendo prática comum medir um número de perfis e usar o valor médio dos parâmetros. Portanto, é esperada desses parâmetros uma maior variabilidade, particularmente para superfícies menos regulares.

Os parâmetros de perfil são mais disseminados e empregados por já serem normatizados desde a década de 1980 pelas ISO 4287 e 4288, em contrapartida aos parâmetros tridimensionais que tiveram seu desenvolvimento a partir de 1998 no projeto europeu Surfstand⁽⁶⁰⁾ e só foram completamente padronizados na ISO 25178 em 2012. Apesar disso, as medições bidimensionais fornecem uma descrição incompleta da topografia real da superfície

analisada. As informações obtidas via medições de área, por outro lado, são mais abrangentes que as de perfil ⁽⁵⁹⁾ pelo fato de ser usado um número de pontos de medidas elevado ($2,8 \times 10^6$ pontos para o caso das superfícies analisadas pelo MeX) para a análise das superfícies.

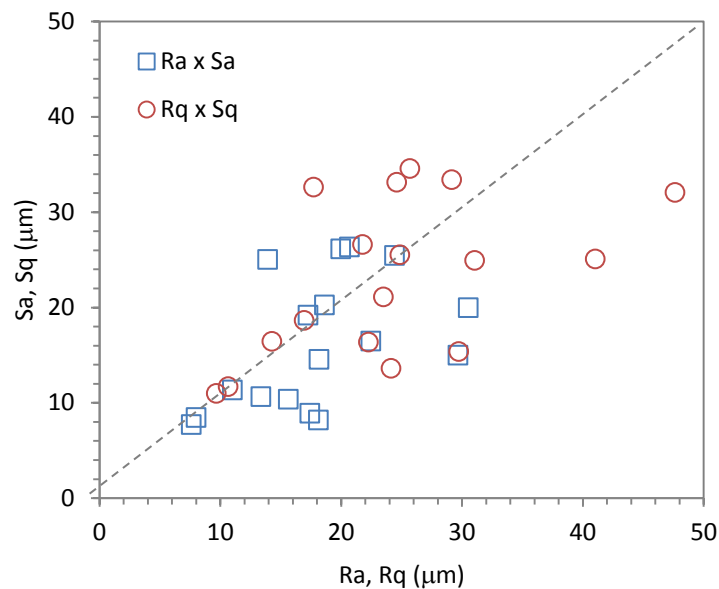


Figura 5.22: Comparação entre os parâmetros de perfil de amplitude Ra e Rq e seus equivalentes superficiais Sa e Sq.

Dessa forma, a primeira etapa para se caracterizar as superfícies de fratura consistiu em identificar os parâmetros 3D de amplitude Sa e Sq e a razão da área medida pela área projetada como tendo melhores relações com os vários níveis de ΔK , conforme ilustra a Figura 5.23 e Figura 5.24. Esses dados foram colocados em função da profundidade em que a solda foi produzida, tendo em vista que foi observado que o método do ensaio (redução de carga ou carga constante) não afeta os resultados. Os parâmetros de rugosidade foram obtidos após filtragem dos comprimentos de onda superior a 0,8mm a partir do filtro λ_c no módulo *SurfaceTextureMeasurement* do MeX.

A partir da avaliação desses dados, observa-se que com o aumento do ΔK a superfície torna-se mais rugosa. Entretanto, deve-se considerar juntamente a esse, o efeito da quantidade de poros amostrada em cada posição.

A caracterização do comportamento da trinca de fadiga para as soldas subaquáticas obtidas nas profundidades de 10 e 90 m foi conduzida pela avaliação dos dados de rugosidade das

superfícies geradas, bem como pela observação dos modelos tridimensionais reconstruídos pelo MeX (ver APÊNDICE B). Observa-se que nas posições em que foi amostrada maior quantidade de poros as deflexões das trincas são mais acentuadas como consequente interação da trinca com os poros. Esse resultado é corroborado pelos valores de rugosidade maiores apresentados pelas superfícies em que mais poros foram amostrados, conforme ilustrado na Figura 5.25. Além da quantidade, o tamanho dos poros também intensifica esse efeito. Por outro lado, deve-se considerar o fato de que os valores de rugosidade estejam influenciados pela própria presença dos poros (variações de altura associadas a eles), já que esses são considerados nessas medidas.

É importante ressaltar que esse resultado é válido independente da profundidade de soldagem, pois como apenas algumas regiões das superfícies dos corpos de prova selecionadas foram avaliadas e a escolha dessas regiões foi baseada unicamente nos valores de ΔK apresentados, ocorreu que algumas regiões dos cps CC10 e RC10 soldados a 10 m apresentam maior porosidade que algumas dos cps CC90 e RC90 soldados a maior profundidade.

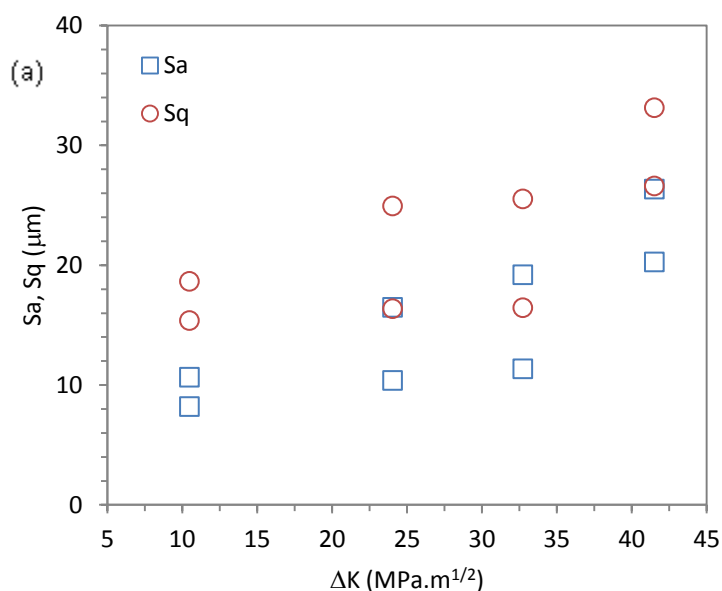


Figura 5.23: Relação entre os parâmetros Sa e Sq e ΔK para as superfícies avaliadas das soldas nas profundidades de: (a) 10 m e (b) 90 m (continua na próxima página)

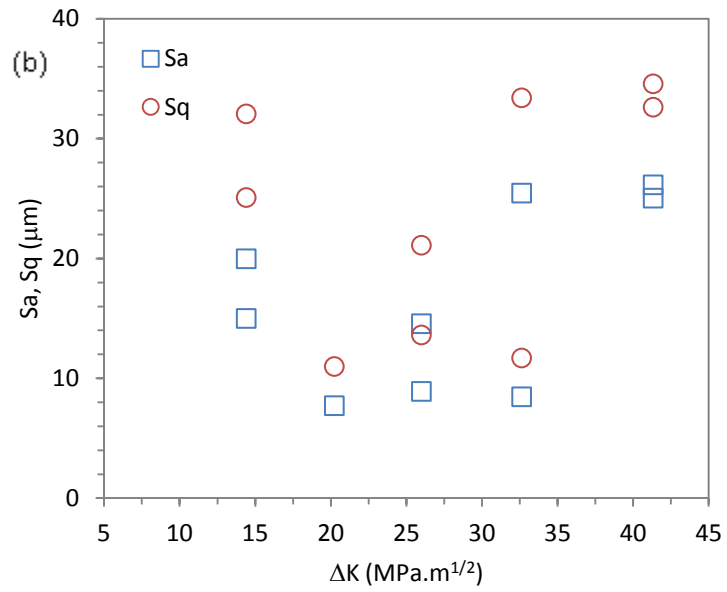


Figura 5.23: Relação entre os parâmetros Sa e Sq e ΔK para as superfícies avaliadas das soldas nas profundidades de: (a) 10 m e (b) 90 m.

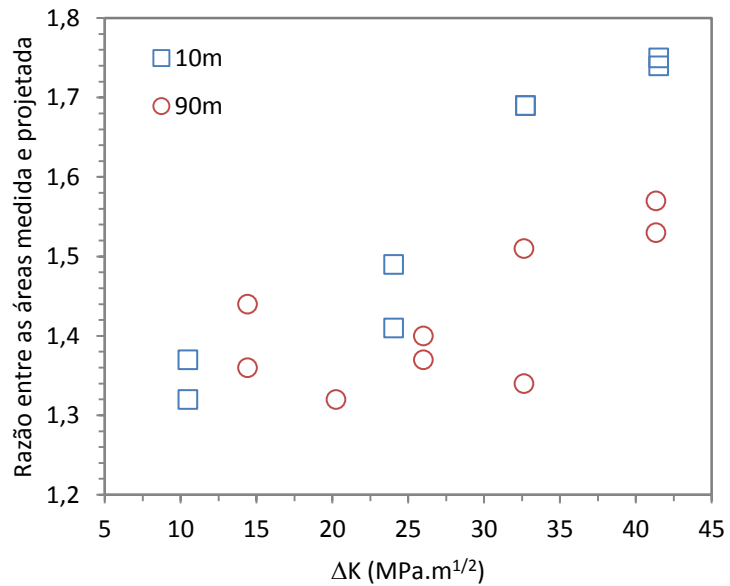


Figura 5.24: Relação entre a razão entre as áreas medida e projetada e ΔK para as superfícies avaliadas.

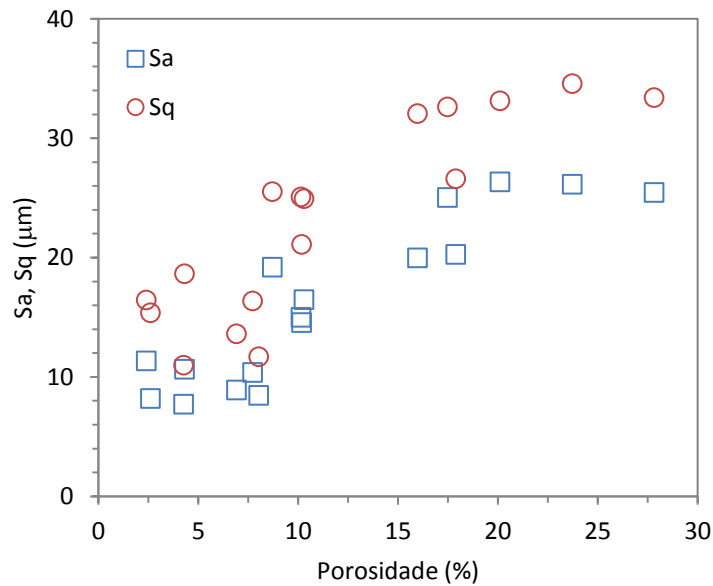


Figura 5.25: Relação entre a rugosidade representada pelos parâmetros de textura superficial Sa e Sq e a quantidade de poros presente nas regiões avaliadas.

A dimensão fractal das superfícies reconstruídas também foi obtida pela ferramenta *SurfaceTextureMeasurement* do software MeX com o intuito de correlacioná-la com as características dinâmicas da falha por fadiga. A Tabela 5.7 apresenta os dados de dimensão fractal, extraídos dos modelos reconstruídos com ângulo de inclinação $\pm 5^\circ$ e *cut-off* de $800 \mu\text{m}$, e os parâmetros dos ensaios de fadiga obtidos a partir dos ensaios de propagação de trinca por fadiga realizados por Arias ⁽¹⁾.

A Figura 5.26 compara os valores de dimensão fractal para as superfícies reconstruídas. Nota-se que os valores de dimensão fractal aumentaram a partir do ΔK igual a $30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Além disso, o comportamento da dimensão fractal em relação ao ΔK assemelha-se muito com a sua relação com o tamanho da trinca (Figura 5.27). Esse resultado já esperado uma vez que a taxa de propagação da trinca depende de ΔK . Desse modo, à medida que a velocidade de propagação da trinca aumenta, os valores da dimensão fractal, associados às respostas do material às condições mecânicas locais do processo de fratura, aumentam.

É interessante notar que tanto a região II, quanto a região do limiar, estudadas apresentam praticamente a mesma dimensão fractal, apesar das diferenças de condições de ensaio. Esse fato pode indicar que essas superfícies foram formadas por um mecanismo de fratura em comum. Ainda, a homogeneidade da dimensão fractal para as superfícies estudadas pode

inviabilizar, por outro lado, a utilização deste parâmetro para caracterizar e comparar tais superfícies. Portanto, a descrição de rugosidade das superfícies pode ser feita de modo mais eficiente, para este caso em estudo, adotando os parâmetros de textura superficial, especialmente Sq.

Além disso, a partir da Figura 5.28, que mostra a relação entre a dimensão fractal e a porosidade nas regiões analisadas, é possível verificar que a presença de poros não afeta estes resultados, ao contrário do que foi observado para os parâmetros de rugosidade Sa e Sq (Figura 5.25).

Por fim, pode-se considerar que os valores encontrados estão condizentes com a literatura. Segundo Paggi e Carpinteri ⁽⁶¹⁾, a dimensão fractal não deve ser maior que 2,5 para superfícies de fratura por fadiga, uma vez que isso implicaria em características superficiais que não condizem com a dinâmica deste processo de fratura. Outra autora ⁽⁴⁵⁾ encontrou valores mais elevados que os deste trabalho, 2,3 a 2,6; pode-se entender que, além dos materiais estudados serem diferentes, tal fato se deva a diferenças no método de obtenção das superfícies de fratura. Em todos os casos, os valores de ΔK dos ensaios de fadiga foram mais elevados (da ordem de 50 a 130 MPa.m^{1/2}), o que pode influenciar nos valores da dimensão fractal conforme apresentado na Figura 5.26.

Tabela 5.7: Dimensão fractal e dados dos ensaios de propagação de trinca para as regiões analisadas.

| Amostra | Posição | Df | ΔK [MPa.m ^{1/2}] | a [mm] |
|---------|--------------|------|------------------------------------|--------|
| CC10 | CC10/32a e b | 2,12 | 32,73 | 12,0 |
| CC10 | CC10/41a e b | 2,12 | 41,51 | 16,0 |
| RC10 | RC10/25a e b | 2,08 | 24,04 | 5,8 |
| RC10 | RC10/12a e b | 2,07 | 10,48 | 13,8 |
| CC90 | CC90/20a | 2,07 | 20,24 | 3,4 |
| CC90 | CC90/32a e b | 2,07 | 32,63 | 11,4 |
| CC90 | CC90/41a e b | 2,08 | 41,33 | 15,4 |
| RC90 | RC90/25a e b | 2,07 | 26,00 | 2,7 |
| RC90 | RC90/12a e b | 2,06 | 14,41 | 10,7 |

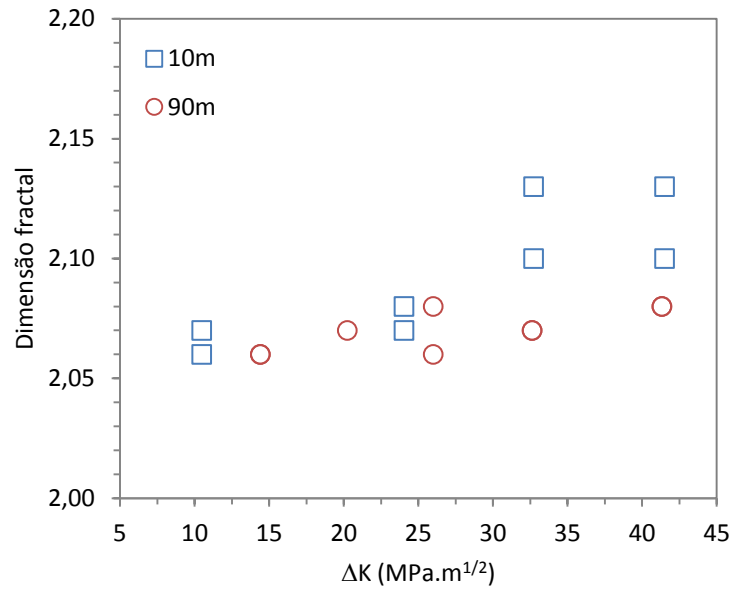


Figura 5.26: Relação entre a dimensão fractal e o ΔK .

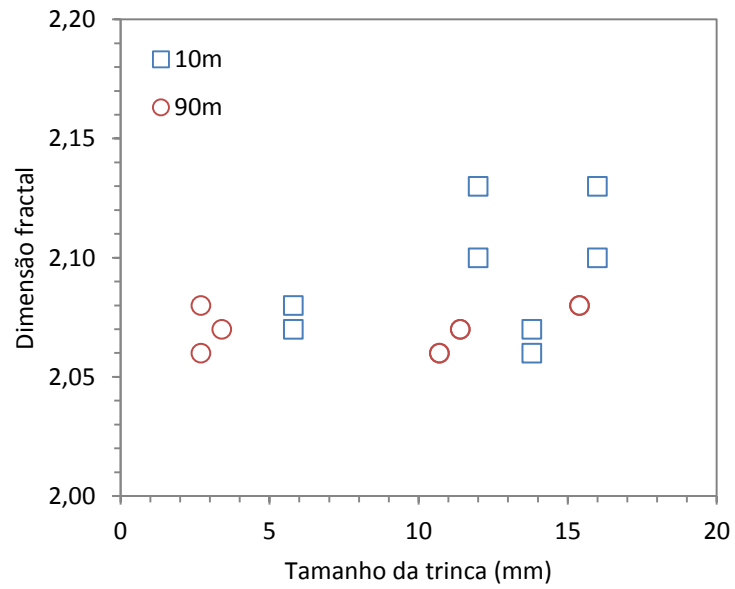


Figura 5.27: Relação entre a dimensão fractal e o tamanho da trinca.

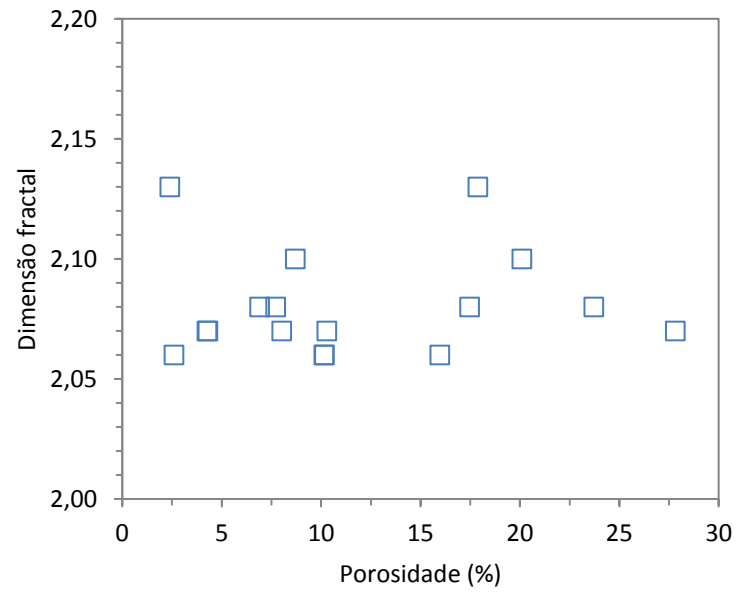


Figura 5.28: Relação entre a dimensão fractal e a quantidade de poros presente nas regiões avaliadas.

6 Conclusões

Superfícies de fratura geradas por fadiga de soldas subaquáticas molhadas foram avaliadas com relação à profundidade de soldagem e às condições de carregamento durante ensaio de fadiga. A geometria do caminho das trincas e a topografia das superfícies foram estudadas por meio de reconstrução tridimensional da superfície de fratura usando estereofotogrametria via MEV. Análise quantitativa das superfícies tridimensionais reconstruídas foi conduzida, focando principalmente na análise de perfil, parâmetros de rugosidade e dimensão fractal. As principais conclusões podem ser resumidas como se segue:

- A aplicação do software MeX mostrou-se como um método conveniente para a reconstrução tridimensional de superfícies a partir de trios de imagens estereoscópicas. As resoluções lateral e vertical desta técnica são limitadas pela resolução do MEV e também pela correta coleta das imagens, em termos do ângulo de inclinação, inclinação eucêntrica e qualidade da imagem, principalmente. A qualidade da imagem, especificamente, mostrou-se crítica para a obtenção de modelos coerentes com a superfície real, especialmente com relação ao balanço entre brilho e contraste. A principal diferença encontrada a partir da reconstrução com diferentes ângulos foi em termos da coordenada z. Os modelos obtidos a partir de imagens inclinadas por $\pm 10^\circ$ apresentaram, de maneira geral, elevações verticais maiores quando comparadas com os mesmos modelos obtidos com $\pm 5^\circ$.
- A partir da comparação entre os métodos de perfilometria de contato e estereofotogrametria, verificou-se diferenças consideráveis para a coordenada z dos modelos reconstruídos, resultando em discrepâncias dos parâmetros de rugosidade. Para a amostra microusinada percebem-se diferenças menores que 4% para os parâmetros analisados, Ra e Rq, pelo software MeX e perfilômetro. Para a superfície de fratura, por outro lado, as medidas de rugosidade feitas pelo MeX e pela perfilômetro apresentam diferenças maiores, sendo que os parâmetros Ra e Rq para o modelo obtido com $\pm 5^\circ$ apresentaram as menores diferenças, 8 e 13%, respectivamente. Resultados mais coerentes foram obtidos, de modo geral, com o ângulo de $\pm 5^\circ$, embora ainda se observe diferenças significativas principalmente com relação aos valores da coordenada z quando comparados aos da perfilometria.

- Com o aumento do ΔK observou-se aumento da rugosidade das superfícies. Resultado semelhante foi encontrado para o aumento da quantidade de poros. Neste caso, a razão para isto pode estar no caminho mais tortuoso da trinca devido a sua interação com os poros ou na própria presença dos poros que contribuem para a obtenção de valores mais elevados dos parâmetros.
- As superfícies de fratura exibem bom comportamento fractal com dimensão no intervalo de 2,06 a 2,12, para as condições de carregamento estudadas, aumentando para maiores valores de ΔK . Devido ao pequeno intervalo em que este parâmetro se encontra, acredita-se que o parâmetro de rugosidade S_q possa ser melhor empregado para caracterizar e comparar essas superfícies. Além disso, a porosidade não demonstrou afetar os valores de dimensão fractal.
- Por fim, o procedimento proposto para estudar as superfícies de fratura geradas por fadiga em soldas subaquáticas molhadas, consistindo na avaliação com as técnicas de reconstrução selecionadas, e análise quantitativa para determinar relações com os resultados dos ensaios de crescimento de trinca por fadiga, bem como com a profundidade de soldagem foi bem sucedida no que se refere a estabelecer algumas correlações entre estes. Entretanto, ainda são necessários estudos mais aprofundados para compreender melhor os mecanismos de propagação de trinca nestes corpos de provas.

7 Relevância dos resultados

Este trabalho explorou uma potencial aplicação da reconstrução tridimensional no estudo de superfícies de fratura em substituição ou aliada aos métodos comumente empregados, como a fractografia, propiciando a possibilidade do estudo quantitativo de tais superfícies.

8 Sugestões para trabalhos futuros

Aprofundar o estudo sobre a aplicação do software MeX:

- Investigar a influência de parâmetros, como distância de trabalho e ângulo de inclinação.
- Definir condições para obtenção das imagens com qualidade ótima para o processamento do software.
- Realizar a calibração da platina do MEV para confirmar o nível de confiança do modo de reconstrução *AutoCalibration* com relação a calibração automática dos ângulos.

Aprofundar o estudo sobre o processo de fratura por fadiga de soldas subaquáticas molhadas:

- Comparar a superfície de fratura dessas soldas com a de materiais sem elevado volume de descontinuidades internas.
- Avaliar o efeito da presença de porosidade nas medições de rugosidade e buscar formas para eliminá-lo ou minimizá-lo.
- Mapear uma maior extensão das superfícies, obtendo mais regiões ao longo da superfície para análise, tendo assim maior amostragem de ΔK , por exemplo, para uma única amostra. Comparar entre amostras diferentes ao contrário do que foi feito neste trabalho.
- Realizar o mapeamento da dimensão fractal ao longo de todo o corpo de prova relacionando-a com o comprimento da trinca e tentar correlacionar os achados com as características dinâmicas da falha por fadiga, presença de trincas secundárias, mudanças de micromecanismos, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ARIAS, A. **Avaliação da propagação de trinca por fadiga em soldas subaquáticas molhadas**. 2017. 96p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- 2 OTEGUI, J. L. **Failure analysis: fundamentals and applications in mechanical components**. Mar del Plata: Springer, 2014.
- 3 WILBY, A. J.; NEALE, D. P. Defects introduced into metals during fabrication and service. In: RAWLINGS, R. D. **Materials Science and Engineering**. [S.l.]: EOLSS, v. 3, 2009. p. 48-75.
- 4 BUFFIERE, J-Y; SAVELLI, S; JOUNEAU, P. H; MAIRE, E; FOUGERES, R. Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-Mg0.3 cast Al alloys. **Materials Science and Engineering**, v. A316, p. 115-126, 2001.
- 5 YAN, Y.; NASH, G.; NASH, P. Effect of density and pore morphology on fatigue properties of sintered Ti-6Al-4V. **International Journal of Fatigue**, v. 55, p. 81-91, 2013.
- 6 PESSOA, E.C.P; BRACARENSE, A.Q; ZICA, E.M; LIU, S; PEREZ-GUERRERO, F. Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 179, p. 239-243, 2006.
- 7 TORRALBA, J; ESTEBAN, L; BERNARDO, E; CAMPUS, M. Understanding contribution of microstructure to fracture behaviour of sintered steels. **Powder Metallurgy**, v. 57, n. 5, p. 357-365, 2014.
- 8 WU, S.C; YU, C; ZHANG, W.H; FU, Y.N; HELFEN, L. Porosity induced fatigue damage of laser welded 7075-T6 joints investigated via synchrotron X-ray microtomography. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 20, n. 1, p. 11-19, 2015.
- 9 FERRIÉ, E.; BUFFIÈRE, J.-Y.; LUDWIG, W. 3D characterisation of the nucleation of a short fatigue crack at a pore in a cast Al alloy using high resolution synchrotron microtomography. **International Journal of Fatigue**, v. 27, p. 1215-1220, 2005.
- 10 DENG, X; PIOTROWSKI, G; CHAWLA, N; NARASIMHAN, K. Fatigue crack growth behavior of hybrid and prealloyed sintered steels. Part I. Microstructure characterization. **Materials Science and Engineering**, v. 491, p. 19-27, 2008.
- 11 BORBÉLY, A; MUGHRABI, H; EISENMEIER, G; HÖPPEL, H. W. A finite element modelling study of strain localization in the vicinity of near-surface cavities as a cause of subsurface fatigue crack initiation. **International Journal of Fracture**, v. 115, p. 227-232, 2002.

- 12 SILVA, L. **Aquisição, processamento e análise de imagens 3D: MicroTC e FIB-SEM na caracterização de defeitos em solda molhada.** 2014. 51p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Processos Químicos) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- 13 ANDRADE, L; DIAS, W; RIBEIRO, L; BRACARENSE, A; PESSOA, E; LIU, S. Efeito do teor de carbono do metal de base e da alma do eletrodo revestido sobre a porosidade em soldas molhadas. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 2, p. 156-164, 2010.
- 14 ARIAS, A. R.; BRACARENSE, A. Q. Velocidade de propagação de trinca por faiga de soldas subaquáticas molhadas: avaliação fora da água. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 403-411, 2015.
- 15 ØDEGÅRD, J.; PEDERSEN, K. **Fatigue properties of an A356 (AlSi7Mg) aluminium alloy for automotive applications - fatigue life prediction.** Society of Automotive Engineers. [S.l.]. 1994. (940811).
- 16 LORENZO, R. **Soldagem molhada de estruturas subaquáticas: visão da mecânica de fratura para material com porosidade acentuada.** 2005. 163p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 17 DIETER, G. Fatigue of Metals. In: DIETER, G. **Mechanical Metallurgy.** SI Metric. ed. London: McGraw-Hill Book Company, 1988. Cap. 12, p. 375-431.
- 18 DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras.** 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- 19 LOBO, R. M. **Reconstrução tridimensional de superfícies de fratura de materiais compósitos do tipo CFRP.** 2009. 87p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear de Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 20 TANAKA, M; KIMURA, Y; CHOUANINE, L; TAGUCHI, J; KATO, R. Quantitative analysis of three-dimensional fatigue fracture surface reconstructed by stereo matching method. **ISIJ International**, v. 43, n. 9, p. 1453-1460, 2003.
- 21 JIANG, J.; SAKAI, S. Stereoscopic fracture surface analysis by SEM using advanced stereo matching. **Materials Science Research International** , v. 8, n. 1, p. 32-37, 2002.
- 22 TANAKA, M; KIMURA, Y; KATO, R; TAGUCHI, J; OYAMA, N. Image reconstruction and geometrical analysis of three-dimensional fracture surfaces in materials. In: ČELEBONOVIC, V., et al. **Trends in materials science research.** New York: Nova Science Publishers, 2006. Cap. 2, p. 49-79.
- 23 CARLI, L. **3D-SEM metrology for coordinate measurements at the nanometer scale.** Technical University of Denmark. Kongens Lyngby, p. 252. 2010.

- 24 PIAZZESI, G. Photogrammetry with the scanning electron microscope. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 6, n. 4, p. 392-396, 1973.
- 25 BARIANI, P; DE CHIFFRE, L; HANSEN, H; HORSEWELL, A. Investigation on the traceability of three dimensional scanning electron microscope measurements based on the stereo-pair technique. **Precision Engineering**, v. 29, p. 219-228, 2005.
- 26 TANAKA, M; KIMURA, Y; TAGUCHI, J; KATO, R. Fracture surface topography and fracture mechanism in austenitic SUS316 steel plates fatigued by repeated bending. **Journal of Materials Science**, v. 41, p. 2885-2893, 2006.
- 27 ALICONA IMAGING GMBH. **MeX: turn your SEM into a 3D measurement device**. Grambach/Graz.
- 28 CAVALLINI, M.; DI BARTOLOMEO, O.; IACOVIELLO, F. Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 75, p. 694-704, 2008.
- 29 MARINELLO, F; BARIANI, P; SAVIO, E; HORSEWELL, A; DE CHIFFRE, L. Critical factors in SEM 3D stereo microscopy. **Measurement Science and Technology**, v. 19, p. 1-12, 2008.
- 30 BHUSHAN, B. Surface roughness analysis and measurement techniques. In: BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**. [S.l.]: CRC Press, v. 1, 2000. Cap. 2.
- 31 LIU, X; TIAN, J; HAN, N; KANG, Y; WANG, Z. Quantitative study of correlation between fracture surface roughness and fatigue properties of Sic/Al composites. **Materials Letters**, v. 29, p. 235-240, 1996.
- 32 GADELMAWLA, E; KOURA, M; MAKSOU, T; ELEWA, I; SOLIMAN, H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, p. 133-145, 2002.
- 33 BLUNT, L.; JIANG, X. Numerical parameters for characterisation of topography. In: BLUNT, L.; JIANG, X. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"**. West Sussex: Kogan Page Science, 2003. Cap. 2, p. 17-41.
- 34 OLIVEIRA, C. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados a topografia de superfícies em usinagens**. 2004. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 35 ALICONA IMAGING GMBH. **MeX manual**. Raaba/Graz. 2013.
- 36 DIGITAL SURF. Leveling and form removal, 2017. Disponível em: <<http://www.digitalsurf.com/en/guide-leveling-form-removal.html>>. Acesso em: 01 set. 2017.
- 37 BLATEYRON, F. Good practices for the use of areal filters. **Digital Surf**, p. 12, 2014.

- 38 TOMOV, M.; KUZINOVSKI, M.; TRAJČEVSKI, N. **Function on Gaussian and 2RC filters to determine the roughness profile in real non-periodic and periodic surfaces**. 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 9-12.
- 39 BRINKMAN, S.; BODSCHWINNA, H. Advanced Gaussian filters. In: BLUNT, L.; JIANG, X. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"**. West Sussex: Kogan Page Science, 2003. Cap. 4, p. 63-90.
- 40 OLYMPUS. Roughness terminology, 2010. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/dictionary/>>. Acesso em: 06 set. 2017.
- 41 SILVA, E. M. **Análise da superfície de fratura do aço inoxidável duplex UNS S31803 através da aplicação da geometria dos fractais**. 2002. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- 42 DAUSKARDT, R. H.; HAUBENSAK, F.; RITCHIE, R. O. On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 38, n. 2, p. 143-159, 1990.
- 43 OLIVEIRA, J. A. **Comportamento fractal de superfícies de fadiga em ligas aeronáuticas**. 2012. 77p. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.
- 44 TANAKA, M; KIMURA, Y; KAYAMA, A; KATO, R; TAGUCHI, J. Fractal analysis of three-dimensional fracture surfaces in metals and ceramics. **ISIJ International**, v. 44, n. 7, p. 1250-1257, 2004.
- 45 MARQUES, T. **Fractografia quantitativa de superfícies obtidas em ensaios de propagação de trincas por fadiga em aço inoxidável 15-5PH**. 2012. 99p. Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- 46 CHEREPANOV, G. P.; BALANKIN, A. S.; IVANOVA, V. S. Fractal fracture mechanics - A review. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 51, n. 6, p. 997-1033, 1995.
- 47 ANNADHASON, A. Methods of fractal dimension computation. **International Journal of Computer Science and Information Technology & Security**, v. 2, n. 1, p. 166-169, 2012.
- 48 VENKATESH, B.; CHEN, D.; BHOLE, S. Three-dimensional fractal analysis of fracture surfaces in a titanium alloy for biomedical applications. **Scripta Materialia**, v. 59, p. 391-394, 2008.
- 49 TANG, W.; WANG, Y. Fractal characterization of impact fracture surface of steel. **Applied Surface Science**, v. 258, p. 4777-4781, 2012.
- 50 AMELI, P.; ELKHOURY, J. E.; DETWILER, L. High-resolution fracture aperture mapping using optical profilometry. **Water Resources Research**, v. 49, p. 7126-7132, 2013.

- 51 MAGALHÃES, L.; SEABRA, J.; SÁ, C. Experimental observations of contact fatigue crack mechanisms for austempered ductile iron (ADI) discs. **Wear**, v. 246, p. 134-148, 2000.
- 52 JHA, S; SZCZEPANSKI, C; GOLDEN, P; PORTER III, W; JOHN, R. Characterization of fatigue crack-initiation facets in relation to lifetime variability in Ti-6Al-4V. **International Journal of Fatigue**, v. 42, p. 248-257, 2012.
- 53 STAMPFL, J. et al. Reconstruction of surface topographies by scanning electron microscopy for application in fracture research. **Applied Physics A**, v. 63, p. 341-346, 1996.
- 54 MBUYA, T; SINCLAIR, I; MOFFAT, A; REED, P. Micromechanisms of fatigue crack growth in cast aluminium piston alloys. **International Journal of Fatigue**, v. 42, p. 227-237, 2012.
- 55 VOJTEK, T; POKLUDA, J; HOHENWARTER, A; PIPPAN, R. Three-dimensional morphology of fracture surfaces generated by modes II and III fatigue loading in ferrite and austenite. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 108, p. 285-293, 2013.
- 56 DEXTER, R; NORRIS, E; SCHICK, W; WATSON, P. **Performance of underwater weldments**. Southwest Research Institute. San Antonio, p. 253. 1986. (SR 1283).
- 57 WATSON, P.; TSAI, C.; WOOD, B. Fitness for service design application for underwater wet welds. In: LIU, S., et al. **International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures**. New Orleans: [s.n.], 1994. p. 215-251.
- 58 PIPPAN, R.; HOHENWARTER, A. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 40, n. 4, p. 471-495, 2017.
- 59 OHLSSON, R.; ROSÉN, B.; WESTBERG, J. The interrelationship of 3D surface characterisation techniques with standardised 2D techniques. In: BLUNT, L.; JIANG, X. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"**. West Sussex: Kogan Page Science, 2003. Cap. 8, p. 197-220.
- 60 BLUNT, L. Introduction: the history and current state of 3D surface characterisation. In: BLUNT, L.; JIANG, X. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"**. West Sussex: Kogan Page Science, 2003. Cap. 1, p. 1-13.
- 61 PAGGI, M.; CARPINTERI, A. Fractal and multifractal approaches for the analysis of crack-size dependent scaling laws in fatigue. **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 40, p. 1136-1145, 2009.
- 62 MEX version 6.1. Alicona Imaging GmbH. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- 63 SCHOETTNER, H.; SCHMIED, M.; SCHERER, S. Comparison of 3D surface reconstruction data from certified depth standards obtained by SEM and an Infinite Focus Measurement Machine (IFM). **Microchimica Acta**, v. 155, p. 279-284, 2006.

APÊNDICE A

Procedimento para reconstrução tridimensional usando o software MeX

O software possui interface amigável e é relativamente fácil de ser usado. Primeiramente, deve-se criar um banco de dados que, por sua vez, é organizado em pastas, projetos e objetos de forma hierárquica, conforme ilustra a Figura A.1. Objetos contêm os dados da reconstrução e são organizados dentro de projetos. Pastas podem ser criadas para diferentes usuários ou podem ser usadas para organizar os dados no banco de dados para um mesmo usuário.

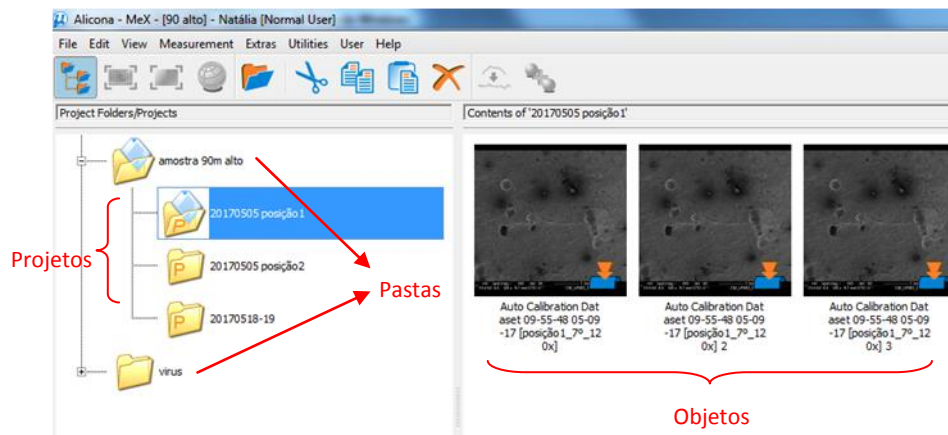


Figura A.1: Banco de dados do MeX (*screenshot*) ⁽⁶²⁾.

O software oferece duas opções de reconstrução: *Stereo Creator* e *Auto Calibration*. No primeiro são carregadas as duas imagens inclinadas para a criação do modelo, já no modo *Auto Calibration* o software requer uma imagem extra, com inclinação zero. O manual do MeX ⁽³⁵⁾ oferece a seguinte descrição de situações em que cada tipo se aplica:

- *Stereo Creator*:
 - Ângulos de inclinação conhecidos com precisão
 - Objetos com pouca informação estrutural
 - Objetos que devem ser medidos com rapidez
- *Auto Calibration*:
 - Objetos em que estruturas muito pequenas devem ser medidas

- Ângulos de inclinação não são conhecidos com precisão
- Objetos em que resultados rastreáveis são necessários
- Objetos com suficientes mudanças de altura
- Ângulos de inclinação maiores ou iguais a 5°
- Suficiente informação estrutural ao longo da imagem
- Não é ideal pra imagens obtidas com baixa ampliação e pequena distância de trabalho

A ferramenta *Auto Calibration* é baseada na autocalibração dos ângulos de inclinação entre a imagem da esquerda e a central e entre a central e a da direita, tomando como base os valores nominais fornecidos pelo operador. A precisão desse método tem sido relatada ⁽⁶³⁾ como de até 0,05°. O resultado final da reconstrução é então baseado na média das reconstruções desses dois pares estereoscópicos. A vantagem desse modo é que, como a precisão das medidas tridimensionais depende da precisão do ângulo de inclinação adotado, não há influência do usuário e da calibração adequada da inclinação obtida no MEV.

Fazendo-se a escolha do modo de reconstrução e realizando o carregamento das imagens, que devem estar alinhadas com a direção da inclinação eucêntrica, três informações devem ser fornecidas como parâmetros de entrada: ângulo de inclinação, *projection distance* (soma da distância de trabalho e um parâmetro do equipamento igual a 9,9 mm, ver Figura A.2) e *sampling distance*, que se refere ao tamanho do pixel da imagem em medidas reais e que pode ser calculada no próprio programa desde que a imagem possua uma barra de escala. Com relação aos ângulos, segundo MeX ⁽⁶²⁾ ângulos entre 5 e 20° são tipicamente usados. De maneira geral, é recomendado que ângulos pequenos sejam selecionados para amostras com suficiente informação estrutural e alta ampliação, e ângulos maiores para amostras mais planas por fornecerem melhor resolução vertical.

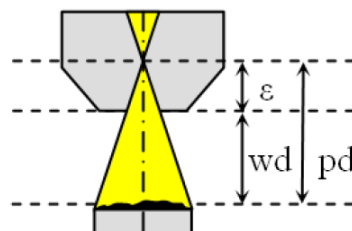


Figura A.2: *Projection distance* (pd), distância de trabalho (wd – *working distance*) e parâmetro ϵ , dependente do MEV ⁽³⁵⁾.

A partir desses três parâmetros de entrada, as três coordenadas introduzidas no modelo teórico descrito pelas Equações (3.2), (3.3) e (3.4) podem ser calculadas. Entretanto, não é possível saber como o MeX opera em suas reconstruções, uma vez que o algoritmo de reconstrução usado no MeX é patenteado pela Alicona ⁽²³⁾.

Após entrada dos parâmetros necessários, o próximo passo é configurar valores manual ou automaticamente para o *Global Offset*, que representa o ponto de partida para o algoritmo do MeX corresponder pontos nas imagens do par ou trio baseado nas disparidades. No caso ideal em que as imagens foram adquiridas mantendo o centro, o *offset* deve ocorrer apenas ao longo do eixo horizontal. Entretanto, frequentemente uma inclinação eucêntrica ideal é difícil de ser obtida, seja por mau posicionamento da amostra ou desalinhamentos. Assim, um valor para o *offset* vertical é detectado, servindo também como indicador para o quão próximo ao real foi mantida a posição eucêntrica. A Figura A.3 apresenta uma comparação entre uma inclinação eucêntrica correta e incorreta. No caso ideal, o eixo principal e o eixo de inclinação intersectam-se no ponto K_{ez} no topo da superfície, resultando em um ponto central estático na imagem. Já no caso não ideal, esses eixos intersectam-se abaixo ou acima da superfície no ponto K_{ne} . Como o caso ideal é difícil de ser realizado na prática, o programa oferece uma ferramenta chamada *Rectification* que permite a correção rotacionando ou distorcendo a imagem, podendo ocorrer, todavia, perda de informações de profundidade ⁽³⁵⁾. Pequenos desvios dessa posição, no entanto, não tendem a provocar efeitos significativos no resultado final.

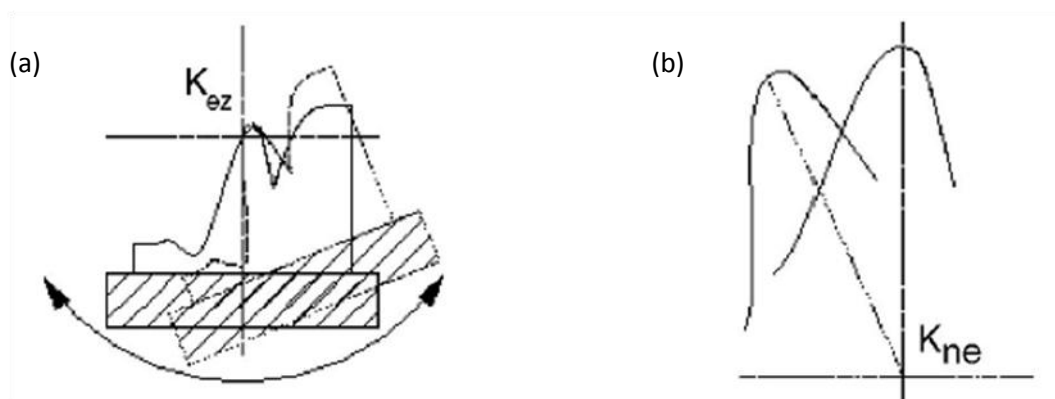


Figura A.3: (a) inclinação eucêntrica correta e (b) inclinação incorreta, onde o eixo de inclinação fica abaixo da superfície da amostra ⁽³⁵⁾.

A última etapa é selecionar uma região de interesse (ROI) onde a reconstrução 3D será feita. É possível, então, remover textos e partes da imagem consideradas desnecessárias. No caso do modo *Stereo Creator*, primeiramente um modelo de elevação digital (Digital Elevation Model – DEM) é criado e, após confirmação do operador de que o modelo parece razoável, o DEM final é gerado. Já no modo *Auto Calibration*, não há a criação desse modelo inicial. O modelo final pode ser exportado como imagens em diferentes formatos ou como dados em arquivo de texto, por exemplo, e permite escolher o número desejado de pontos que irão compor a nuvem.

Após a obtenção dos modelos 3D algumas operações podem se fazer necessárias para ajustar a superfície criada. Tais operações podem ser feitas no próprio MeX que fornece diversas ferramentas para correção dos modelos, como remoção de defeitos na superfície e de parte do conjunto de dados, por exemplo. No caso deste trabalho, a ferramenta *Workpiece Coordinate System* foi empregada a fim de se ajustar o plano do modelo reconstruído. Dessa forma, como pode ser visto na Figura A.4, primeiramente um método deve ser selecionado, dependendo do tipo de superfície. Em seguida, uma determinada região ou o *dataset* inteiro deve ser tomado como referência. Um modo de cálculo usando todos os pontos do *dataset* (*Automatic/Best Fit*) ou um que não seja influenciado por picos e vales (*Automatic Robust*) deve ser escolhido. Este último apesar de melhores resultados leva um tempo maior no processo. Há também a opção de se realizar esse ajuste de coordenadas manualmente.

O MeX ainda apresenta várias outras ferramentas, denominados módulos de medição (*measurement modules*) em conformidade com normas EN/ISO. As que foram usadas neste trabalho foram: extração de perfil, cálculo de parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_z , R_p , R_v , R_c , R_{Sm} , R_{sk} , R_{ku} , R_{dk}) de acordo com as normas ISO 4287/4288 e ISO 11562, bem como a filtragem de perfis por meio do valor λ_c e análise de área que fornece a determinação dos parâmetros S_a , S_q , S_z , S_p , S_v e cálculo da dimensão fractal (D_f).

Existem, portanto, dois módulos para determinação da rugosidade no MeX, *ProfileRoughnessMeasurement* e *SurfaceTextureMeasurement*. Na Tabela A.1 estão apresentadas algumas características desses métodos que auxiliam na escolha do método mais adequado.

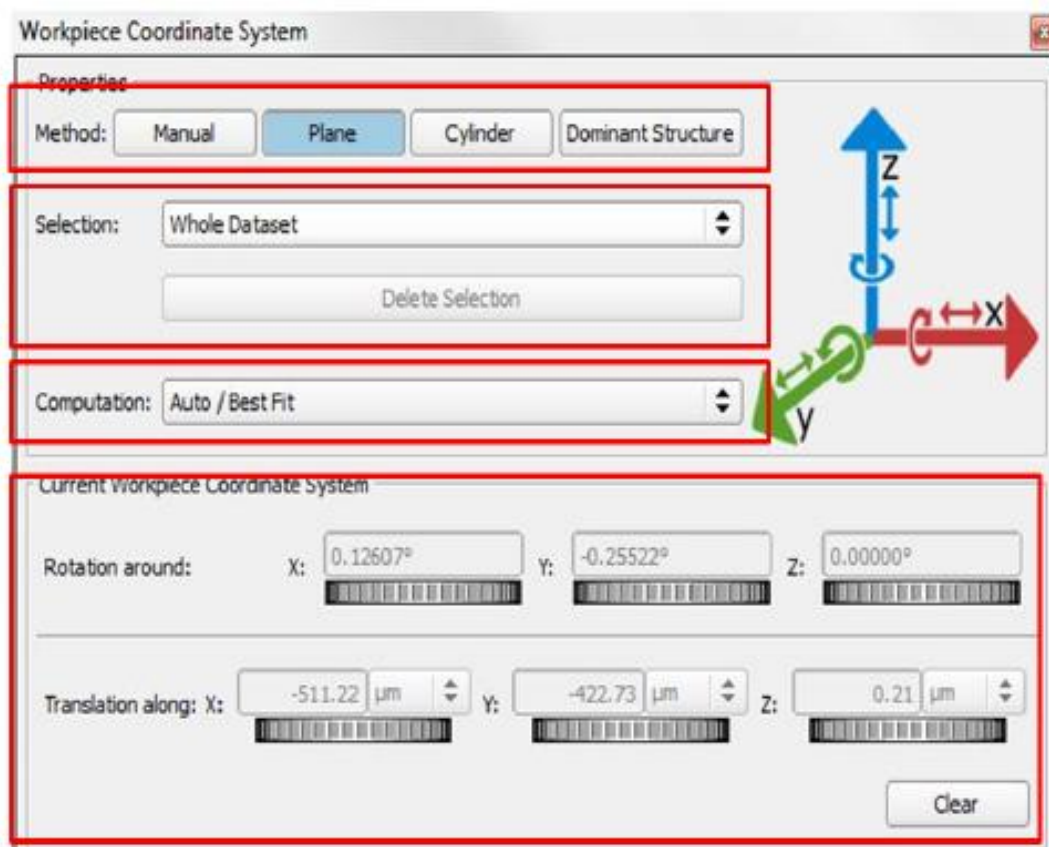


Figura A.4: Ferramenta *Workpiece Coordinate System* do MeX ⁽³⁵⁾.

Tabela A.1: Parâmetros dos módulos de cálculo de rugosidade disponível no MeX ⁽³⁵⁾.

| Critério | <i>ProfileRoughnessMeasurement</i> | <i>SurfaceTextureMeasurement</i> |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Popularidade | Bem conhecido | Relativamente novo |
| Background | ISO 4287, 4288 | Livro <i>Surfstand</i> |
| Repetibilidade | Média | Alta |
| Área avaliada | Pequena | Grande |
| Resultados | Ra, Rq, Rz | Sa, Sq, Sz |
| Estrutura da superfície | Com direção | Sem direção |

A obtenção dos parâmetros de rugosidade está condicionada a algumas operações. O MeX realiza automaticamente uma filtragem inicial normalmente para se eliminar fontes de ruído e o nivelamento da superfície, conforme mostram os fluxogramas da Figura A.5. A partir disso é obtido o perfil ou superfície primária e, em seguida, um *cut-off* deve ser selecionado para separar rugosidade de ondulação para finalmente os parâmetros de rugosidade poderem ser extraídos.

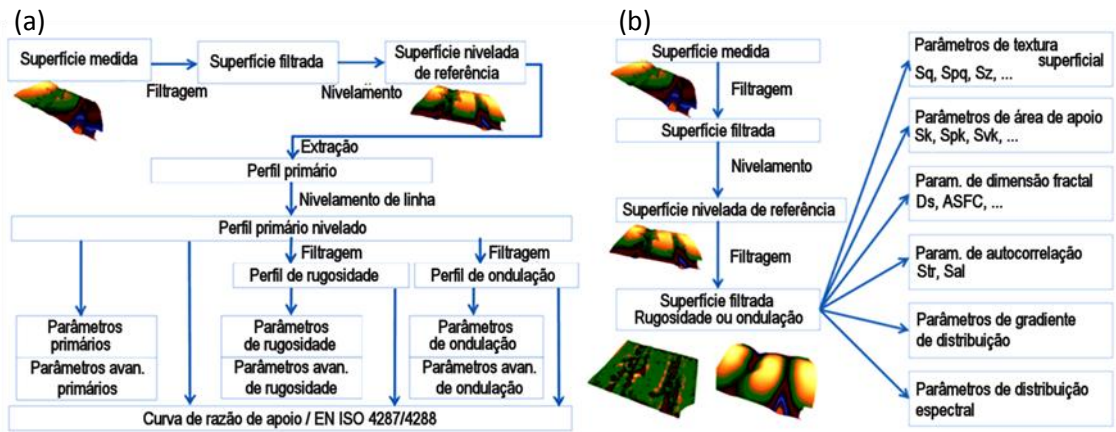


Figura A.5: Fluxogramas para (a) análise de perfil e (b) análise de área a partir dos módulos do MeX *ProfileRoughnessMeasurement* e *SurfaceTextureMeasurement*, respectivamente ⁽³⁵⁾.

APÊNDICE B

Modelos tridimensionais obtidos pelo MeX

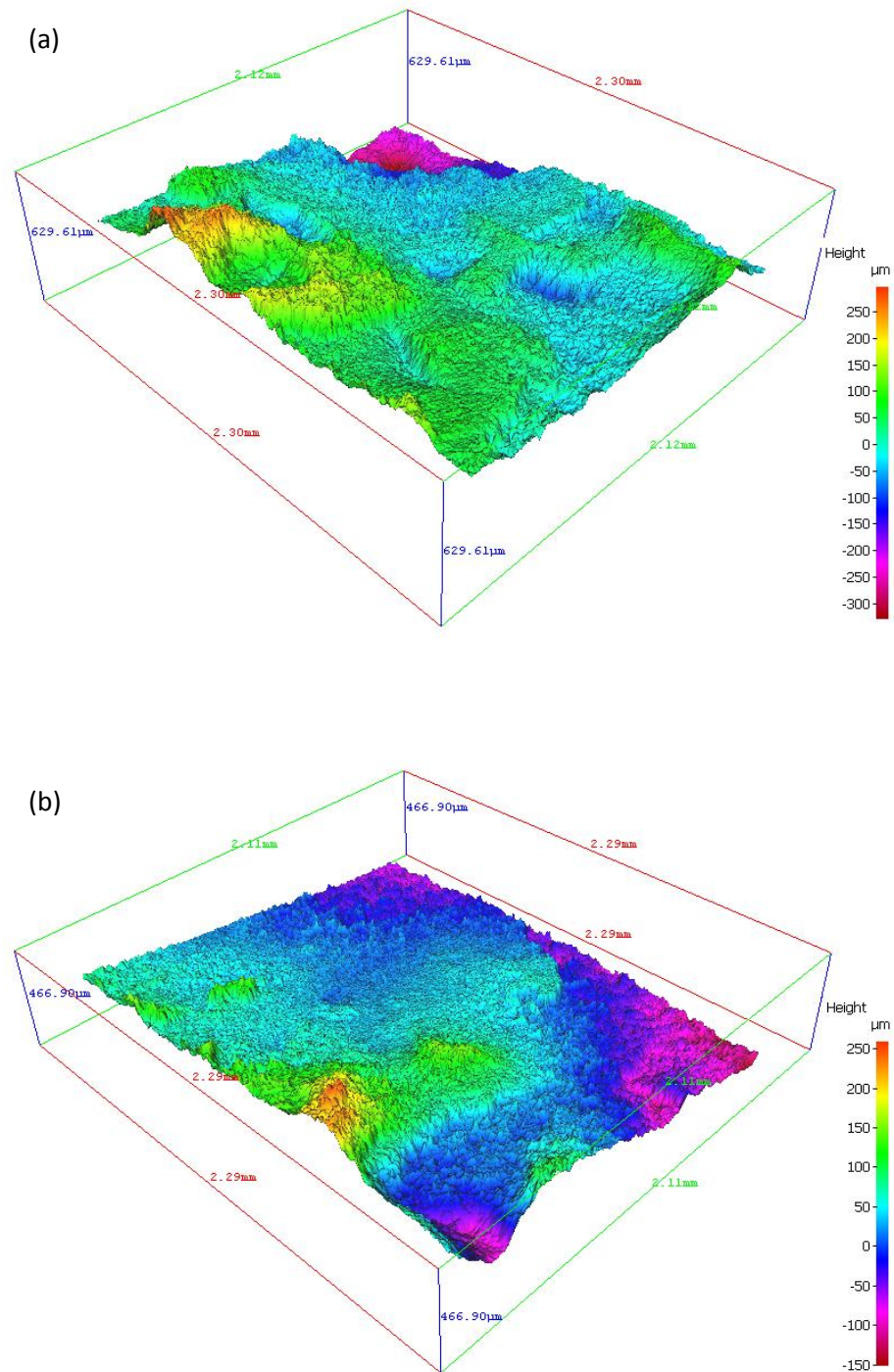


Figura B.1: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do cp CC10 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) CC10/32a, (b) CC10/32b, (c) CC10/41a e (d) CC10/41b (continua na próxima página).

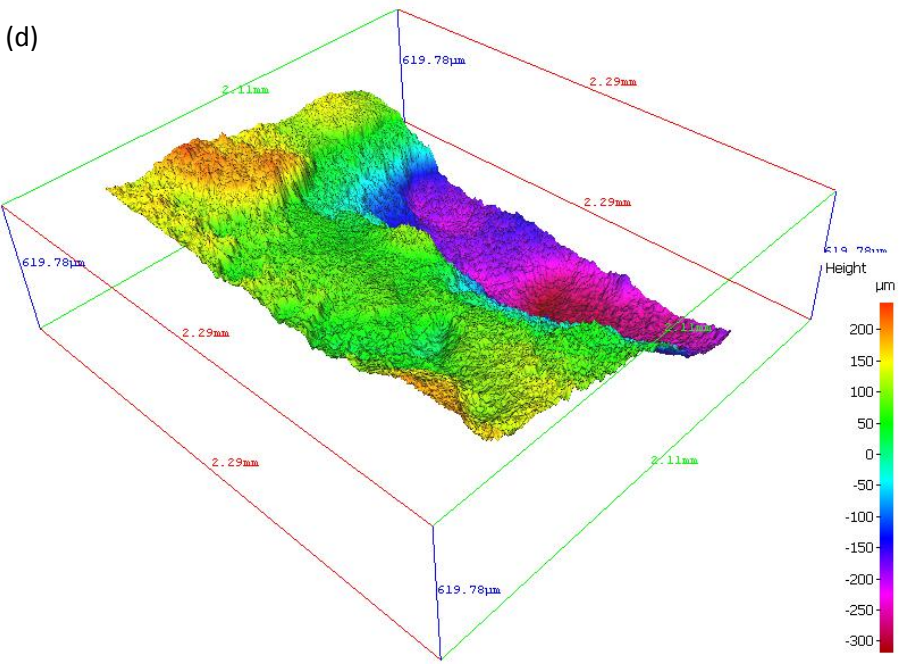
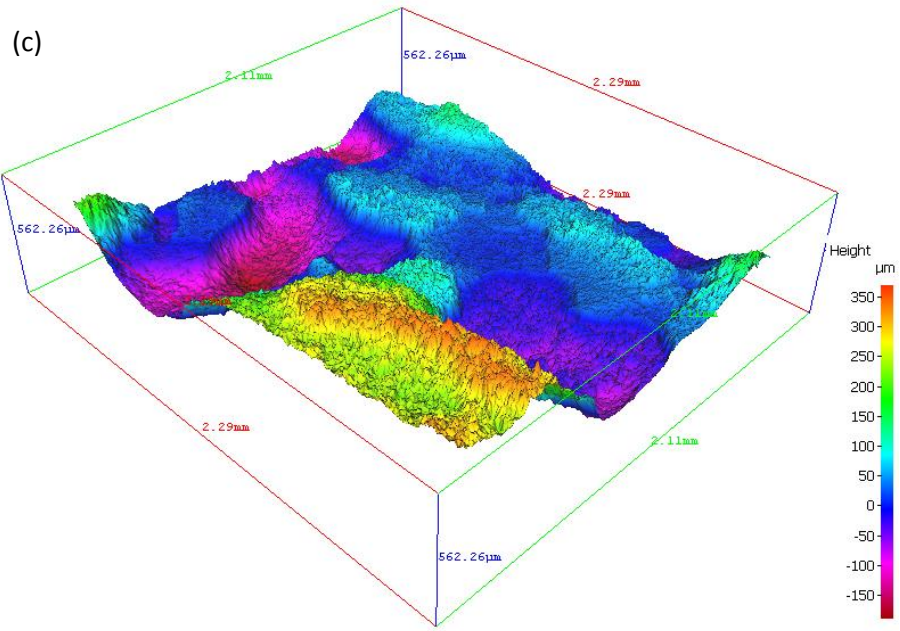


Figura B.1: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do cp CC10 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) CC10/32a, (b) CC10/32b, (c) CC10/41a e (d) CC10/41b.

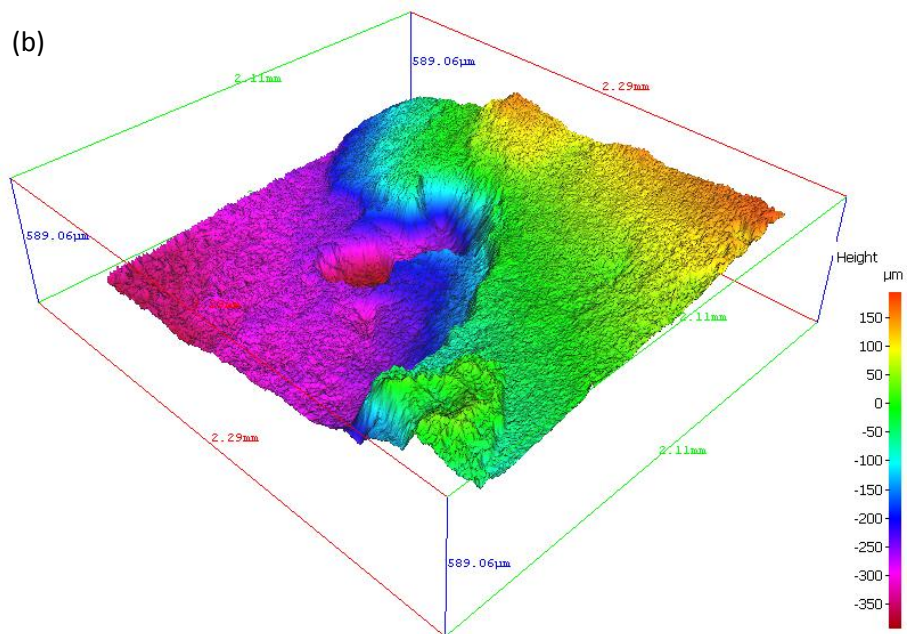
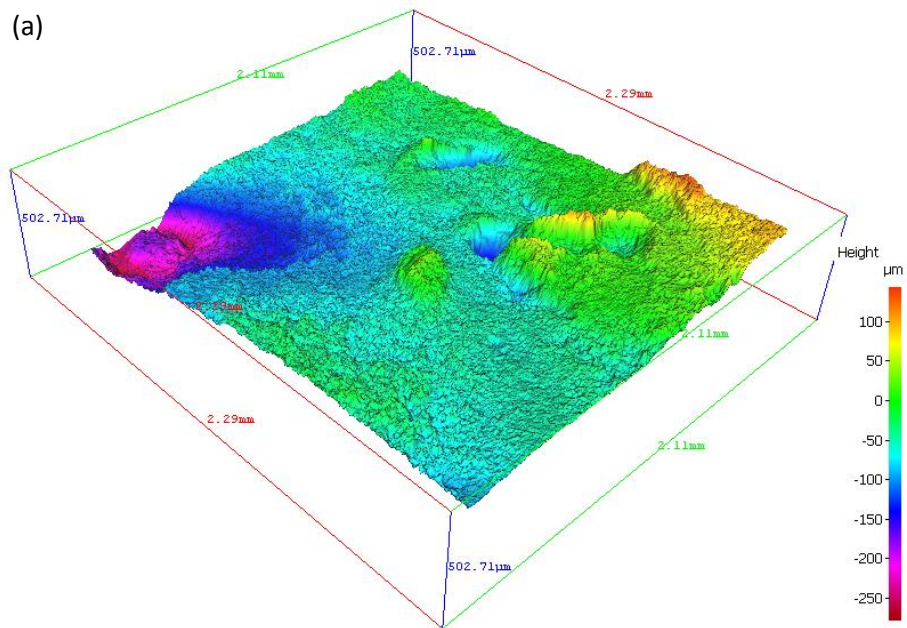


Figura B.2: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do co RC10 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) RC10/25a, (b) RC10/25b, (c) RC10/12a e (d) RC10/12b (continua na próxima página).

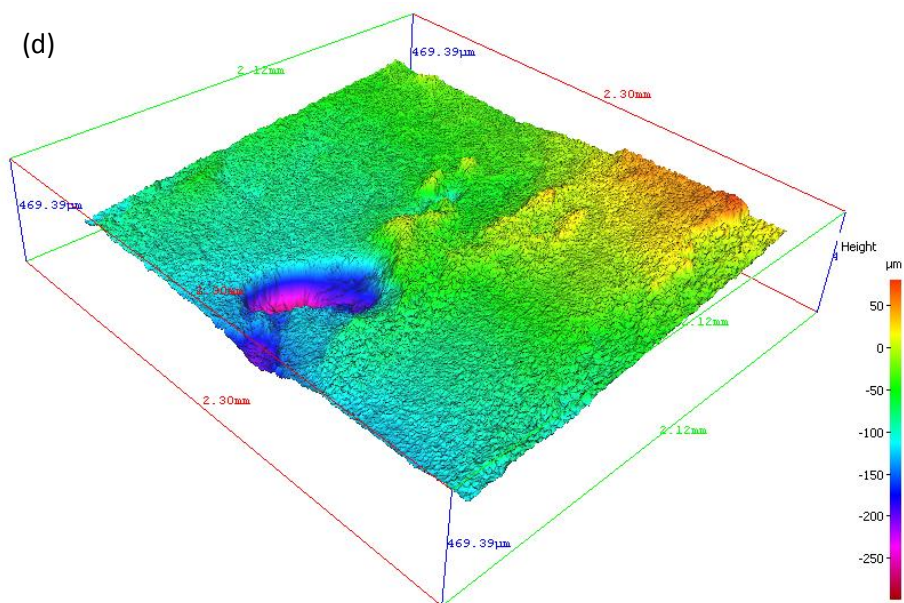
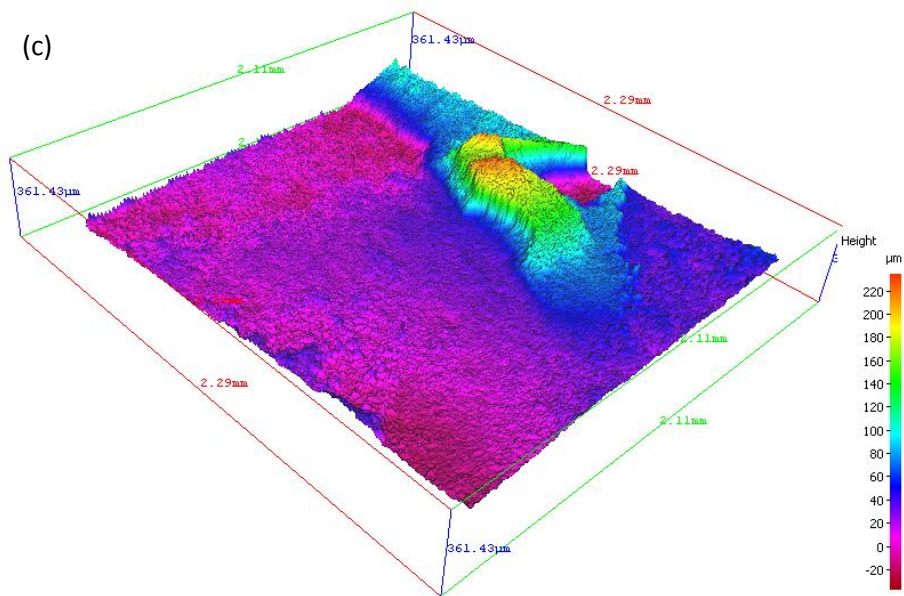


Figura B.2: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do co RC10 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) RC10/25a, (b) RC10/25b, (c) RC10/12a e (d) RC10/12b.

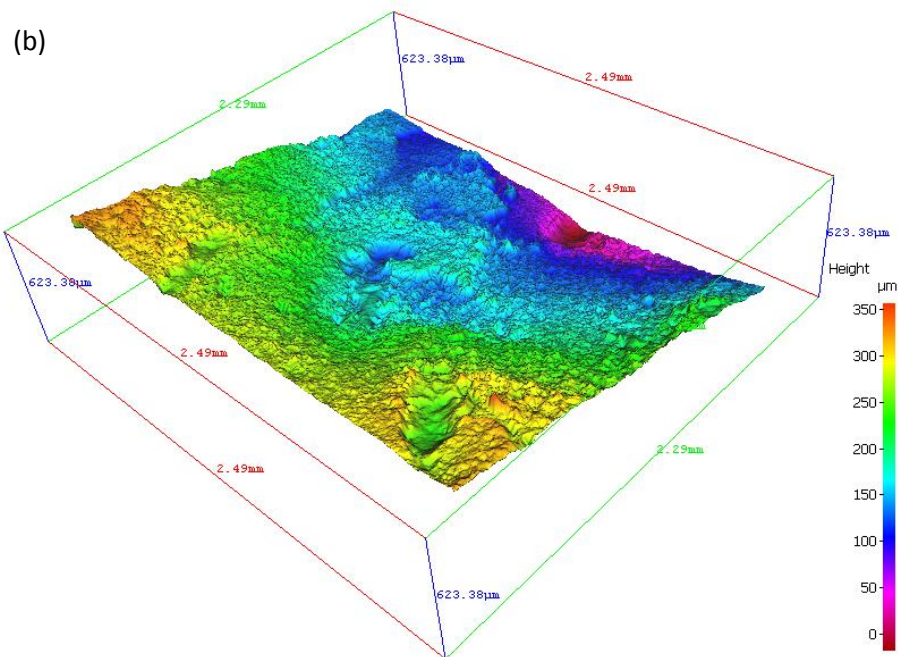
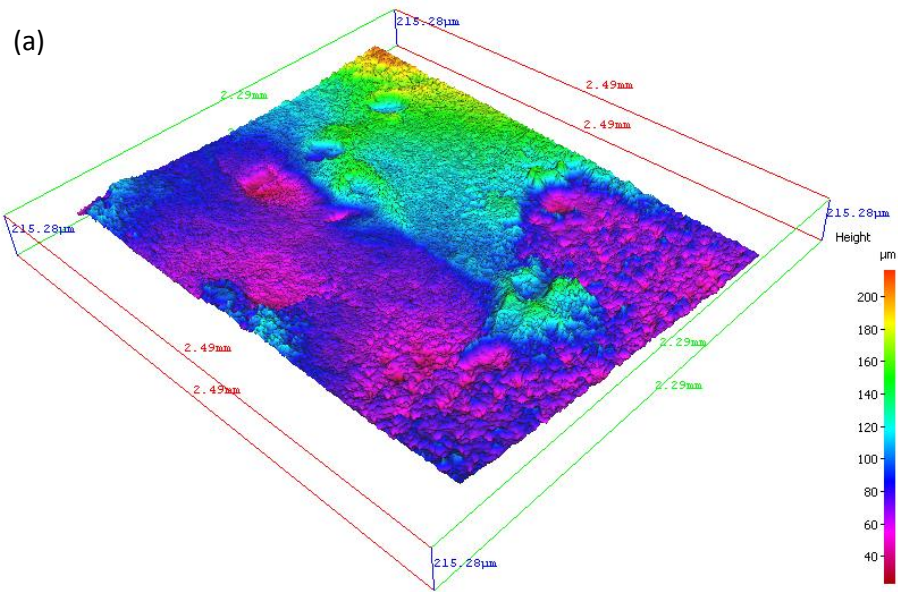


Figura B.3: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do cp CC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) CC90/20a, (b) CC90/32a, (c) CC90/32b, (d) CC90/41a e (e) CC90/41b (continua na próxima página).

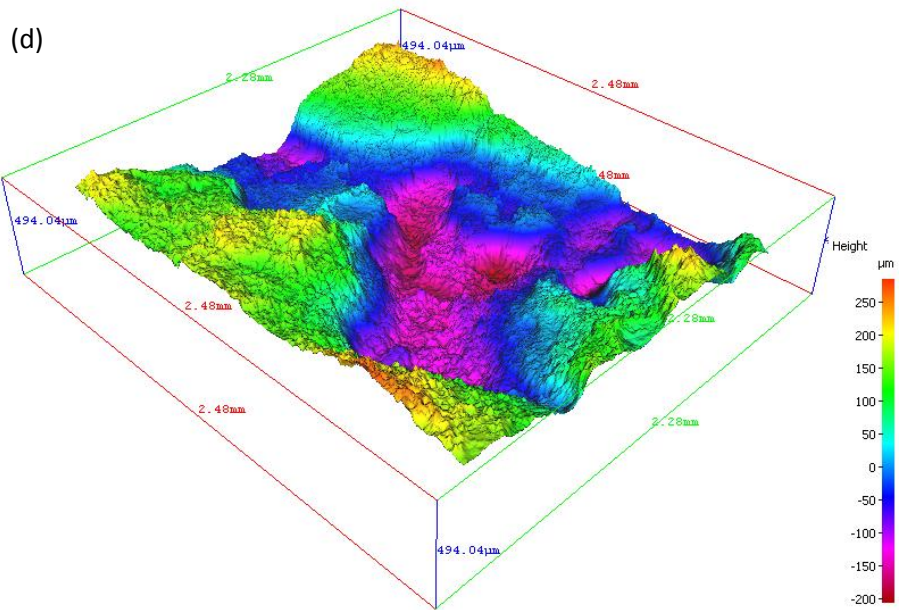
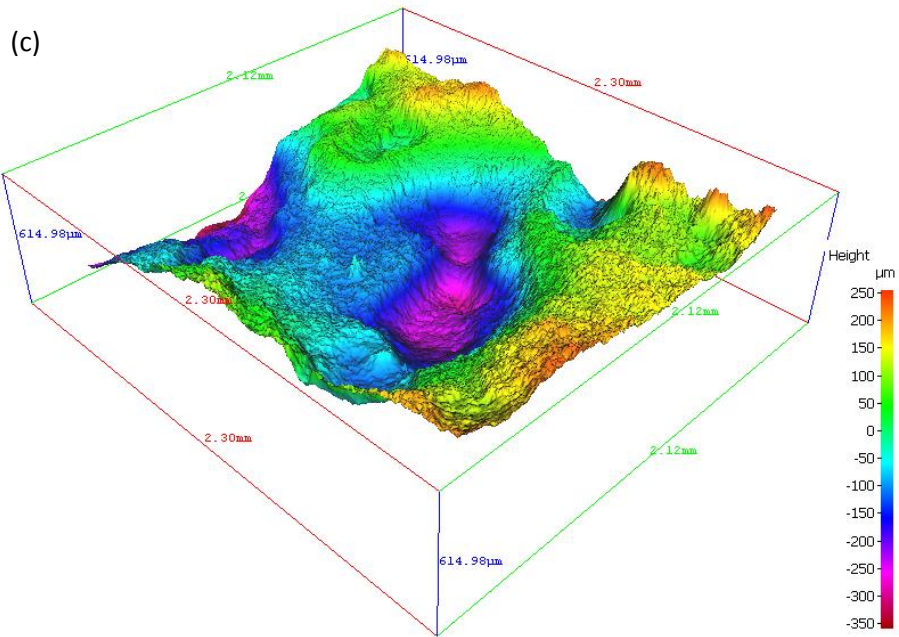


Figura B.3: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões seleccionadas da superfície de fratura do cp CC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) CC90/20a, (b) CC90/32a, (c) CC90/32b, (d) CC90/41a e (e) CC90/41b (continua na próxima página).

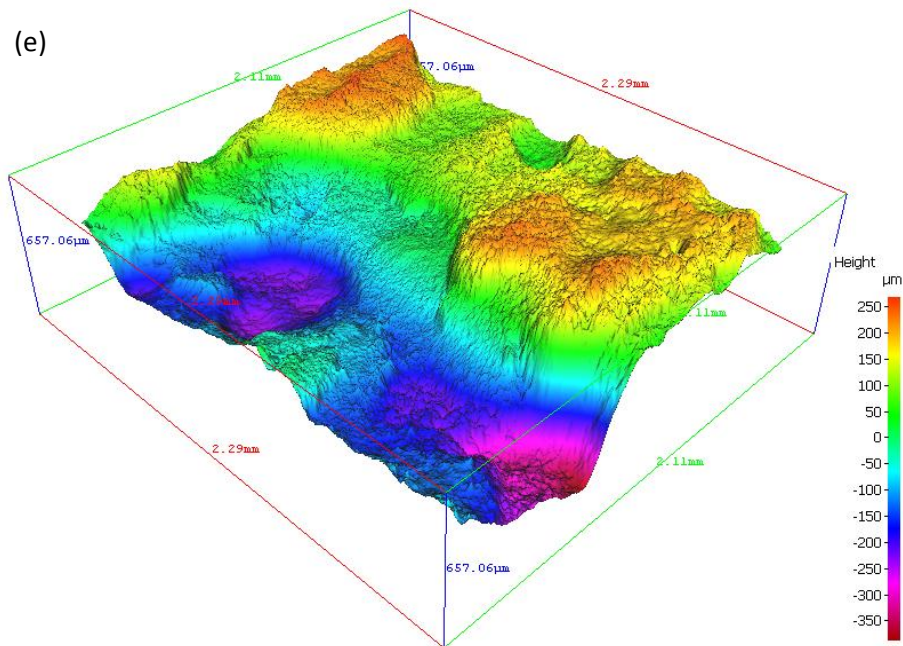


Figura B.3: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões seleccionadas da superfície de fratura do cp CC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) CC90/20a, (b) CC90/32a, (c) CC90/32b, (d) CC90/41a e (e) CC90/41b.

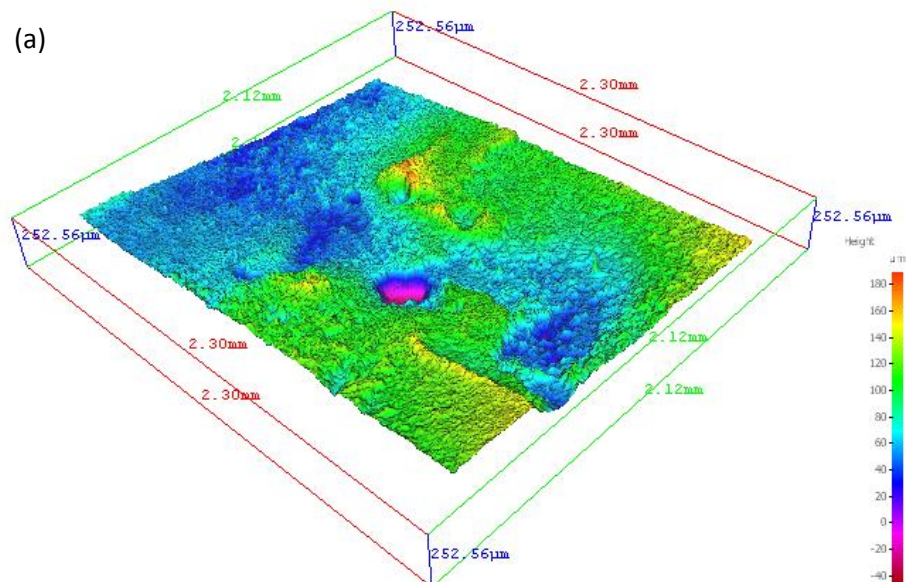


Figura B.4: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões seleccionadas da superfície de fratura do cp RC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) RC90/25a, (b) RC90/25b, (c) RC90/12a e (d) RC90/12b (continua na próxima página).

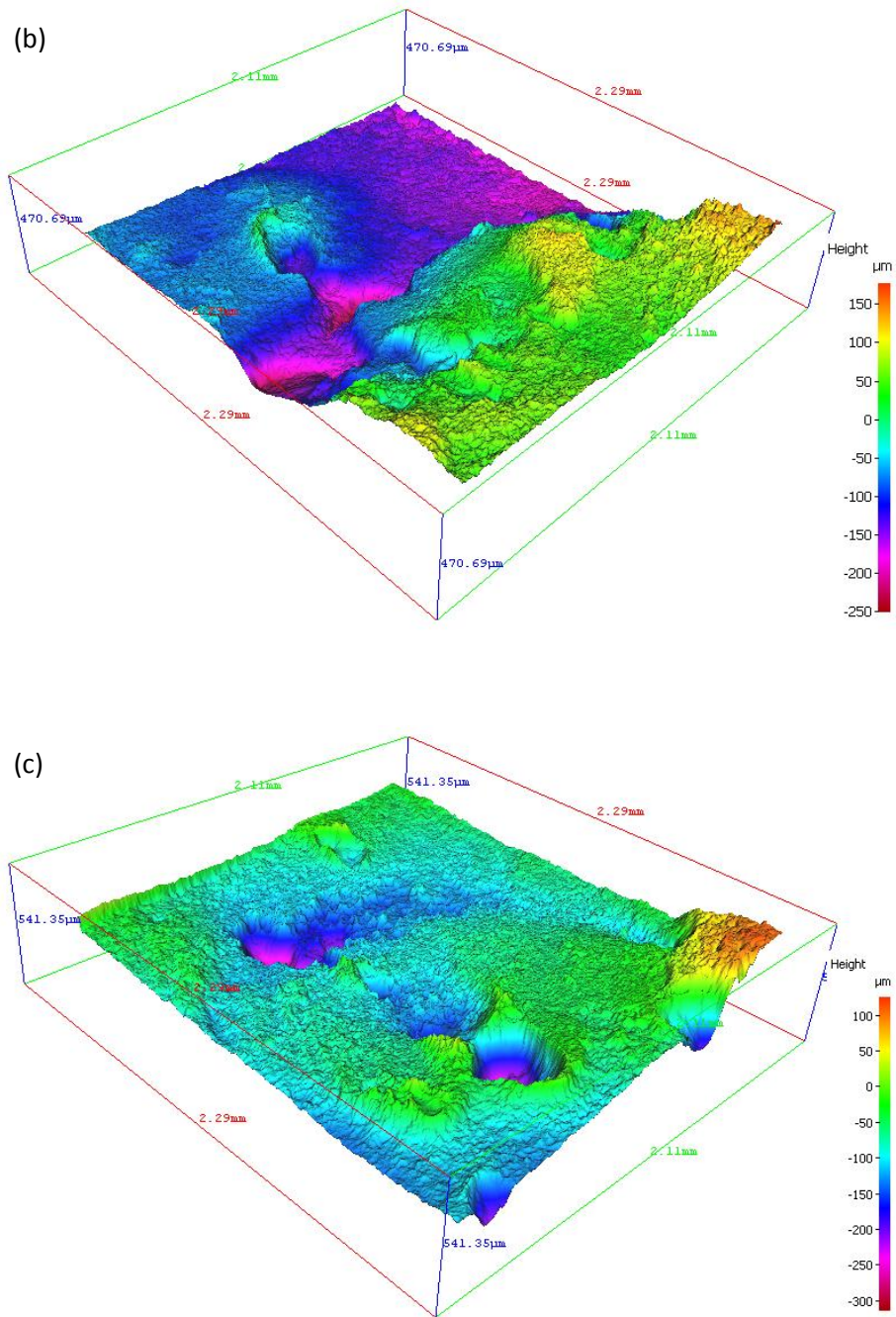


Figura B.4: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do cp RC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) RC90/25a, (b) RC90/25b, (c) RC90/12a e (d) RC90/12b (continua na próxima página).

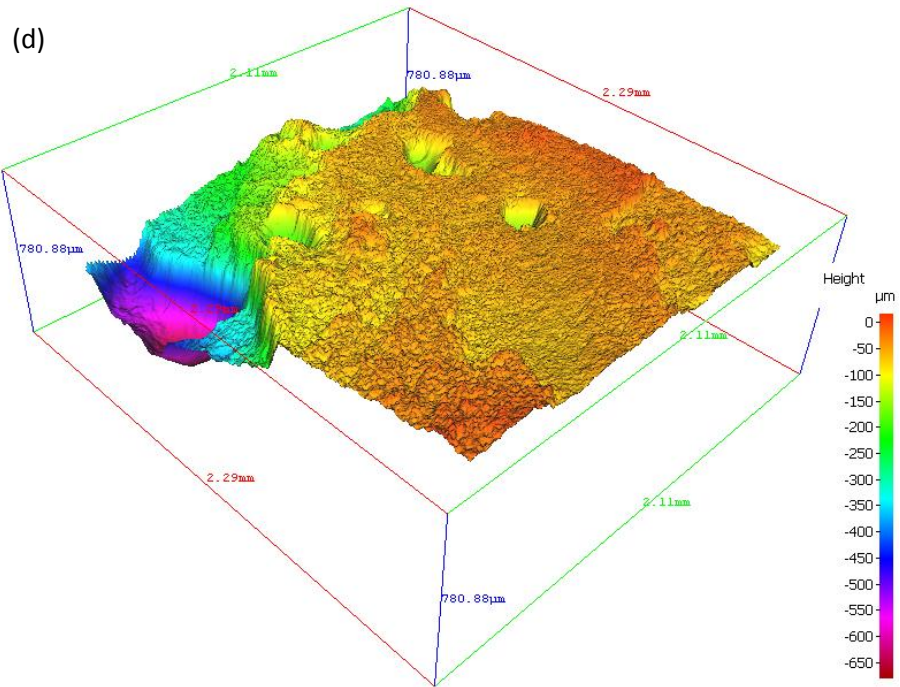


Figura B.4: Reconstruções obtidas pelo software MeX das regiões selecionadas da superfície de fratura do cp RC90 a partir do par estereoscópico com $\pm 5^\circ$ de inclinação: (a) RC90/25a, (b) RC90/25b, (c) RC90/12a e (d) RC90/12b.