Análise por Tomografia da Propagação de Trincas em Metal de Solda Subaquática Molhada

Projeto de Graduação

Departamento de Engenharia Mecânica

Aluno: Tiago Matos dos Santos

Matrícula: 1113354

Orientadores: Sidnei Paciornik e Valter Rocha dos Santos

Rio de Janeiro, 14 de Dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Professor Sidnei Paciornik o qual me auxiliou e me acompanhou em mais uma etapa da minha vida acadêmica, orientando-me e apoiando-me para ampliar meu conhecimento.
- Ao Professor Marcos Henrique que esteve sempre disponível para me tirar dúvidas e operar os equipamentos para obter as imagens.
- Ao Professor Valter que forneceu a amostra para realização do teste e compartilhou o seu conhecimento na área metalúrgica direcionando da melhor forma o trabalho.
- À minha família por me dar forças para superar os obstáculos da graduação, orientando-me para fazer escolhas corretas que foram essenciais para os frutos que estão sendo colhidos.
- À equipe do Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI).

RESUMO

Durante o processo de soldagem subaquática molhada, o metal de solda pode apresentar trincas oriundas da grande disponibilidade de hidrogênio. Estas trincas normalmente teriam um impacto deletério sobre a ductilidade do material. No entanto, ensaios de dobramento neste tipo de material têm mostrado uma resposta muito superior ao esperado, levando à especulação de que ocorram processos de bloqueio da propagação das trincas geradas no ensaio pelas trincas transversais pré-existentes. Utilizou-se a microtomografia de raios-x, microCT, para acompanhar, em 3D, a propagação e a formação de trincas em corpos de prova submetidos a ensaios mecânicos com deformação acumulativa, analisando o possível fenômeno de intertravamento de trincas. Os resultados obtidos permitiram concluir que as trincas pré-existentes travam o desenvolvimento das trincas geradas pelo ensaio de dobramento. Além disso, o comprimento das trincas originadas pela operação de soldagem não apresentou variação, ou seja, as trincas não se propagaram ao longo dos ensaios mecânicos. As trincas pré-existentes não são prejudiciais ao ensaio de dobramento, opondo-se ao que se espera de uma amostra com trincas ao ser flexionada.

Palavras Chave: Soldagem Subaquática; Trincas; Intertravamento; Microtomografia.

ABSTRACT

During the wet underwater welding procedure, the welding metal can carry cracks generated by the high availability of hydrogen. These cracks normally have a negative impact on the ductility of the material. However, bending tests showed a response much superior to the expectation, leading to the speculation that the pre-existing transverse cracks create a locking mechanism that hinders the propagation of the cracks during the test. X-ray microtomography (micro CT) was used to analyze in 3D the propagation and formation of cracks in samples submitted to mechanical tests with cumulative deformation, verifying the possible phenomenon of interlocking of cracks. The results allowed to conclude that the pre-existing cracks block the development of the cracks generated by the bending test. In addition, the length of the cracks originated by the welding operation did not vary, that is, cracks did not propagate throughout the mechanical tests. Pre-existing cracks are not deleterious to the bending test, opposing what is normally expected from a sample with cracks.

Keywords: Underwater Welding Procedure; Crack; Locking Process; Microtomography.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo e motivação	1
1.2 Metodologia	1
2. Fundamentação Teórica.....	2
2.1 Processo de Soldagem Subaquática Molhada.....	2
2.1.1. Conceito e história	2
2.1.2. Hidrogênio Difusível.....	3
2.2 Ensaio de Dobramento	3
2.3 Microtomografia	6
2.3.1 Raios – X.....	6
2.3.2 Processo de Atenuação dos Raios X pela Matéria	7
2.3.3 Tomografia Computadorizada	8
2.3.4 Componentes e Método de Captação de Imagem em Microtomografia.....	9
2.4 Processamento e Análise Digital de Imagens	11
2.4.1 Imagem Digital.....	11
2.4.2 Resolução e Profundidade.....	11
2.4.3 Histograma	12
2.4.4 Brilho e Contraste.....	12
2.4.5 Pré-processamento.....	13
2.4.6 Segmentação.....	14
2.5 Ensaio de Tração.....	15
2.5.1 Limite de Escoamento e Limite de Resistência	17
2.5.2 Ductilidade	18
2.5.3 Módulo de Young	18
2.5.4 Formação de Trinca	19

2.5.5	Deformação Plástica	19
2.6	Mecânica da Fratura	21
2.6.1	Tipos de Fratura nos Metais.....	21
2.6.2	Fratura Dúctil	23
2.6.3	Efeitos do Entalhe.....	24
3.	Procedimento.....	27
3.1	Primeira Microtomografia	32
3.2	Primeiro Ensaio de Tração e Segunda Microtomografia.....	33
3.3	Segundo Ensaio de Tração e Terceira Microtomografia	33
3.4	Terceiro Ensaio de Tração e Quarta Microtomografia.....	33
3.5	Análise das Imagens	33
4.	Resultados e Discussões	36
4.1	Ensaio de Tração.....	36
4.2	Análise Visual de Desenvolvimento das Trincas.....	38
4.3	Medição de Espessura	42
5.	Conclusões	48
6.	Referências bibliográficas	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dobramento Guiado	4
Figura 2 - Dobramento Semi-Guiado	4
Figura 3 - Primeira Etapa do Dobramento Livre	5
Figura 4 - Segunda Etapa do Dobramento Livre	5
Figura 5 - Ilustração dos Parâmetros do Ensaio	5
Figura 6 - Radiografia da Mão Esquerda da Esposa do Físico Rontgen	7
Figura 7 - Protótipo de Hounsfield	9
Figura 8 – Métodos de Geração de Imagem.....	9
Figura 9 - Histograma de uma Imagem	12
Figura 10 - Imagem em 256 Tons de Cinza	14
Figura 11 - Imagem Binária.....	14
Figura 12 - Ensaio de Tração	15
Figura 13 – Tensão de Engenharia e Verdadeira	16
Figura 14 - Curva Tensão x Deformação	17
Figura 15 - Deformação Plástica de 0,2%.....	18
Figura 16 - Contorno de Grão	19
Figura 17 - Discordância Aresta.....	20
Figura 18 - Discordância Espiral	20
Figura 19 - Tipos de Fraturas em Metais.....	22
Figura 20 - Etapas da Fratura Dútil.....	24
Figura 21 - Tensões no Entalhe.....	26
Figura 22 - Vista Ortográfica da Amostra.....	27
Figura 23 - Amostra	28
Figura 24 – Amostra	28
Figura 25 - Microtomógrafo Zeiss Xradia Versa 510	29
Figura 26 - Lentes do Microtomógrafo.....	29
Figura 27 – Interior Microtomógrafo	30
Figura 28 - Amostra e Volume Específico Analisado.....	31
Figura 29 - Amostra no Interior do Microtomógrafo	32
Figura 30 - Imagem de Um Plano da Amostra Sem Filtro	35
Figura 31 - Imagem do Plano Após o Filtro Non Local Means.....	35
Figura 32 - Imagem do Plano Após o Filtro Non Local Means e Entropy Minimization	35
Figura 33 - Imagem do Plano Segmentada para Visualização das Trincas.....	35

Figura 34 - Trinca Gerada na Segunda Tração.....	36
Figura 35 - Trinca Gerada na Segunda Tração com Aumento	36
Figura 36 - Trinca Gerada na Segunda Tração com Aumento na Ponta do Entalhe	37
Figura 37 - Plano 1 Sem Tração.....	39
Figura 38 – Plano 1 Com Tração 1.....	39
Figura 39 – Plano 1 Com Tração 2.....	39
Figura 40 – Plano 1 Com Tração 3.....	39
Figura 41 - Região Ampliada do Plano 1 Sem Tração.....	39
Figura 42 - Região Ampliada do Plano 1 Com Tração 1	39
Figura 43 - Região Ampliada do Plano 1 Com Tração 2	39
Figura 44 - Região Ampliada do Plano 1 Com Tração 3	39
Figura 45 - Plano 2 Sem Tração.....	40
Figura 46 - Plano 2 Com Tração 1	40
Figura 47 - Plano 2 Com Tração 2	40
Figura 48 - Plano 2 Com Tração 3	40
Figura 49 - Região Ampliada do Plano 2 Sem Tração.....	40
Figura 50 - Região Ampliada do Plano 2 Com Tração 1	40
Figura 51 - Região Ampliada do Plano 2 Com Tração 2	40
Figura 52 - Região Ampliada do Plano 2 Com Tração 3	40
Figura 53 - Esquema Ilustrativo de Propagação da Trinca.....	41
Figura 54 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe sem Tração	43
Figura 55 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 1	43
Figura 56 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 2.....	43
Figura 57 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 3.....	43
Figura 58 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe sem Tração	44
Figura 59 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 1	44
Figura 60 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 2	45
Figura 61 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 3	45
Figura 62 - Esquema de Medição das Espessuras e Altura	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros das Lentes	30
Tabela 2 - Medições de Espessura e Altura.....	47

1. Introdução

1.1 Objetivo e motivação

Este trabalho tem o intuito de verificar a possibilidade de intertravamento de trincas, realizando análise de imagens em 3D obtidas por microtomografia de raios-x (microCT). Esse possível fenômeno é proposto para explicar o bom desempenho de amostras de soldas subaquáticas molhadas submetidas a ensaios de dobramentos, que deveriam apresentar um resultado ruim devido a presença de trincas originadas do processo de soldagem.

1.2 Metodologia

Uma amostra foi retirada da solda e preparada para ser analisada no microtomógrafo. Um entalhe foi confeccionado no seu centro para gerar trincas pré-direcionadas e possivelmente transversais às trincas originadas durante o processo de soldagem. Aplicaram-se três carregamentos através de ensaios de tração, realizando varreduras no microtomógrafo antes e entre os ensaios mecânicos. Em sequência, o processamento e análise das imagens foram realizadas com o auxílio dos softwares: DragonFly e ORS Visual. Os resultados foram discutidos e analisados, permitindo a conclusão do trabalho.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Processo de Soldagem Subaquática Molhada

2.1.1. Conceito e história

O método de soldagem subaquática molhada é aplicado em componentes estruturais, plataformas e navios, sendo em alguns casos situações emergenciais. No entanto, com a descoberta de grandes poços de petróleo em alto mar, destaque para o Brasil que teve o início da exploração a partir de 1974 com a descoberta da Bacia de Campos, ocorreu um aumento de oportunidades de reparo em plataformas flutuantes e navios de produção.

No início a soldagem subaquática era considerada uma forma secundária de reparo. Em diferentes casos e situações emergenciais a soldagem é a única solução.

Para execução dessa solda o operador, no caso um mergulhador, deve utilizar equipamento de mergulho completo, equipado com capacete com protetor facial articulado e óculos de solda com filtro. Os eletrodos são danificados pela água, portanto eles devem ser impermeabilizados com materiais adequados. Além disso, normalmente se utiliza como fonte de solda um gerador DC com até 300 amperes.

2.1.2. Hidrogênio Difusível

Durante o processo de soldagem, a molécula de água presente no meio é facilmente decomposta ao ser submetida ao calor gerado pelo arco elétrico. Esse fenômeno promove a geração dos gases hidrogênio e oxigênio que podem se unir para gerar o vapor d'água, porém podem sofrer absorção pelo metal no estado líquido.

Esse processo de absorção aumenta com o aumento da profundidade de soldagem. O hidrogênio que não conseguir sair do líquido no processo de solidificação, permanecerá no metal de solda dissolvido ou ficará nos poros e interfaces. Um dos grandes problemas gerados por esse processo é a geração de poros e trincas que contribuem para a fragilização da solda [1].

Além da influência do hidrogênio difusível para geração de trincas, a água permite um rápido resfriamento da junta soldada, gerando regiões com martensita (altamente frágeis) e intensificando a possibilidade de trincamento.

2.2 Ensaio de Dobramento

Este ensaio mecânico tem como objetivo medir a ductilidade do material, avaliando componentes que serão submetidos a flexão durante o seu funcionamento. Em soldas, este procedimento é utilizado para qualificar o soldador, o processo de soldagem e as próprias soldas.

Para a soldagem, aplica-se três tipos de ensaio de dobramento: livre, semi-guiado e guiado. O dobramento guiado é utilizado para a avaliação da qualidade da solda, pois induz a formação de trincas em um local específico devido à forma pré-determinada. Por outro lado, o semi-guiado é utilizado quando deseja-se obter uma distribuição mais uniforme da deformação.

Figura 1 - Dobramento Guiado [2]

Figura 2 - Dobramento Semi-Guiado

O dobramento livre é dividido em duas etapas. Na primeira, o corpo de prova é apoiado sobre dois roletes que não restringem a deformação. Em sequência, há a aplicação de uma carga lateral por meio de um cutelo. Na segunda etapa, ocorre a aproximação das extremidades do corpo de prova.

Figura 3 - Primeira Etapa do Dobramento Livre [2]

Figura 4 - Segunda Etapa do Dobramento Livre [2]

O copo de prova é submetido ao ângulo de 180°. O alongamento é medido conforme abaixo:

Figura 5 - Ilustração dos Parâmetros do Ensaio [33]

Além do alongamento, observa-se a presença de falhas (fissuras e fendas) no local onde ocorreu o tracionamento do corpo de prova. De acordo com a norma, fissuras que apresentarem

comprimentos maiores que 3 mm geram a rejeição no teste. Além disso, fissuras nas arestas podem ser geradas, mas não são consideradas para motivos de rejeição.

2.3 Microtomografia

2.3.1 Raios – X

Os raios x são uma radiação eletromagnética que foi descoberta pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen, recebendo esse nome devido o desconhecimento desse tipo de radiação na época.

Röntgen estudava o fenômeno de luminescência gerado por raios catódicos em um tubo de descarga de gás, conhecido como tubo de Crookes. A corrente elétrica, ao ser fornecida aos elétrons do tubo, gerava um efeito brilhoso em uma folha recoberta de platíniceto de bário. A partir dessa descoberta, Röntgen colocou entre o tubo de raio catódico e a placa de platíniceto de bário alguns corpos opacos à luz visível. Os resultados demonstraram que a radiação era atenuada, mas a sua chegada até a placa de platíniceto não era eliminada.

Alguns testes foram feitos com a mão da esposa de Röntgen, revelando a estrutura óssea interna, no entanto a exposição da pele ao raio x provocava vermelhidão, ulceras, empolamentos, câncer e morte das células.

Figura 6 - Radiografia da Mão Esquerda da Esposa do Físico Rontgen [4]

O choque entre os elétrons acelerados emitidos pelo catodo e um alvo metálico promove a geração de raios x. O choque provoca a desaceleração dos elétrons, fornecendo energia aos elétrons do anodo e promovendo a perda de energia cinética, geração de energia térmica e a radiação. Esse processo é denominado de Bremsstrahlung (radiação de frenagem), ocorrendo quando um núcleo é atingido por um elétron, transformando a sua energia cinética em fótons de raio x.

2.3.2 Processo de Atenuação dos Raios X pela Matéria

A intensidade dos raios x decai a partir do momento que entram em contato com o material. Esse fenômeno ocorre devido à interação dos fótons com a matéria. Através da lei de Beer-Bauguer (eq. 1) é possível calcular a intensidade do feixe transmitido, sendo uma relação entre a intensidade do feixe incidente e fração de energia removida por unidade de espessura por unidade de intensidade.

$$I = I_0 e^{(-\tau)} \quad (1)$$

Onde I_0 é a intensidade do raio incidente, I é a intensidade do raio transmitido, e τ é o comprimento percorrido.

2.3.3 Tomografia Computadorizada

A tomografia teve uma grande aplicação inicial na área médica. Diversos diagnósticos médicos puderam ser realizados através da aplicação dessa técnica, permitindo a obtenção de imagens dos órgãos internos do paciente de maneira segura e precisa.

O termo tomografia está relacionado com a aquisição de imagens de projeções de um objeto, obtidas de diversas direções. A tomografia efetua a sobreposição de toda a informação obtida numa imagem bidimensional. Para se obter a imagem tridimensional é necessário a junção das projeções por meio da matemática desenvolvida pelo médico e matemático Allan Cormack. Esses cálculos permitem que imagens embaralhadas dos sensores de raio x possam ser organizadas e transformadas em cortes transversais do objeto.

Allan Cormack estudava inicialmente a distribuição dos coeficientes de atenuação do corpo humano para gerar um melhor direcionamento para tumores no tratamento por radioterapia. Outro ponto de estudo importante foi o desenvolvimento de um algoritmo matemático que possibilitava a reconstrução tridimensional da distribuição da concentração de radioclídeos através de dados de um equipamento de “câmara - pósitron”. Para os seus testes, foi utilizado um protótipo nomeado de Hounsfield que necessitava de 9 dias para adquirir uma imagem e 150 minutos para processar uma imagem. Com o acoplamento de um tubo e um gerador de raios x, o tempo de aquisição foi reduzido para 9 horas.

Figura 7 - Protótipo de Hounsfield [5]

2.3.4 Componentes e Método de Captação de Imagem em Microtomografia

Os atuais microtomógrafos são constituídos de um dos quatros métodos de geração das imagens apresentados na figura 8.

Figura 8 – Métodos de Geração de Imagem

No caso apresentado pelo item a, o feixe pontual gerado pela fonte P atravessa um estreito colimador C. Esse raio passa através do objeto O ao longo do eixo x_1 produzindo uma única imagem. O eixo x_2 permite a rotação do objeto, fornecendo imagens de uma determinada altura

do objeto. A translação do objeto permite a formação de fatias do objeto, permitindo a geração de uma imagem tridimensional do mesmo.

A figura 8 - b apresenta um sistema denominado de “Fan Beam System”. Ele é constituído por um anteparo retangular fino que restringe a forma transversal do raio x gerado pela fonte, um escudo dispersor e um detector unidimensional. O eixo x_2 permite a rotação do objeto, gerando uma imagem de um determinado plano. Essas imagens serão agrupadas para gerarem o uma imagem tridimensional.

A figura 8 - c representa um sistema denominado de “Parallel-Beam Geometry”. Esse sistema permite uma rápida obtenção de imagens transversais do objeto ao mesmo tempo, gerando uma imagem bidimensional. O feixe de raios paralelos atravessa o objeto, atingindo um detector bidimensional. Através da rotação da amostra, uma imagem tridimensional é gerada.

A figura 8 - d exemplifica um sistema denominado de “Cone Beam Geometry”. O feixe de raio-x diverge da fonte, atravessa a amostra e é absorvido pelo detector retangular. Esse método é que se aplica atualmente, sendo o mais relevante.

2.4 Processamento e Análise Digital de Imagens

2.4.1 Imagem Digital

Uma imagem digital é constituída por pixels. As imagens preto e branco são representadas pela numeração binária que representa 256 tonalidades de cinza ao retratar uma imagem de 8 bits (1 byte). O computador é capaz de interpretar essa combinação binária e identificar a tonalidade correspondente ao pixel. Essa escala de tons de cinza varia do preto ao branco, permitindo a formação da imagem. Para as imagens de 16 bits (2 bytes), cada pixel pode receber um dos valores dos 65536 tons de cinza possíveis.

As imagens digitais coloridas são constituídas pela combinação das três cores primárias da luz (vermelho, azul e verde). Cada pixel da imagem é representado por um conjunto de 24 bits (3 bytes), sendo cada cor primária caracterizada por 8 bits; logo, cada byte receberá um tom de uma cor dentre os 256 tons possíveis da mesma. Por fim, a combinação dos 3 bytes, ou seja, dos tons de cada cor primária, poderá gerar 16,7 milhões de cores diferentes.

2.4.2 Resolução e Profundidade

A resolução é definida pela capacidade máxima de diferenciar dois pontos vizinhos, sendo definido pelo pixel que retrata a unidade básica de uma imagem digital

A profundidade está relacionada com o número máximo de níveis de intensidade que uma imagem pode conter.

2.4.3 Histograma

Esse elemento de uma imagem representa uma distribuição gráfica dos tons de cinza presentes em uma imagem. Através do mesmo é possível identificar características importantes da imagem como: intensidade média dos pixels, brilho e contraste.

Figura 9 - Histograma de uma Imagem

2.4.4 Brilho e Contraste

O brilho é caracterizado pelo nível de intensidade, ou seja, a tonalidade presente no pixel. Portanto, uma imagem que seja predominantemente formada por pixels com tons de cinza, valores próximos a zero (preto), representa uma imagem escura, gerando uma imagem de baixo brilho. Por outro lado, uma imagem que contenha pixels com tons de cinza próximo a 255 (branco) é caracterizada por um alto brilho [6].

O contraste de uma imagem demonstra a diferença de brilho entre as áreas de alto e baixo brilho. Além disso, ele é definido matematicamente como o desvio padrão dos tons de cinza dos pixels presentes na imagem, sendo retratado através por um histograma estreito (baixo contraste) ou largos (alto contraste).

2.4.5 Pré-processamento

Durante o processo de aquisição de imagens, alguns defeitos como ruído ou efeitos de sombra podem ser gerados, dificultando a próxima etapa de segmentação. Portanto, o número de imperfeições deverá ser o menor possível para garantir uma melhor análise. Além disso, essa etapa permite realçar detalhes importantes que serão necessários para futuras informações.

Há diversos defeitos que podem aparecer durante a aquisição de imagem, tal como há diversos métodos de correção. No entanto, o mesmo método pode não apresentar o mesmo resultado se for usado para diferentes defeitos. Exemplos de procedimentos são: realce de bordas, diminuição de ruídos, correção de fundo e outros.

Os procedimentos são divididos em duas categorias, atuando no domínio da frequência ou no domínio do espaço real. O domínio da frequência é manipulado por meio de uma modificação da imagem através da transformada de Fourier da imagem original e obtenção de sua transformada inversa [6]. Por outro lado, o domínio espaço real destaca-se por realizar manipulações sobre os pixels da imagem.

As operações que ocorrem no domínio do espaço real ocorrem por meio de operações matemáticas, atuando diretamente sobre os pixels. Elas são divididas em quatro tipos: operações pontuais na qual cada tom de cinza da imagem de entrada gera um tom de cinza na imagem de saída, operações entre imagens que envolvem duas ou mais imagens de entrada, operações locais no qual o tom de cinza de um pixel específico na imagem de saída é função dos tons de cinza dos seus pixels vizinhos da imagem de entrada e operações geométricas que se destacam por modificar a posição dos pixels da imagem de entrada.

2.4.6 Segmentação

O cérebro humano é capaz de interpretar regiões de um objeto ou de um local, diferenciando-as por cores, texturas e outras características. No processamento de imagem, as informações digitais das imagens apresentam características que podem ser usadas para distinguir regiões diferentes. Um exemplo simples é a geração de uma imagem binária por segmentação do fundo em relação aos objetos, que serão representados por pixels brancos e a região restante (fundo) por pixels pretos. As figuras 10 e 11 retratam o exemplo mencionado:

Figura 10 - Imagem em 256 Tons de Cinza

Figura 11 - Imagem Binária

Um dos procedimentos de segmentação mais simples e o mais utilizado é denominado de limiarização ou thresholding. Trata-se da separação de regiões de interesse por uma faixa tonal, ou seja, os pixels encontrados em determinadas regiões estarão sendo contemplados pela faixa tonal escolhida, evidenciando-as em relação ao objeto. Esse processo pode proporcionar a separação de duas regiões (limiarização bi-modal) ou separação de n fases presentes na imagem (limiarização multi-modal), para o que será necessária a especificação de $(n-1)$ tons de corte [6].

2.5 Ensaio de Tração

O ensaio de tração relaciona a tensão aplicada ao material com a sua respectiva deformação, produzindo um gráfico conforme a figura 12.

Figura 12 - Ensaio de Tração

A tensão (σ) corresponde à força de tração aplicada no corpo de prova dividido pela área da sua seção transversal. Além disso, a deformação (ϵ) é definida como a razão entre o alongamento sofrido pelo corpo de prova e um comprimento pré-definido. Ela é dividida em deformação elástica e plástica. A elástica ocorre quando o corpo de prova volta ao seu tamanho original após a retirada do carregamento de tração. Por outro lado, a plástica é caracterizada pela permanência de um alongamento no corpo de prova após o descarregamento.

A deformação definida no parágrafo anterior é denominada deformação de engenharia e a deformação real é descrita pela equação abaixo:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{\infty} \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta l_i}{l} \Rightarrow \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3)$$

A mesma denominação é aplicada à tensão a qual se divide em tensão de engenharia e tensão verdadeira. A tensão verdadeira estabelece uma razão entre a força aplicada e a área da seção transversal a cada momento do ensaio de tração. Portanto o gráfico tensão x deformação tende a crescer até a tensão de ruptura. No caso de tensão de engenharia, o gráfico tende a diminuir quando se aproxima da tensão de ruptura. A figura 13 representa a relação descrita acima.

Figura 13 – Tensão de Engenharia e Verdadeira

2.5.1 Limite de Escoamento e Limite de Resistência

O limite de resistência é identificado no gráfico de tensão x deformação como o ponto máximo da curva a partir do qual ocorre o processo de estricção, caracterizado pela criação de um pescoço no corpo de prova.

O limite de escoamento é definido como o ponto no qual o material passa a sofrer deformação plástica. Por norma, ele é obtido pelo encontro da curva tensão deformação com uma reta paralela à curva para o regime elástico e que passa por uma deformação plástica de 0.2 % (Figura 15). A figura 14, abaixo, destaca esses dois pontos, mostrando as regiões plástica e elástica.

Figura 14 - Curva Tensão x Deformação

Figura 15 - Deformação Plástica de 0,2%

2.5.2 Ductilidade

É uma propriedade definida pela capacidade do material de se deformar sem sofrer ruptura. Pode ser medido através da redução de área (RA) transversal após o corpo de prova sofrer fratura, sendo medida em porcentagem. A equação que define esse parâmetro pode ser observada abaixo:

$$RA(\%) = \frac{\text{Área Inicial} - \text{Área Final}}{\text{Área Inicial}} \times 100 \quad (3)$$

2.5.3 Módulo de Young

O Módulo de Young (E) é uma propriedade do material que estabelece uma relação entre a tensão aplicada no componente mecânico e sua respectiva deformação durante o regime elástico do material. Essa relação é estabelecida pela Lei de Hooke cuja a equação é descrita abaixo:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

2.5.4 Formação de Trinca

As trincas podem ser geradas por deformação plástica através do tensionamento do material acima do seu limite de escoamento ou por carregamentos cíclicos abaixo do limite de escoamento do material.

2.5.5 Deformação Plástica

Todo material metálico é constituído por estruturas cristalinas que caracterizam uma orientação de organização dos seus átomos. O grão é constituído por um conjunto de átomos que se organizam uniformemente, formando a rede cristalina. Cada grão possui uma orientação específica para a rede cristalina, caracterizando uma região denominada de contorno de grão no qual há mudança na direção das redes cristalinas.

Figura 16 - Contorno de Grão

Fonte: Calister, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. p. 139

A rede cristalina contém diversos defeitos cristalinos lineares que são nomeados de discordâncias, podendo ser em aresta ou em espiral. A deformação plástica é caracterizada pelo movimento das discordâncias ao serem submetidas a tensões de cisalhamento.

Figura 17 - Discordância Aresta

Fonte: Calister, W. D. Ciência e Engenharia De Materiais: Uma Introdução. p. 131

Figura 18 - Discordância Espiral [7]

Quando a discordância é submetida a uma tensão cisalhante com magnitude suficiente, ocorre a sua movimentação. Alguns átomos da discordância não estão ligados a todos os átomos em seu entorno, portanto a tensão aplicada promoverá a formação da ligação atômica com os átomos seguintes, gerando uma nova discordância. Através desse fenômeno ocorre o movimento de discordância até o momento que não haverá mais ligações atômicas para serem geradas, promovendo a quebra das ligações existentes e a formação de uma trinca.

Se o material é considerado dúctil, ele permitirá uma grande movimentação de discordâncias até a geração de trincas porque os seus átomos podem se organizar melhor durante o seu período de formação. Em contrapartida, materiais frágeis não têm tempo de organizar os seus átomos durante o seu período de formação, apresentando diversas discordâncias que dificultam o fenômeno de movimentação das mesmas [8]. Em resumo, materiais frágeis são capazes de resistir a grandes faixas de tensões até a formação de trincas (quebra de ligações

atômicas) com pouca deformação até a falha e materiais dúcteis permitem maiores deformações (movimentação de discordâncias) até a sua falha.

2.6 Mecânica da Fratura

O termo fratura corresponde ao fenômeno de separação de um corpo sólido em duas ou mais partes após ser submetido à uma tensão. Durante o processo de fratura há duas grandes etapas: início da trinca e propagação da trinca. Essas duas etapas são encontradas na fratura frágil e na fratura dúctil. Na primeira categoria, a propagação da trinca é rápida, não há deformação macroscópica e ocorre pouca microdeformação. Por outro lado, a fratura dúctil destaca-se por apresentar uma considerável deformação plástica antes e durante a etapa de propagação da trinca. Em suma, a fratura apresenta diferentes características que dependem do estado de tensões aplicado sobre o material, da taxa de aplicação de tensão e da temperatura.

2.6.1 Tipos de Fratura nos Metais

De maneira geral, a fratura frágil é observada através de uma separação perpendicular à direção de aplicação da tensão de tração, caracterizada por não apresentar vestígios de deformação. Os metais que apresentam a estrutura cristalina do tipo c.c.c. (Cúbica de Corpo Centrado) e h.c. (Hexagonal Compacta) permitem a ocorrência de fratura frágil; no entanto, os metais c.f.c. (Cúbica de Face Centrada) só a apresentam se ocorrer fragilização dos contornos de grãos [9].

A fratura dúctil ocorre de forma diferente para diferentes tipos de metais. Os monocristais do tipo h.c. apresentam o deslizamento em planos basais sucessivos que ao final do processo sofrem separação por cisalhamento (figura 19-b). Metais policristalinos dúcteis, como ouro ou chumbo, demonstram ter uma seção reduzida a um ponto, antes de ocorrer o rompimento (19-c). Por último, os metais que possuem uma ductilidade considerável apresentam uma seção com uma redução de área considerável (empescoçamento), iniciando a fratura no centro do corpo e

propagando ao longo da seção. Essa forma de fratura é conhecida como “taça e cone” (figura 19-d).

Figura 19 - Tipos de Fraturas em Metais

Fonte: DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, p. 214.

A fratura por cisalhamento é diferenciada por ser uma consequência de constantes deslizamentos de planos atômicos, provocados por tensões cisalhantes. Quando não há mais possibilidade de deslizamento, ocorre o processo de clivagem (rompimento das ligações atômicas) na direção de aplicação da tensão de tração. Essa região de rompimento demonstra ter um aspecto brilhante devido à reflexão da luz nas superfícies lisas.

As fraturas que ocorrem em metais policristalinos podem ser classificadas como transgranulares (a propagação da trinca ocorre no interior do grão) ou intergranulares (a trinca se propaga pelos contornos de grão).

2.6.2 Fratura Dúctil

Durante o processo de fratura dúctil em metais, uma grande quantidade de energia promove um lento rompimento do metal. Considerando um tensionamento uniaxial, a amostra sofre um empescoçamento de uma região localizada, ou seja, redução do diâmetro. Esse tipo de fratura é conhecido como “taça e cone” e possui alguns estágios bem característicos.

Inicialmente a amostra possui um estado plano de tensão ao longo da sua superfície circunferencial devido ao carregamento em tração uniaxial. No entanto, na região onde ocorre o empescoçamento surge um estado de tensões triaxial. A região de redução de área evidencia um ponto de instabilidade plástica no qual há a redução do aumento da resistência ao encruamento, compensando a redução da seção transversal (figura 20 – a). No centro da região do pescoço e ao longo do eixo do corpo de prova um componente hidrostático promove o surgimento de microcavidades (figura 20-b) que crescem e sofrem coalescimento à medida que o processo de deformação continua gerando uma trinca central (figura 20-c). Essa trinca cresce na direção perpendicular à direção de atuação do carregamento até se aproximar da superfície. Conforme dito previamente, a região da superfície é caracterizada por um estado plano de tensão. Portanto a trinca passa a se propagar em planos cisalhantes orientados a 45° em relação ao eixo da amostra, formando a região denominada de “cone” (figura 20-d).

Figura 20 - Etapas da Fratura Dúctil

Fonte: DIETER, G.E., *Metalurgia Mecânica*, p. 239.

Muitos estudos foram realizados em relação ao processo de fratura frágil e foi descoberto que a deformação tende a se concentrar em bandas estreitas de alta deformação cisalhante nas extremidades da trinca central. Nessas regiões ocorre a nucleação de placas de vazios que crescem e coalescem até ocorrer uma fratura local. Macroscopicamente é observado que a trinca se propaga radialmente, em direção transversal ao eixo de tração. No entanto, o percurso em “ziguezague” é encontrado quando uma análise microscópica é realizada [9].

2.6.3 Efeitos do Entalhe

A presença do entalhe provoca um aumento local de tensão, por ser um concentrador de tensão, e contribui para o surgimento de um estado triaxial. O valor atingido na ponta do entalhe atinge valores acima do limite elástico do material, gerando escoamento plástico. É importante ressaltar que a espessura da placa contribuirá para a geração de um estado triaxial na ponta do entalhe, normalmente presente em placas finas.

Quando uma amostra com entalhe é submetida ao carregamento cuja tensão σ_y é menor do que o limite elástico, há a geração de uma tensão elástica transversal σ_x devido à geometria do entalhe. Fisicamente, esse fenômeno pode ser entendido como uma série de pequenos corpos de prova na ponta do entalhe [9]. Através da figura 21-a, pode-se observar que a tensão σ_y decresce rapidamente ao se afastar da ponta do entalhe, gerando um gradiente de deformação. Sabe-se que

ao aplicar um carregamento trativo em um corpo de prova, verifica-se uma contração lateral ε_x . Portanto, cada elemento poderia se deformar sem a influência dos demais a sua volta e teria $\varepsilon_x = -\nu\varepsilon_y$, provocando o rompimento das interfaces entre os corpos de prova (Dieter, 1981). Para que isso não ocorra, há o surgimento da tensão trativa σ_x que irá manter a continuidade. Além disso, a tensão σ_x aumenta ao se afastar da ponta do entalhe até um ponto e diminui quando a distância em relação ao mesmo aumenta (figura 21 – a) porque a deformação longitudinal diminui devido à redução da tensão trativa σ_y .

Por fim, a tensão na direção da espessura apresenta um valor pequeno quando utiliza-se uma placa fina. No entanto, quando a espessura B é relativamente maior ao ser comparada com o entalhe, há a presença de uma tensão σ_z que decai para zero (figura 21 – c) ao se aproximar das superfícies da placa [9].

Figura 21 - Tensões no Entalhe

Fonte: DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, p. 242.

3. Procedimento

Inicialmente foi retirada uma amostra de uma junta de soldagem subaquática que apresentava diversas trincas originadas pelo hidrogênio difusível. Essas trincas pré-existentes possuíam uma direção perpendicular à direção de confecção da solda. Foi confeccionado um corpo de prova em que pudesse ser aplicado um teste de tração, sendo necessário gerar um entalhe para direcionar as trincas geradas por tração.

A amostra possuía o formato conforme a figura 22. Foi confeccionado um entalhe com 0,75 mm de profundidade e 0,3 mm de abertura na região central através de um processo de eletroerosão. Ele teve a função de concentrar a tensão, garantindo que a trinca originada pelo ensaio de tração fosse direcionada transversalmente às trincas pré-existentes (originadas durante a operação de soldagem).

Figura 22 - Vista Ortográfica da Amostra

Figura 23 - Amostra

Figura 24 – Amostra

As imagens da amostra foram geradas através do microtomógrafo Xradia Versa 510 (figura 25). Esse equipamento é constituído de 4 lentes (figura 26): uma lente macro e 3 lentes para maior aumento. Conforme a tabela 1, cada lente possui os valores especificados de alguns parâmetros para operação [10]. Além disso, a lente macro (aumento de 0,4X) possui um formato quadrado e está localizada ao lado das demais lentes, conforme observado na figura 26.

Figura 25 - Microtomógrafo Zeiss Xradia Versa 510

Figura 26 - Lentes do Microtomógrafo

Tabela 1 - Parâmetros das Lentes [10]

	Lentes			
	0.4X	4X	20X	40X
Resolução Espacial (μm)	20	1.9	0.9	0.7
Máximo Campo de Visão 3D (mm)	50	6.5	1.3	0.7
Espessura Máxima Recomendada para Amostra Sólida (mm)	100	50	10	5

Figura 27 – Interior Microtomógrafo

Para cada etapa do experimento foram utilizadas a lente macro (0,4X) e a lente de aumento de 4X. A captura de imagens com maior aumento permitiu visualizar um volume específico no interior da amostra próximo à ponta do entalhe. De acordo com o que foi mencionado no segundo

parágrafo do item 3, a trinca gerada pelo ensaio de tração irá interagir com as trincas pré-existentes. Portanto, as imagens do volume específico permitirão visualizar melhor essas interações. Para um entendimento mais claro do leitor, a figura 28 representa a localização da região analisada próxima à ponta do entalhe sobre o volume da amostra. Nesta figura, para efeito de visualização, na imagem de menor aumento a amostra teve sua espessura reduzida digitalmente. Na verdade, a espessura da amostra é maior, e contém totalmente o volume obtido pela lente de maior aumento.

Figura 28 - Amostra e Volume Específico Analisado

3.1 Primeira Microtomografia

Iniciou-se o processo colocando a amostra como recebida no interior do microtomógrafo com o entalhe orientado para a porta de abertura da câmara.

Figura 29 - Amostra no Interior do Microtomógrafo

Primeiramente, uma lente de aumento de 0,4X permitiu analisar a amostra, aproximando a fonte para ter uma maior projeção. Para essa etapa foi utilizada obtida uma resolução de 10.9 μm . Inicialmente mediu-se a transmitância dos raios-x nas duas orientações (espessa e fina) da amostra. Obteve-se um valor de transmissão de 4 % para a orientação mais espessa e de 13% para a orientação mais fina. Essas informações foram necessárias para identificar o correto filtro a ser utilizado para o procedimento de acordo com a tabela fornecida pelo fabricante do microtomógrafo (ZEISS). Em seguida, foi programada uma varredura com a lente de aumento de 4X, obtendo uma resolução de 2,0 μm . O tempo total de captura das imagens a 0,4X e 4X foi de 17 horas e 33 minutos.

3.2 Primeiro Ensaio de Tração e Segunda Microtomografia

O material foi acoplado a uma máquina de tração no Laboratório de Ensaios Mecânicos da PUC – Rio, utilizando um extensômetro com 10 mm. O ensaio foi interrompido em 5300 N com uma deformação total de 0,13%. No momento em que foi detectada visualmente a formação de uma trinca com o auxílio de uma lupa, a amostra foi levada ao microtomógrafo para ser analisada. Repetiu-se o mesmo procedimento de tomografia utilizado para a amostra antes do ensaio mecânico.

3.3 Segundo Ensaio de Tração e Terceira Microtomografia

A amostra foi novamente ensaiada até que detectou-se uma trinca na ponta do entalhe e uma trinca na superfície da lateral da amostra. Neste momento a carga atingiu 10590 N.

Em sequência, a amostra foi levada ao microtomógrafo para uma nova análise, nas mesmas condições anteriores.

3.4 Terceiro Ensaio de Tração e Quarta Microtomografia

Para o terceiro ensaio de tração, a interrupção se deu quando surgiu uma trinca na ponta do entalhe. Finalmente, a amostra foi tomografada mais uma vez.

3.5 Análise das Imagens

Depois que as imagens geradas pelo microtomógrafo foram reconstruídas, os resultados foram analisados através de dois softwares: DragonFly e ORS Visual (Object Research System). Inicialmente, no DragonFly, foi utilizado a opção “crop” para retirar as camadas da superfície inferior e superior que apresentavam problemas de sombreamento. Em sequência, foi realizado um procedimento de processamento nas imagens no qual foram aplicados filtros: Non Local Means e Local Entropy Minimization [11]. Essa etapa teve o objetivo de melhorar a identificação correta das trincas na etapa de segmentação, reduzir o nível de ruído presente nas imagens 2D e

corrigir problemas de sombreamento na região superior procurando a uniformização. Além disso, devido ao alto nível de ruídos nas imagens da terceira microtomografia, foi necessário aplicar um filtro de abertura [11].

Após importar as imagens para o software ORS Visual, foi realizada uma segmentação através do histograma para separar e evidenciar as trincas. Em seguida, o item “Object Analysis” foi utilizado para gerar uma “ROI” que permitiu verificar o volume das trincas e utilizar a opção de cálculo de espessura nas trincas. Por fim, a operação “Compute Thickness” [12] permitiu verificar as espessuras presentes das trincas para uma possível análise do seu incremento ao longo dos ensaios de tração.

Por último, as imagens 3D e 2D foram utilizadas para identificar o desenvolvimento e crescimento de trincas geradas pelo entalhe que iriam ser interceptadas pelas trincas pré-existentes. Para isso, foi necessário selecionar as imagens 2D que possivelmente representavam a mesma camada, identificando a progressão da trinca.

Figura 30 - Imagem de Um Plano da Amostra Sem Filtro

Figura 31 - Imagem do Plano Após o Filtro Non Local Means

Figura 32 - Imagem do Plano Após o Filtro Non Local Means e Entropy Minimization

Figura 33 - Imagem do Plano Segmentada para Vizualização das Trincas

4. Resultados e Discussões

4.1 Ensaios de Tração

Para estabelecer o momento de parada de carregamento no segundo ensaio de tração foi necessário detectar a formação de uma trinca na lateral da amostra. As figuras 34, 35 e 36 evidenciam a trinca observada, sendo melhor visualizada com o auxílio de uma lupa.

Figura 34 - Trinca Gerada na Segunda Tração

Figura 35 - Trinca Gerada na Segunda Tração com Aumento

Figura 36 - Trinca Gerada na Segunda Tração com Aumento na Ponta do Entalhe

Conforme pode ser observado nas figuras 34 e 35, a amostra foi submetida a um preparo de superfície antes da captura das imagens. Observa-se a presença de linhas horizontais originadas do processo de lixamento que estão na direção na qual o carregamento foi aplicado, podendo serem imaginadas como linhas de força. Próximo à ponta do entalhe, verifica-se uma curvatura das linhas na vertical, caracterizando uma região de concentração de tensão. Esse fato retrata a explicação discutida na parte teórica sobre a geração de uma tensão na direção perpendicular ao carregamento para manter a continuidade próximo ao entalhe. Na região mais afastada do entalhe, não é verificada essa curvatura porque a tensão na direção do carregamento é reduzida por estar distante do local de concentração de tensão, diminuindo a necessidade de uma tensão perpendicular para manter a continuidade.

Quando a região vizinha à ponta do entalhe sofre escoamento localizado, uma tensão transversal ao carregamento surge, mantendo a coesão da região. Através da figura 21 - d, percebe-se que a tensão σ_x sofre um aumento superior ao se distanciar do entalhe conforme a expansão da zona plástica. Em resumo, essa tensão transversal promoveu a abertura das trincas pré-existentes,

conforme a figura 34, colaborando para o aumento da espessura que fora observado na análise das imagens após o primeiro ensaio de tração. Além disso, as trincas presentes em locais distantes do entalhe não sofreram um aumento de espessura porque a tensão transversal era muito pequena ou nula, pois não havia concentração de tensão próximo. Essas trincas eram submetidas apenas a um carregamento uniaxial na direção do seu comprimento que não gerava nenhum efeito sobre elas.

4.2 Análise Visual de Desenvolvimento das Trincas

A verificação da propagação da trinca ao longo dos ensaios de tração foi obtida através das imagens sequenciais de um mesmo plano no ORS Visual. As imagens haviam sido previamente processadas no DragonFly para uma melhor análise. As figuras 37 a 52 evidenciam dois planos diferentes ao longo das etapas do trabalho. Além disso, as imagens procuraram representar o mesmo plano, mas um procedimento em outro software de imagem seria necessário para garantir o perfeito alinhamento porque é impossível garantir o alinhamento igual ao colocar amostra no microtomógrafo e sabe-se que amostra sofreu deformação plástica ao longo dos ensaios, alterando o formato original.

**Figura 37 - Plano 1
Sem Tração**

**Figura 38 - Plano 1
Com Tração 1**

**Figura 39 - Plano 1
Com Tração 2**

**Figura 40 - Plano 1
Com Tração 3**

**Figura 41 - Região Ampliada do Plano 1
Sem Tração**

**Figura 42 - Região Ampliada do Plano 1
Com Tração 1**

**Figura 43 - Região Ampliada do Plano 1
Com Tração 2**

**Figura 44 - Região Ampliada do Plano 1
Com Tração 3**

**Figura 45 - Plano 2
Sem Tração**

**Figura 46 - Plano 2
Com Tração 1**

**Figura 47 - Plano 2
Com Tração 2**

**Figura 48 - Plano 2
Com Tração 3**

**Figura 49 - Região Ampliada do Plano 2
Sem Tração**

**Figura 50 - Região Ampliada do Plano 2
Com Tração 1**

**Figura 51 - Região Ampliada do Plano 2
Com Tração 2**

**Figura 52 - Região Ampliada do Plano 2
Com Tração 3**

As imagens que representam os planos após o ensaio de tração 3 evidenciam com clareza a propagação da trinca gerada devido ao entalhe. A trinca foi formada a partir da ponta do entalhe, propagou-se em ângulos de aproximadamente 45° e foi interrompida quando a sua frente interceptou uma trinca pré-existente, funcionando como um amortecedor para a propagação da mesma. Esse fenômeno pode ser explicado realizando uma analogia com a propagação de discordâncias entre dois obstáculos.

As trincas pré-existentes funcionam como obstáculos por serem regiões planares vazias. A frente da trinca irá interceptar duas regiões vazias (trincas pré-existentes) e tentará continuar o seu avanço através das regiões onde há matéria (figura 53 – b). Para passar por entre as duas regiões vazias, ela sofrerá uma curvatura, aumentando o seu comprimento, o que demandará mais energia para continuar o seu processo de propagação, pois sabe-se que para uma discordância a sua energia de propagação é diretamente proporcional ao seu comprimento. Em suma, esse fenômeno irá dificultar o crescimento da trinca gerada pelo entalhe, demandando um carregamento trativo com valor cada vez maior.

Figura 53 - Esquema Ilustrativo de Propagação da Trinca

Durante o ensaio de dobramento, o corpo de prova originado da solda é submetido a um processo de flexão, gerando tensões trativas acima ou abaixo da linha neutra de acordo com o momento fletor. A direção das trincas pré-existentes é a mesma das tensões trativas, portanto, não haverá efeito para o ensaio de dobramento. Além disso, a trinca que poderá ser gerada devido à flexão terá a direção perpendicular em relação às trincas pré-existentes, sofrendo o fenômeno de amortecimento explicado anteriormente.

Apesar não terem sido realizadas medições de comprimento das trincas pré-existentes após cada etapa, verifica-se por meio das imagens do mesmo plano que as trincas mantiveram o mesmo comprimento. Esse fato evidencia que as trincas pré-existentes não propagaram.

4.3 Medição de Espessura

Através da função “Compute Thickness” foi possível medir a espessura das trincas, verificando a sua variação após os ensaios de tração. Esse método foi utilizado apenas para os volumes obtidos com a lente de aumento de 4X (figura 54 - 57) porque procurou-se analisar o desenvolvimento das trincas pré-existentes próximo ao entalhe o qual geraria uma trinca perpendicular às trincas originadas pela solda. As imagens abaixo retratam a variação da espessura ao longo da trinca. Os maiores valores de espessura são representados pela cor vermelha e os menores valores são evidenciados pela cor azul.

Figura 54 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe sem Tração

Figura 55 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 1

Figura 56 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 2

Figura 57 - Distribuição da Espessura ao Longo das Trincas Próximas ao Entalhe com Tração 3

Em sequência, será apresentado o histograma dos valores de espessura correspondente às figuras 58 a 61, demonstrando a variação após os ensaios de tração.

Figura 58 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe sem Tração

Figura 59 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 1

Figura 60 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 2

Figura 61 - Histograma Espessura da Trincas Próximo ao Entalhe com Tração 3

Ao aplicar o carregamento no primeiro ensaio de tração, observou-se um aumento de espessura das trincas pré-existentes, o que foi explicado em seções anteriores. A partir do segundo ensaio de tração, verificou-se uma redução na espessura promovido pelo processo de estrição na altura do entalhe. Portanto, a redução da área gerou um estreitamento das trincas.

A figura 62 retrata os pontos que foram medidos nas imagens obtidas ao longo das 4 etapas de varreduras no microtomógrafo, sendo as informações apresentadas na próxima tabela.

Figura 62 - Esquema de Medição das Espessuras e Altura

Tabela 2 - Medições de Espessura e Altura

Carregamento Trativo [N]	Abertura do Entalhe [μm]	Espessura da Amostra na Altura da Ponta do Entalhe [μm]	Espessura da Amostra Próximo à Ponta do Entalhe [μm]	Espessura da Amostra Afastada da Ponta do Entalhe [μm]
0	209,3	2292,4	2999	2978,5
5300	213,5	2276,9	2969,5	2978,1
10590	391,5	2206,8	2944	2992,5
10952	558,2	2028,9	2861,3	2986,9

Para o primeiro ensaio de tração, percebe-se que não há reduções consideráveis de espessuras próximas à ponta do entalhe e nem aumento considerável da abertura do entalhe, evidenciando que o carregamento colaborou prioritariamente para promover a abertura das trincas próximas ao entalhe, devido ao surgimento da tensão transversal explicada nas seções anteriores. Para os demais carregamentos, observa-se uma redução apreciável na espessura na região próxima à ponta do entalhe e aumento da altura do entalhe, demonstrando que ocorreu uma redução localizada da espessura da amostra próximo à ponta do entalhe, caracterizando um processo de estrição e explicando a diminuição das espessuras das trincas ao redor da ponta do entalhe.

5. Conclusões

Os resultados discutidos anteriormente são a base para provar que as trincas pré-existentes funcionam como amortecedores, promovendo o travamento do desenvolvimento das trincas geradas no ensaio de dobramento, sendo uma explicação para o resultado favorável nos ensaios de dobramento para soldas que apresentam diversas trincas. É importante lembrar que o carregamento trativo está na direção das trincas pré-existentes, sendo mais um motivo para resultados positivos em ensaios de dobramento. Além disso, verificou-se que as trincas não se propagaram durante os ensaios mecânicos, sendo mais um fator contribuinte para o resultado satisfatório dos ensaios de dobramento.

Após analisar os resultados quantitativos e qualitativos é possível concluir que as trincas pré-existentes não prejudicam o ensaio de dobramento. Essas conclusões se opõem ao que se espera de uma amostra com várias trincas ao ser flexionada.

A análise das imagens digitais obtidas através do microtomógrafo foi extremamente importante para visualizar o desenvolvimento das hipóteses levantadas no início do trabalho. Além disso, a indução de uma trinca por um entalhe na direção desejável foi essencial para simular o que ocorre em um ensaio de dobramento, pois permitiu verificar a interação entre as trincas pré-existentes e as trincas geradas na direção transversal.

Para futuros estudos, aconselha-se realizar uma comparação mais apurada dos planos no decorrer dos ensaios de tração, realizando um alinhamento, por software, das regiões de leitura do microtomógrafo. Além disso, seria válido realizar medições de área e volume das trincas pré-existentes, entendendo melhor seu comportamento ao longo do ensaio de dobramento.

6. Referências bibliográficas

- 1 - SANTOS, V. R. **Introdução à soldagem subaquática.**
- 2 - Centro de Formação Metal Mecânico. **Classificação dos Tipos de Dobramento.** Disponível em:<http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6593-classificacao-dos-tipos-de-dobramento#.WEXx2bIrKUI>. Acesso em: 05 novembro 2016.
- 3 - Centro de Formação Metal Mecânico. **A aplicabilidade dos Ensaios de Dobramento.** Disponível em:<http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7526-a-aplicabilidade-dos-ensaios-de-dobramento>. Acesso em: 05 novembro 2016.
- 4 - Radio In Mama. História da Radiologia. Disponível em: <<http://www.radioinmama.com.br/historia.htm>>. Acesso em: 07 novembro 2016
- 5 - Sabbatini, R. M. E. **A História da Neuroimagem.** Disponível em: http://www.cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage3_p.htm. Acesso em: 08 novembro 2016
- 6 - GOMES, O. F. M. *Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais.* 2001. 151 f. Tese (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.
- 7 - Centro de Formação Metal Mecânico. **Defeito em Linha nos Materiais Cristalinos.** Disponível em:< http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6421-defeitos-em-linha-nos-materiais-cristalinos#.WEX_97IrKUI>. Acesso em: 05 novembro 2016.
- 8 - CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.* John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- 9 - DIETER, G. E. *Metalurgia Mecânica.* 2a. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p

10 - CARL ZEISS. *Xradia Versa User's Guide*. Califórnia: Carl Zeiss X-ray Microscopy, Inc., 2014. 352 p.

11 - Object Research System Inc. **Dragonfly Help**. Disponível em: <http://www.theobjects.com/dragonfly/dfhelp/Default.htm>. Acesso em 15 noembro 2016.

12 - OBJECT RESEARCH SYSTEM INC. *ORS Visual SI User Manual*. Montreal: Object Research System (ORS) Inc., 2014. 842 p.