

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

**CARACTERIZAÇÃO METALURGICA E MECÂNICA EM UMA JUNTA  
SOLDADA DE AÇOS AISI 316L E BS EN10025 PELO PROCESSO DE FTPW  
(Friction Taper Plug Welding)**

**Marcelo Moussalle Macedo**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre

Dezembro de 2011

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe Ana Maria Moussalle Macedo e ao meu pai Luis Roberto da Silva Macedo por todo apoio e pelas lições de vida que ajudam a guiar meu caminho.

Ao Professor Doutor Telmo Roberto Strohaecker, pela orientação e pelas oportunidades oferecidas.

Aos engenheiros Gabriel Cogo e Emanoela Mattos, pela ajuda no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas do LAMEF pela amizade e suporte durante todo o período da faculdade.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	VIII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	X
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA .....	2
2.1 Soldagem por fricção .....	2
2.2.2 Fases do Processo.....	4
3.1.3 Parâmetros do Processo.....	7
2.2 Processo Reparo por Fricção com Pino Consumível.....	10
2.2.1 Características Fundamentais.....	10
2.2.2 Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Solda.....	12
2.2.3 Vantagens e Limitações do Processo.....	13
2.2.4 Friction Taper Plug Welding.....	14
2.3 Mecânica da Fratura.....	15
2.3.1. Ensaio de CTOD .....	15
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	18
3.1 Materiais .....	18
3.2 Composição Química.....	19
3.3 Análise Metalográfica.....	20
3.4 Análise de Microdureza .....	21
3.5 Ensaio de CTOD .....	22
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1 Análise Macrográfica.....	24
4.2 Análise Micrográfica .....	26
4.2.1. Análise de Inclusões.....	26
4.2.2. Análise de microestrutural .....	27

4.3	Ensaio de Microdureza .....	33
4.4	Ensaio de CTOD .....	34
5.0	CONCLUSÕES .....	36
7.0	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	37
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Seqüência básica da solda por atrito convencional (2). .....	3
Figura 2: Ilustração esquemática dos parâmetros durante o processo de soldagem por fricção pelo método convencional.....	4
Figura 3: Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase I: Concentrações de material plastificado em um anel entre 1/2 a 2/3 de raio. (6) .....	5
Figura 4: Seqüências básicas de um processo de soldagem com pinos consumíveis (12) .....	11
Figura 5: Regiões da solda durante o processo por fricção com pino consumível.....	12
Figura 6: Esquema do processo “friction taper plug welding”.....	14
Figura 7: Ensaio CTOD: emprego de extensômetro de fratura para acompanhar a abertura da boca do entalhe.(15).....	16
Figura 8: : Corpo-de-prova compacto para ensaio de CTOD.....	17
Figura 9: Máquina de soldagem por fricção, onde foram produzidos os reparos. ....	18
Figura 10: Figura mostrando a Identificação da amostra e o local de onde foi retirado o corpo de prova para análise. ....	19
Figura 11: Avaliação da quantidade e do tipo de inclusões nos aços segundo a norma ASTM E45.....	20
Figura 12: Imagem mostrando os locais onde foram realizados os perfis de microdureza. ....	22
Figura 13: Local da retirada do Corpo-de-prova C(T) para ensaio CTOD. ....	23
Figura 14: Macrografia da amostra. Mostrando a presença de uma descontinuidade na região central do pino. ....	25
Figura 15: Detalhe das regiões da solda. Foto em lupa digital de baixo aumento. ....	25
Figura 16: Micrografias do Substrato, onde é possível observar inclusões de sulfeto de manganês. Sem ataque.....	26
Figura 17: Micrografias do pino, onde é possível observar inclusões de sulfeto de manganês. Sem ataque.....	27
Figura 18: Imagem panorâmica da junta soldad.....	27
Figura 19: Micrografia do metal de base. Ataque com Nital 2%.....	28
Figura 20: Micrografias da ZTMA-MB. Ataque Nital 2% .....	28
Figura 21: Micrografias da ZTA-MB. Ataque Nital 2% .....	29

Figura 22: Micrografia da Zona de Ligação, mostrando uma boa ligação metalúrgica.	29
Figura 23: Micrografias da ZTA-PINO. Ataque Ácido Oxálico.....	30
Figura 24.:Micrografia da ZMTA-PINO. Ataque Ácido Oxálico.....	30
Figura 25: Micrografias do da região central do pino. Ataque Ácido Oxálico .....	31
Figura 26: Micrografia mostrando a microestrutura na região da trinca. Ataque Ácido Oxálico. ....	31
Figura 27: Fractografias em MEV da superfície da trinca. ....	32
Figura 28: Perfis de microdureza da amostra. ....	33
Figura 29: Perfil de microdureza vertical realizado na amostra.....	33
Figura 30: Curva obtida a partir do ensaio de CTOD.....	34

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Análise das composições químicas da amostra. ....	19
Tabela 2: Parametros utilizados no ensaio de CTOD. ....	34

**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

ASM	American Society of Metals;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
AWS	American Welding Society;
BS	British Standard;
CP	Corpo de Prova;
FHPP	Friction Hydro Pillar Processing;
FTPW	Friction taper Plug Welding
HV	Hardness Vickers;
MB	Metal Base;
rpm	Rotações por minuto;
SAE	Society of Automotive Engineers;
TWI	The Welding Institute;
ZTA	Zona Termicamente Afetada;
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada;

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar metalúrgica e mecânicamente, uma junta soldada pelo processo de reparo por fricção com furo passante (Friction Taper Plug Welding - FTPW), que consiste na utilização de pinos consumíveis para reparar estruturas que contenham trincas. O reparo, estudado neste trabalho, foi realizado utilizando um pino consumível de aço inoxidável AISI 316L em um substrato de aço BS EN10025. Foram realizadas análises macro e microscópica, com o objetivo de identificar as zonas termicamente e termomecanicamente afetadas, bem com a evolução microestrutural ao longo da junta. Foram realizados ainda, perfis de microdureza, análise da composição química e ensaio de CTOD para avaliação da tenacidade a fratura da junta.

Palavras chaves: Reparo por fricção, FTPW, ZTA, ZTMA, evolução microestrutural, tenacidade a fratura.

## ABSTRACT

This work aims to provide metallurgical and mechanical characterization of the repair process by friction with through hole (Friction Taper Plug Welding - FTPW), which consists of use of consumable rod to repair structures containing cracks. In this work the repair was done using a consumable rod stainless steel AISI 316L onto a substrate BS EN10025. Has been performed macroscopic and microscopic analyses, in order to identify the thermally and thermomechanically affected zones, as well as the microstructural evolution along the joint. Were also performed, profiles of microhardness, chemical composition analysis and CTOD testing for evaluation of fracture toughness of the repair.

**Keywords:** Repair by friction, FTPW, HAZ, TMAZ, microstructural evolution, fracture toughness.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de reparo por fricção com furo passante é uma técnica relativamente nova, que surge como um método alternativo a soldagem a arco elétrico para o reparo de trincas em grandes estruturas. A técnica consiste em usinar um furo cônico em toda a espessura do material, no local onde existir um defeito, e então preencher este furo com um pino consumível, que é introduzido na cavidade, com uma alta velocidade de rotação, ao mesmo tempo que uma força axial é aplicada. O calor, que é gerado a partir do atrito, entre o pino e o material base faz com que ocorra a plastificação do consumível, preenchendo, assim, completamente o furo. Os principais parâmetros do processo são: Velocidade de rotação, força axial, comprimento de queima, força de forjamento e tempo de queima

Essa técnica tem recebido especial atenção, nos últimos anos, das indústrias, do petróleo e naval, uma vez que por ser um processo de soldagem inteiramente realizada no estado sólido pode ser usado sob condições extremas, como de baixo da água ou atmosferas perigosas. A ausência da fase líquida evita o surgimento dos problemas convencionais gerados pela absorção de gases, (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio), tais como porosidade e trincas induzidas pelo hidrogênio, normalmente observados em cordões de solda onde ocorra a fusão do material.

Embora seja uma técnica promissora, muito pouco se conhece dela em relação aos fenômenos envolvidos durante o processo, bem como a real influência dos parâmetros na qualidade final do reparo produzido. Desde modo, este trabalho visa identificar as microestruturas formadas ao longo de uma junta composta por um substrato de aço ao carbono, onde foi realizado um reparo utilizando um pino consumível de aço inoxidável austenítico. Foram também, avaliadas algumas propriedades mecânicas da junta, como dureza e tenacidade a fratura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO

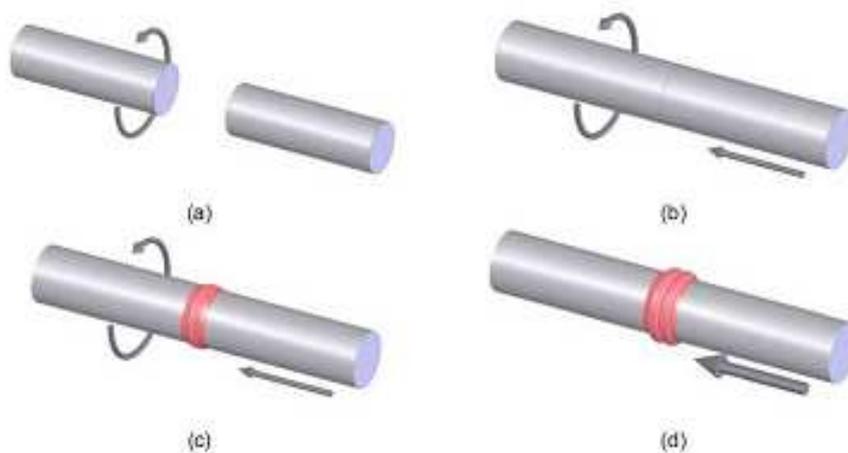
Apesar da força de fricção (ou atrito) ser conhecida de tempos bastante antigos pela humanidade, a história da soldagem utilizando este recurso é bastante recente. De acordo com a American Welding Society (AWS), a origem do processo de soldagem por fricção é conhecida desde o ano de 1891, quando o primeiro processo desta natureza foi patenteado nos Estados Unidos. Outros processos foram patenteados ao redor da Europa, principalmente na Inglaterra, entre os anos 1920-1944, e na União Soviética em 1956. (1)

A soldagem por fricção é um processo de união de peças no estado sólido, no qual duas peças são colocadas em contato com movimento relativo, sendo simultaneamente aplicada uma força axial entre os componentes. Com a geração de calor devido ao atrito das peças e o íntimo contato entre as partes decorrentes da força aplicada, há a formação da ligação entre as peças (2).

Existem duas variantes do processo de soldagem por fricção, cujas diferenças estão no modo de geração de energia para o processo: a soldagem por fricção convencional e a soldagem por fricção inercial. Na primeira, esta energia é obtida através de um mandril que gira indeterminadamente e é mantido por um tempo predeterminado. Na segunda, a energia é obtida através de um volante de rotação (3). No presente trabalho será abordado o método de fricção convencional, por ser o processo de reparo por fricção uma variante desse processo.

A Figura 1 mostra o processo de soldagem por fricção convencional. No primeiro estágio, uma das peças é colocada em movimento de rotação enquanto que a outra peça é fixa no equipamento. Em seguida, em um segundo estágio, as peças são

colocadas em contato e então uma força axial é aplicada iniciando o processo, fazendo que ocorra a fricção das superfícies das duas peças e o aquecimento das mesmas. O aquecimento segue até uma temperatura na qual os materiais em contato plastificam. Por fim, com a força axial sendo aplicada é formada uma rebarba (flash), onde as impurezas (filme de óxidos, graxas, inclusões, etc.) encontradas nas superfícies das peças são expulsas para esta rebarba. Após ter alcançado a temperatura e o tempo estipulados a rotação é parada e a força axial é aumentada visando consolidar e aumentar a adesão da junta, essa etapa é conhecida como de forjamento. (2)



**Figura 1: Sequência básica da solda por atrito convencional (2).**

Embora seja considerado um processo no estado sólido, alguns autores reconhecem sob determinadas condições, a possibilidade da formação de um filme de material fundido entre as superfícies em atrito (4). No entanto, as características finais da solda não devem evidenciar a formação de uma estrutura fundida decorrente do intenso trabalho a quente ao qual o material é submetido, por esta razão, grande parte dos autores considera que durante o processo de soldagem, não ocorre fusão de material (5).

A microestrutura do material soldado é influenciada pelo tipo e intensidade da energia aplicada e pela deformação submetida durante o ciclo de soldagem.

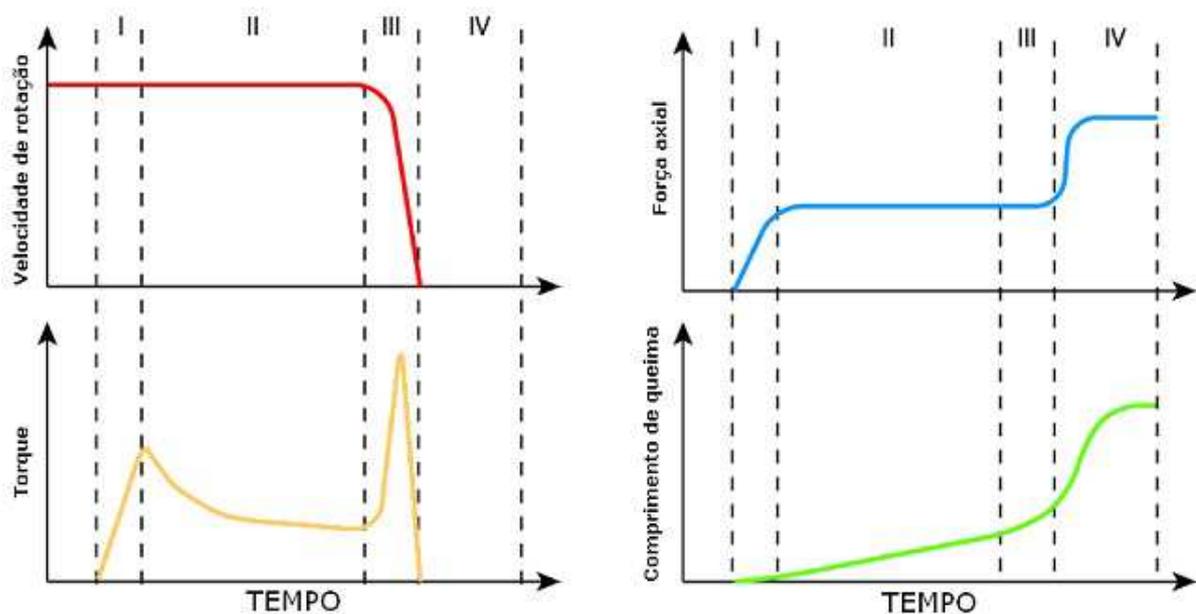
As zonas podem ser divididas em três modos:

- ❖ Zona afetada pelo calor (ZAC): onde a microestrutura e as propriedades mecânicas apenas sofrem a influência do calor gerado durante o processo de soldagem.

- ❖ Zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA): onde a quantidade de calor é maior do que na ZAC, resultando uma recuperação de grãos e aparecimento de grãos deformados.
- ❖ Zona de Recristalização (ZR): é claramente caracterizada pela formação de uma microestrutura de grãos finos e com a morfologia equiaxial como resultado do fenômeno de recristalização dinâmica

### 2.1.1 FASES DE PROCESSO

A AWS e a ASM subdividem o ciclo de soldagem em duas fases, porém se o processo é controlado automaticamente (fricção convencional) uma subdivisão mais detalhada dos mecanismos durante a soldagem por fricção é necessária. Sendo assim, uma subdivisão em quatro fases básicas parece mais apropriada (6). A Figura 2 mostra essa divisão e a variação dos parâmetros de soldagem durante cada fase do ciclo



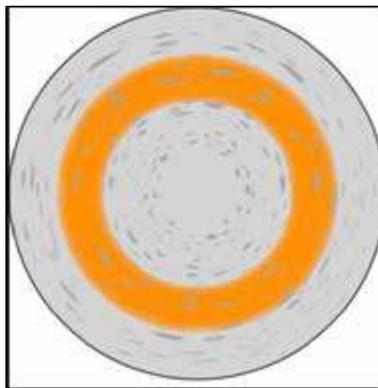
**Figura 2: Ilustração esquemática dos parâmetros durante o processo de soldagem por fricção pelo método convencional**

I – FASE DE ATRITO: Nessa fase ocorre o primeiro contato entre as superfícies. Há o amaciamento das protuberâncias, e com isso um aumento das regiões de contato e quebra dos filmes de graxa e óleo presentes nas superfícies. Ocorre também nesta fase a quebra e expulsão de parte dos filmes de óxidos presentes na interface. Nas regiões

externas da junta, partículas são transportadas para fora da zona de atrito devido às altas forças radiais (efeito hidro-extração). Após, há uma grande elevação do torque devido à remoção de parte desses filmes de óxidos e ao aumento da área real de contato. Essa etapa é caracterizada por processos de adesão e micro-colagem (6).

O efeito de hidro-extração das partículas de contaminantes da superfície próximas ao centro de rotação é obstruído por forças radiais mais baixas e condições de fluxo material restringido. Então, uma concentração de material em uma área assemelhando uma coroa circular pode ser observada (Figura 3), sendo sua distância do centro de rotação da peça de  $1/2$  a  $2/3$  do raio da superfície de fricção. Esta concentração causa aquecimento local formando uma fina camada plastificada de material cisalhado. Esta área circular aumenta em tamanho, uma quantia maior de área nominal de soldagem faz contato, e uma maior quantidade de microcolagens são produzidas(6).

Com o aumento da temperatura há uma redução no limite de resistência do material, fazendo com que haja uma menor taxa de deformação do mesmo (7). Como resultado dos processos descritos acima, o torque de atrito tem seu primeiro máximo (Figura 2). A taxa de aquecimento e a temperatura aumentam significativamente. A fase I é concluída logo que o torque de atrito atinge o seu máximo.



**Figura 3: Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase I: Concentrações de material plastificado em um anel entre  $1/2$  a  $2/3$  de raio. (6)**

II – FASE DE AQUECIMENTO: Nesta fase ocorre uma queda brusca no torque e um aumento da temperatura plastificando o material e o extrudando, em parte, para a periferia das superfícies, formando as rebarbas. Nesta fase, o sistema entra em regime semi-estacionário, e a velocidade de encruamento, a temperatura e a transferência de calor são praticamente constantes. Ao final desta fase as superfícies estão prontas para a

formação da ligação metalúrgica, pois tem-se temperaturas elevadas, o metal está plastificado e os possíveis detritos foram removidos em direção à rebarba (7).

À medida que a temperatura diminui, devido à diminuição do atrito, o tamanho da zona plastificada decresce e áreas mais frias fazem contato, aquecem e se tornam altamente plastificadas. Este processo é mantido desde que a temperatura e a altura da zona plastificada possam ser mantidas em equilíbrio. Como resultado mais material é empurrado para a rebarba.

Estas ações equilibradas resultam em saturação de calor da área de fricção e das zonas adjacentes.

Um campo de temperatura virtualmente estacionário é alcançado e as superfícies de atrito e o momento de fricção decrescem.

Deste ponto, uma quase constante taxa de redução axial é estabelecida.

Em suma: com o aumento da saturação térmica das peças a energia exigida para plastificação reduz levando a um momento de fricção mais baixo. Porém, a rebarba crescente aumenta a superfície de fricção e conseqüentemente o momento de fricção. Estes fenômenos equilibram-se um ao outro resultando em um momento de fricção quase constante.

A segunda fase é concluída assim que um perfil de temperatura exigido para uma boa operação de soldagem é estabelecida ao longo das peças de trabalho.

**III – FASE DE DESACELERAÇÃO:** Quando no modo convencional da soldagem por fricção, o decréscimo de velocidade ocorre de forma controlada, a temperatura cai, a resistência ao cisalhamento aumenta e com isso o torque alcança o seu segundo pico. Esse aumento do momento de fricção causa uma deformação adicional no material adjacente à junta, que até então não tinha sido submetido a nenhuma deformação (6).

Uma velocidade rotacional mais baixa ainda resulta em um maior comprimento de queima. O material é empurrado desde as regiões internas da zona de solda para as rebarbas, resultando em um aumento de temperatura nesses locais. Em um momento crítico a rotação é reduzida a um nível tão baixo que as temperaturas nas superfícies de atrito não podem ser mantidas. Então a resistência ao cisalhamento do material aumenta e a deformação angular ocorre em uma região maior ao longo da peça (7). Esta é uma fase de fundamental importância para o processo, pois é ao final dessa fase que ocorrem as ligações mecânicas.

IV – FORJAMENTO: Aqui a velocidade de rotação é nula, sendo que a força axial continua sendo aplicada por um tempo. Há um rápido resfriamento e ao final a união está estabelecida. A elevada força de soldagem resulta em um aumento brusco do comprimento de queima e do torque de atrito. As camadas de óxidos causadas pelo atrito insuficiente são expulsas das regiões externas da solda. Após a rotação ser interrompida, o processo de amolecimento dinâmico, ou seja, a deformação é concluída, mas os processos de difusão prosseguem. Como o material começa a resfriar lentamente, ocorre recristalização estática, regeneração cristalina e um lento processo de fluência. As tensões internas são consideravelmente eliminadas, caracterizando um fator determinante para as propriedades mecânicas de uma solda por atrito (6).

### 2.1.2. PARÂMETROS DO PROCESSO

Os principais parâmetros do processo de soldagem por atrito são: força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima (burn-off), tempo de aquecimento e força de forjamento. Serão descritos a seguir, em maiores detalhes, a influência de cada um desses parâmetros na qualidade do reparo produzido.

#### Força Axial

Esta deve ser conservada em valores que permitam manter as superfícies de atrito muito próximas, de modo a evitar a presença de partículas indesejáveis na interface e a formação de filmes de óxido. No entanto, valores muito elevados podem dificultar o controle do processo, em vista das elevadas temperaturas locais e das altas taxas de comprimento de queima.

Estudos realizados (Vill 1962) mostram de forma bem detalhada a influência da força axial na qualidade da união. Além de esta controlar de forma efetiva os tempos de soldagem, a mesma atua no perfil e características da ZTA. As maiores forças conduzem a um estreitamento da ZTA, a qual se propaga, na direção axial, semelhantemente a um perfil cônico, com origem no centro da solda e estendendo-se para o exterior. Para as menores forças, a ZTA é apresentada com um perfil mais

abrangente, propagando-se de forma paralela à superfície de atrito. Recomenda-se o emprego de maiores forças para a obtenção de uma microestrutura mais refinada, evitando-se a formação de ferrita de Widmanstätten, proporcionando-se assim um relativo ganho nas propriedades de tração, dureza e tenacidade (2).

### Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação possui uma grande faixa de variação, sem provocar sensíveis perturbações na qualidade da solda (2). Segundo estudos (Vill 1962) realizados, existem certas velocidades ótimas para cada combinação de materiais e aplicações. Nas mais altas velocidades de rotação, as interações entre as asperidades são acompanhadas por uma ação de polimento entre as superfícies em atrito. Este comportamento pode estar relacionado às condições viscoplásticas do material interfacial, o que conduz a um maior tempo de aquecimento para serem alcançadas as condições plásticas ideais, favorecendo-se assim a propagação de calor e intensificação da ZTA. As altas velocidades irão ocasionar, além do maior volume de material aquecido, uma menor taxa de resfriamento e queda nas propriedades mecânicas, tais como limite de resistência e dureza (8). Já as mais baixas velocidades implicarão em menor input de energia de soldagem e um menor aquecimento periférico na superfície em atrito.

Contudo, principalmente em elevadas pressões axiais, é necessário uma unidade com maior potência a fim de superar os esforços resistivos a baixa rotação. As baixas rotações também podem ser um agravante, devido às mais altas taxas de resfriamento, podendo ocasionar, dependendo do meio de resfriamento, a formação de fases com excessiva dureza. Foi observado que, maiores velocidades privilegiarão uma estrutura mais grosseira de Widmanstätten, com propriedades mecânicas de resistência inferiores às obtidas a baixas rotações (9).

### Comprimento de Queima

Descreve a velocidade com que ocorre o deslocamento entre as superfícies de atrito das peças em contato. Este parâmetro é utilizado para controlar o ciclo de soldagem, ou seja, início e fim do processo, além de ter significativa influência na qualidade da união. Apresenta forte influência da força axial e velocidade de rotação, de

modo que, altas forças e baixas velocidades propiciam os mais elevados comprimentos de queima. Estudos realizados (Ellis 1972) demonstraram que os maiores comprimentos de queima tendem a desenvolver maiores valores de limite de resistência.

O controle do processo através deste parâmetro apresenta a desvantagem de se necessitar de um adequado alinhamento entre as seções a serem unidas, bem como a presença de rebarbas largas e defeitos superficiais. Esses fatores levam a uma redução na qualidade da união soldada (10).

### Tempo de aquecimento

O tempo de aquecimento é o período entre o momento do contato inicial do atrito até o fim da fase de frenagem. Ele é significativamente influenciado pela pressão axial e pela velocidade de rotação e determina a energia utilizada na operação de soldagem (11).

O tempo de aquecimento é importante principalmente porque dispara o mecanismo de adesão do material. O aquecimento define a microestrutura na interface de soldagem e afeta a largura da ZAC.

No fim da fase de forjamento, dependendo da taxa de resfriamento a austenita se transforma em produtos diferentes: ferrita, perlita, bainita ou martensita. O tipo e a fração de volume final da microestrutura são uma função do pico de temperatura alcançado durante o ciclo de soldagem e da taxa de resfriamento subsequente. A microestrutura determinará a força e suscetibilidade final da solda à fratura frágil, bem como as outras propriedades da junta. O pico de temperatura e a taxa de resfriamento são difíceis de serem medidos experimentalmente devido às severas deformações plásticas que acontecem na interface de solda (11).

### Força de Forjamento

Na etapa final do processo de fricção (quando finda a rotação) uma força de forja é aplicada. Esta força confere três efeitos benéficos para a solda. O forjamento é requerido para dispersar as inclusões que foram reorientadas durante a fricção e refinar os grãos austeníticos devido ao trabalho a quente, bem como reduzir a tendência de formar ferrita de *Widmanstätten* por afetar a taxa de resfriamento. A força de forja também ajuda a aumentar a resistência à tração e a dureza, o que significa que é de bom grado que ela seja aplicada (12).

## 2.2. PROCESSO DE REPARO POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL

O processo de reparo por fricção com pino consumível (Friction Hydro Pillar Processing – FHPP) é uma técnica desenvolvida e patenteada pelo “The Welding Institute”, no começo dos anos 90, que a define como uma técnica para unir e reparar matérias de grande espessura. O processo é caracterizado como um processo não-convencional e vem recebendo grande atenção principalmente da indústria naval e de petróleo, pela possibilidade de reparo de trincas em estruturas *offshore*, tubulação de óleo e gás (13).

Em virtude do restrito número de publicações acerca desta técnica, se conhece relativamente muito pouco sobre os fenômenos envolvidos, bem como a influência real dos parâmetros do processo e suas faixas ótimas de operação, visto que estes também dependem do tipo de material trabalhado (6).

### 2.2.1. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

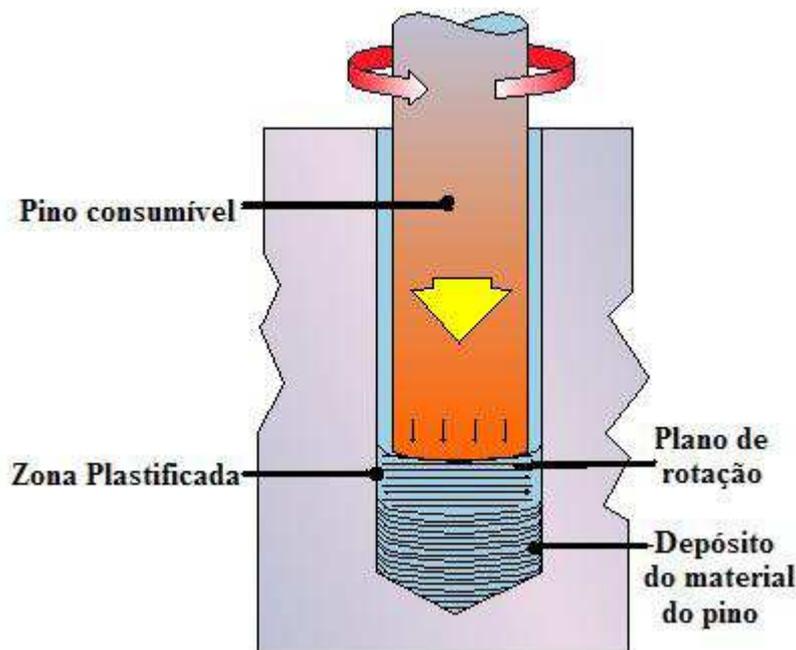
O processo de reparo por fricção com pino consumível consiste em duas etapas: Primeiramente é realizada a abertura de um furo cego (não passante), com geometrias tanto cônicas, quanto cilíndricas e posteriormente é feito o preenchimento deste furo por meio de um pino (consumível), primeiramente rotacionado, e posteriormente inserido coaxialmente ao furo, sendo, então, submetido a um esforço normal de compressão (10). A Figura 4 apresenta as sequencias básicas do processo FHPP



**Figura 4: Seqüências básicas de um processo de soldagem com pinos consumíveis (12)**

Devido às interações entre as superfícies de atrito, é gerado calor que provoca o aquecimento e conseqüente redução do limite de escoamento do material. Este efeito térmico forma um fluxo plástico, que, mediante as forças existentes, propaga-se axialmente ao longo da seção do consumível do pino, promovendo o completo preenchimento do orifício (14).

A principal diferença entre este processo e o processo de soldagem por atrito é a existência de um consumível (pino de queima). O pino de queima é colocado em rotação em relação ao eixo do furo da chapa a ser reparada. Após atingir a rotação pré-determinada, o mesmo é colocado em contato com o fundo do furo e, então, é iniciada a aplicação da força axial. Devido à aplicação da carga axial e do movimento relativo das superfícies, uma camada contínua de material plastificado é formada. O pino de queima é totalmente plastificado devido ao atrito entre as interfaces do pino e do furo, sendo a região vazia existente entre o pino e o furo preenchida pelo material plastificado do pino. A Figura 5 apresenta um esquema mostrando a soldagem como se processa.



**Figura 5: Regiões da solda durante o processo por fricção com pino consumível.**

Em vista do intenso trabalho mecânico a quente que o consumível (pino) está sujeito, suas propriedades mecânicas de limite de resistência e dureza finais tendem a ser mais elevadas que aquelas apresentadas pelo material de origem, podendo estas, ainda, ser alteradas mediante práticas de tratamento térmico (6).

### 2.2.2 INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DO PROCESSO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS REPAROS

Em um estudo realizado (Meyer 2002), a respeito da influência dos parâmetros força axial e velocidade de rotação foi demonstrado que a ZTA tende a ser maior com velocidades de rotação mais elevadas. Podendo estar relacionado às maiores energias de soldagem aportadas, quando do uso de altas rotações.

A influência da velocidade sobre o tempo de processamento não ficou muito clara. O tempo de processo apresentou variações irrelevantes, sem relação com a velocidade. Somente uma ligeira tendência a redução nos valores de dureza foi notado, quando aplicadas velocidades de rotações mais elevadas (13).

Os estudos também mostraram que a utilização de uma maior força axial leva a uma tendência de aumento de dureza, porém com valores não muito significativos. Com relação à ZAC, devido ao fato de que maiores forças axiais implicam em maiores taxas

de queima do pino e, portando, em um menor tempo de aquecimento da peça, isso leva, ao contrário da utilização de maiores velocidades de rotação, a uma ZAC relativamente menor. Foi reportado que a força axial age de forma mais preponderante que a velocidade de rotação, sendo a principal variável a ser trabalhada nesse aspecto.

Observou-se também que as propriedades mecânicas da região trabalhada se mostraram superiores às do metal-base e às do pino, demonstrando mais uma vez as potencialidades do processo.

Em termos de microestrutura, todos os ensaios realizados em aços API X65 apresentaram as mesmas tendências, que foi a formação de martensita e ferrita com grãos de martensita alinhada na interface entre o pino de queima e o furo. A formação desse tipo de microestrutura se deveu à maior velocidade de resfriamento nessa região. Já a região mais central das peças, com menores velocidades de resfriamento, mostrou uma microestrutura com grãos maiores, com presença de ferrita globular e ferrita acicular, sendo que essa última promove uma melhora significativa na tenacidade da peça (15).

### 2.2.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO

O processo de reparo por fricção apresenta uma série de vantagens em relação aos processos convencionais. As principais vantagens são:

- Possibilidade de soldagem de materiais altamente dissimilares, que não são possíveis por meio dos processos de fusão.
- Metal de adição, fluxo ou gases de proteção não são necessários.
- Processo limpo, pois não há radiação, fumaça ou centelhas.
- Não gera defeitos como porosidades e segregação (efeitos ligados a solidificação).
- O processo é facilmente automatizado para produção em massa.
- Cria reparos de grande resistência mecânica.
- Baixo consumo de energia se comparado aos processos por fusão.
- Com a união dos materiais ocorre no estado sólido em baixa temperatura, preserva a microestrutura da maioria dos materiais eliminando a necessidade de tratamento térmico após a soldagem.

Apesar das inúmeras vantagens, o processo também apresenta algumas limitações, tais como:

- O custo das máquinas e das ferramentas é relativamente alto, se comparado aos processos a arco elétrico.
- Não é possível realizar os reparos em peças de ferro fundido, pois o grafite atua como lubrificante. O mesmo efeito é gerado em peças metálicas com baixo coeficiente de atrito.
- Um dos materiais a serem unidos deve ser passível de deformação plástica.

#### 2.2.4. FRICTION TAPER PLUG WELDING

Esse processo é uma variação do *Friction Hydro Pillar Processing*, desenvolvido por Andrews e Mitchell para realizar reparos em estruturas “*offshoore*”, em condições subaquáticas. Este processo é muito similar ao FHPP com a única diferença de que neste caso o furo feito é passante, fazendo com que a maior concentração de deformação plástica encontra-se nas paredes laterais, e não ao longo de grande parte da seção transversal do pino.

Este processo envolve a perfuração de um furo cônico em toda a espessura da placa no local do defeito. Um pino cônico com o ângulo do furo é introduzido e depois soldado por atrito no furo.

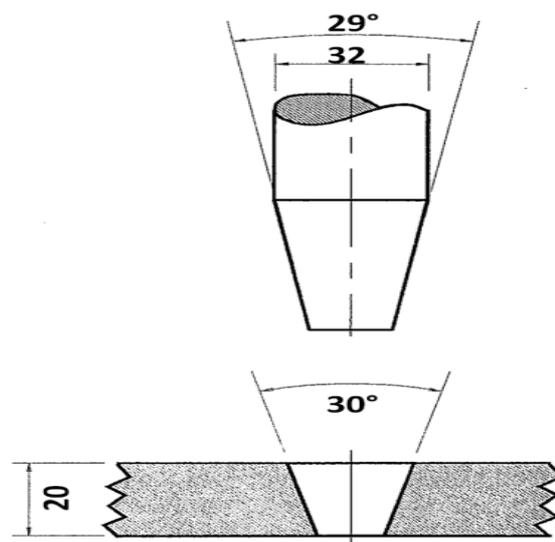


Figura 6: Esquema do processo “friction taper plug welding”

A geometria do furo e dos pinos permite maiores forças hidrodinâmicas e maiores forças de reação na soldagem. Essa técnica permite efetuar soldagens em materiais em que há necessidade de expulsão do material modificado pela temperatura ou fluxo indesejável na formação da interface de soldagem.

### 2.3. MECÂNICA DA FRATURA

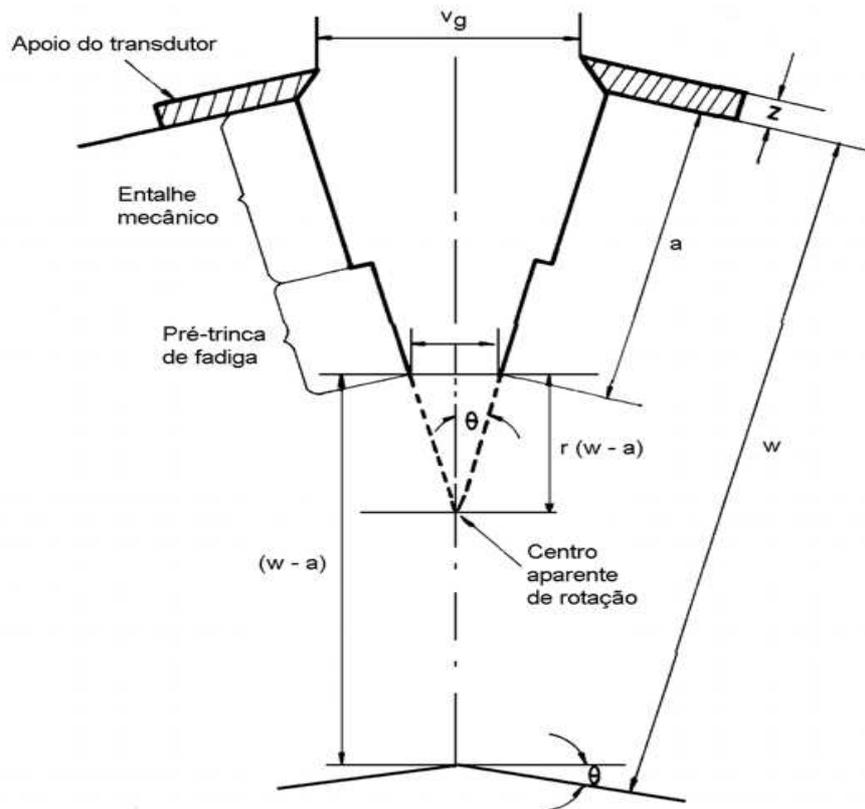
A mecânica da fratura é a ferramenta que possibilita a análise de defeitos permissíveis em um componente. Ela fornece os conceitos e equações utilizadas para determinar como as trincas crescem e quanto podem afetar a resistência. (16)

Os ensaios ligados à mecânica da fratura são realizados em corpos de prova com uma trinca aguda na raiz do entalhe que garante, dentro de certos limites, a máxima severidade possível de tensões para o entalhe. Esses ensaios são: tenacidade à fratura em deformação plana (KIC), deslocamento de abertura da ponta da trinca crítico (CTOD) e o parâmetro crítico em termos da integral J (JIC). Os ensaios de tenacidade à fratura do tipo KIC são mais indicados para materiais frágeis de elevada resistência mecânica. Já os ensaios CTOD e integral JIC permitem estabelecer parâmetros de tenacidade à fratura para materiais dúcteis de menor resistência mecânica, em condições elasto-plásticas de deformação (17).

#### 2.3.1. ENSAIO DE CTOD

O método CTOD baseia-se na medição do deslocamento da abertura da ponta da trinca como parâmetro crítico de iniciação do processo de fratura. A presença de uma zona plástica na ponta de uma trinca decorre do escoamento localizado nesta região, devido à intensificação de tensões. Desta forma, passa a existir um campo de tensões plásticas completamente circundado por um campo de tensões elásticas, onde não mais se aplicam as equações da Mecânica da Fratura Linear Elástica, tornando-se necessário desenvolver expressões para o cálculo do valor de CTOD.(18)

O parâmetro de tenacidade CTOD, é baseado na medida da abertura da ponta da trinca, e é obtido a partir da medida do deslocamento  $V_p$  realizada por um *clip-gage* devidamente instalado na abertura do entalhe do corpo de prova.



**Figura 7: Ensaio CTOD: emprego de extensômetro de fratura para acompanhar a abertura da boca do entalhe.(15)**

A conversão do deslocamento  $V_p$  obtida pelo *clip-gage* para o valor do CTOD no ensaio é realizada através da determinação de um centro de rotação do corpo de prova situado abaixo da pré-trinca de fadiga, ilustrado pela Fig. 7. Esse centro de rotação é gerado pelo carregamento aplicado à amostra, que provoca uma deformação em torno de um ponto denominado como centro aparente de rotação (19).

Através da análise da Figura 7, pode-se verificar que o valor do CTOD( $\delta$ ) pode ser facilmente determinado por semelhança de triângulos e calculado, a partir do deslocamento de abertura da boca do entalhe  $V_p$ , pela equação 3.1.

$$\delta = \frac{K^2 (1-\nu)^2}{\sigma_y E} + \frac{0,4 (W-a) V_p}{0,4(W+a) + a+Z} \quad (3.1)$$

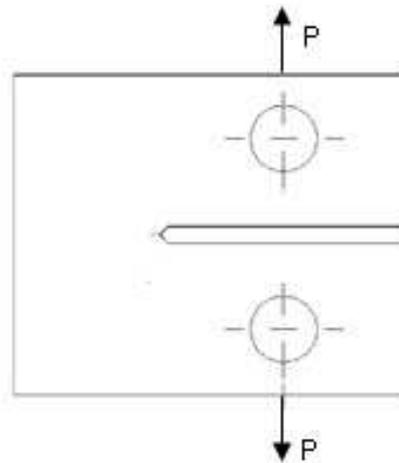
Sendo que :  $K = \frac{P.Y}{B.W^{0,5}}$

onde:

- a = tamanho da pré-trinca
- W = altura do corpo de prova

- $B$  = espessura do corpo de prova
- $\nu$  = coeficiente de Poisson
- $V_p$  = componente plástica da abertura de trinca
- $z$  = altura dos suportes do extensômetro
- $K$  = valor do fator de intensidade de tensões
- $Y$  = fator de forma
- $B$  = espessura do corpo de prova

Um registro da carga aplicada ao corpo de prova pela abertura da trinca (monitorada pelo *clip gage*) fornece os dados a serem empregados na equação 3.1 (16).



**Figura 8: : Corpo-de-prova compacto para ensaio de CTOD.**

O corpo de prova usado foi do tipo compacto (Figura 8) e foi pré-fissurado em fadiga a fim de simular um defeito com a máxima acuidade possível representando o pior defeito que pode ser encontrado na prática.

Entre os ensaios utilizados para avaliar a tenacidade à fratura dos materiais, o ensaio CTOD é o que apresenta a maior simplicidade de execução. A principal vantagem da utilização do ensaio CTOD é devida à possibilidade da sua aplicação tanto em materiais de elevada resistência mecânica, onde predominam os conceitos da mecânica da fratura linear-elástica, quanto em materiais dúcteis onde se tem o comportamento elasto-plástico. Desse modo, o ensaio CTOD pode ser bastante indicado em pesquisa e desenvolvimento de novas microestruturas, onde não se tenha resultados prévios do comportamento de fratura dos materiais (17).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. MATERIAIS

Os reparos foram realizadas no centro de pesquisa da TWI em Cambrige – Inglaterra, utilizando uma maquina de soldagem por atrito NEI – John Thompson modelo FW-13 com carga de 150 kN e velocidade rotacional 1550 rpm. O comprimento de queima estabelecido foi de 4 mm.

Os reparos foram realizados utilizando-se como substrato uma chapa de aço BS EN10025 com dimensões 200x140x30mm e pino cônico, obtido a partir de uma barra laminada a quente cilíndrica de 30mm de diâmetro de aço inoxidável AISI 304L.



**Figura 9: Maquina de soldagem por fricção, onde foram produzidos os reparos.**

A Figura 10 apresenta a foto da amostra da chapa após o processo, com a devida identificação e mostrando o local de onde foi retirado o corpo de prova para a realização dos ensaios.



**Figura 10:** Figura mostrando a Identificação da amostra e o local de onde foi retirado o corpo de prova para análise.

### 3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As composições químicas foram realizadas, no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), em um espectrômetro de Marca SPECTRO modelo Spectrolab. A Tabela 1 apresenta as análises químicas realizadas no material do pino e da chapa, bem como a composição típica desses aços. Para cada amostra foram realizadas 5 queimas e obteve-se uma média aritmética desses valores

**Tabela 1: Análise das composições químicas da amostra.**

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti
Metal Base (chapa)	0,15	0,37	1,36	0,009	0,014	<0,0010	<0,0050	0,015	0,001
BS EN10025	0,2 máx	0,5 máx	1,5 máx	0,04 máx	0,04 máx	-	-	0,15 máx	0,15 máx
Pino	0,015	0,47	1,83	0,027	0,021	17,24	1,95	9,76	0,005
AISI 316L	0,03 máx	0,75 máx	2,00 máx	0,045 máx	0,03 máx	16,00 18,00	16,00 18,00	10,00 14,00	-

### 3.3. ANÁLISE METALGRÁFICA

A análise metalográfica foi realizada com o objetivo de identificar as fases e constituintes presentes nas regiões desde o metal de base até o pino.

Primeiramente, a superfície de interesse da amostra obtida foi lixada segundo a seqüência granulométrica de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, a fim de tornar a superfície mais planas e com menores rugosidad.

Após a amostra foi polida com pasta de diamante de granulometria 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . e então foi feita a análise do teor de inclusões presentes no pino e na chapa. As fotos foram obtidas em aumento de 100x e comparadas com imagens-padrão (Figura 11).

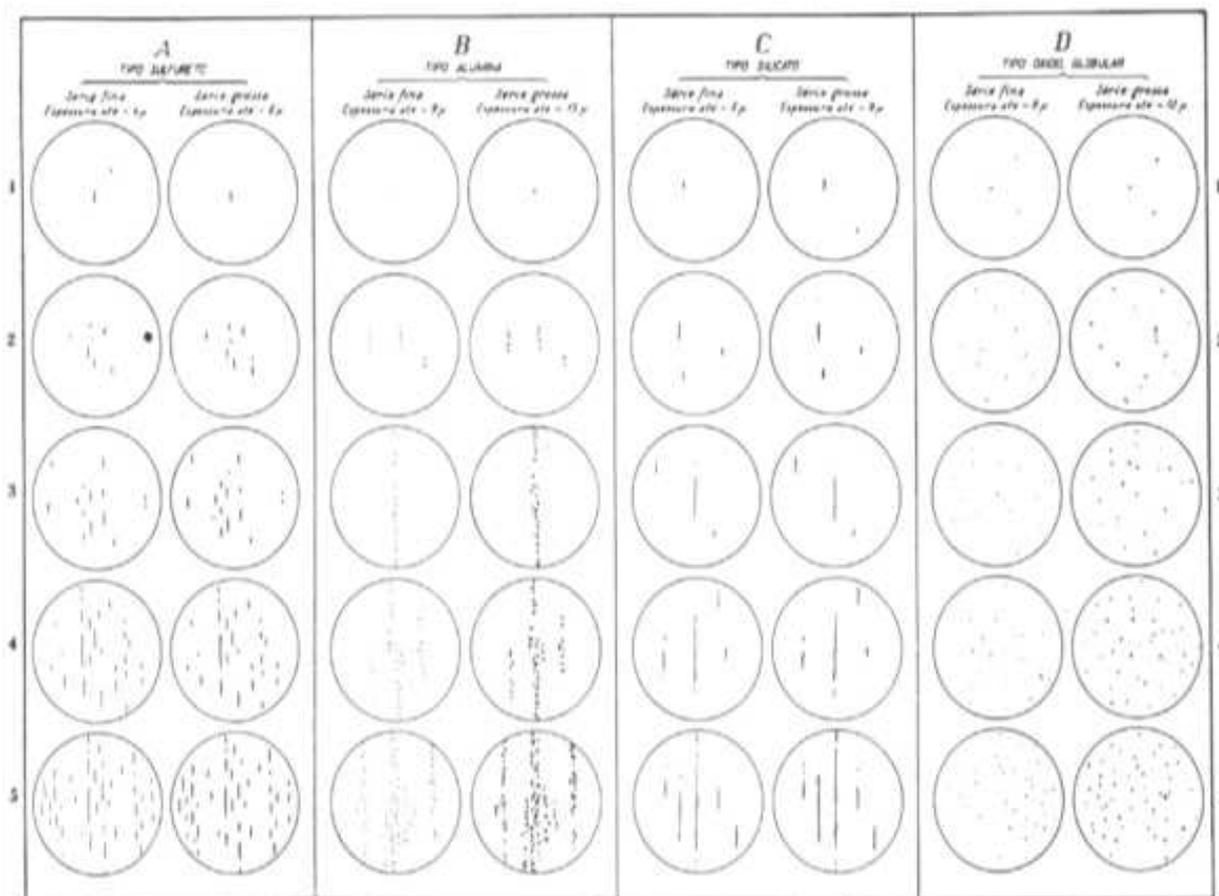


Figura 11: Avaliação da quantidade e do tipo de inclusões nos aços segundo a norma ASTM E45

Foi, então, realizado um ataque químico composto de Nital 2% e de ácido oxálico para a revelação da microestrutura da chapa e do pino respectivamente. A seguir, foi feita a análise macroscópica, a olho nu, que tem como objetivo dimensionar o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona termomecanicamente afetada (ZTMA)

Posteriormente, a amostra foi examinada através de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), visando identificar e caracterizar as microestruturas formadas antes e após o processo de reparo por atrito. A observação foi executada na região do pino, ao longo da interface pino/bloco e no metal base (chapa). As imagens das microestruturas foram obtidas com o auxílio de um microscópio óptico OLYMPUS, modelo BX51M com uma câmera digital acoplada e um microscópio eletrônico de varredura SHIMADSU, modelo SSX-50 SUPERSCAN com sistema de análise de imagens.

### 3.4ANÁLISE DE MICRODUREZA

Foram realizados quatro perfis de microdureza, sendo um vertical e três horizontais. O perfil vertical tem início na face superior do bloco, passando pelo centro do pino. O primeiro perfil horizontal inicia a 1,5 mm de altura em relação a face superior do bloco, o segundo a 10 mm e o terceiro, a 18 mm . Todos têm início no lado esquerdo da amostra, na região adjacente a solda, e avançam em direção à face lateral oposta. A Figura 12 demonstra o procedimento de posicionamento destes perfis.

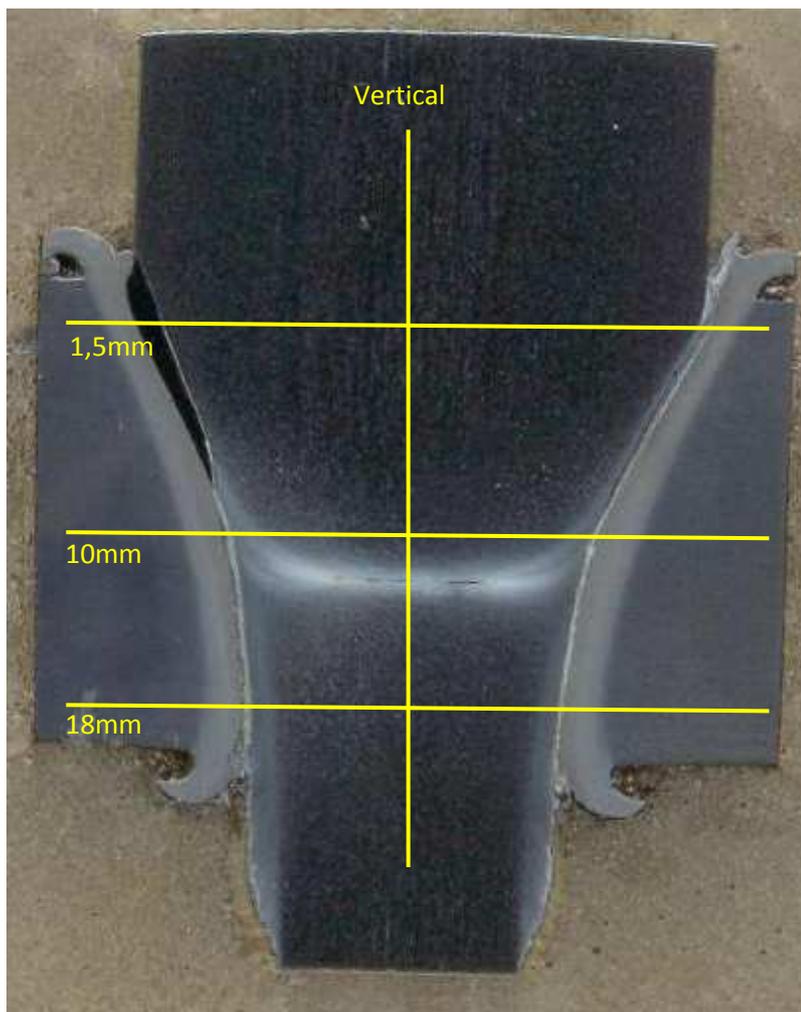
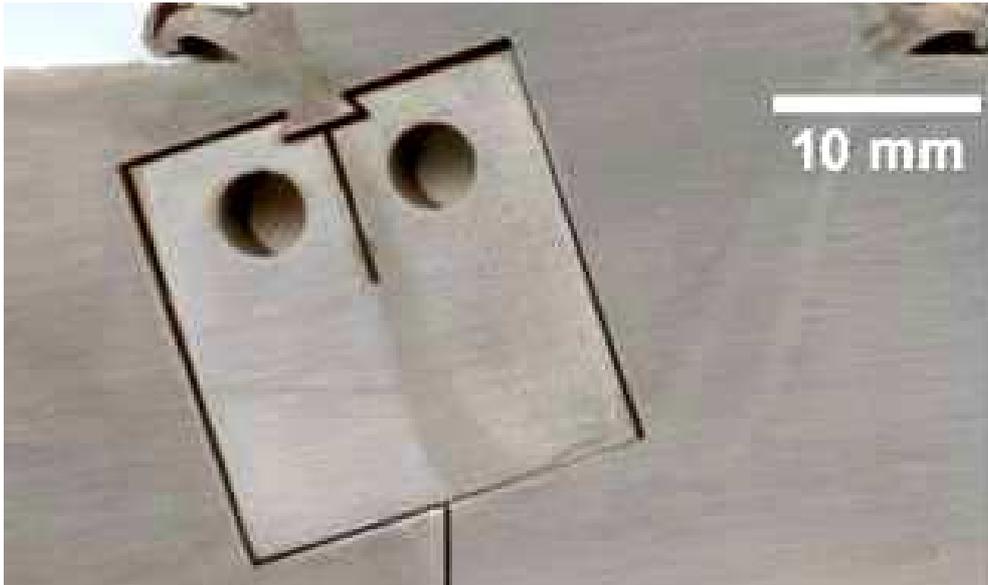


Figura 12: Imagem mostrando os locais onde foram realizados os perfis de microdureza.

### 3.5 ENSAIO DE CTOD

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma BS 7448-1, as pré-trincas de fadiga foram realizadas em máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 810 com uso do aplicativo *MTS Fracture Toughness Test Ware* com razão de fadiga (R) de 0,1. Para a realização dos cálculos de CTOD ( $\delta$ ) foram usados valores de tensão de escoamento de 390 MPa. O módulo de elasticidade considerado foi de 210 000 MPa.

Foram utilizados corpos de prova tipo compacto C(T) com aproximadamente 7mm de espessura e com entalhe posicionado na interface metal base/pino, como exemplificado na Figura 13. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente



**Figura 13: Local da retirada do Corpo-de-prova C(T) para ensaio CTOD.**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados, bem como as avaliações desses resultados na propriedade do reparo por FTPW. Os resultados serão apresentados na seguinte ordem: Análise macro e microestrutural, ensaio de microdureza e ensaio de CTOD para avaliação das propriedades mecânicas.

### 4.1 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

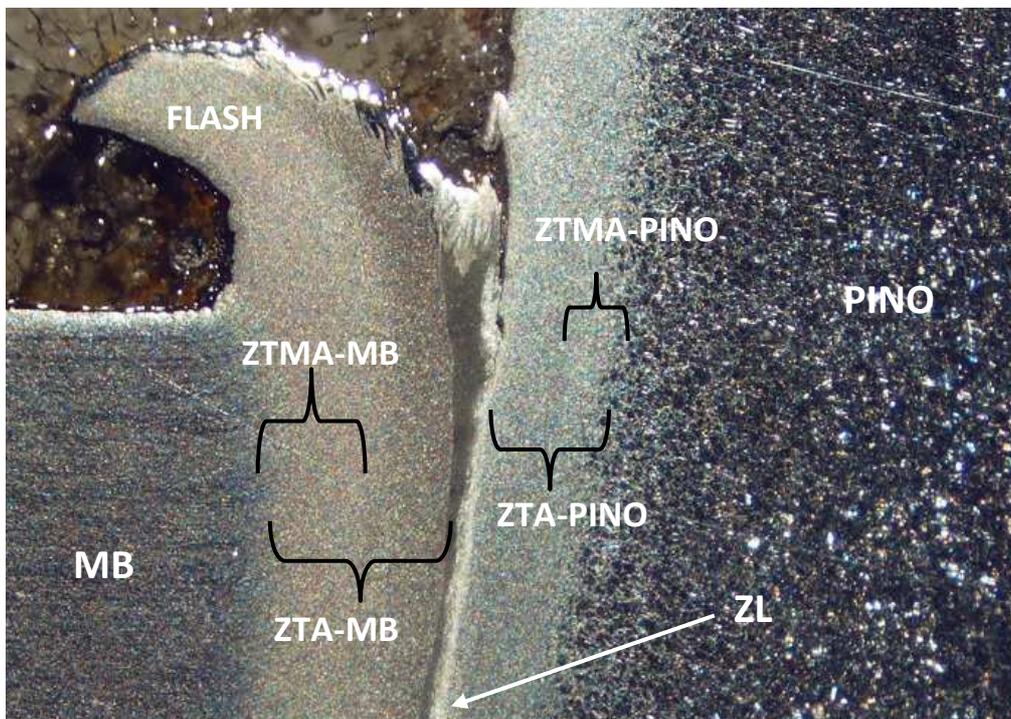
Através da análise macroscópica foi possível identificar todas as regiões da junta soldada: material de base (MB), zona termomecânicamente afetada (ZTMA), zona termicamente afetada (ZTA), zona de ligação (ZL) e o pino consumível (PINO).

Alem de identificar estas zonas, observou-se ainda a presença de uma descontinuidade no centro da região do pino, em um local onde existe uma concentração das linhas de fluxo do material (Figura 14).



**Figura 14: Macrografia da amostra. Mostrando a presença de uma descontinuidade na região central do pino.**

A Figura 15 apresenta uma imagem, em lupa de baixo aumento, da região onde ocorreu o atrito entre os dois materiais. Nela, é possível observar em maiores detalhes as zonas presentes na junta.



**Figura 15: Detalhe das regiões da solda. Foto em lupa digital de baixo aumento.**

## 4.2 ANÁLISE MICROGRAFICA

### 4.3.1 ANÁLISE DE INCLUSÕES

Como visto na Tabela 1, a composição química da chapa e do pino estão de acordo com o especificado para um aço BS EN10025 e um aço AISI 316L respectivamente.

Primeiramente o substrato foi analisado apenas na condição de polido, sem ataque químico, com o objetivo de avaliar o teor de inclusões no material. As inclusões observadas foram classificadas como sendo do tipo sulfeto de manganês, serie fina e grau 2 no material base e serie fina e grau 3 no material do pino. As Figura 16 e a Figura 17 apresentam micrografias, em 100x de aumento, obtidas no centro da chapa e do pino respectivamente.



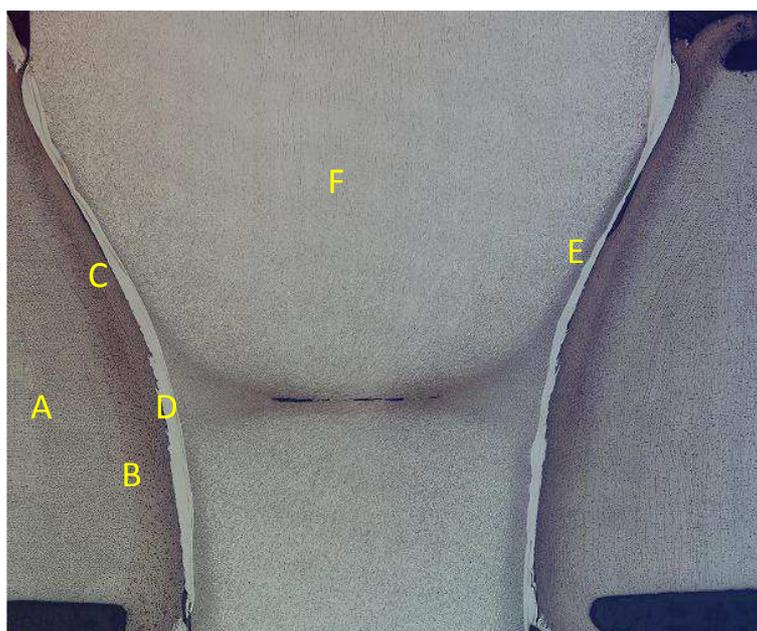
**Figura 16: Micrografias do Substrato, onde é possível observar inclusões de sulfeto de manganês. Sem ataque.**



**Figura 17: Micrografias do pino, onde é possível observar inclusões de sulfeto de manganês. Sem ataque.**

#### 4.3.2 ANALISE MICROESTRUTURAL

Embora no processo de reparo por fricção não ocorra o processo de fusão do material, ainda assim as temperaturas alcançadas são capazes de provocar transformações de fase nas regiões próximas a zona de ligação. Sendo assim, dependendo da taxa de resfriamento, diferentes microestruturas podem ser formadas ao longo da junta, resultando na geração de um gradiente de propriedades mecânicas.



**Figura 18: Imagem panorâmica da junta soldada mostrando as regiões: Metal de Base (Ponto A), ZTMA-MB ( Ponto B), ZTA-MB ( Ponto C), Zona de ligação (Ponto D), ZTMA/ZTMA- Pino (ponto E) e Pino (ponto F)**

A Figura 18 apresenta uma imagem panorâmica da junta, que foi utilizada para medir o tamanho da ZTA e da ZTMA com maior precisão. As medidas foram realizadas em uma região afastada do centro da amostra, obtendo-se as seguintes medidas:

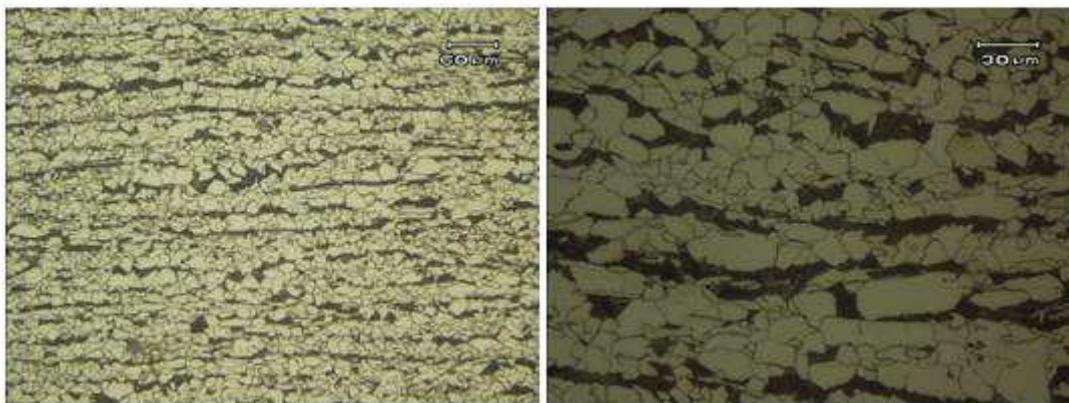
ZTMA-MB: 0,7mm

ZTA-MB: 1,3mm

ZTMA-PINO: 0,6mm

ZTA-PINO: 0,35mm

Através do ataque químico, com reagente Nital 2%, observou-se que metal base apresentou microestrutura bandada de perlita e ferrita, típica de uma aço BS EN10025 . A Figura 19 mostra metalografias, obtidas na região A, com aumento de 200 e 500x.



**Figura 19: Micrografia do metal de base. Ataque com Nital 2%.**

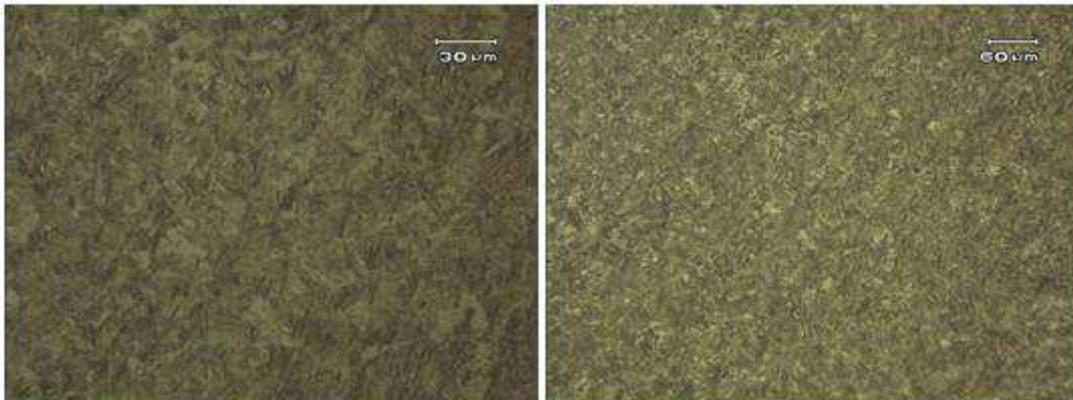
A Figura 20, obtida na região B, mostra a microestrutura da ZTMA do metal de base, onde se pode observar que a microestrutura nessa região é composta de ferrita e martensita.



**Figura 20: Micrografias da ZTMA-MB. Ataque Nital 2%**

**Figura**

A ZTA do material base (região C) apresentou microestrutura composta por fases de maior resistência mecânica, porém mais frágeis, como martensita e bainita, microestruturas, essas resultantes da alta taxa de extração de calor nesta região.



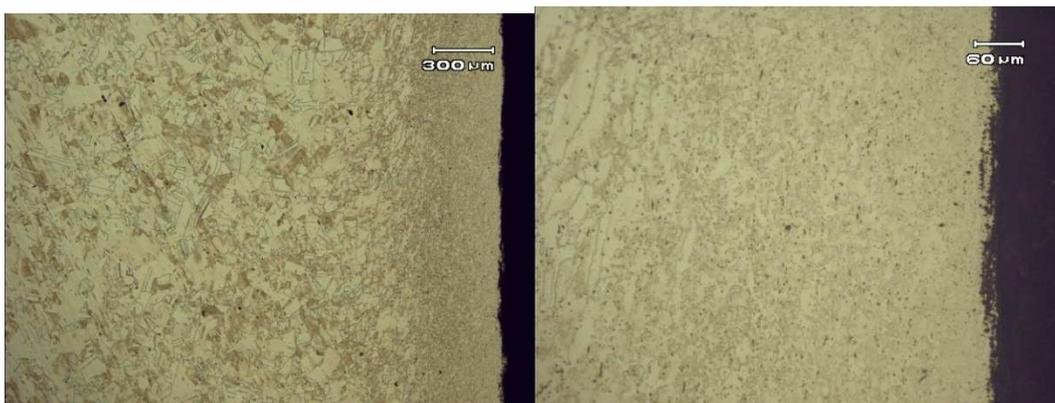
**Figura 21: Micrografias da ZTA-MB. Ataque Nital 2%**

A Figura 22 foi obtida na região D, e mostra uma micrografia da zona de ligação. Nela, é possível observar que ocorreu uma boa ligação metalúrgica entre o material base e o material do pino.

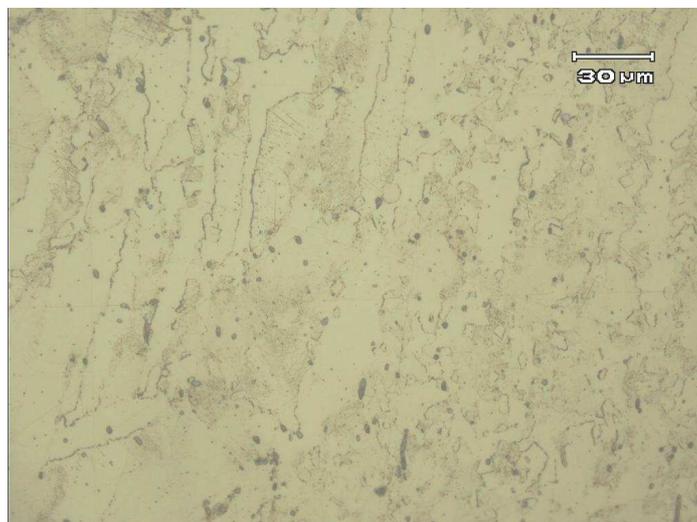


**Figura 22: Micrografia da Zona de Ligação, mostrando uma boa ligação metalúrgica. Ataque Nital 2%**

A ZTMA e ZTA do pino são mais estreitas do que as do material base, o que torna difícil a caracterização dessas regiões por microscopia ótica, sendo até mesmo difícil separá-las. São mostradas nas Figuras 23 e 24 as metalografias, da ZTA e ZTMA do pino, respectivamente. É possível observar que a microestrutura nesses locais é composta de grãos austeníticos (ZTA) e grãos austeníticos deformados (ZTMA), devido ao intenso trabalho mecânico. As micrografias foram obtidas na região E da Figura 18.



**Figura 23: Micrografias da ZTA-PINO. Ataque Ácido Oxálico.**



**Figura 24.:Micrografia da ZMTA-PINO. Ataque Ácido Oxálico**

O material do pino apresentou microestrutura austenítica típica de um aço SAE 316L. A Figura 25 apresenta metalografias obtidas no centro do pino, no local indicado pelo letra F na figura 18, com aumento de 200 e 500x.



**Figura 25: Micrografias da região central do pino. Ataque Ácido Oxálico**

Por fim, foi analisada a região central do pino, onde anteriormente havia se detectado a presença de uma descontinuidade. Utilizando maiores resoluções foi possível observar que a microestrutura naquele local apresentou-se bastante deformada, como pode ser visto na Figura 26.

Sabe-se que tanto a chapa quanto o pino sofrem uma redução nos valores de suas propriedades mecânicas devido a alta temperatura do processo de reparo. Porém, no aço carbono essa perda é mais significativa do que no aço inoxidável austenítico. Esse fenômeno explica o porquê do surgimento dessa descontinuidade, uma vez que não ocorreu um decréscimo tão grande da tensão de escoamento do pino, como na chapa, dificultando a deformação plástica do mesmo, e levando a formação de um trinca por cisalhamento.



**Figura 26: Micrografia mostrando a microestrutura na região da trinca. Ataque Ácido Oxálico.**

Depois de realizadas as metalografias a amostra foi submetida a um esforço de flexão para expor a superfície da trinca. Essa foi então levada ao MEV para uma melhor caracterização dessa região.

Como já era esperado, quando analisada no MEV, a superfície da trinca apresentou aspecto de fratura por cisalhamento, como pode ser visto na Figura 27.

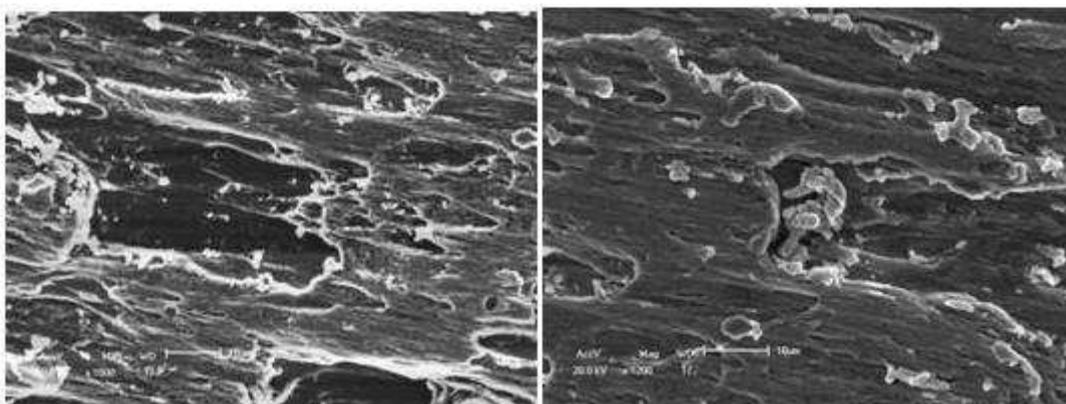


Figura 27: Fractografias em MEV da superfície da trinca.

#### 4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA

Foi possível observar através dos perfis de microdureza realizados na amostra, que há um aumento significativo de dureza quando alcança a ZTA, O gráfico contendo os resultados desse ensaio pode ser visto na Figura 28.

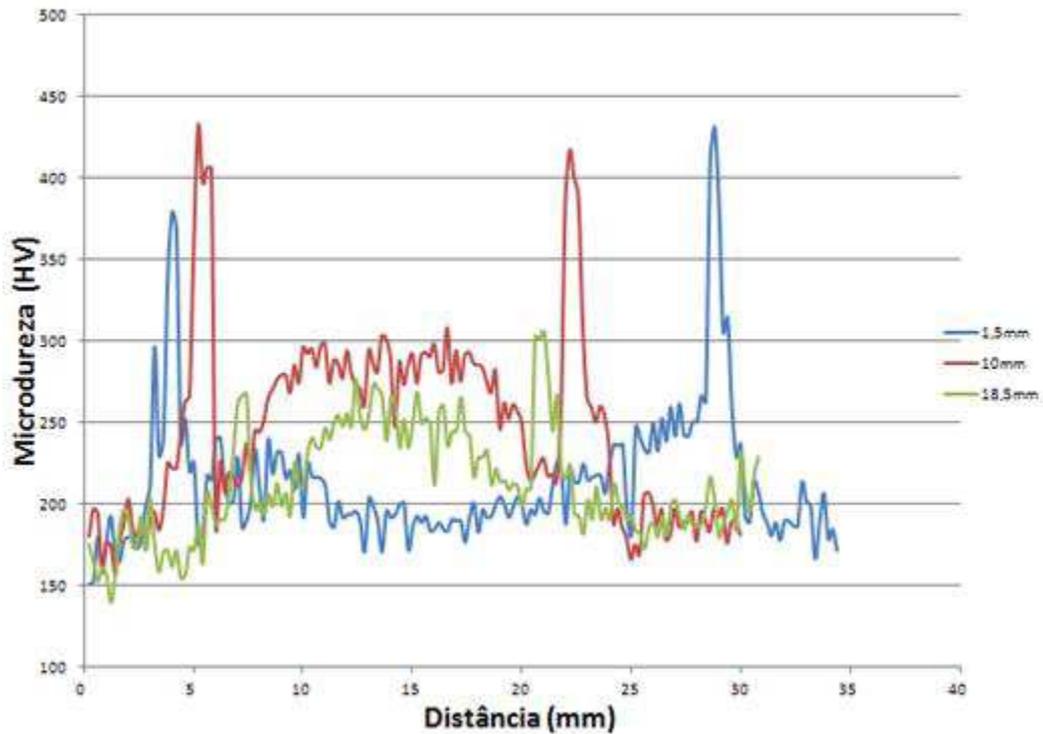


Figura 28: Perfis de microdureza da amostra.

A amostra apresentou uma dureza média de 170 HV na região do material de base, em seguida ocorre um pico de dureza na região da ZTA, devido a formação de fases de maiores dureza nessas regiões, como bainita e martensita.

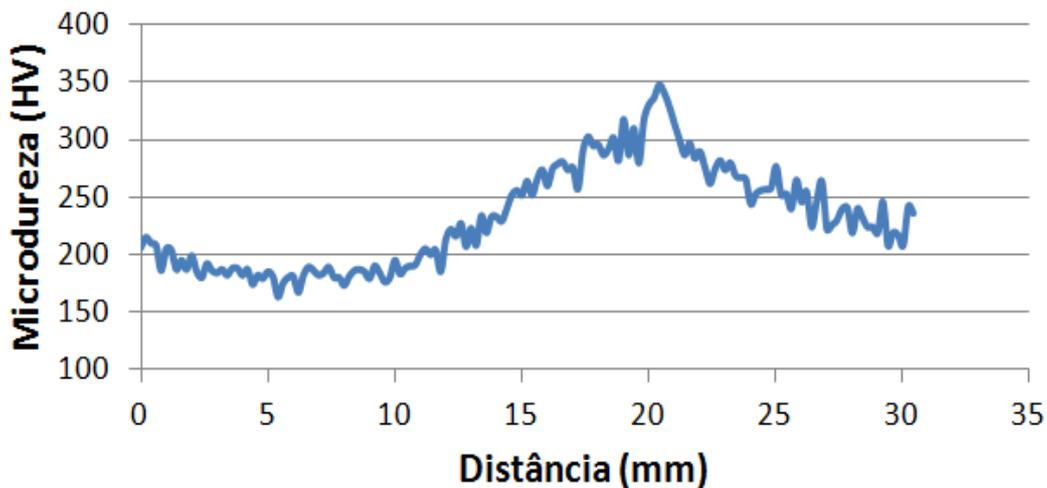


Figura 29: Perfil de microdureza vertical realizado na amostra.

Fig

O perfil vertical iniciou a 5mm da face superior da chapa, estendendo-se por 25mm. O objetivo desse ensaio, foi caracterizar as transformações ocorridas ao longo do

pino de aço inoxidável nos pontos mais afastados das faces que foram atritadas. Observou-se que ocorreu um decréscimo de dureza após atingir seu ponto Máximo.

#### 4.5 ENSAIO DE CTOD

O monitoramento do ensaio de CTOD da amostra permitiu a construção do gráfico mostrado na Figura 30, onde é possível ver a variação da abertura da boca do entalhe pela carga aplicada.



Figura 30: Curva obtida a partir do ensaio de CTOD

Através do gráfico acima foi possível obter todos os valores necessários a serem empregados na equação 3.1. A tabela 2, mostra os esses valores, bem como os já pré-determinados Para os valores de resistência ao escoamento e modulo de elasticidade foram utilizados os dados referentes ao material da chapa.

Tabela 2: Parametros utilizados no ensaio de CTOD

Pm (N)	Vp (mm)	B (mm)	W (mm)	Ao (mm)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	E (MPa)	V	Y	K (N/mm <sup>3/2</sup> )
6225,4	0,346	7,04	14,04	7,41	390	210000	0,3	10,54	2486,5

Por fim, determinou-se que a junta soldada apresentou valor de tenacidade a fratura de  $\delta=0,135$ .

Confrontando o valor obtido no ensaio de CTOD com a norma interna utilizada pela Petrobras (19), para a classificação e seleção de aços para estruturas oceânicas, foi possível perceber que o valor está abaixo do mínimo exigido, uma vez que uma junta soldada com essa espessura e nessa condição deve apresentar um valor de tenacidade a fratura de  $\delta>0,25$ . O resultado do ensaio pode ser explicado devido ao alto teor de inclusões encontrado no material do pino, o que diminui a tenacidade a fratura da junta, uma vez que estas inclusões alongadas são concentradores de tensão e favorecem a formação de trincas.

## 5. CONCLUSÕES

O chapa (substrato) e o pino consumível apresentaram composição química similar a um aço BS EN1400 e AISI 316L respectivamente.

A junta soldada apresentou microestrutura refinada composta de ferrita e martensita na ZTMA do material base e ferrita, bainita e martensita na ZTA. Observou-se na ZTMA do pino microestrutura composta por grãos deformados de austenita, devido a alta deformação plástica naquela região.

A zona de ligação evidenciou que houve uma boa ligação metalúrgica entre a chapa e o pino. Não sendo evidenciados problemas como falta de adesão ou microtrincas.

Observou-se a presença de uma descontinuidade no centro do pino, proveniente do fato de o aço inoxidável não apresentar um decréscimo tão significativo nas suas propriedades mecânicas, quanto o aço carbono, em altas temperaturas. Esse fato dificultou a deformação plástica do material do pino e resultou no surgimento de uma trinca por cisalhamento naquela região.

A amostra apresentou valores de dureza maior na quando atinge a ZTA do material base, isso se deve a formação de fases de maior dureza naquela região, como bainita e martensita.

A junta soldada apresentou valor de tenacidade a fratura  $\delta=0,135$ . Valor este que está, por exemplo, abaixo do que a Petrobras exige para uma junta soldada nessas condições. Esse valor pode ser explicado pelo alto teor de inclusões encontrado no material do pino, o que diminui drasticamente a tenacidade a fratura, uma vez que inclusões alongadas são concentradores de tensão e produzem caminhos preferenciais para a propagação de trincas.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar os parâmetros de soldagem, como força axial, força de forjamento e tempo de soldagem.
- Realizar reparos utilizando pré e pós-aquecimento.
- Estudar a utilização de tratamento térmico de alívio de tensões após soldagem.
- Realizar reparos com pinos de aço inoxidáveis em substratos de aços inoxidáveis.
- Estudos de solda FTPW para realizar “costuras” por fricção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [www.ebah.com.br/content/ABAAA2zUAE/tecnologia-soldagem-por-friccao](http://www.ebah.com.br/content/ABAAA2zUAE/tecnologia-soldagem-por-friccao), acessado em 20 de Outubro de 2011.
2. AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS: Welding Handbook. Vol. 2, 8th Ed, Miami, 1991.
3. WAINER, E.; BRANDI, S. D. ; MELLO, F. D. H. de ; Soldagem - Processos e Metalurgia . São Paulo , Edgard Blücher, 1992.
4. WICHELHAUS, G. "Berechnung der Stoßflächentemperatur beim Reibschweißen". In Schweißen und Schneiden, 27 (1), p.9-10, 1975.
5. CROSSLAND, B. "Friction Welding: Recommended Practices for Friction Welding". In: Contemporary Physics, 12(6), p.559-574, 1971.
6. MEYER, A. Friction Hydro Pillar Processing. Dr.Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2002.
7. LEBEDEV, V. K.; CHERNENKO, I. A. Friction Welding. Vol. 4, p.59-168, 1992.
8. ELLIS C. R. G. Continuous Drive Friction Welding of Mil Steel. Welding Journal, p.183-197, April 1972.
9. PINHEIROS, G. A.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MEYER, A.; DOS SANTOS, J.F.; BLAKEMORE, G. R. Costura por Atrito: Fundamentos e Aplicações. 1º Cobef. Abril, 2001.
10. NICHOLAS, E. D. Underwater Friction Welding for Electrical Coupling of Sacrificial Anodes. In: 16th Annual OTC. Houston, Texas, May 7-9, 1984.
11. BRACARENSE, A. Q. Processo de Soldagem por Fricção. S.1.: Universidade Federal de Minas Gerais
12. AMBROZIAK, A.; GUL, B.; Investigations of underwater FHPP for welding Steel overlap joints, ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING. Vol. VII. 2007.

13. PIRES, R. R., Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.
14. THOMAS, W.; NICHOLAS, D. "Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)". TWI Connect. June, 1992.
15. SOUZA, R.B: Desenvolvimento, Projeto E Construção De Um Equipamento De Reparo De Trincas Por Atrito; Universidade Federal de Minas Gerias - 2006
16. STROHAECKER, T.R.: Mecânica da Fratura
17. GUIMARÃES ,V.A., L.R.O. Hein, J Zangradi Filho: Sistemas de Baixo custo para nucleação de pré trincas por fadiga em corpos de prova de tenacidade a fratura. Materials Research, Vol 4, No 3, 205-209,2001
18. FORTES, C: Mecânica da Fratura – ESAB,2003
19. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, E 1290 – 93, Standard Test Methods for Crack-Tip Opening Displacement(CTOD) Fracture Toughness Measurement, Philadelphia,10 p., 1995
20. PETROBRAS N-1678 REV. F 10/2008