

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO RADIAL EM
TUBOS BIMETÁLICOS CLADADOS MECANICAMENTE

SAMANTA BIANCHI VEARICK

PORTO ALEGRE, MARÇO DE 2003.

RESUMO

O trabalho pretende caracterizar a soldagem por fricção radial feita em tubos bimetálicos, com diferentes tempos de fricção, utilizados on-shore e off-shore. Os materiais utilizados são:

- Tubo interno: inconel 825 ou aço inox superaustenítico-4529.
- Anel de soldagem: aço inox duplex-4462, inconel 825 ou aço inox superaustenítico-4529.
- Tubo externo: aço carbono API 5L-X65.

A primeira etapa do trabalho foi realizar a caracterização mecânica dos materiais através de ensaios de dureza, microtração e análise química. Posteriormente a análise microestrutural foi realizada, através de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

O trabalho não descreve o processo da soldagem, apenas fornece os parâmetros utilizados e se detém na caracterização da soldagem realizada.

A amostra CB3 foi à única que não apresentou queda de dureza na ZTA, pois não houve mudança de microestrutura do tubo externo. Enquanto os demais materiais apresentaram variação microestrutural desde estrutura predominantemente ferrítica, até uma estrutura martensítica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Jorge dos Santos pela oportunidade de realizar este trabalho no GKSS – Alemanha. Ao Dr. Celso Ribeiro pela amizade e co-orientação.

Ao meu orientador no Brasil Prof. Dr. Afonso Reguly e aos meus amigos e colegas Fabrício Pinheiro dos Santos e Leandro Bettoni Ortega por toda dedicação.

Ao Prof. Dr. Antonio Vilela pela compreensão e boa vontade de me ajudar para conclusão e apresentação desse trabalho.

E também a minha família por todo o apoio e compreensão.

Enfim a todas aquelas pessoas que torceram para que eu passasse por mais essa etapa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVO	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM	8
3.1.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO RADIAL	9
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	10
3.2.1 TUBOS BIMETÁLICOS	10
3.2.2 TUBULAÇÕES BUTTING BIMETÁLICAS (BUBI)	11
3.2.3 AÇOS PARA TUBULAÇÕES DE OLEODUTO	12
3.3 AÇO INOX	13
3.3.1 AÇO INOX DUPLEX	13
3.3.2 AÇO INOX SUPER AUSTENÍTICO	15
3.4 LIGAS DE NIQUEL	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL	16
4.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM	17
4.3 MATERIAL UTILIZADO	18
4.4 ENSAIO METALOGRÁFICO	19
4.5 ENSAIO DE DUREZA	19
4.6 ANÁLISE QUÍMICA	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5.1 ANÁLISE QUÍMICA	24
5.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA	25
5.2.1 ANÁLISE DA ZTA	25
5.3 ANÁLISE DOS TUBOS E ANEIS	29
5.4 ENSAIO DE DUREZA	31
6. CONCLUSÕES	36
7. BIBLIOGRAFIA	37
8. TRABALHOS FUTUROS	39

1. INTRODUÇÃO

Nos primórdios da produção de óleo e gás as primeiras linhas de fluxo eram inteiramente produzidas de aço carbono. Essa escolha foi bem sucedida, devido ao óleo ter a tendência de formar um filme protetor sobre a superfície do aço inibindo assim a corrosão. Em termos gerais, havia uma tendência dos poços de óleo não serem altamente corrosivos, pelo menos inicialmente. Com o passar do tempo, os poços começaram a apresentar um acréscimo na quantidade de água e assim, gradualmente o filme protetor que o óleo formava na superfície do aço começou a ser cada vez menos eficiente.

Durante a produção de gás, ao contrário do óleo, não se tem a formação do filme protetor. Como o gás é produzido em poço, ele é resfriado desde a temperatura no fundo do poço até a temperatura da superfície, o que é acompanhado de uma condensação de água proveniente do gás na forma de vapor. Essa água condensada contém gases ácidos dissolvidos, CO_2 e H_2S . O pH resultante dessa água condensada está entre 3,5 e 4,2, assim a taxa de corrosão pode ser extremamente alta, chegando a ser da ordem de milímetros por ano.

Para controlar a corrosão, começou-se a adicionar inibidores químicos nos poços. Mas havia alguns fatores a serem considerados, são eles:

- O projeto do poço ser inadequado à injeção do inibidor.
- Taxas de corrosão serem suficientemente altas, mesmo com injeção de inibidores.
- O custo acumulativo da aquisição do inibidor, começar a ficar excessiva ano após ano.
- A segurança solicitada no sistema de injeção do inibidor, nem sempre está garantida.

- Os órgãos ambientais tornaram-se mais exigentes.

Uma solução para esses problemas é a utilização de ligas resistentes a corrosão (LRC) como linhas de fluxo, isso começou na década de 70.

No período de 1975 a 1980, NAM, uma companhia Holandesa, foi a pioneira no uso de LRC como linhas de fluxo. Nesse período, sete linhas de fluxo internamente cladadas com aço inox AISI 316L (comprimento total 7,7Km) e quatro linhas de aço inox duplex (comprimento total 13,3Km) foram instaladas, duas das linhas duplex fizeram parte das primeiras linhas de fluxo LRC de um off-shore.

A NAM tornou-se a maior produtora de gás, mas também se familiarizou com os problemas de corrosão causados pelo CO₂, o qual era produzido com o metano. Apesar do aço inox austenítico, seja este o 304L ou 316L, apresentar ótima resistência à corrosão, não apresentava resistência à altas pressões, devido ao seu baixo limite de escoamento (160-180MPa). Entretanto, usando o aço inox austenítico como um clad e um aço muito mais forte como revestimento protetor (X52 com limite de escoamento de 360MPa) obteve-se uma redução da espessura do tubo de praticamente 50%. Além de diminuição do peso, do tempo de solda e do custo do material.

Assim começou a utilização, entre outros, de tubos bimetálicos como meio de transporte na indústria.

A união desses tubos até então é feita com soldagem TIG como passe de raiz e soldagem MIG como preenchimento. O processo de soldagem por fricção radial já foi aplicado com sucesso em tubos de titânio usados em poços de produção de petróleo(1). Este trabalho irá abordar a caracterização da soldagem por fricção radial feita com diferentes tempos de fricção. Os materiais utilizados são tubos bimetálicos, usados, por exemplo, em oleodutos, onde o tubo externo é de aço carbono e o tubo interno de material com maior resistência à corrosão. A união desses materiais pelo processo de fricção radial ainda é uma incógnita, a qual esse trabalho ajudará a caracterizar.

2. OBJETIVO

Estudar-se-á a viabilidade do uso do processo de soldagem por fricção radial para união de tubos cladados mecanicamente. Esse é um projeto da União Européia, realizado em empresas - centros de pesquisa, onde cada qual é responsável por uma parte distinta do projeto. Este trabalho é uma dessas partes realizadas no GKSS-Centro de Pesquisa Alemão, que tem como objetivo avaliar por meio de microtração, dureza e micrografia da solda realizada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Há basicamente três grupos de processo de solda. São eles:

- 1) Soldagem por fusão
- 2) Soldagem por fluxo
- 3) Soldagem de fase-sólida (2)

O presente trabalho se deterá apenas ao grupo 3, já que nele está classificada a soldagem por fricção, assunto deste capítulo.

Soldagem de fase-sólida: aplica-se uma pressão suficiente para que o material deforme plasticamente e solde, sem que haja fusão do material.(2)

A soldagem por fricção é um processo de união no estado sólido, no qual a coalescência entre as peças metálicas é obtida por aquecimento através do atrito.

O processo é descrito abaixo e mostrado na figura 1.

(A) Disposição inicial das peças a serem soldadas, peça a direita parada e a esquerda com velocidade constante.

(B) Contato inicial entre as peças, através de forças aplicadas no sentido axial. Este contato gera calor aquecendo as superfícies devido ao atrito.

(C) Deformação plástica devido ao aumento da força axial e do aquecimento.

(D) Caldeamento e forjamento da junta soldada. (11)

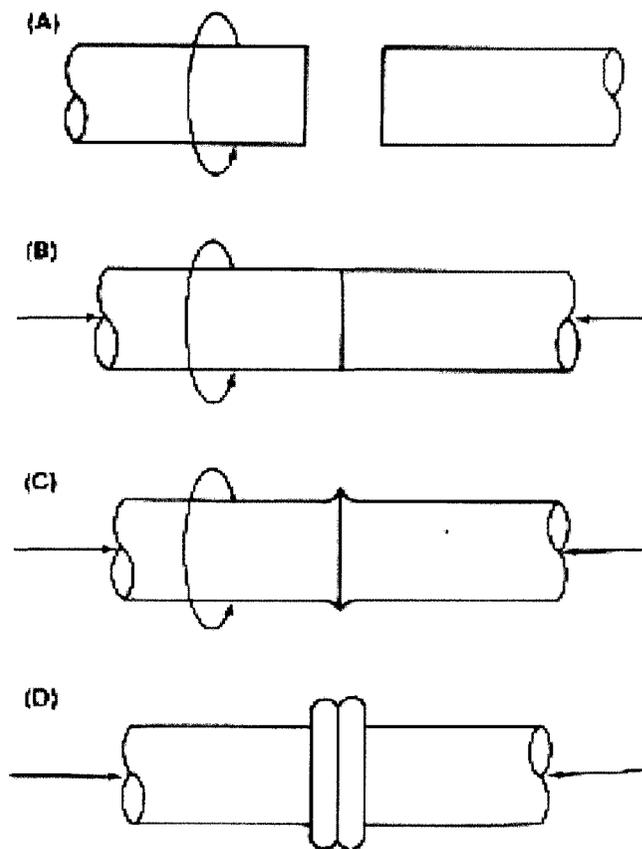


Figura 1: Desenho esquemático do processo de soldagem por fricção

3.1.1 SOLDAGEM POR FRICÇÃO RADIAL

A soldagem por fricção radial é uma versão modificada do processo de soldagem por fricção, foi desenvolvido em um Instituto de Soldagem (TWI) em Cambridge, Inglaterra, para a soldagem de tubulações.(3)

O princípio de funcionamento é rotacionar e comprimir um anel sólido sobre dois tubos estacionários, produzindo uma junção no estado sólido. Dentro dos tubos coloca-se um mandril com o intuito de evitar a formação de rebarba. (4)

O material do mandril deve apresentar resistência a altas temperaturas e elevados esforços mecânicos causados pelo processo radial. O material geralmente utilizado é aço ferramenta para trabalho à quente ou ligas de níquel de alta resistência.(3)

Tanto os tubos quanto o anel são chanfrados, sendo que o ângulo do chanfro dos tubos é maior que o do anel, assim o aquecimento começará na raiz da área chanfrada e o material fluirá para fora do diâmetro externo. Assim como as impurezas serão impelidas para a parte oposta e superior a raiz da solda, de modo que, essa superfície externa pode ser usinada após a soldagem eliminando a quantidade de material extra e também a maioria das impurezas.(5)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

3.2.1 TUBOS BIMETÁLICOS

Geralmente, o tubo externo de aço carbono tem a função de controlar a pressão interna, enquanto o tubo interno é utilizado para proteção a corrosão. O método convencional para a produção de tubos cladados é o uso de roll-bonded plates, onde duas camadas metálicas são metalurgicamente unidas por difusão térmica.(14)

3.2.1.1 TUBO INTERNO

É um tubo metálico ou não metálico o qual é instalado dentro de um outro tubo com o objetivo de reparar, melhorar ou proteger o tubo externo do material que circula pelo duto.(6)

Este tubo é utilizado no interior de uma tubulação com o objetivo de aumentar a vida útil dessa tubulação. Além de manter a resistência externa ao impacto, agora o material apresentará maior resistência à corrosão devido à presença do tubo interno.(7)

3.2.2 TUBULAÇÕES BUTTING BIMETÁLICAS (BUBI)

Tubulações BUBI são tubos mecanicamente unidos. Essa união geralmente é feita da mesma maneira que os tubos metalurgicamente cladados, isto é, por soldagem circular. Para esse tipo de soldagem, os procedimentos existentes relacionados à preparação das arestas paralelas e soldas com passes transversais, evitam a diluição do ferro na raiz da solda, se seguir os seguintes passos.

A seguir duas opções que mostram a eficácia das tubulações BUBI:

1. Geralmente, as tubulações BUBI têm a extremidade final do tubo fixa. O espaço entre o tubo externo e interno é preenchido por uma ou duas camadas de solda estanque, utilizando aço inoxidável como material de preenchimento. Assim, fica impedida a entrada de qualquer sujeira ou umidade. Além disso, as extremidades do tubo são chanfradas de acordo com a norma DIN ou ANSI para mais tarde serem soldados circunferencialmente.

2. Normalmente, para a soldagem desses tubos a junta precisa ser especialmente preparada, no entanto o processo desenvolvido pela companhia Butting utiliza uma peça de transição final a qual impede dificuldades durante a soldagem circular que podem ocorrer no local.

A Butting começou a soldar as extremidades dos tubos com anéis de aproximadamente 100-200mm de comprimento. Esses anéis, os quais são feitos de materiais que apresentam resistência à corrosão e resistência mecânica, não apenas satisfazem as solicitações mínimas de resistência para aço doce como tubo externo, como também cumpre com a necessidade de apresentar resistência à corrosão em relação ao aço inoxidável do tubo interno.

De acordo com ANSI, os tubos podem apresentar diâmetro externo de 114,3mm (4") até 609,6mm(24"). Essa espessura vai depender das solicitações do projeto em relação à resistência à corrosão e pressão. Para garantir a eficácia da soldagem,

uma espessura mínima de 2,5mm para o tubo interno é recomendada. Já a espessura do aço carbono do tubo interno deve ser calculada de maneira que satisfaça as condições de pressão do sistema.

No entanto, existem capacidades de produção, tubos com comprimento de até 12m não precisam ser soldados circunferencialmente, ao contrário de tubos com comprimentos maiores a 12m.(12)

3.2.3 AÇOS PARA TUBULAÇÕES DE OLEODUTO:

Aço para tubulação de oleodutos inclui tanto aço carbono como aços de alta resistência e baixa liga (HSLA). Esses aços devem apresentar um certo nível de limite de escoamento.

Os aços do tubo externo seguem o limite de escoamento do Instituto Americano de Petróleo (API), desde o tipo A (207 MPa ou 30 Ksi) até API 5L-X80 (522MPa ou 80Ksi).

Geralmente, as especificações API 5L, são aços com limite de escoamento acima de 359MPa (52Ksi) são microligados e processados com laminação controlada para alcançar propriedades de resistência e tenacidade desejada.

A espessura da parede está baseada na pressão da linha e a tensão circunferencial resultante.

Os aços carbono utilizados contêm baixos a médio teor de carbono e limite de escoamento de 207 a 358MPa (30 a 52 Ksi).

Os aços alto carbono, baixa liga estão sendo utilizados, devido ao aumento de produtividade, onde as empresas de petróleo e gás natural requerem tubos de maiores diâmetros e com maiores níveis de pressão. (8)

3.3 AÇO INOX

São ligas a base de ferro que contém no mínimo 11% de Cr, essa é a quantidade necessária para evitar a oxidação em atmosferas não poluídas (por isso a designação inoxidável), não mais que 1,5% de C e mais ferro que qualquer outro elemento individual.

Conseguem suas características inoxidáveis pela formação na superfície de um filme aderente de óxido rico em cromo.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco famílias, baseado em microestrutura e propriedades(13):

- 1) Aço inoxidável martensítico
- 2) Aço inoxidável ferrítico
- 3) Aço inoxidável austenítico
- 4) Aço inoxidável endurecível por precipitação (PH)
- 5) Aço inoxidável duplex ferrítico-austenítico

Este trabalho se deterá nas famílias 3 e 5.

3.3.1 AÇO INOX DUPLEX

O aço inox duplex é formado de duas fases, ferrítica-austenítica baseadas no sistema ferro-cromo-níquel. São caracterizados por apresentarem baixo carbono (<0,03% em peso) e adição de molibdênio, nitrogênio, tungstênio e cobre. Também possui cromo e níquel, 20 a 30% de Cr e 5 a 10% de Ni.

O aço 1.4462(UNS S 31803) é conhecido por sua elevada resistência à corrosão e trincamento, atribuível à corrosão sob tensão.

Esse aço pode ser conformado tanto à frio quanto à quente. Quando conformado à frio sua recuperação elástica é alta, um comportamento indesejável. Já a conformação à quente ser feita entre 1100 e 1000°C após o processo é recomendável um resfriamento rápido.

Esse aço pode apresentar um raio de curvatura de até duas vezes a espessura da chapa a 180°C sem apresentar trincas.

Devido à alta quantidade de ferrita, aproximadamente 50%, esse aço apresenta uma baixa resistência à fluência para temperaturas maiores que 800°C.

Em relação à soldagem:

Do ponto de vista da soldagem, o aço 1.4462 apresenta as melhores propriedades mecânicas e de corrosão, se a proporção ferrita-austenita estiver entre 0,4-0,6.

As condições estruturais da junta dependem principalmente de três fatores:

- Composição química do metal da solda
- Taxa de resfriamento após a soldagem
- Tratamento térmico após a soldagem

O diagrama de fase mostra que com o aumento da quantidade de níquel haverá aumento do campo austenítico. Porém, a adição elevada de níquel é limitada:

Por um lado, o aumento não deve ser demasiadamente alto, de modo que a ferrita no estado de equilíbrio não seja demasiadamente baixa, inferior a 30%, por outro lado esse efeito dependerá da proporção da mistura. (9)(15)(17)

3.3.2 AÇO INOX SUPER AUSTENITICO

Um aço inox super austenítico é uma classe especial do aço inox austenítico, contendo níveis mais altos de Ni, Mo e em alguns casos nitrogênio. Essa liga é usada em ambientes altamente corrosivos. Apresentam melhor resistência ao trincamento atribuível à corrosão sob tensão, devido ao alto teor de Ni, pite e corrosão por fresta, devido ao Mo e N. No geral, essa liga tem composição balanceada para assegurar uma microestrutura completamente austenítica.(9).

3.4 LIGAS DE NIQUEL

A série da liga Fe-Ni-Cr foi desenvolvida no início dos anos 50 e usada no período da guerra da Coreia.

Esta série também apresenta grande uso em ambientes petroquímicos de alta temperatura.

Uma das ligas de importância comercial é a Inconel 825 (Fe-42Ni-21,5Cr-2Cu):

Estabilizada com adição de Ti (0,6-1,2%), também contém Mo (3%) para a resistência à corrosão por pites em meio aquoso e o Cu concede resistência ao ácido sulfúrico.

Usado em processos químicos, equipamentos de controle de poluição, tubulações para gás e óleo, reprocessamento de combustível nuclear, produção de ácidos e equipamentos de decapagem.(10)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

Com o intuito de se ter uma visão geral das etapas do trabalho e facilitar o entendimento do procedimento experimental adotado, é proposto na figura 2 o diagrama da seqüência experimental. O detalhamento de cada bloco é apresentado nos capítulos seguintes.

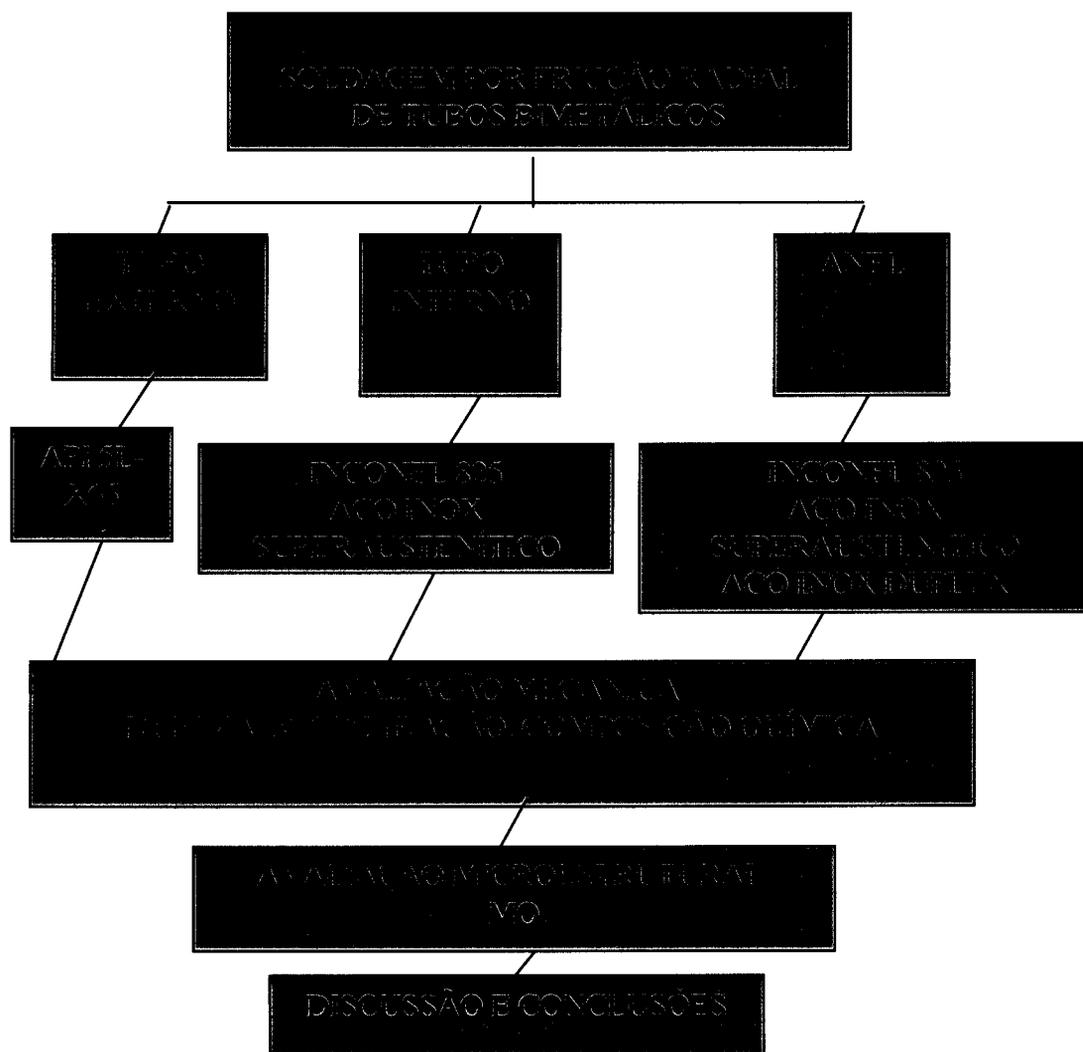


Figura 2: Diagrama esquemático do procedimento experimental utilizado nesse estudo.

4.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo SFR foi aplicado em tubos bimetálicos. Todas as amostras soldadas foram produzidas pela empresa Stolt Comex Seaway Ltd. na unidade de Aberdeen na Escócia, usando o equipamento Metalock RFW - Machine 01, com a capacidade de produzir soldas em tubos de 6 à 12 polegadas de diâmetro externo. O suporte interno para a raiz da junta soldada foi feito por um mandril dotado de espaçadores controlados por um sistema hidráulico, a fim de acomodar as dimensões do tubo. A figura 3 apresenta uma visão geral do equipamento. O equipamento de soldagem foi conectado a um sistema de monitoramento dos parâmetros de soldagem baseado em um microcomputador para aquisição, monitoramento e processamento dos parâmetros durante o procedimento de soldagem. Na figura 4 é apresentado um desenho esquemático do processo de fricção radial.

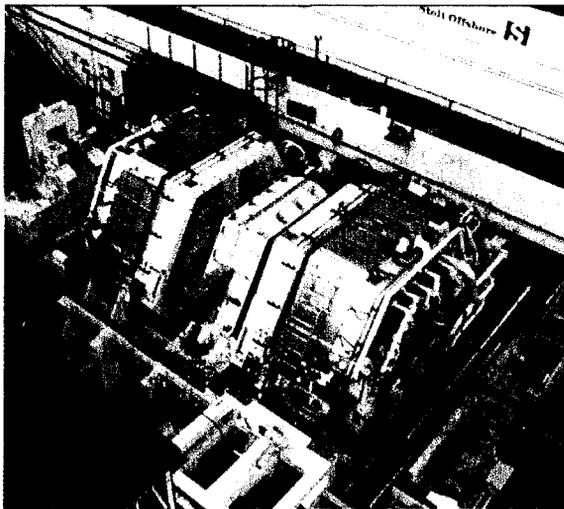
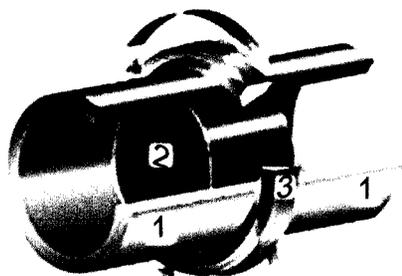


Figura 3: Equipamento de soldagem por fricção radial



- 1 - Tubo
- 2 - Mandril
- 3 - Anel Consumível

Figura 4: Esquema do processo de fricção radial

4.3 MATERIAL UTILIZADO

As amostras utilizadas foram classificadas conforme a nomenclatura apresentada na tabela 1:

Tabela 1: Esquema do material das amostras utilizadas.

AMOSTRAS	TUBO EXTERNO	TUBO INTERNO	SOLDAGEM ENTRE O TUBO INTERNO E EXTERNO	ANEL
CB01	Aço carbono API 5L-X65	Inconel 825	Sem soldagem	Inconel 825
CB02	Aço carbono API 5L-X65	Inconel 825	TIG	AISI duplex-4462
CB03	Aço carbono API 5L-X65	Inconel 825	TIG	Inconel 825
CB05	Aço carbono API 5L-X65	Superaustenítico-4529	MIG	Superaustenítico-4529

:

4.4 ENSAIO METALOGRÁFICO

As amostras foram lixadas em uma seqüência granulométrica de 80 até 1200 mesh. Após as amostras foram polidas em pasta de diamante de granulometria de 4 μ m e 1 μ m. Todo esse preparo foi realizado em um equipamento da marca Struers modelo DP-10.

O ataque químico foi feito primeiramente no tubo externo de todas as amostras com o reagente Nital 3% por três segundos, para que fosse possível ver microestrutura e a zona termicamente afetada (ZTA). As imagens microestruturais foram adquiridas em um microscópio ótico Olympus BX60M e a ZTA via lupa Zeiss Stemi SV11. Os tubos internos e os anéis foram imersos por trinta segundos no reagente Kalling's 2, aquecido a 80°C.(16)

4.5 ENSAIO DE DUREZA

Perfis de microdureza Vickers foram levantados em seções transversais das juntas soldadas para todas as condições de soldagem experimentadas. A norma ASTM E 384 – 99 foi utilizada como referência para preparação, indentação e avaliação dos resultados do ensaio. Os valores de microdureza foram tomados em três linhas paralelas à superfície das juntas soldadas.

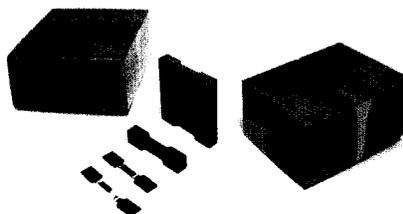
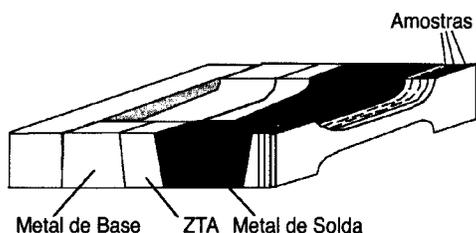
Uma carga de 500p (4,9 N) foi aplicada durante um período de 10s com uma distância entre indentações de 0,5 mm. Cada superfície a ser testada foi preparada segundo o procedimento metalográfico ASTM E 3 – 95. As amostras foram, posteriormente à realização do ensaio, atacadas quimicamente a fim de possibilitar a correta identificação das diferentes zonas da junta soldada. O ensaio foi realizado em um microdurômetro Shimadzu (HMV 2000) com controle automático da indentação e movimentação da mesa e suporte da amostra com as diagonais das indentações sendo medidas com o auxílio do programa Duramin.

4.7 ENSAIO DE MICROTRAÇÃO

A utilização do ensaio de tração em juntas soldadas permite apenas uma avaliação global das propriedades de tração da junta. Dessa forma, a influência das transformações metalúrgicas, nas propriedades mecânicas locais da junta soldada não pode ser por esse teste avaliada.

Assim, para determinar as propriedades locais de tração de cada região da junta soldada utilizou-se o ensaio de microtração. Esse consiste de um método patenteado pelo centro de pesquisas GKSS da Alemanha, onde se tem pequenas amostras de seção retangular fatiadas, por eletroerosão, de um bloco retirado da direção transversal da junta soldada. A Figura 5 ilustra como as amostras são retiradas a partir da junta soldada.

Por outro lado, uma vez que os resultados do ensaio de Microtração são obtidos a partir de corpos-de-prova não padronizados, a avaliação dos resultados pode somente ser utilizada para se obter ou estimar as propriedades de tração ao longo da junta soldada. Nenhuma comparação direta pode ser feita com ensaios de tração convencionais.



a) Eletroerosão das amostras

b) Bloco contendo a junta soldada

Figura 5: Esquema da extração de amostras para o ensaio de microtração.

A preparação das amostras é conduzida basicamente em dois estágios. Primeiro pela extração de um bloco contendo a junta soldada no meio -Figura 5 b e posteriormente pela extração das amostras na direção transversal à direção da solda, Figura 5 a. A extração das amostras é feita com a utilização de um processo de eletroerosão a partir de um fio de cobre de 0,1 mm de diâmetro, sendo todo o processo automático auxiliado por um controlador CNC. As dimensões finais dos corpos-de-prova são apresentadas na Figura 6.

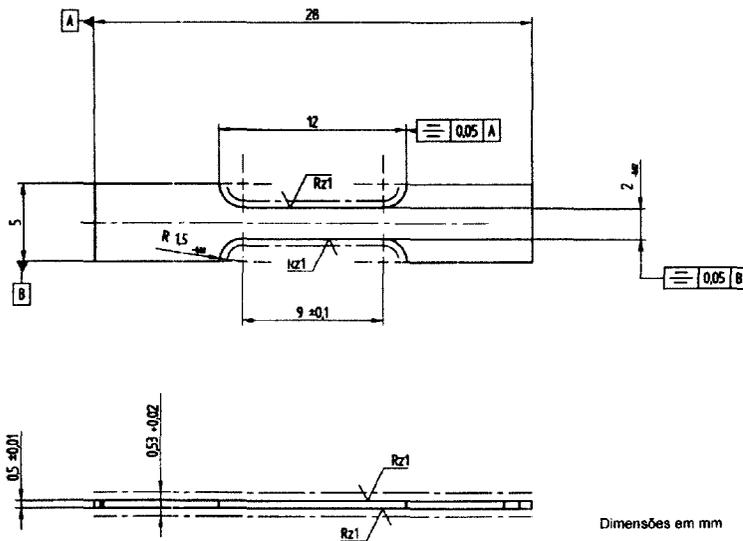


Figura 6: Dimensões do corpo-de-prova utilizado no ensaio de microtração.

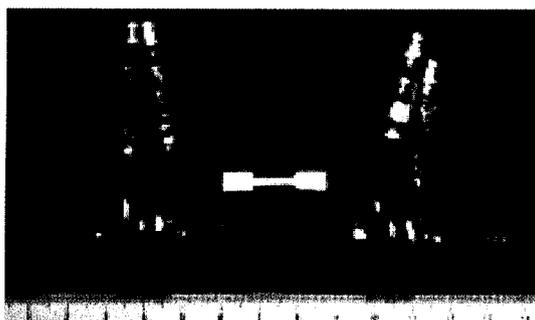
O ensaio de microtração foi realizado em uma máquina de ensaios servo-mecânica marca Instron, modelo 1195, com uma carga de 2 KN. O deslocamento da amostra foi medido por extensômetro a laser marca FOEPS com 50 mm de limite máximo de medida. A tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados durante o ensaio.

Tabela 3: Parâmetros utilizados durante o ensaio de microtração.

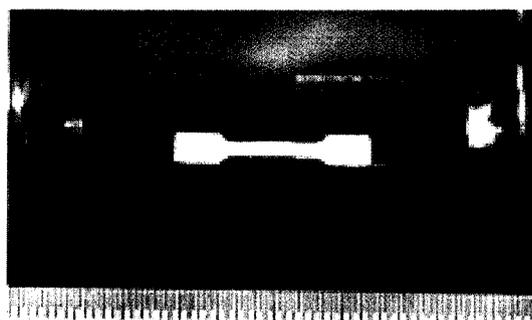
Processo de Soldagem	Posição da Amostra	A* (mm ²)	L0 (mm)	V** (mm/min)
SFR	Junta Soldada	1	8	0,2

* Área da seção transversal, ** Velocidade do ensaio

Todos os dados foram analisados pelo programa LQ CFG 1.8 baseado em um computador. A figura 7 apresenta a aparência final do corpo-de-prova e a garra utilizada no ensaio. Tal sistema também pode ser utilizado para ensaios a alta temperatura.



a) Amostra e sistema de garras



b) Detalhe do sistema

Figura 7: Sistema de garras utilizada no ensaio de microtração.

As amostras foram retiradas na direção transversal à junta soldada, com o bloco sendo usinado no meio da seção da junta soldada. A Figura 8 apresenta o esquema de bloco utilizado para a usinagem dos corpos-de-prova.

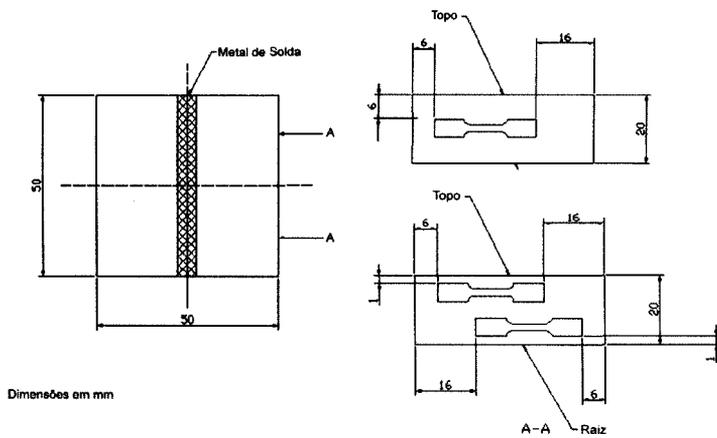


Figura 8:Esquema do bloco para a retirada dos corpos-de-prova para o ensaio de microtração.

4.6 ANÁLISE QUÍMICA

Realizada em todos os materiais com o intuito de verificar se as composições químicas se encontram dentro da faixa especificada pelo fabricante. Análise foi realizada em Espectrômetro de emissão óptica, Spectro modelo spectrolab

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE QUÍMICA

A composição química das ligas utilizadas é apresentada nas tabelas 5 a 7. A composição química da liga API 5L X-65 é apresentada na tabela 4. Na tabela 5 temos a composição do aço inox duplex enquanto que na tabela 6 e 7 temos respectivamente, a composição química da liga superaustenítica e do inconel 825.

Tabela 4: Composição química do aço carbono

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	Ti	V	Fe
X	0,14	0,233	1,265	0,008	0,003	0,037	0,009	0,024	0,03	0,003	0,002	0,029	Bal.

Tabela 5: Composição química do aço inox duplex

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
X	0,0187	0,3951	0,9	0,0119	<0,0010	22,83	3,495	5,89	0,0045
%	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe
X	0,1544	0,1498	0,0097	0,0152	0,0883	0,018	0,0029	0,0011	Bal.

Tabela 6: Composição química do aço inox superaustenítico

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
X	<0,050	0,2043	0,873	0,0106	0,0015	20,96	6,95	23,8	0,0404
%	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	B	Fe	
X	0,512	0,755	0,0215	0,0099	0,0459	0,0219	0,0005	Bal.	

Tabela 7: Composição química do Inconel 825

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
X	0,0251	0,2103	0,857	0,0103	0,0042	23,54	3,635	38,2	0,0712	0,209
%	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Mg	B	Fe	
X	1,763	0,0139	0,902	0,0687	0,047	0,0189	0,0037	0,0027	Bal.	

5.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

5.2.1 ANÁLISE DA ZTA

A amostra CB1 apresentou uma ZTA de 0.5mm e sua indicação pode ser visualizada na figura 9A, também é observado uma separação entre o tubo externo e interno, essa separação ocorreu de ambos os lados da solda.

As figuras 9B e 9C mostram a microestrutura da ZTA, sendo que na figura 9C nota-se grãos grosseiros de ferrita e perlita.

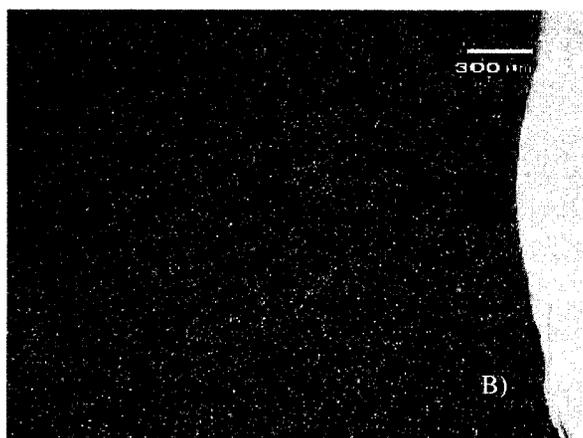
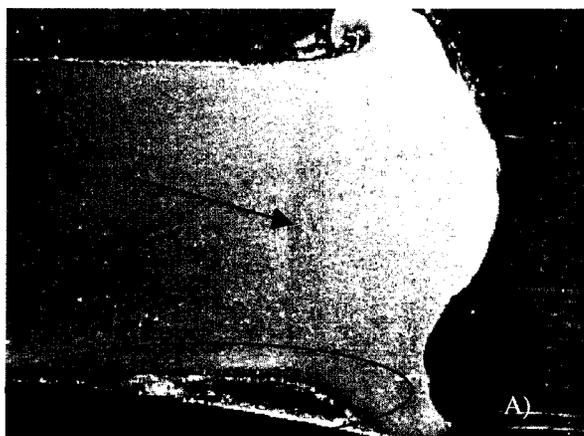


Figura 9: A) Indicação da ZTA da amostra CB1, B) Visão geral da microestrutura e C) Microestrutura junto ao anel. Todas as imagens foram tiradas a esquerda do anel soldado.

A amostra CB2 apresentou uma ZTA de 0.55mm e sua indicação pode ser visualizada na figura 10A, nessa amostra também houve uma pequena separação entre os tubos externo e interno.

As figuras 10B e 10C mostram a microestrutura da ZTA, sendo que na figura 10C tem-se uma microestrutura ferrita e perlita, mas com a ferrita como estrutura predominante.

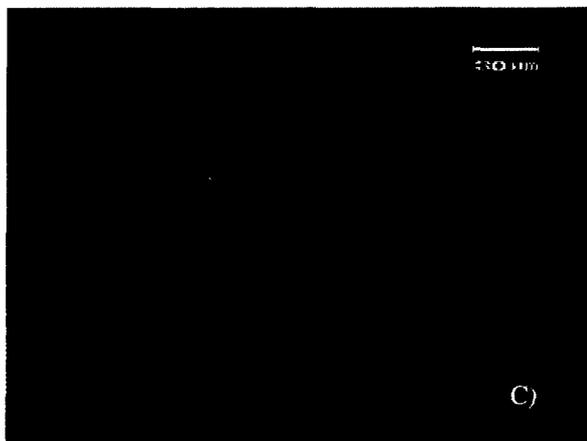
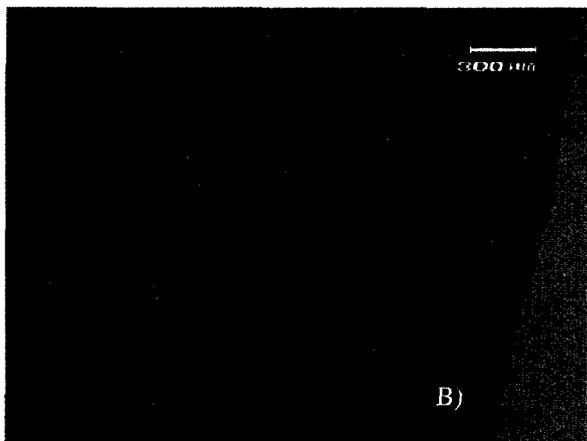
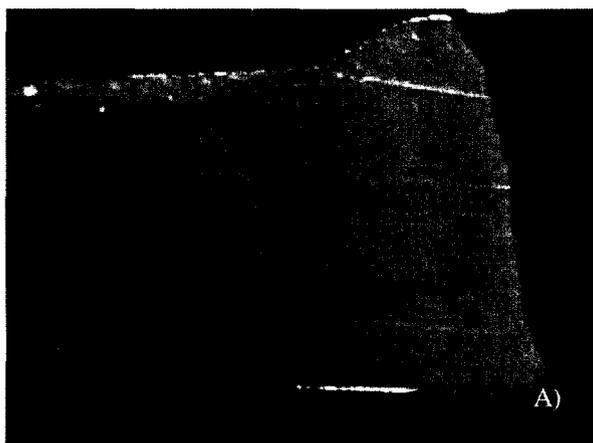


Figura 10: A) Indicação da ZTA da amostra CB2, B) Visão geral da microestrutura e C) Microestrutura junto ao anel. Todas as imagens foram tiradas a esquerda do anel soldado.

A amostra CB3 apresentou uma ZTA de 0.43mm e sua indicação pode ser visualizada na figura 11A

Nas figuras 11B e 11C visualiza-se uma microestrutura da ZTA, sendo que na figura 11C visualiza-se uma microestrutura ferrita e perlita, mas com a ferrita como estrutura predominante e a área clara indicada pode ser uma descarbonetação, já que apresentou uma microdureza menor que do material base e anel.

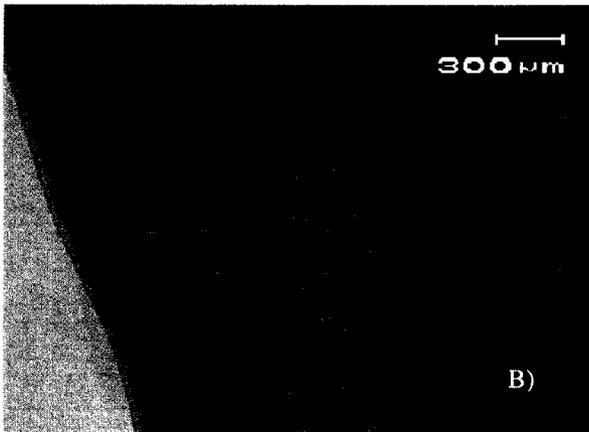
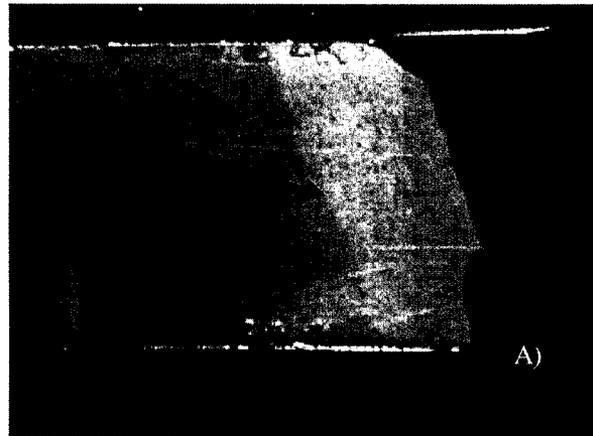


Figura 11: A) Indicação da ZTA da amostra CB3,.B) Visão geral da microestrutura e C) Microestrutura. As imagens da microestrutura foram tiradas a direita do anel soldado.

A amostra CB5 apresentou uma ZTA de 0.9mm e sua indicação pode ser visualizada na figura 12A

As figuras 12B e 12C mostram a microestrutura da ZTA, sendo que na figura 12C visualiza-se uma microestrutura martensítica.

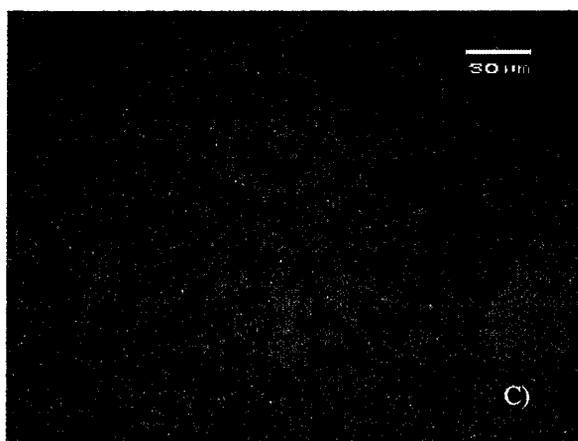
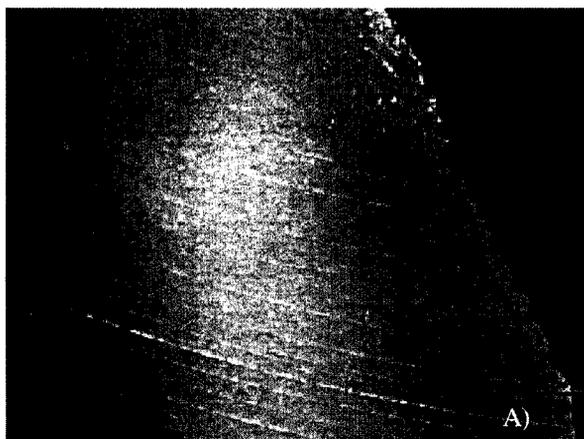


Figura 12: A) Indicação da ZTA da amostra CB5, B) Visão geral da microestrutura e C) Microestrutura junto ao anel Todas as imagens foram tiradas a esquerda do anel soldado.

5.3 ANALISE DOS TUBOS E ANEIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram aço inox superaustenítico, o qual pode ser visualizado na figura 13, o material apresenta uma matriz austenítica com presença de maclas.

O aço inox duplex é mostrado na figura 14 apresenta em sua estrutura ferrita –fase escura e austenita-fase clara.

E a liga inconel 825 apresenta uma estrutura austenítica com maclas, mostrada na figura 15.

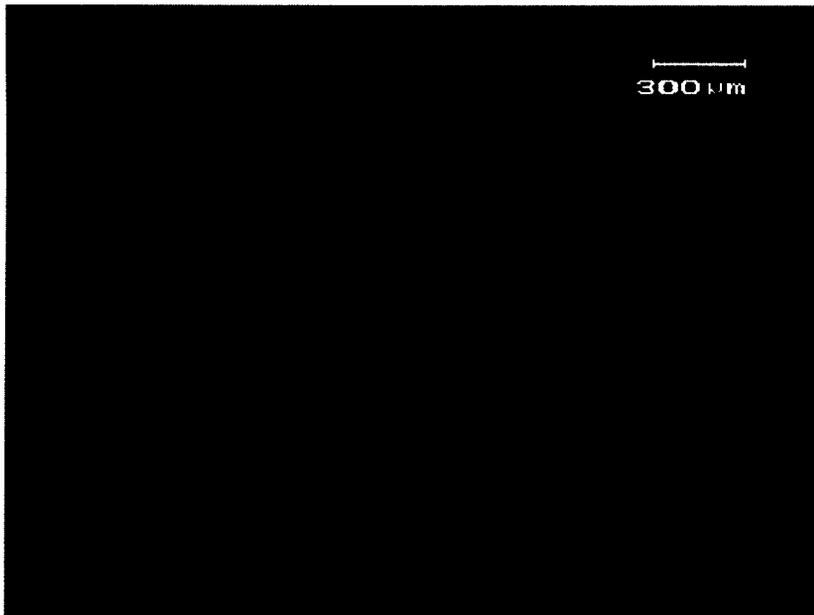


Figura 13: Aço inox superaustenítico, atacado com Kalling's2.

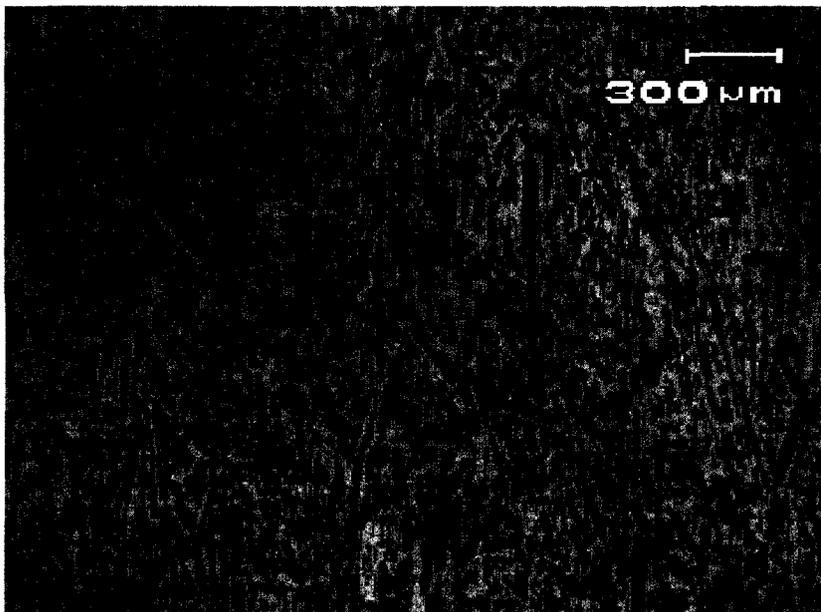


Figura 14: Aço inox duplex, atacado com Kalling's 2.



Figura 15: Inconel 825, atacado com Kalling's 2.

5.4 ENSAIO DE DUREZA

Como o material é chanfrado em V, os gráficos de perfil de dureza apresentam retas para que fosse possível analisar as curvas em um único sistema de eixos x-y. No perfil de dureza do liner, a região que se encontra dentro do anel está entre as linhas verdes, para o perfil do meio da amostra a região dentro do anel está entre as linhas vermelhas e para o perfil do topo da amostra que se encontra dentro da área do anel está entre as linhas azuis. A caracterização do perfil de dureza da amostra CB1, conforme figura 16, indica que houve uma diminuição da dureza junto a ZTA-região próxima a linha azul, que apresentou granulometria grosseira nessa região.

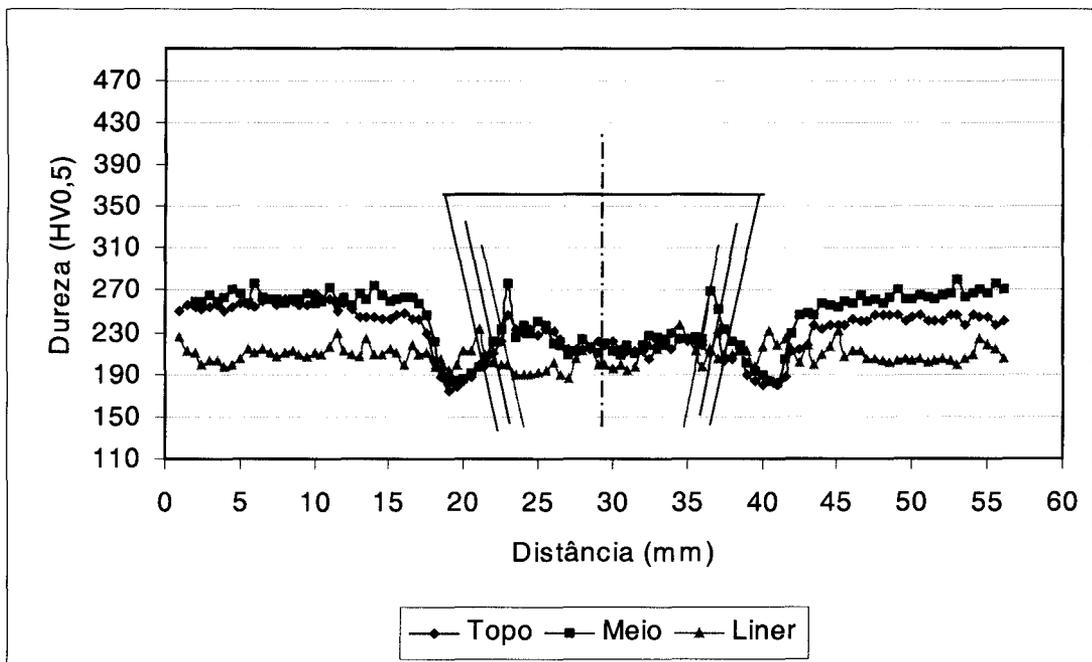


Figura 16: Perfil de dureza da amostra CB1

Conforme a figura 17 a amostra CB2 também apresentou diminuição de dureza na ZTA provavelmente porque o material apresenta muita ferrita nessa região. Partindo da região central do anel antes de chegar às linhas azuis, também houve uma queda da dureza, mas essa foi devido ao amanteigamento feito entre o anel e o material base.

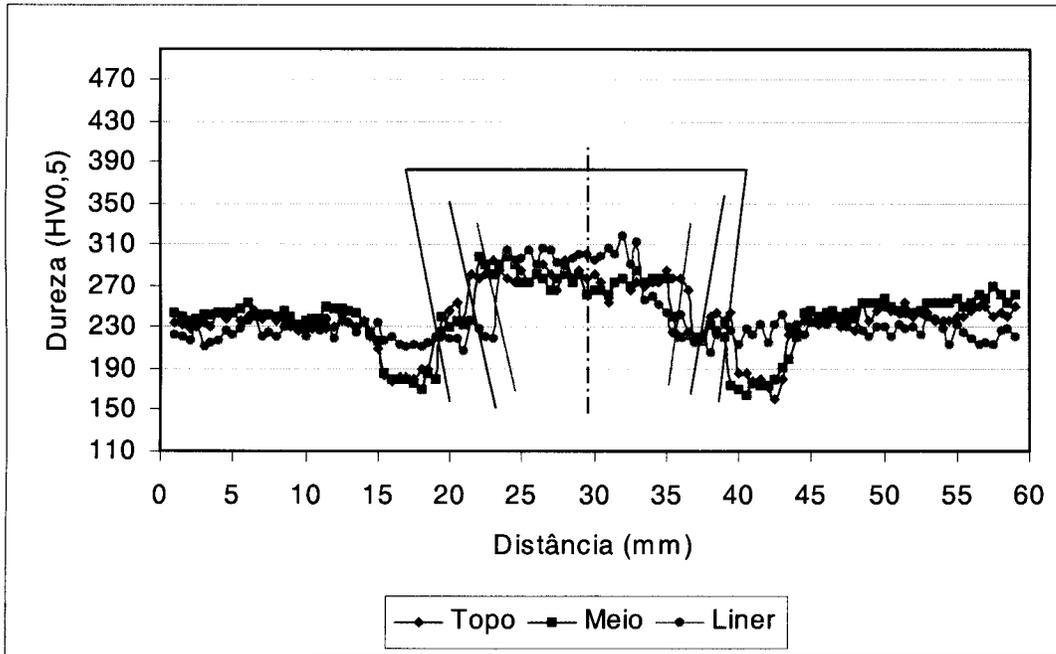


Figura 17: Perfil de dureza da amostra CB2

A amostra CB3 não apresentou mudança de dureza na ZTA, mas houve alguma reação na interface do anel e do material do amanteigamento, pois gerou um aumento de dureza no anel., conforme figura 18. Embora no perfil de dureza não seja possível identificar a queda de dureza da região clara indicada na figura 11C, pelo fato da carga de 500p ser muito alta para uma região tão pequena, foi realizada uma microdureza com carga de 25p, para saber o comportamento da região, onde foi constatada uma média de microdureza de 100 HV, no anel uma média de 160 HV e no material base 230HV.

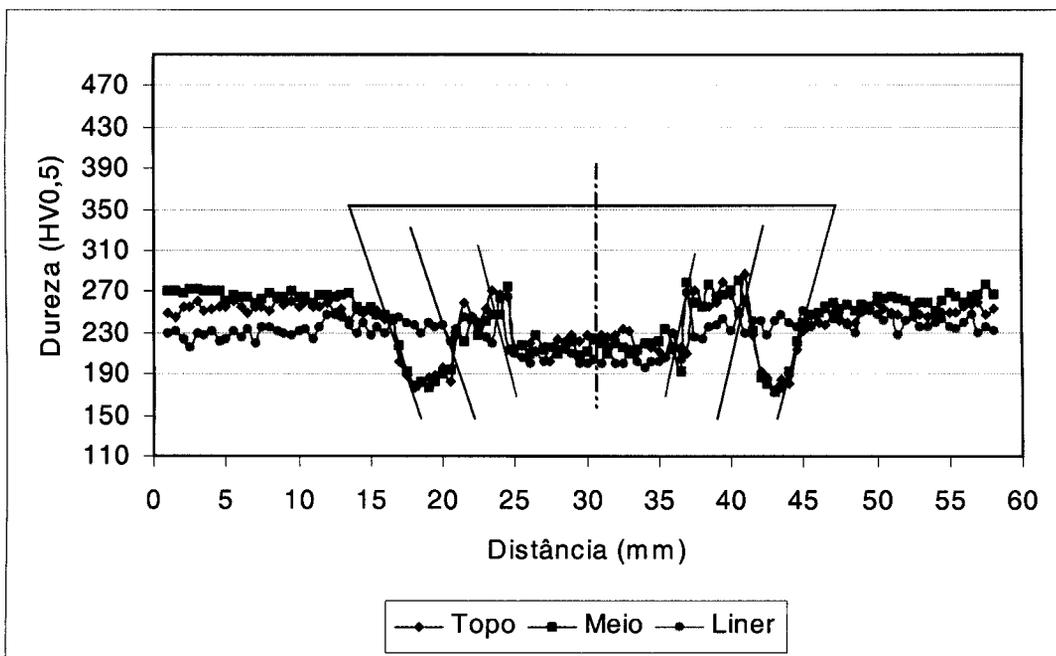


Figura 18: Perfil de dureza da amostra CB3

A amostra CB5 apresentou queda de dureza na ZTA e dois picos bem acima da média do gráfico devida a presença de martensita, conforme figura 19.

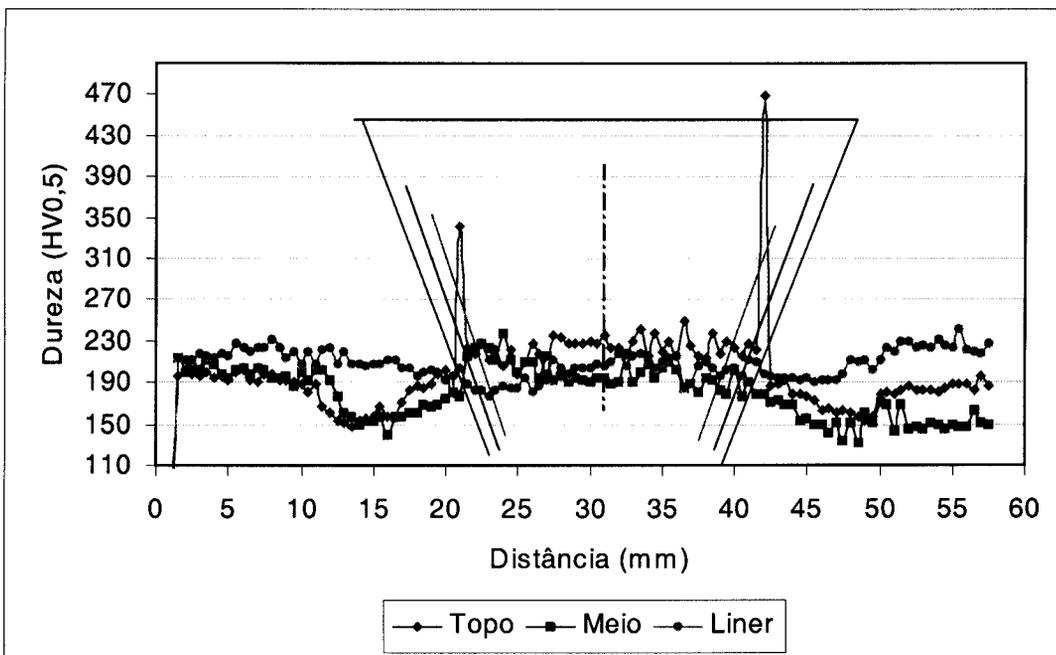


Figura 19: Perfil de dureza da amostra CB5

5.5 ENSAIO DE MICROTRAÇÃO

A figura 20 mostra o comportamento do limite de escoamento obtido pelo ensaio de microtração.

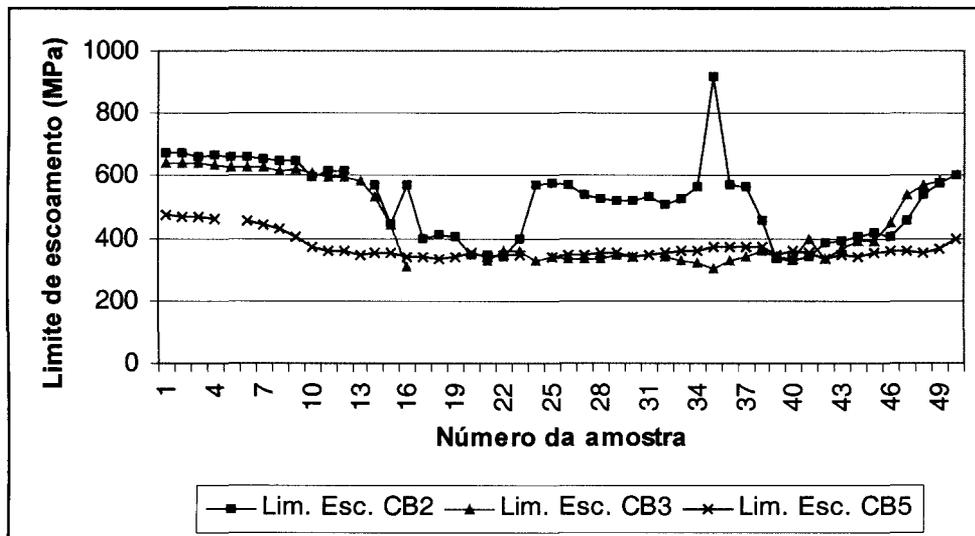


Figura 20: Curvas dos valores de limite de escoamento.

A figura 21 mostra o comportamento do limite máximo obtido pelo ensaio de microtração, estes gráficos apresentaram um comportamento semelhante aos dos perfis de dureza, já que a relação $d\sigma/d\varepsilon$ é diretamente proporcional. A curva de limite de escoamento não teve o mesmo comportamento, porque em um mesmo corpo de prova é possível ter mais do que um material, isso porque os corpos de prova não foram retirados com o mesmo ângulo do chanfro, sendo assim paralelo ao mesmo.

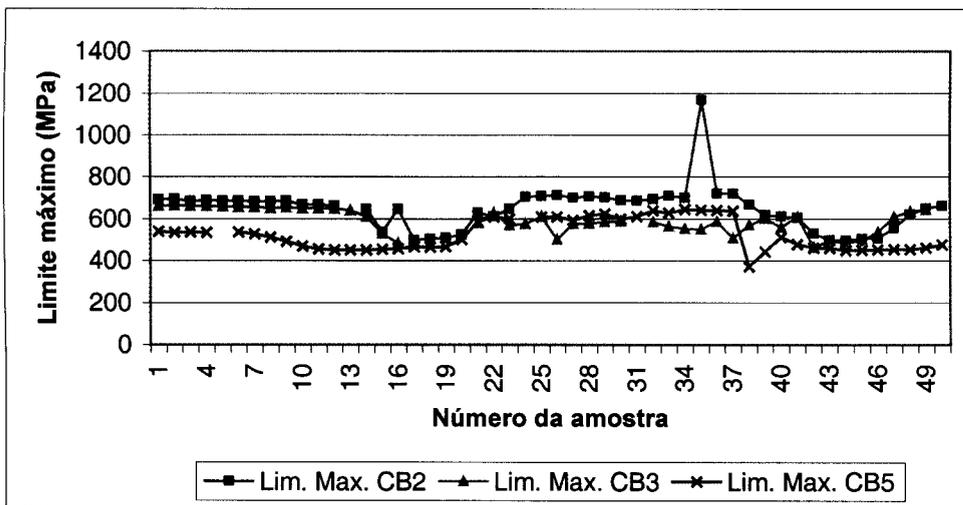


Figura 21: Curva dos valores de limite máximo

6. CONCLUSÕES

- 1) A amostra CB1 apresentou uma separação significativa entre o tubo interno e externo em ambos os lados da solda e também entre o tubo externo e o anel. Essas separações inclusive impossibilitaram a obtenção de corpos de prova para os ensaios de microtração, pois houve desprendimento dos materiais do tubo. Além disso, o material apresentou presença de grãos grosseiros na ZTA.
- 2) Embora a amostra CB2 também tenha apresentado uma pequena separação entre os tubos internos em externos, esse fato em nada prejudicou os ensaios.
- 3) Evitar variações bruscas de dureza, tais como a queda da amostra CB2 devido à presença de ferrita ou valores muito elevados como os da amostra CB5 devido à presença de martensita, ambos os casos na ZTA. Essas variações não se restringem a ZTA, pois no anel da amostra CB3 também ocorreu essa variação, mas neste caso entre o anel e o material utilizado no amanteigamento.
- 4) A amostra CB3 apresentou uma descarbonetação, que não foi detectada por se tratar de uma faixa muito pequena para os parâmetros utilizados para obtenção do perfil de dureza.

7. BIBLIOGRAFIA

- (1) Liane Smith and Mario Celant, Martensitic stainless steel in context, Supermartensitic stainless steels 2002, Belgium-October 3-4.
- (2) B.Crossland, Friction Welding, CONTEMP. PHYS., 1971, Vol.12, N°6, 559-574.
- (3) S.B. Dunkerton, A. Johansen and S. Frich, Radial Friction Welding for Off-shore pipelines.
- (4) Stephen A. Blackman and David V. Dorling, Advances in a variety of processes, from GMAW to laser welding, may bring productivity to a new level.
- (5) Arne Johansen, Friction welding and J-laying of pipes.
- (6) 62-532.200 Definitions for water well permitting and construction, chapter 62-532 Water and well permitting and construction requirements.
- (7) Chapter 9 Lined pipe systems, EM 1110-1-4008-5 May 99.
- (8) Steels for oil and gas pipelines, PIPELINE TECHNOLOGY CONFERENCE, Belgium 15-18 october 1990.
- (9) Metals Handbook, Stainless Steel.
- (10) Nickel and nickel alloys, ASM Handbook Vol.2.
- (11) Paulo Eustáquio de Faria, Soldagem por fricção, UFMG curso de pós-graduação.
- (12) Mechanically Bonded pipe (BuBi-Pipe), Butting Edelstahlrohre.
- (13) Welding, StainlessSteel

- (14) Catálogo Butting produkt.
- (15) Catálogo Butting produkt – Special alloys.
- (16) ASTM E 407-99, Standard practice for microetching metals and alloys.

8. TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos a serem realizados são muitos, já que a pesquisa de soldagem por fricção radial em tubos bimetálicos está apenas começando.

Pela análise dos resultados desse trabalho pode-se fazer um estudo mais aprofundado dos materiais individualmente, dando ênfase a materiais da amostra CB3, por ter apresentado melhor resultado em relação a demais amostras.