



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DE TUBOS DE AÇO API 5L
X65 SOLDADOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO COM
ANEL INTERMEDIÁRIO

Lucas Moussalle Macedo

00208747

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luís Roberto da Silva Macedo e Ana Maria Moussalle Macedo, e meu irmão, Marcelo Moussalle Macedo, por todo carinho, ensinamento, confiança e suporte prestados ao longo de toda minha vida.

Ao meu orientador Professor Doutor Afonso Reguly, pelo apoio, aconselhamento e conhecimento transmitido.

Ao Doutor Márcio L. K. Macedo pelo apoio, aconselhamento e conhecimento transmitido.

Ao Eng. Diogo Buzzatti e a Dra. Mariane Chludzinski, pelo auxílio cedido durante a realização deste trabalho.

Aos amigos do Grupo de Análise de Falhas (GAF), em especial ao Eng. Douglas Martinazzi e Anderson Pelufa, pela ajuda cedida durante a realização deste trabalho.

A minha companheira, Camila Nérís dos Santos, por todo apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) por toda estrutura e oportunidade fornecida.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas	V
Resumo	VI
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	3
3.1 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	3
3.1.2 Influência dos elementos de liga	4
3.2 Processo de fabricação dos aços ARBL	6
3.3 Soldagem por fricção	8
3.3.1 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção	10
3.4 Solda em tubos através do processo de fricção com anel intermediário..	12
3.4.1 Influência dos parâmetros de soldagem	14
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	17
4.1 Materiais	17
4.1.1 Composição Química	17
4.2 Métodos	18
4.2.1 Soldagem	18
4.2.2 Análise Metalografica	19
4.2.3 Ensaio de Microdureza	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 Introdução	22
5.2 Análise Macroestrutural	22
5.3 Análise micrografica	24
5.3.1 Análise de inclusões	24

5.3.2	Análise microestrutural	25
5.3.2.1	Amostra 1	25
5.3.2.2	Amostra 2	28
5.3.2.3	Amostra 3	32
5.4	Ensaio de microdureza	35
6.	CONCLUSÕES	38
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do processo termomecânico de laminação controlada com e sem resfriamento acelerado. Adaptado de (13).....	8
Figura 2: Etapas do processo de solda por fricção. (12).	9
Figura 3: Influência dos parâmetros na solda. Adaptado de (15).	10
Figura 4: Desenho esquemático da solda por fricção com anel intermediário (17).....	12
Figura 5: Amostra do tubo soldado por fricção e macrografia da solda. (17). ..	14
Figura 6: Parâmetros controlados durante o processo de soldagem por fricção com anel intermediário (20).....	15
Figura 7: Figura mostrando o local onde foi retirado um dos corpos de provas (à esquerda) e a amostra submetida a análise (à direita).....	17
Figura 8: Máquina de soldagem MASF 1500 (22).....	18
Figura 9: Foto-padrão – segundo a norma ASTM E45 - para a possível classificação da quantidade e do tipo de inclusões presente nas amostras.....	20
Figura 10: Localização do perfil de microdureza realizado nas amostras.	21
Figura 11: Macrografia da amostra 1.....	23
Figura 12: Macrografia da amostra 2.....	23
Figura 13: Macrografia da amostra 3.....	23
Figura 14: Macrografia da amostra 4.....	24
Figura 15: Falta de preenchimento, em maior aumento, das regiões de ligação entre o tubo e o anel.....	24
Figura 16: Micrografia do material base. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	26
Figura 17: Caracterização da ZAC do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	27
Figura 18: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	27
Figura 19: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	27
Figura 20: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	28

Figura 21: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	28
Figura 22: Caracterização do MB do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	29
Figura 23: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	30
Figura 24: Caracterização da ZTA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	30
Figura 25: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	31
Figura 26: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	31
Figura 27: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	31
Figura 28: Caracterização do MB do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	32
Figura 29: Caracterização da ZTA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	33
Figura 30: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	33
Figura 31: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	34
Figura 32: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	34
Figura 33: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.	35
Figura 34: Perfil de microdureza da amostra 1.....	36
Figura 35: Perfil de microdureza da amostra 2.....	36
Figura 36: Perfil de microdureza da amostra 3.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da amostra utilizada e sua composição nominal.
Valores em peso (%). 18

Tabela 2: Parâmetros utilizados no processo de soldagem..... 19

RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização mecânica e metalúrgica de juntas soldadas através do processo de solda por fricção com a utilização de um anel intermediário, que consiste em utilizar o movimento rotacional do anel central, para unir duas superfícies tubulares. A utilização desta técnica é crescente, tornando-se uma alternativa de grande valor na soldagem de tubos de grandes extensões, em substituição as soldas manuais convencionais. Assim, a otimização dos parâmetros utilizados neste processo para a realização de uma solda de boa qualidade também vem em crescente desenvolvimento visto que as aplicações destas tubulações podem ser alocadas em situações ambientais distintas, como subterrestre ou offshore. As quatro juntas soldadas, estudadas neste trabalho, foram realizadas utilizando-se seções tubulares e anel produzidos em aço API 5L X65. Para a realização das soldas, foram utilizados diferentes parâmetros, previamente estabelecidos, variando-se a força axial compressiva aplicada e o consumo de material. Para a caracterização metalúrgica, foram realizadas análises macro e microscópicas, com o intuito de encontrar possíveis defeitos na região soldada, identificar as zonas termicamente e termo mecanicamente afetadas, qualificar a zona de ligação entre tubo e anel e também para a identificação das diferentes microestruturas encontradas ao longo da junta. Já para a análise mecânica foi realizado um perfil de microdureza, a fim de identificar o gradiente de dureza nas diferentes regiões da amostra e assim verificar possíveis zonas fragilizadas presente no material.

Palavras chaves: Soldagem de tubos por fricção, API 5L X65, análise microestrutural, perfil de microdureza.

ABSTRACT

This work presents the mechanical and metallurgical characterization of welded joints through the friction welding process with an intermediate ring, which consists in using the rotational movement of the central ring, to join two tubular surfaces. The use of this technique is increasing, becoming an alternative of great value in the welding of tubes of great extensions, replacing the conventional manual welds. Thus, the optimization of the parameters used in this process for the realization of a good quality weld also comes in increasing development since the applications of these pipes can be allocated in different environmental situations, such as underground or offshore. Four welded joints, were made using tubular and ring sections produced in API 5L X65 steel. For the realization of the welds, different parameters, previously established, were used, varying the compressive axial force applied and the material consumption. For the metallurgical characterization, macro and microscopic analyzes were carried out to identify possible defects in the welded region, to identify the thermally and thermomechanically affected areas, to qualify the zone of connection between tube and ring and also to identify the different microstructures found along the joint. For the mechanical analysis, a microhardness profile was performed in order to identify the hardness gradient in the different regions of the sample and to verify possible fragilized zones present in the material.

Keywords: Welding of friction tubes, API 5L X65, microstructural analysis, microhardness profile.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por produção de gasodutos, oleodutos e outros tipos de tubulações para a extração de recursos naturais, devido ao crescimento e descoberta de novas fontes energéticas, aumentou-se também a necessidade de melhoria e aprimoramento pela união de segmentos de tubos a fim de produzir dutos de extensas dimensões. Desse modo, devido à grande dificuldade em soldar tubulações de extensas dimensões, a busca pela automatização foi cada vez mais se tornando necessária neste tipo de processo mesmo que ainda atualmente a maioria desses componentes sejam majoritariamente soldados manualmente através do processo de soldagem por fusão, requerendo uma mão de obra muito qualificada, tornando com isso o processo caro, demorado e nem sempre garantindo um resultado eficiente.

Assim os métodos de soldagem por fricção, os quais se processam no estado sólido, não havendo a fusão dos materiais envolvidos, surgem como uma excelente alternativa na soldagem de grandes estruturas. As juntas soldadas por esse processo são, essencialmente, o resultado da plastificação dos componentes metálicos, similares ou dissimilares, aquecidos através do processo de fricção. Uma das variações da soldagem por fricção convencional é o processo de soldagem com a inserção de um anel intermediário, na qual este anel, geralmente produzido com material semelhante aos tubos, é rotacionado em alta velocidade entre as extremidades dos dois componentes a serem soldados.

Este processo de solda por fricção acabou tornando-se uma técnica bastante eficaz por proporcionar a produção de juntas soldadas de melhor qualidade, automatizada, com redução de problemas proporcionados por erro humano e também por possuir um benefício ambiental ao não produzir gases nocivos ao meio ambiente. Por se tratar de um processo realizado no estado sólido e envolver menores temperaturas de trabalho, os problemas do processo de fusão e o aparecimento de fases frágeis também são minimizados.

2. OBJETIVOS

Este presente trabalho possui o objetivo de avaliar a qualidade de juntas soldadas obtidas através do processo de soldagem por fricção com anel intermediário. Para isso foi utilizado componentes produzidos em aço microligado API 5L X65, variando os parâmetros de soldagem em cada amostra.

Mais especificamente, os experimentos realizados neste trabalho tiveram os seguintes objetivos:

- Identificar os melhores parâmetros de soldagem, dentre os avaliados, de modo a se obter a junta soldada de melhor qualidade;
- Analisar as características das microestruturas formadas na região soldada e no material de base através de microscopia ótica;
- Identificar e mensurar as zonas termicamente afetadas e termo mecanicamente afetadas (ZTA e ZTMA) de cada amostra e analisar as mudanças de fase ocorridas nestas regiões;
- Através do ensaio de microdureza, identificar possíveis regiões frágeis nas amostras, após o processo de soldagem;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)

Os aços de alta resistência e baixa liga (ou HSLA em inglês: High Strength Low Alloy), também conhecidos como aços C-Mn, são aços com composição química desenvolvida especialmente para proporcionar maiores valores de propriedades mecânicas, e, algumas vezes, até mesmo melhor resistência a corrosão do que os aços ao carbono estruturais. Essas características, aliadas ao seu baixo custo de produção, faz com a aplicação desses aços torna-se bastante atraente, principalmente, na fabricação de componentes de transporte, como tubulações da área petrolífera, onde a redução de peso é um fator importante, uma vez que torna possível a fabricação de seções com menores espessuras (1).

A elevada resistência mecânica e tenacidade à fratura dos aços pertencentes a essa família resultam da interação simultânea de múltiplos mecanismos de endurecimento, os quais atuam como obstáculos ao movimento de discordâncias, provocando uma maior dificuldade do metal se deformar plasticamente e conseqüentemente aumentando a sua resistência. Os mecanismos de endurecimento observados nos aços ARBL são, principalmente, o refino do tamanho de grão (através de resfriamento controlado), o aumento na densidade de discordâncias (geradas pelo processo de deformação a frio), endurecimento por precipitação (formação de carbonetos de liga, finamente dispersos na matriz), além de uma textura adequada (2).

A classificação dos aços para tubos utilizados na indústria de petróleo e gás é feita de acordo com API (American Petroleum Institute), uma associação responsável por criar normas e procedimentos para indústrias deste setor. Essa classificação varia de acordo com a aplicação e a resistência mecânica das tubulações. A API 5L *Specification for Line Pipe* (3) abrange, especificamente, a classificação para aços de alta resistência e baixa liga utilizados na fabricação de tubos (terminologia desse tipo de aço: X + limite de escoamento em ksi) (4).

Normalmente os aços ARBL apresentam teor de carbono equivalente, inferior a 0,25%, de modo a manter sua conformabilidade e soldabilidade, e teores de manganês em torno de 1,5% em peso. Outros elementos de liga são adicionados em pequenas quantidades, como nióbio, titânio, cobre e vanádio para que se alcance os níveis de resistência desejados. A influência desses elementos será melhor explicada logo a seguir.

A capacidade dos aços ARBL de serem soldados, sem que haja excessiva concentração de tensões internas, está diretamente relacionada com a sua composição química, que pode ser quantificada de acordo com o teor de carbono e dos elementos de liga presentes. Valores elevados de carbono e outros elementos tornam o aço mais temperável, mas conseqüentemente, diminui sua soldabilidade (5).

3.1.2 Influência dos elementos de liga

- Manganês

É o elemento de liga com maior teor adicionado aos aços ARBL e tem como principal objetivo aumentar a sua resistência mecânica. Altas concentrações de manganês fazem com que a temperatura de transformação da fase austenítica para a fase ferrítica diminua, promovendo, desse modo, o refinamento do grão ferrítico. É através deste refinamento que o aço tem um aumento considerável na sua resistência mecânica e na sua tenacidade. Um problema observado, porém, é a grande afinidade desse elemento com o enxofre, o que faz com que ocorra a formação de inclusões alongadas de MnS, as quais ocasionam uma queda acentuada na tenacidade do material (6).

- Nióbio

Encontra-se em pequena quantidade nos aços ARBL, com teores variando entre 0,001 até 0,1%. Por possuir uma grande afinidade com o carbono, o nióbio desempenha uma função extremamente importante na fabricação desses aços, sendo responsável pela formação de finos carbonetos distribuídos homogeneamente na sua estrutura. A presença desses carbonetos contribui com o aumento da resistência mecânica do aço através do mecanismo de endurecimento por precipitação. Estes compostos (NbC) atuam, também, como “barreiras”, restringindo o crescimento do grão austenítico durante o processo de laminação, fazendo com que o aço possua uma estrutura mais refinada (6).

- Titânio

Do mesmo modo que o nióbio, tem uma elevada tendência a formar carbonetos, aumentando a resistência mecânica dos aços através do mecanismo de endurecimento por precipitação e melhorando, também, o seu desempenho em altas temperaturas. É um elemento estabilizador da ferrita e em concentrações mais elevadas diminui a extensão do campo austenítico (7).

- Vanádio

Pequenas adições de vanádio no aço provocam precipitação de finas partículas de V_4C_3 na ferrita, entre 550 e 650°C, causando o endurecimento secundário. Além disso ele eleva a temperatura de crescimento do grão austenítico, promovendo o refino de grão. Ambos mecanismos de endurecimento fazem com que o aço tenha um ganho significativo de resistência mecânica e tenacidade (2).

A soma dos teores de Nióbio, Titânio e Vanádio não deve ultrapassar 0,15% em peso para que as propriedades do aço não sejam prejudicadas (6).

3.2 Processo de fabricação dos aços ARBL

Inicialmente a adição de elementos microligantes permitiu uma significativa redução do carbono equivalente na fabricação dos aços ARBL. Porém, uma maior redução no carbono equivalente se tornou possível com procedimentos de melhoria no processamento termomecânico, como a laminação controlada (8).

Este processo termomecânico, seguido de um resfriamento igualmente controlado, aumentam os valores da resistência mecânica e a tenacidade dos aços, devido ao maior refino do tamanho de grão (9).

Um processo que permita obter, durante a laminação, austenita de grão fino e, eventualmente, encruada, favorece, naturalmente, a nucleação de ferrita no resfriamento e resulta em microestruturas de grãos extremamente fino. Devido à baixa temperatura de recristalização dos aços C-Mn, uma alternativa é o uso de elementos microligantes, como o nióbio que, dissolvidos na austenita ou precipitados como carbonitretos, aumentam a temperatura de recristalização e retardam o crescimento do grão austenítico (2).

A grande maioria das tubulações industriais são produzidas através do processo de laminação. Os aços ARBL, especificamente o aço API 5L X65 utilizado para gasodutos, passam por uma laminação controlada onde o processo consiste em laminar o aço a quente, em patamares controlados, seguido de um resfriamento acelerado ou ao ar. A microestrutura resultante é diretamente relacionada a severidade com a qual o aço for resfriado (2).

Este processamento termomecânico com resfriamento controlado, possui uma vantagem considerável em relação a laminação convencional por não necessitar de um tratamento térmico posterior. Com a introdução deste processo, juntamente com a adição de elementos de liga como Nióbio, Vanádio e Titânio, foi possível diminuir significativamente o tamanho de grão da austenita, que dá origem a uma microestrutura final igualmente refinada, elevando sobremaneira a resistência mecânica, a soldabilidade e a tenacidade ao produto final (10).

O processo de laminação controlado consiste basicamente em três etapas, de acordo com a Figura 1. O aço inicialmente é reaquecido a uma elevada temperatura onde ocorrerá a dissolução total dos microligantes na matriz, antes de se iniciar o processo de laminação. Com a deformação da austenita na primeira etapa do processamento, ela irá se recrystalizar com o objetivo de obter um grão austenítico fino e homogêneo através da combinação de ciclos sucessivos de deformação e recrystalização. A segunda etapa do processo, após já ocorridos algumas sequências de laminação e recrystalização, ocorre em temperaturas intermediárias onde a austenita já está no seu estado deformado final, sem a possibilidade de ser recrystalizada novamente. Com este formato encruado dos grãos austeníticos é possível obter um aumento significativo da taxa de nucleação da ferrita, evitando que ocorra um crescimento do grão. Na última etapa, existe uma mistura de austenita e ferrita. A ferrita sofre encruamento, levando a um aumento da resistência do material. A austenita, ao fim da conformação, apresenta um tamanho de grão igualmente fino devido ao mecanismo de encruamento (11).

Dependendo da severidade com que o aço for resfriado ao final do processo de laminação é possível que a austenita restante seja transformada tanto em bainita ou martensita, caso o resfriamento seja feito de maneira rápida, quanto em perlita caso o resfriamento seja feito naturalmente ao ar. Ambas as microestruturas do aço, independente da severidade do resfriamento, apresentarão também ferrita na sua composição final.

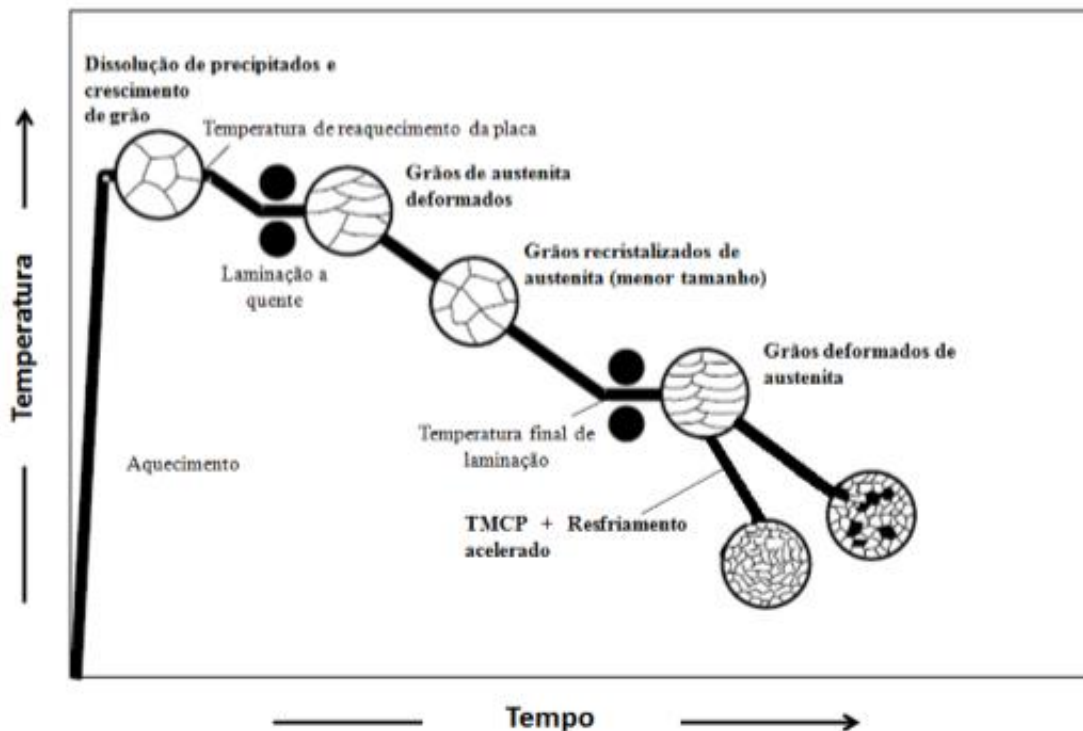


Figura 1: Esquema do processo termomecânico de laminação controlada com e sem resfriamento acelerado. Adaptado de (13).

3.3 Soldagem por fricção

A técnica de soldagem por fricção é um processo que ocorre no estado sólido, não promovendo a fusão dos materiais envolvidos. Nesse processo os dois componentes a serem soldados são submetidos a uma força axial compressiva um contra o outro, através de movimento rotacional, fazendo com que haja um aumento localizado da temperatura devido ao atrito presente entre os dois corpos. Com o aumento da temperatura e a conseqüente diminuição da tensão de escoamento, as superfícies dos corpos em contato acabam deformando-se plasticamente, o que promove a união entre eles. Com o aumento da força sendo aplicada, além da completa união entre os corpos, é formada também uma rebarba (flash), onde as impurezas encontradas nas superfícies das peças são expulsas para essa região (12). Este processo de soldagem por fricção é exemplificado na figura 2.

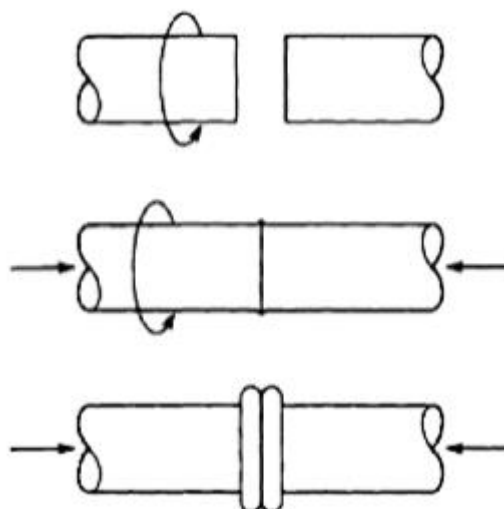


Figura 2: Etapas do processo de solda por fricção. (12).

Este processo de soldagem por fricção vem se tornando cada vez mais estudado devido a elevada gama de combinações de materiais que esse tipo de solda pode proporcionar. Além da combinação de materiais similares, o procedimento por atrito permite junções de alta qualidade para materiais de processos críticos e de materiais dissimilares (14).

A microestrutura do material soldado é diretamente dependente da intensidade de energia aplicada, da força axial compressiva e da velocidade de rotação durante o processo de soldagem (15). A figura 3 exemplifica as diferentes morfologias das soldas quando variados a intensidade destes parâmetros.

Após o processo de soldagem, o material soldado pode ser dividido em quatro zonas distintas: (14).

- Zona de mistura (ZM): Região onde ocorre a união dos materiais, devido a deformação plástica gerada pelo atrito. O aquecimento formado leva a estrutura a sua recristalização.

- Zona Termicamente Afetada (ZTA): Região onde a microestrutura e as propriedades mecânicas sofrem apenas a influência do calor gerado durante o processo de soldagem, não observando deformação no material.

- Zona Termo Mecanicamente Afetada (ZTMA): Região onde a quantidade de calor é superior que a ZTA, resultando numa recuperação de grãos e o aparecimento de grãos deformados.

- Metal de Base (MB): Região onde a microestrutura não sofre alterações durante o processo de soldagem, mantendo sua estrutura inicial.

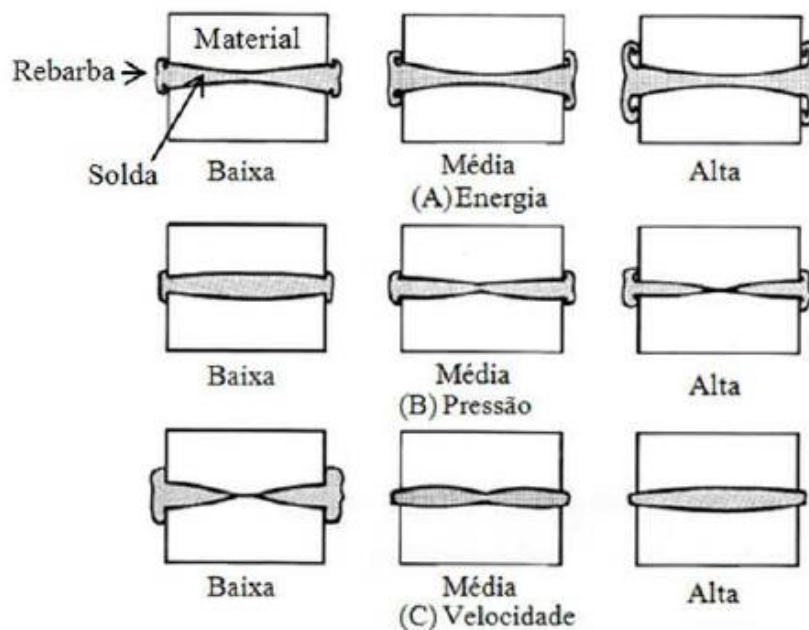


Figura 3: Influência dos parâmetros na solda. Adaptado de (15).

3.3.1 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.

Para se obter uma boa qualidade na solda por fricção alguns requisitos importantes são necessários ser tomados, como por exemplo, não soldar materiais frágeis e nem materiais que contenham na liga aditivos que forneçam lubrificação, como o caso da grafita nos ferros fundidos. Este segundo caso se torna um empecilho por não promover atrito suficiente para gerar o calor necessário para que a união ocorra (16).

Por se tratar de um processo que não necessita a fusão do material, é possível se obter algumas vantagens em relação a outros tipos de soldas convencionais.

- Vantagens: (16).
 - Processo facilmente automatizado, com produção de soldas mais uniformes, de alta qualidade e realizadas em menor tempo;
 - Possível união de dois materiais dissimilares;
 - Não há defeitos relacionados a solidificação, como por exemplo, porosidade, uma vez que esta soldagem se realiza sem a necessidade de fusão dos materiais;
 - Maior segurança para o operador e para o meio ambiente por não possuir fumaça e radiações;
 - Baixo custo por não necessitar um alto consumo de energia e nem uma mão de obra tão qualificada;
 - Zona Afetada pelo Calor (ZAC) mais estreita do que comparada com outras juntas soldadas pelo processo convencional;
 - Possibilidade de realizar soldas em tubos de grande extensão.

- Limitações: (16).
 - Alto valor de investimento inicial;
 - Preparação e alinhamento das peças deve ser realizado com extremo cuidado para não haver problemas com a uniformidade da solda;
 - Dificuldade com peças de geometria complexa;
 - Necessidade de ao menos um dos materiais entrar no regime plástico para que a união seja realizada.

3.4 Solda em tubos através do processo de fricção com anel intermediário

O processo de solda utilizando um anel intermediário rotativo é uma das variações da técnica de soldagem por fricção. Trata-se de um processo de soldagem onde o calor necessário para realizar a solda é gerado através do resultado das forças de atrito entre as duas superfícies e um anel intermediário, sob uma pressão axial controlada em ambos os lados das secções tubulares. Este processo tem sido alvo intenso de estudos por conseguir soldar componentes, que por sua natureza, seriam complicados de serem rotacionados em alta velocidade devido suas extensas dimensões e, conseqüentemente, impossibilitando a geração de atrito entre eles. Um caso onde o uso deste processamento é muito utilizado são em tubos da indústria petrolífera, como gasodutos e oleodutos que podem atingir até 18 metros de comprimento (17).

Neste tipo de soldagem, os tubos são axialmente alinhados e permanecem fixos durante o processo. O movimento de rotação se dá através de um anel, com diâmetro semelhante à dos elementos tubulares, posicionado entre as superfícies extremas dos tubos na qual deve ocorrer à união. Com a rotação do anel intermediário atingindo alta velocidade, o calor gerado devido o atrito entre ele e as extremidades dos tubos, é suficientemente alta para plastificar as superfícies de contato. Logo após os materiais atingirem o regime plástico, a rotação do anel é cessada e ocorre um aumento na força compressiva axial em ambos os tubos, fazendo com que a união metalúrgica ocorra (17). A figura 4 demonstra o esquema utilizado para este tipo de solda, apresentando os tubos e o anel intermediário.

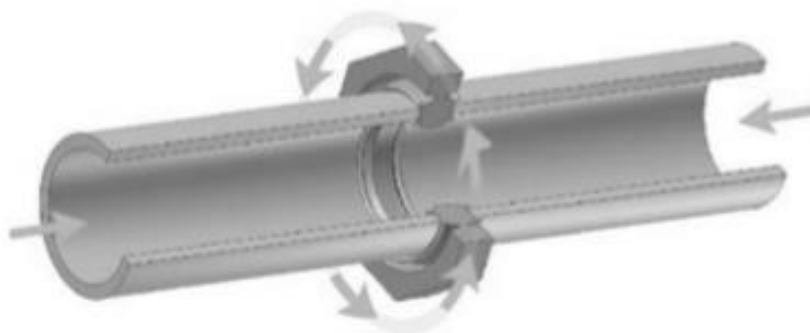


Figura 4: Desenho esquemático da solda por fricção com anel intermediário (17).

Com o intuito de produzir soldas por fricção de melhor qualidade e com tempo de soldagem reduzido, foi desenvolvido no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF-UFRGS) uma máquina de soldagem por fricção (MASF 1500). Este equipamento foi desenvolvido para ser utilizado na união de tubos pelo método de fricção por anel intermediário rotativo, sendo capaz de soldar tubos de 200mm até 400mm de diâmetro. Com um elevado índice de tecnologia nacional (81,2%), a MASF 1500 apresenta o Brasil como um país com grande potencial de desenvolvimento tecnológico, abrindo novos horizontes de pesquisa à nível nacional e possibilitando grandes avanços na área de soldagem por fricção. Este equipamento é capaz de substituir os processos convencionais de soldagem se tornando uma alternativa de maior produtividade e qualidade na construção de dutos para óleo e gás (18).

A máquina é constituída de 6 atuadores hidráulicos com capacidade individual de 250 kN, responsáveis pela força axial dos tubos em direção ao anel. Sua força máxima de soldagem é de 1500 kN. Para que a ação aconteça, o anel é colocado entre as extremidades dos dutos a serem unidos e então rotacionado através da ação de 6 motores elétricos, capazes de gerar calor suficiente para a união dos componentes. Com a MASF 1500 realizaram-se juntas soldadas de forma eficiente e com total controle sobre o processo. Os valores prescritos de força axial, velocidade de rotação do anel e consumo dos materiais, são comandados externamente de maneira automatizada, trazendo mais rapidez, repetitividade e segurança ao processo (19).

Na figura 5, a esquerda, é demonstrado uma amostra cortada de dois tubos soldados através da técnica de solda por fricção com anel intermediário. Do lado direito é possível identificar, em maior aumento, a região onde a união ocorreu.

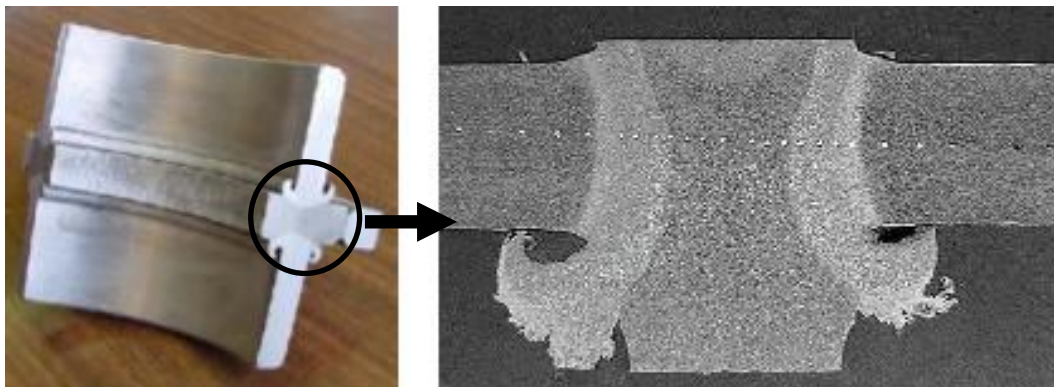


Figura 5: Amostra do tubo soldado por fricção e macrografia da solda (17).

3.4.1 Influência dos parâmetros de soldagem

Os principais parâmetros utilizados na solda de tubos através da técnica de soldagem por fricção com anel intermediário são a velocidade de rotação do anel, a força compressiva axial aplicada nos tubos e o consumo dos materiais. Caso um destes parâmetros seja escolhido de maneira indevida, a solda pode apresentar defeitos críticos como por exemplo a falta de preenchimento. Ou seja, o controle da velocidade de rotação do anel, da força axial e do consumo do tubo são fundamentais para a realização de uma solda considerada satisfatória (20).

A figura 6 apresenta um gráfico na qual é possível visualizar as principais variáveis controladas em função do tempo.

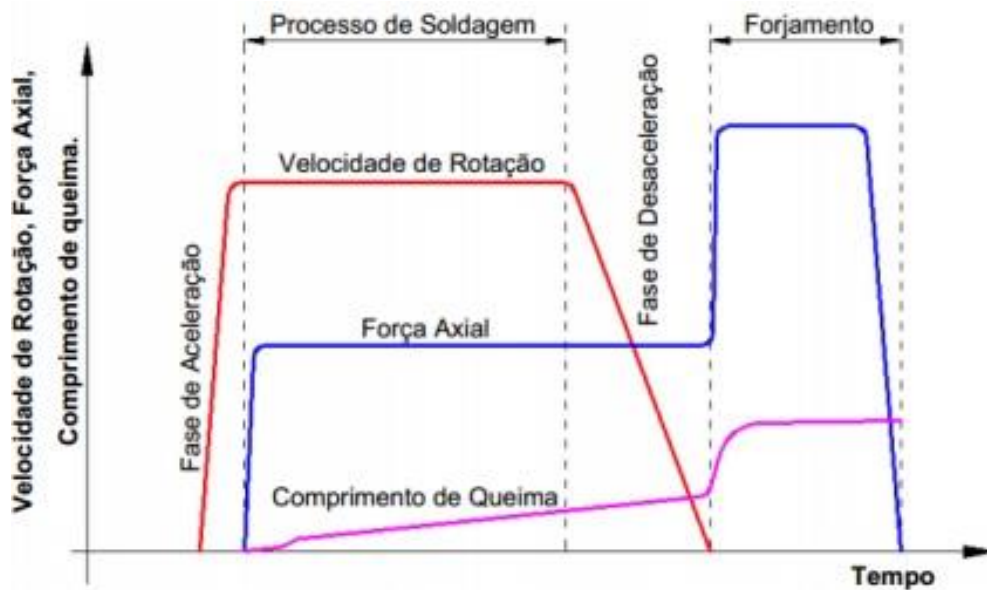


Figura 6: Parâmetros controlados durante o processo de soldagem por fricção com anel intermediário (20).

- Velocidade de rotação do anel: Está relacionada diretamente com a quantidade de calor gerado no processo de soldagem. Elevadas velocidades ocasionam uma maior temperatura (propagação de energia térmica) ao longo da junta. Isso implica numa zona termicamente afetada mais extensa, resultando na queda das propriedades mecânicas. Por outro lado, velocidades rotacionais baixas podem fazer com que o calor gerado não seja suficientemente necessário para que os componentes entrem no regime plástico, impossibilitando a realização da solda (20).

- Força axial: É a grande responsável por manter as superfícies dos componentes em contato, a fim de formar a ligação metalúrgica e, por esse motivo, ela deve ser suficientemente alta para que a união possa acontecer. Por outro lado, o excesso desta força pode provocar o surgimento de altas temperaturas no componente e elevadas taxas de queima, prejudicando o resultado do processo. Forças elevadas implicam numa redução da ZAC por diminuir o tempo de soldagem (21).

- Taxa de queima: Descreve a velocidade com a qual o elemento tubular é deslocado linearmente, um contra o outro, durante o processo. É o parâmetro responsável por determinar o início e o fim do ciclo de soldagem, determinando o consumo de material utilizado. Uma vez que o consumo do material seja escolhido de maneira ineficaz, pode-se ocasionar o surgimento de defeitos na região da solda, como por exemplo a falta de preenchimento. Este tipo de defeito faz com que os níveis de resistência da junta sejam reduzidos significativamente, prejudicando as propriedades finais da união (21).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

Para este trabalho foram utilizadas secções tubulares de 220mm de diâmetro e 13mm de espessura, produzidos em aço baixa liga e alta resistência, de acordo com a norma API 5L. Os anéis intermediários de diâmetro idêntico ao tubo, porém com espessura de 22m, também seguem a mesma classificação.

A figura 7 apresenta os tubos soldados de uma das amostras analisadas após o processo de soldagem, sendo possível visualizar o local de onde foi retirado o corpo de prova (à esquerda). A direita é apresentada o corpo de prova extraído, na qual as análises foram submetidas.



Figura 7: Figura mostrando o local onde foi retirado um dos corpos de provas (à esquerda) e a amostra submetida a análise (à direita).

4.1.1 Composição Química

A análise química do material foi realizada através da técnica de espectroscopia de emissão ótica, no espectrômetro da marca SPECTRO, modelo Spectrolab, localizado no LAMEF. Foram realizadas ao total cinco queimas no material base do tubo, obtendo assim uma média aritmética desses valores.

A tabela 1 apresenta o resultado da composição química do material base utilizado.

Tabela 1: Composição química da amostra utilizada e sua composição nominal. Valores em peso (%).

Elemento	C	Mn	S	P	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb+V+Ti
Tubo	0,14	1,00	0,004	0,012	0,20	0,06	0,007	<0,05	0,012	0,10
API 5L X65	0,26 máx	1,45 máx	0,03 máx	0,03 máx	0,15 máx	0,50 máx	0,15 máx	0,50 máx	0,50 máx	0,15 máx

4.2 Métodos

4.2.1 Soldagem

A união metalúrgica dos tubos API 5L X65 e do anel, de mesmo material, foram feitas através da máquina de soldagem MASF 1500, na qual se encontra ilustrada na figura 8. Para cada amostra soldada foram utilizados parâmetros de força axial e consumo de material diferentes.



Figura 8: Máquina de soldagem MASF 1500 (22).

As amostras foram classificadas de acordo com os parâmetros utilizados para cada solda realizada. Estes parâmetros utilizados foram determinados de

acordo com a experiência prévia da equipe que me auxiliou na realização deste trabalho. Todas as soldas utilizadas tiveram a velocidade rotacional do anel de 500 rpm. A tabela 2 apresenta os detalhes para cada solda produzida.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no processo de soldagem.

	Taxa de deslocamento inicial (mm/s)	Taxa de carregamento (kN/s)	Consumo do tubo (mm)
Amostra 1	0,05	5	15
Amostra 2	0,05	10	15
Amostra 3	0,05	7,5	20
Amostra 4	0,05	7,5	10

4.2.2 Análise Metalografica

A análise metalografica foi realizada com o objetivo de identificar as fases presentes em todas as amostras, desde o metal base do tubo até o centro do anel, passando pelas zonas afetadas pelo calor da solda.

Primeiramente os corpos de prova foram cortados próximo a região da solda, a fim de facilitar a preparação das amostras. Após isso, as superfícies de interesse das amostras obtidas foram lixadas numa sequência granulométrica de 80, 120, 320, 400, 600, 1200 mesh e polidas com pasta abrasiva diamantada de granulometria 1 μm . Estas etapas fazem com que as superfícies de interesse se tornem as mais planas possíveis, retirando ao máximo as rugosidades do material.

Com as amostras já devidamente polidas foi realizado uma análise de inclusões presente no material base do tubo e do anel de todas as amostras. O teor de inclusões presente nos materiais foi classificado de acordo a norma ASTM E45, onde através de fotos obtidas por microscópio ótico, numa ampliação de 100x, foi possível compara-las com uma imagem padrão (Figura 9) afim de classifica-las.

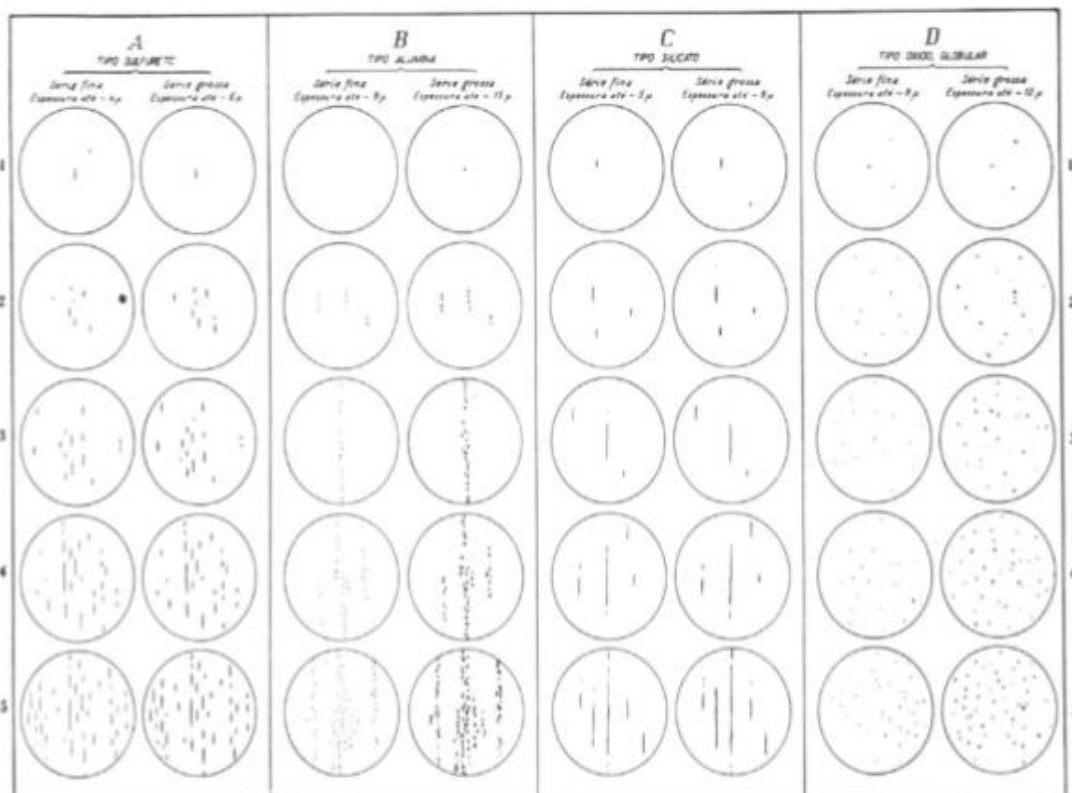


Figura 9: Foto-padrão – segundo a norma ASTM E45 - para a possível classificação da quantidade e do tipo de inclusões presente nas amostras.

Após a análise de inclusões, as amostras foram imersas no reagente Nital (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico). Este ataque químico foi utilizado para a revelação da microestrutura do material base do tubo e das zonas afetadas pelo processo de soldagem. Na sequência, foi realizado uma análise macroscópica a partir da junção de micrografias feitas no microscópio óptico Zeiss, numa ampliação de 50x, contando com o auxílio do software Microsoft ICE. O objetivo principal das macrografias é dimensionar o tamanho das zonas afetadas pelo calor (ZAC), das zonas termo mecanicamente afetadas pelo calor (ZTMA) e também para auxiliar numa possível observação dos defeitos metalúrgicos presente nas amostras.

A análise micrografica foi realizada a partir de imagens feitas em diversas ampliações da microestrutura das amostras, contando com o auxílio do microscópio óptico Zeiss. Foram registradas imagens do metal base do tubo, das zonas afetadas pelo calor, das zonas termo mecanicamente afetadas e da zona de mistura.

4.2.3 Ensaio de Microdureza

Os perfis horizontais de microdureza foram realizados na mesma secção utilizadas para as análises macro e microestruturais. Estes perfis têm como objetivo determinar a dureza nas diferentes regiões da solda. Para a realização deste teste foi utilizado um microdurometro INSTRON, na escala Vickers com uma carga de 500g. A figura 10 demonstra o sentido que foi realizado o perfil horizontal de microdureza, assim como as diferentes regiões presente nas amostras.

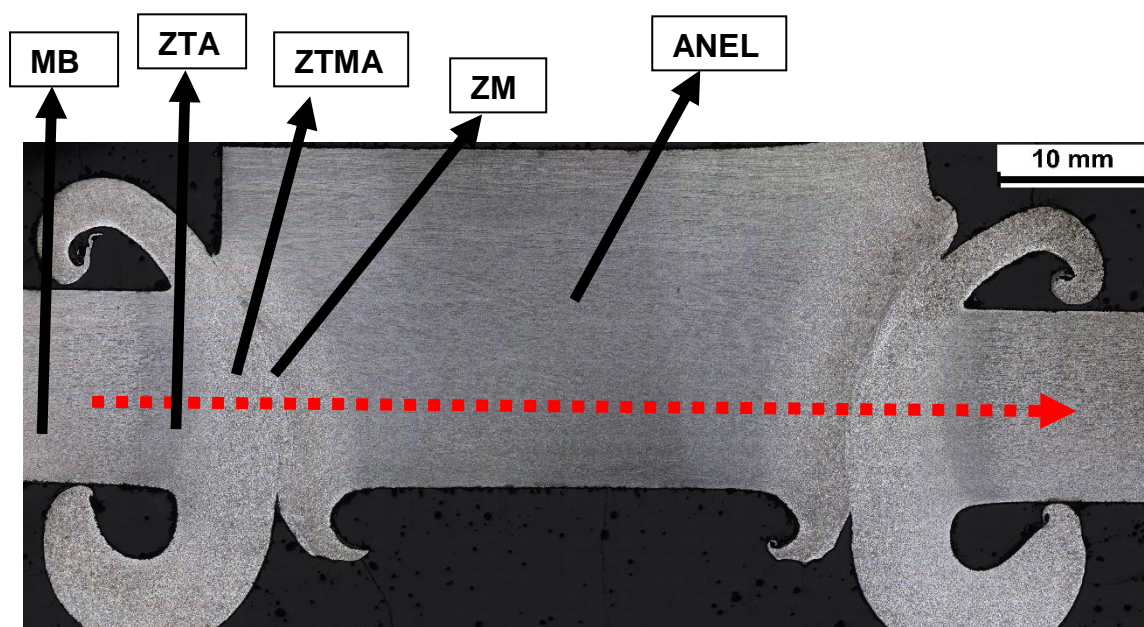


Figura 10: Localização do perfil de microdureza realizado nas amostras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e as avaliações das quatro juntas soldadas pertencentes a este trabalho, na qual foram produzidas através do processo de soldagem por fricção com anel intermediário. Serão apresentadas as caracterizações metalográficas, como teor de inclusões, análise macro e microestrutural e também os ensaios de microdureza das amostras. Com estes resultados se torna possível a avaliação e a comparação entre as propriedades estruturais e mecânicas das amostras produzidas.

5.2 Análise Macroestrutural

As imagens macroestruturais das juntas soldadas estão representadas nas figuras de 11 a 14.

Com a análise macroestrutural das amostras foi possível verificar a qualidade da união realizada, identificar todas as regiões presentes nas amostras após o processamento e verificar as extensões das zonas termicamente afetadas. Estas regiões foram classificadas como: Material base do tubo (MB), Zona termicamente afetada (ZTA), Zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e Zona de ligação ou mistura (ZM).

A amostra 2 foi a que apresentou menor ZTA, quando comparado as outras amostras. Isto pode ser explicado devido ao fato da força compressiva aplicada nesta amostra ser superior a todas as outras juntas soldadas analisadas neste trabalho.

Além da identificação das regiões presentes na amostra 4, a macrografia evidencia também uma falta de preenchimento nas Zonas de Misturas entre o tubo e o anel, conforme pode ser visualizado em maior aumento na figura 15. Este defeito é decorrente do baixo consumo de material utilizado para a realização da solda, visto que esta amostra foi a que se utilizou menor consumo de material dentre todas. Estes vazios existentes na solda fazem com que as propriedades da junta sejam muito prejudicadas e, com isso, não se tornando relevante a continuação de sua análise.

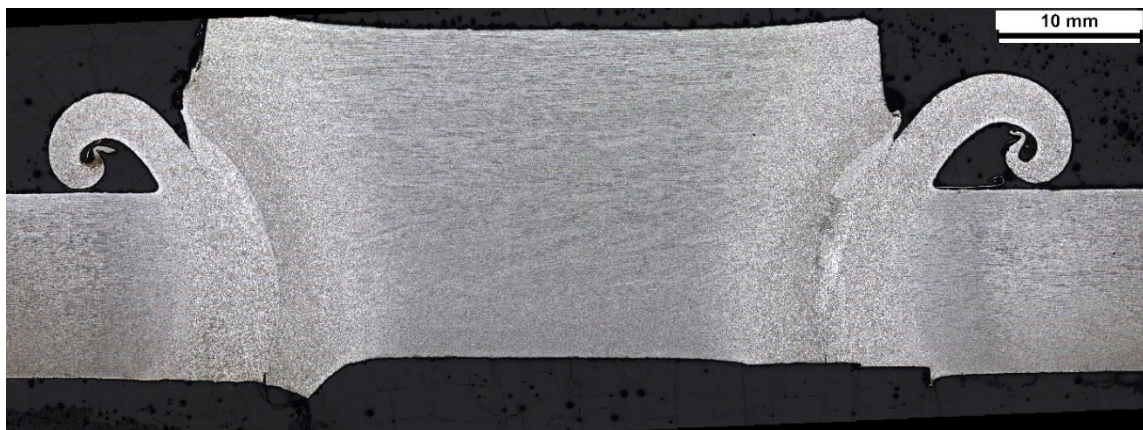


Figura 11: Macrografia da amostra 1.

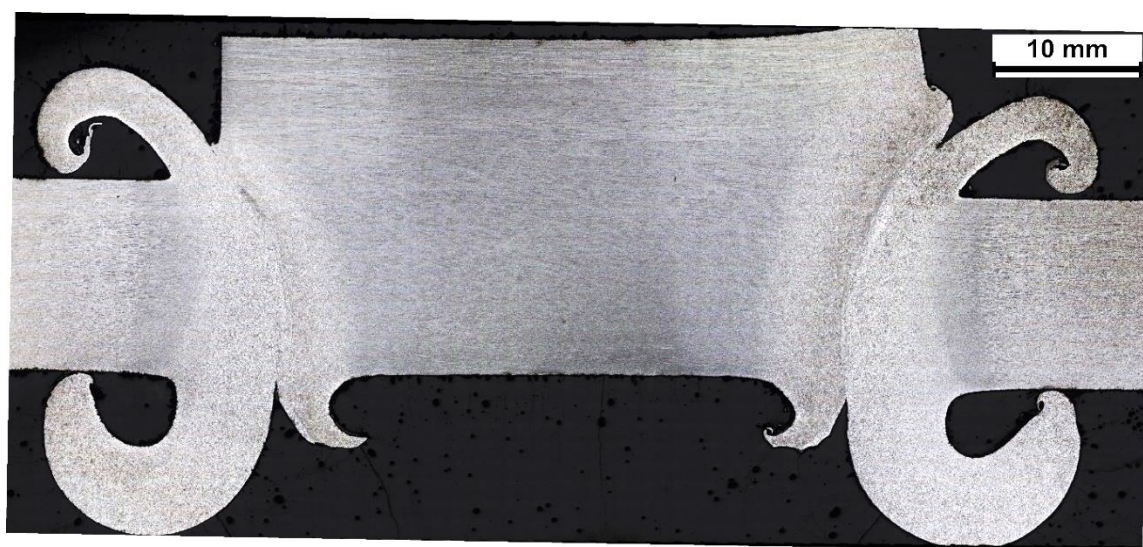


Figura 12: Macrografia da amostra 2.

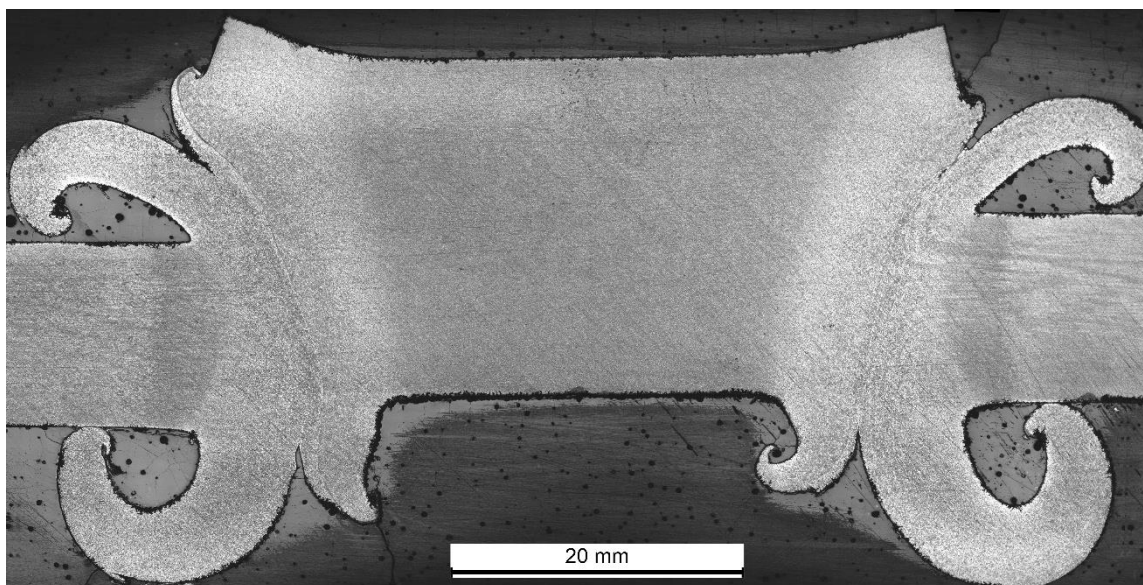


Figura 13: Macrografia da amostra 3.

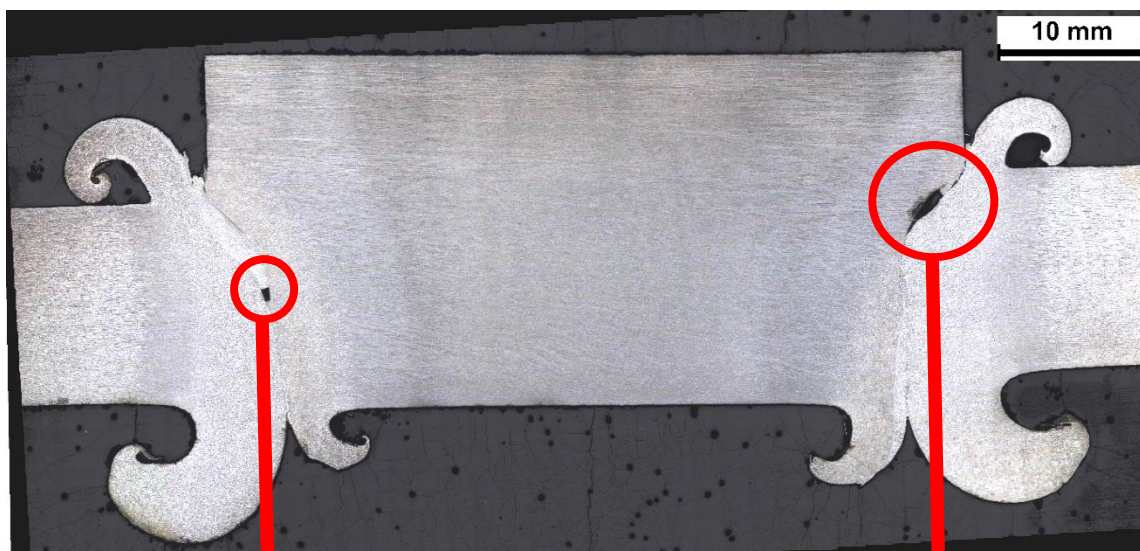


Figura 14: Macrografia da amostra 4.

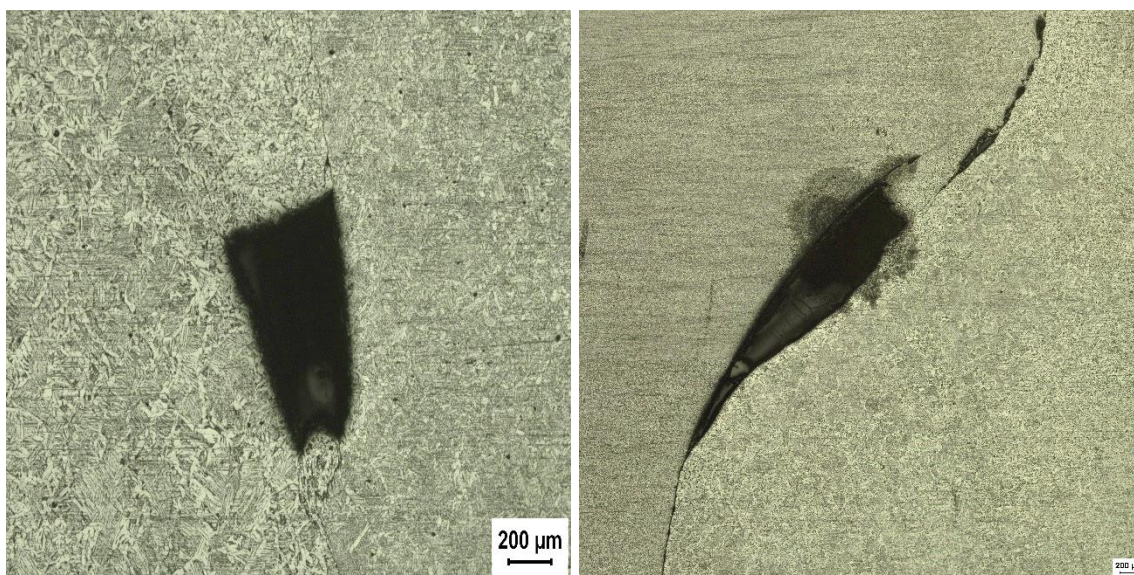


Figura 15: Falta de preenchimento, em maior aumento, das regiões de ligação entre o tubo e o anel.

5.3 Análise micrografica

5.3.1 Análise de inclusões

As amostras após serem polidas, e antes de passarem pelo ataque químico seletivo, foram submetidas a uma análise para avaliar o teor de inclusões presente nos materiais. O tubo utilizado, de acordo com a tabela 1, foi classificado como aço microligado API 5L X65, apresentando um baixíssimo teor de fósforo (P) e enxofre (S). Com isso, todas as análises realizadas

apresentaram amostras livres de quantidades significativas de inclusões, sendo classificados dentro da série fina A1 e D1, de acordo com a norma ASTM E45, para inclusões de sulfetos e óxidos, respectivamente. A redução dos teores desses elementos tende a melhorar a tenacidade à fratura do aço em questão.

5.3.2 Análise microestrutural

A análise microestrutural tem o objetivo de caracterizar metalurgicamente cada região da junta soldada, apresentando as diferentes fases presentes ao longo da amostra. Mesmo não havendo fusão no processo de solda por fricção, a temperatura atingida deve ser suficientemente alta para que a plastificação dos materiais ocorra. Essas temperaturas elevadas são capazes de provocar as transformações de fases ao longo da junta, principalmente nas regiões mais próximas a zona de mistura que é onde o atrito entre os materiais é gerado. A taxa de resfriamento e o nível de deformação também são importantes por determinar as diferentes microestruturas que podem ser formadas, causando assim uma diferença de resistência ao longo da amostra.

5.3.2.1 Amostra 1

A amostra 1 foi produzida com uma taxa de deslocamento inicial de 0,05mm/s, com um consumo de material (tubo) de 15mm e uma taxa de carregamento axial de 5kN/s.

Os tamanhos das zonas termicamente afetadas foram realizados a partir da macrografia utilizada, com o auxílio do software ImageJ. Essas medidas estão listadas abaixo.

ZTA-MB: 11,50mm

ZTMA-MB: 6mm

ZTA-ZM: 7mm

ZTMA-ZM: 4mm

Através do ataque químico seletivo com o reagente Nital 2%, foi possível observar que o material base do tubo apresentou uma microestrutura composta por ferrita (cor clara) e perlita (cor escura) ambas alinhadas no sentido de laminação, conforme mostra a figura 16. Essa é uma microestrutura comumente encontrada nos aços de alta resistência e baixa liga que possuem um baixo teor de carbono.

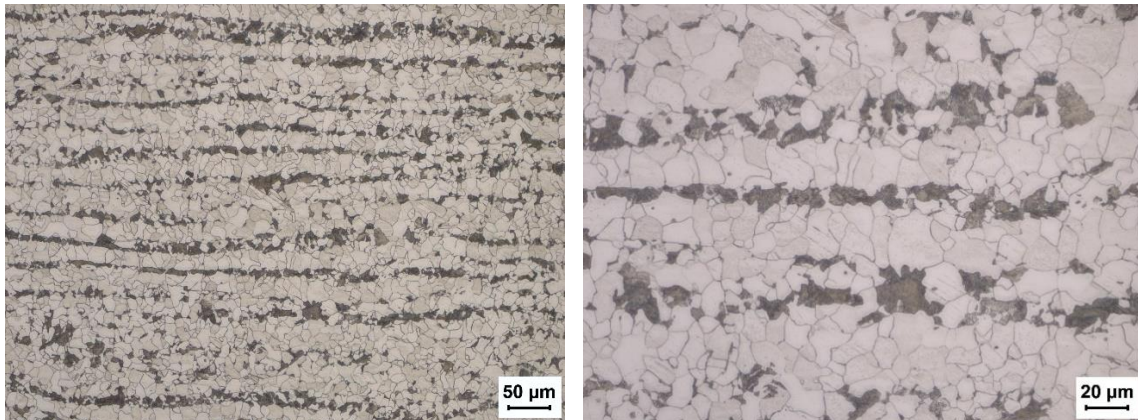


Figura 16: Micrografia do material base. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

As zonas afetadas pelo calor do atrito entre os componentes tiveram uma microestrutura modificada devido ao aumento da temperatura. A ZTA do tubo apresentou uma microestrutura semelhante ao do material base, porém com uma orientação aleatória e com um aumento significativo do tamanho de grão. Isso se deve pelo fato de que essa zona passou pelo processo de recristalização, com o aumento da temperatura, e ao ser resfriado acabou por formar grãos mais grosseiros. Já a ZTMA apresentou a formação de bainita, juntamente com a presença de diversas morfologias da ferrita (equiaxial, acicular e Widmanstätten) além da presença de perlita, todos deformados devido ao atrito do processo. As figuras 17 e 18 apresentam as microestruturas formadas, respectivamente.

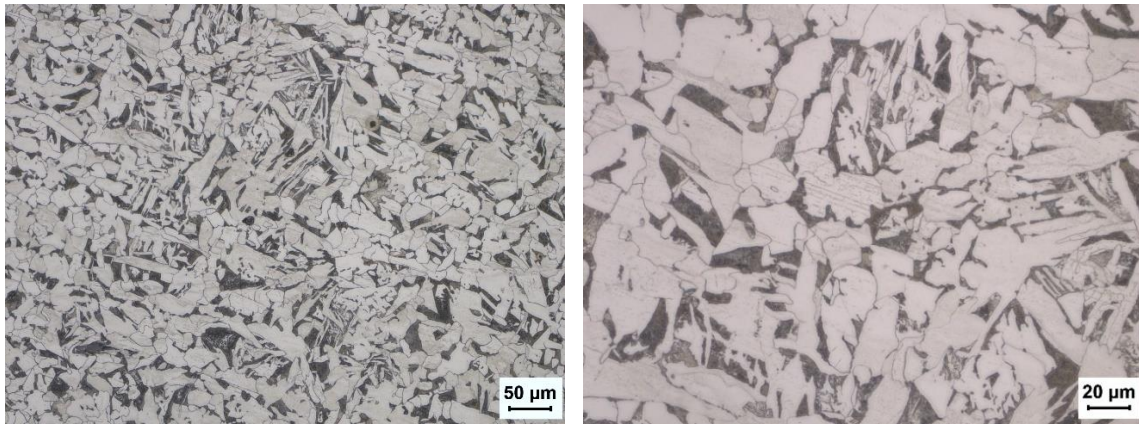


Figura 17: Caracterização da ZAC do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

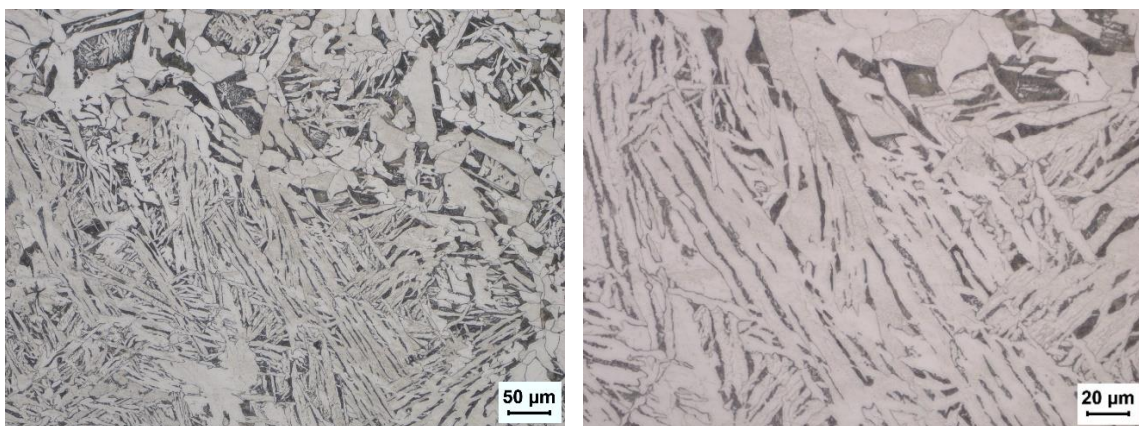


Figura 18: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

As mesmas microestruturas foram encontradas nas zonas afetadas termicamente do lado entre a interface e o anel, porém numa extensão reduzida. As figuras 19 e 20 comprovam o fato.

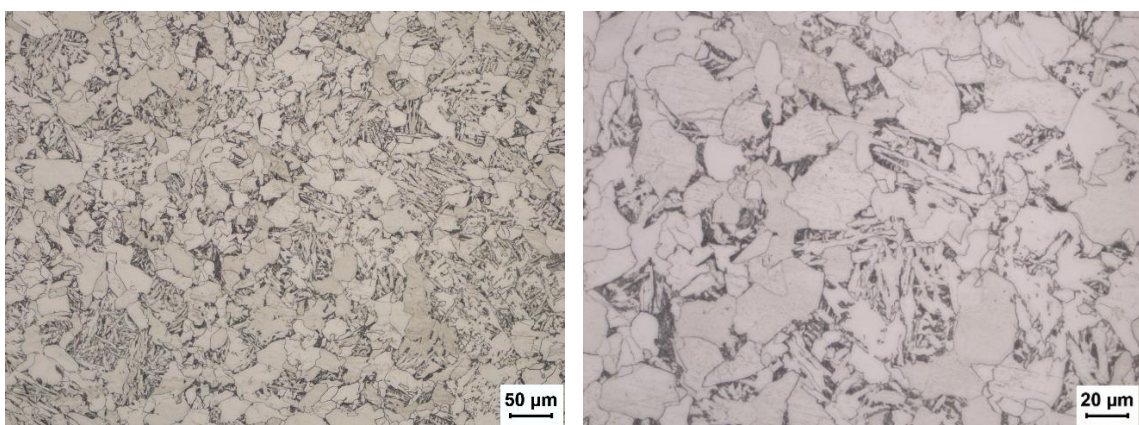


Figura 19: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

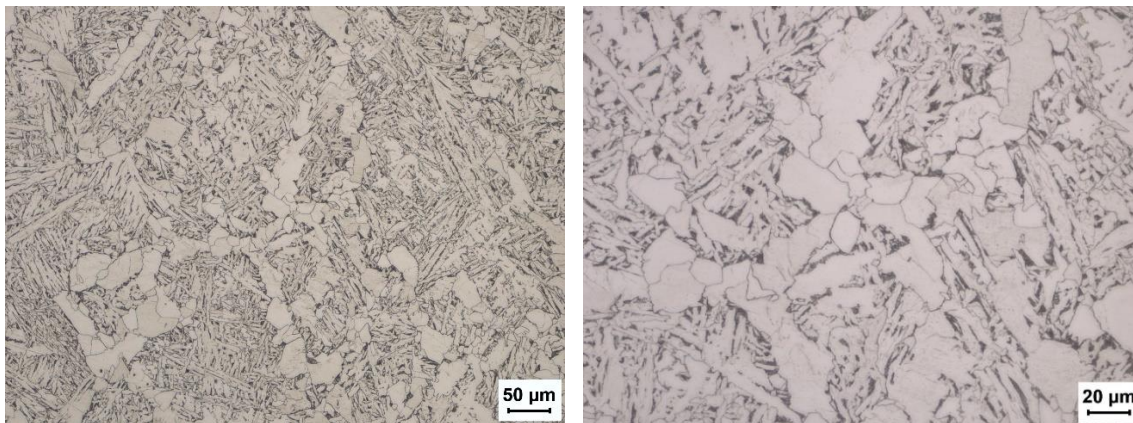


Figura 20: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A figura 21 apresenta a zona de mistura entre o material do tubo e o anel central desta amostra. Com essas micrografias foi possível analisar a boa aderência metalúrgica ocorrida no processo. A esquerda encontra-se o tubo e a direita o anel.

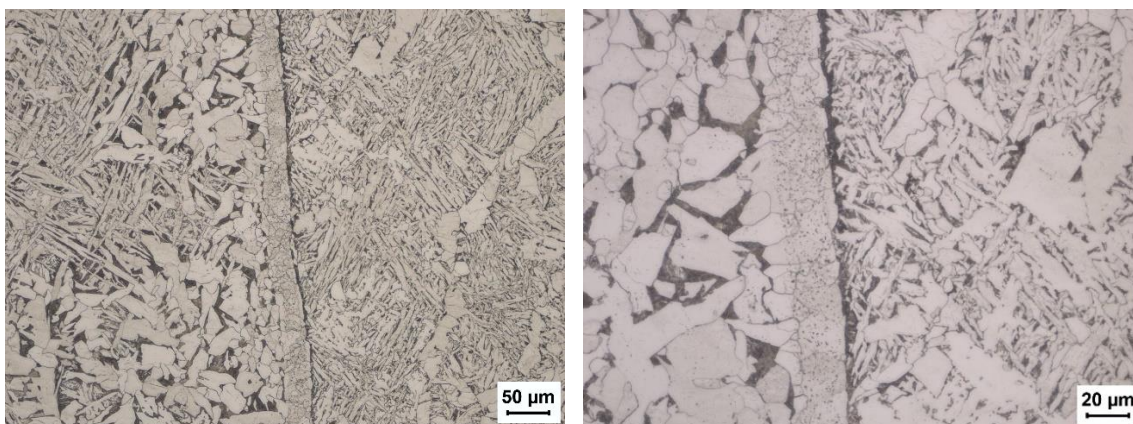


Figura 21: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

5.3.2.2 Amostra 2

Amostra produzida a uma taxa de deslocamento inicial de 0,05mm/s, com consumo do material do tubo de 15mm e com uma taxa de carregamento axial de 10kN/s. Nesta amostra foi possível analisar que as zonas afetadas pelo calor e as zonas termo mecanicamente afetadas foram reduzidas em relação a amostra 1, como apresentado abaixo.

ZTA-MB: 9mm

ZTMA-MB: 3mm

ZTA-ZM: 5mm

ZTMA-ZM: 2,5mm

Isso significa dizer que as zonas frágeis da junta soldada foram minimizadas, uma vez que essas regiões apresentam o maior valor de dureza na amostra (veremos na sequência do trabalho).

O material base do tubo apresentou uma microestrutura composta por ferrita equiaxial e perlita, como já era esperado por se tratar do mesmo material da amostra anterior. O bandeamento apresentado segue o sentido de laminação decorrente do processo de fabricação, como mostra a figura 22.

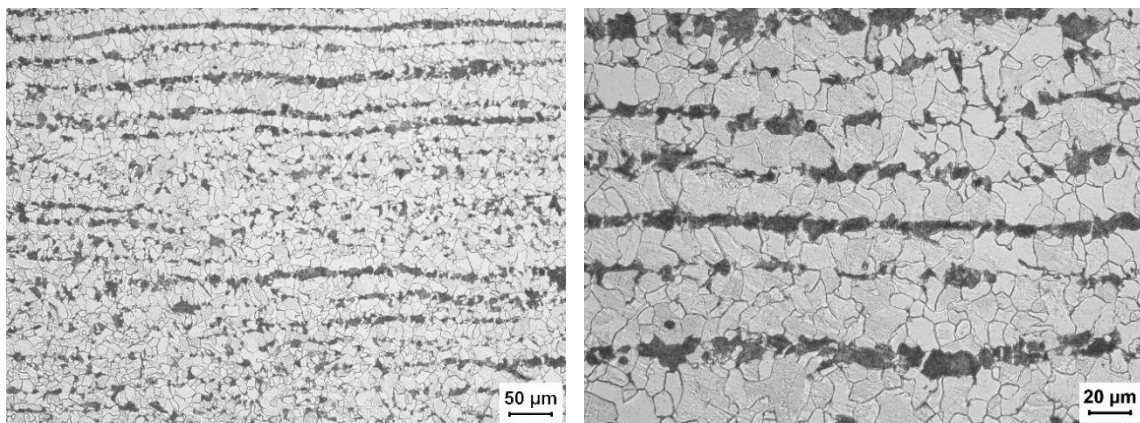


Figura 22: Caracterização do MB do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A ZTMA do tubo apresentou uma microestrutura composta por ferrita equiaxial, ferrita de Widmanstätten, ferrita acicular, colônias de perlita e bainita superior, enquanto a ZTA apresentou microestrutura predominantemente ferrítica (equiaxial e de Widmanstätten) e perlítica, com grãos ferríticos superiores ao do material base. As figuras 23 e 24 evidenciam tal análise, respectivamente.

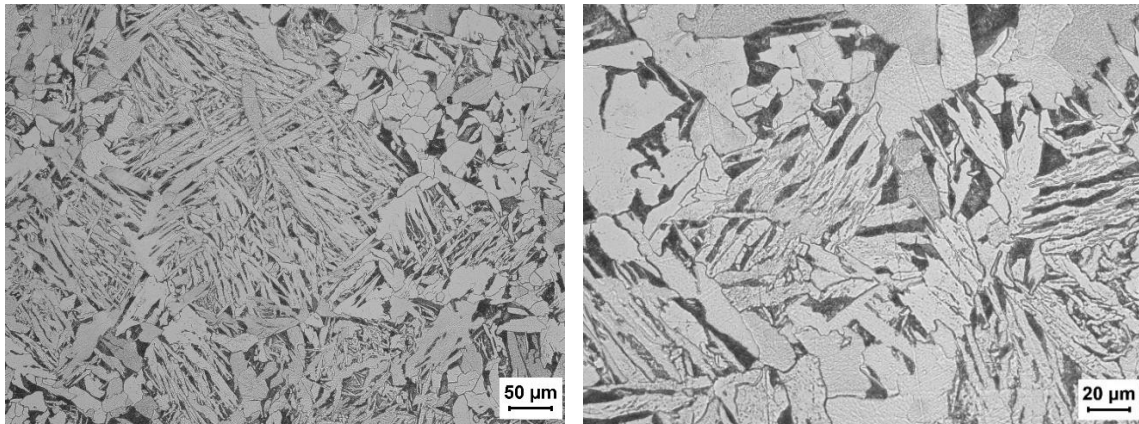


Figura 23: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

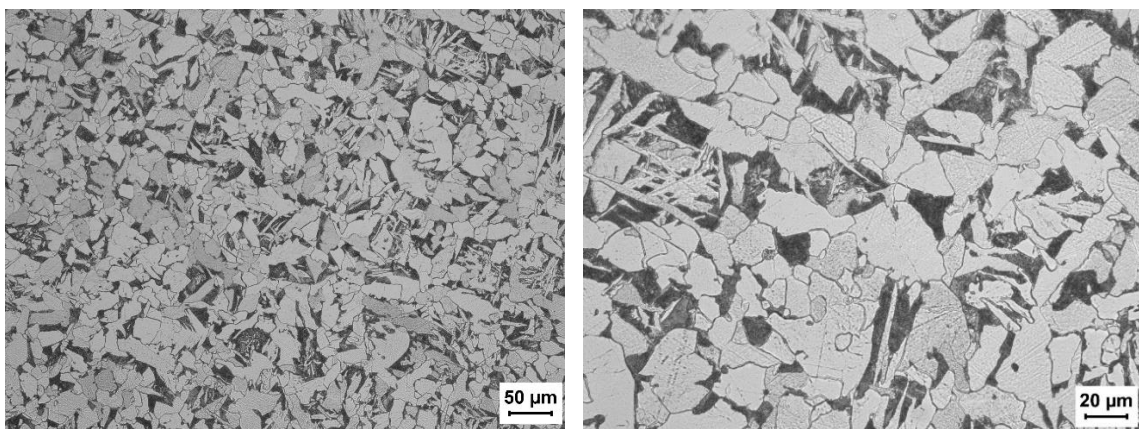


Figura 24: Caracterização da ZTA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A ZTMA do anel é composta de ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten, bainita superior e com algumas colônias de perlita (figura 25). Já a ZTA que não sofreu deformação mecânica apresentou microestrutura composta por ferrita e perlita de grão levemente grosseiros (figura 26).

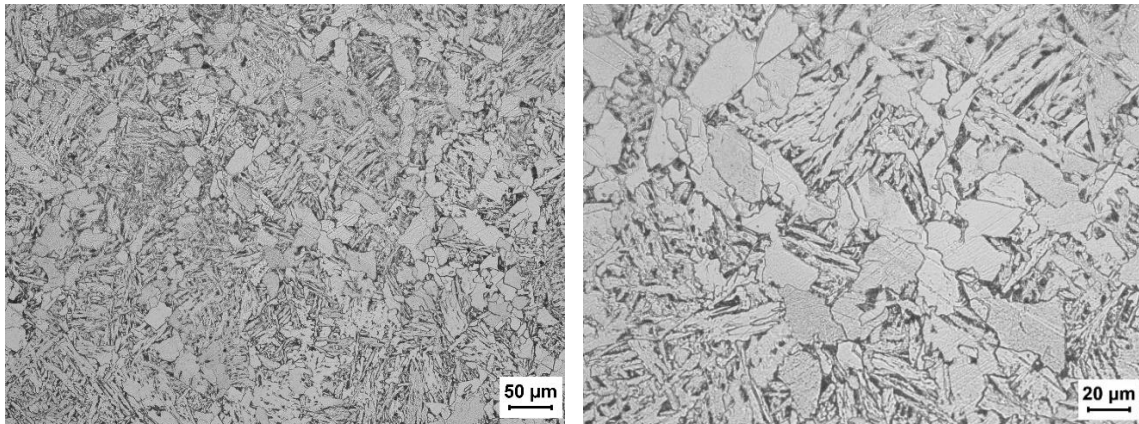


Figura 25: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

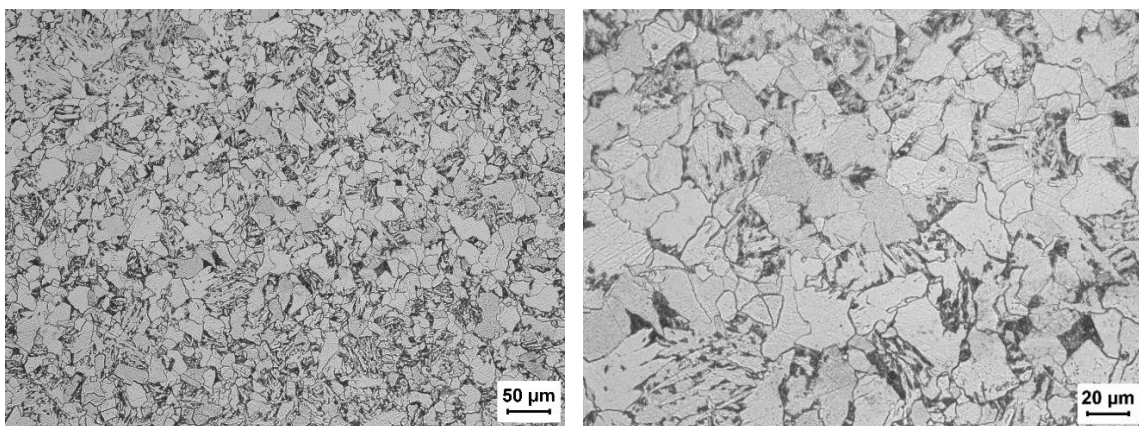


Figura 26: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A zona de mistura entre o tubo e o anel pode ser verificado na figura 27. Com a análise das imagens fica clara a boa ligação metalúrgica envolvida na amostra.

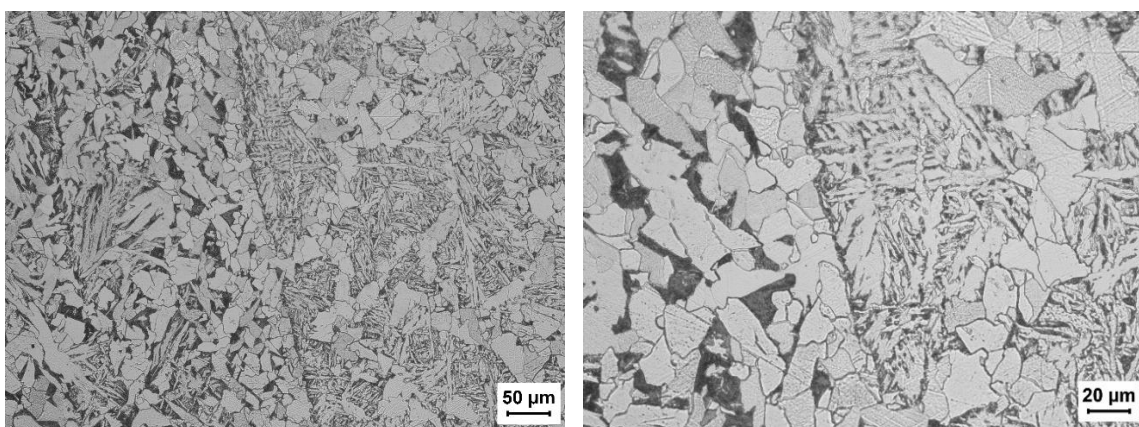


Figura 27: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

5.3.2.3 Amostra 3

A amostra 3 foi produzida com o maior consumo de tubo e uma força compressiva intermediária, em comparação com as outras duas amostras já apresentadas. O consumo de material total utilizado foi igual a 20mm, enquanto a força axial utilizada foi de 7,5kN/s. A taxa de deslocamento inicial permaneceu sendo de 0,05mm/s.

A medidas das zonas afetadas termicamente e termo mecanicamente foram basicamente intermediárias em relação as amostras anteriores, sendo a ZTA maior que comparado a amostra 2 e menor em relação a amostra 1. As extensões das regiões da junta soldada são apresentadas abaixo.

ZTA-MB: 10mm

ZTMA-MB: 3,5mm

ZTA-ZM: 6,5mm

ZTMA-ZM: 2,5mm

O metal de base do tubo apresentado seguiu, como já esperado, a mesma microestrutura das outras duas amostras sendo esta composta de grãos ferríticos equiaxiais refinados e colônias de perlita, seguindo o sentido de laminação (figura 28).

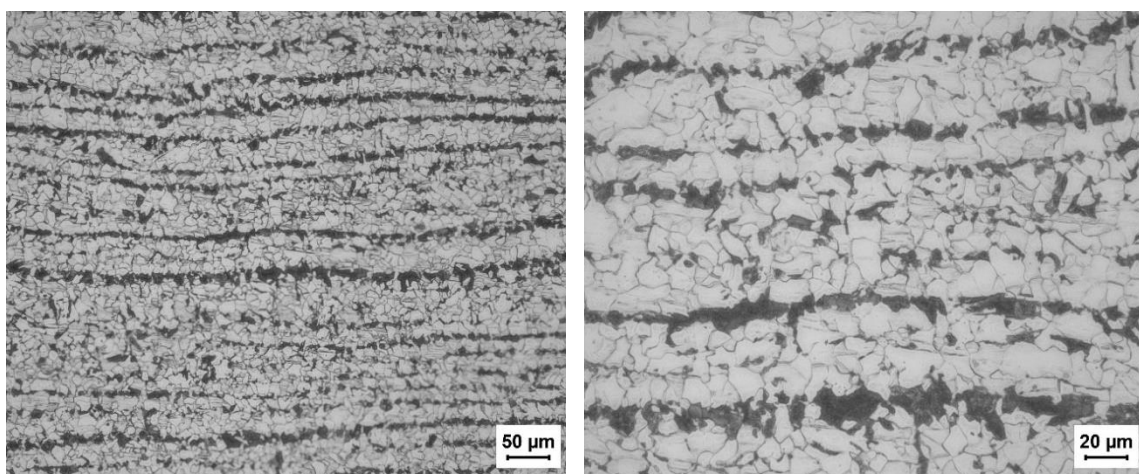


Figura 28: Caracterização do MB do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A zona somente afetada pelo calor do tubo apresentou microestrutura predominantemente de ferrita equiaxial e perlita (figura 29), enquanto a zona termo mecanicamente afetada apresentou grãos ferrítico acicular, de Widmanstätten e equiaxiais, colônias de perlita e bainita superior (figura 30).

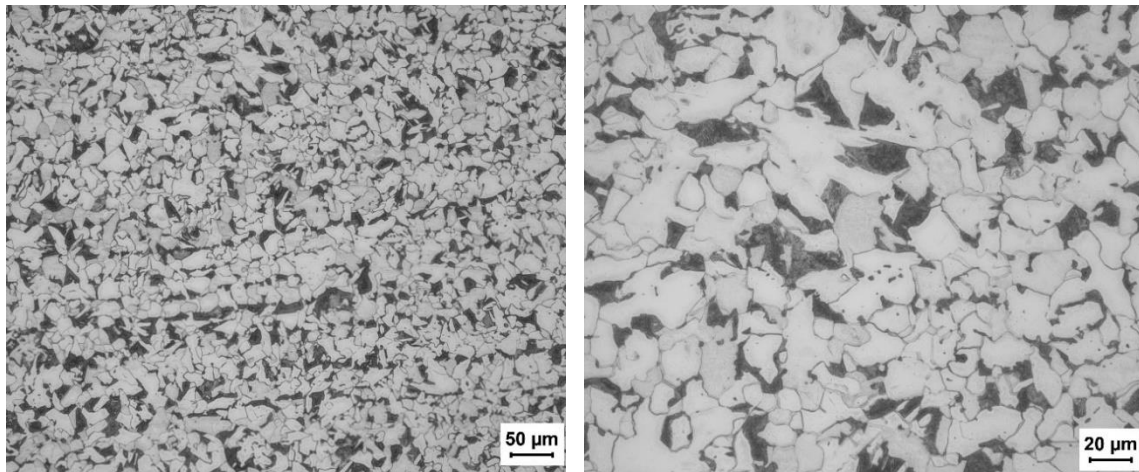


Figura 29: Caracterização da ZTA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

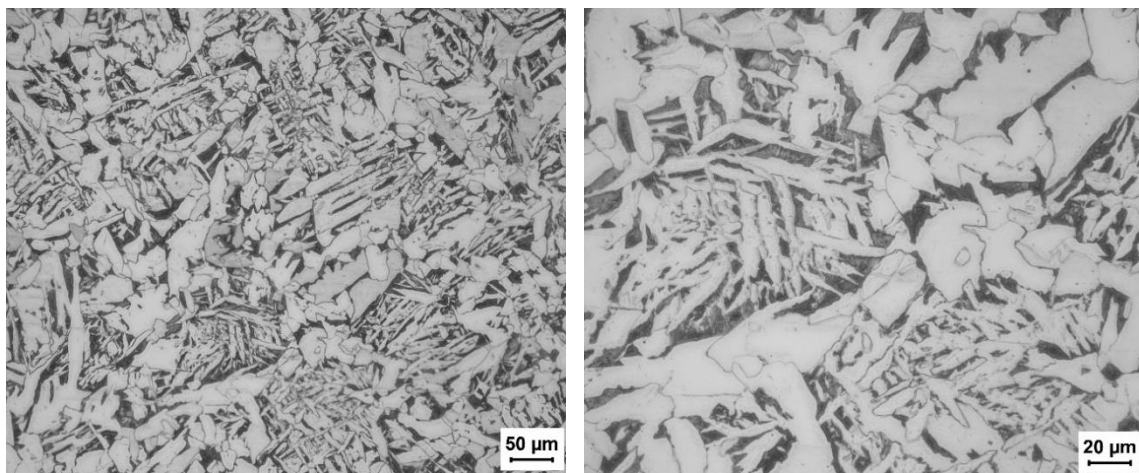


Figura 30: Caracterização da ZTMA do tubo. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A ZTA e a ZTMA do anel são mais estreitas e apresentaram grãos mais refinados em comparação com as zonas afetadas do tubo, porém com microestruturas semelhantes, conforme mostra as figuras 31 e 32 respectivamente.

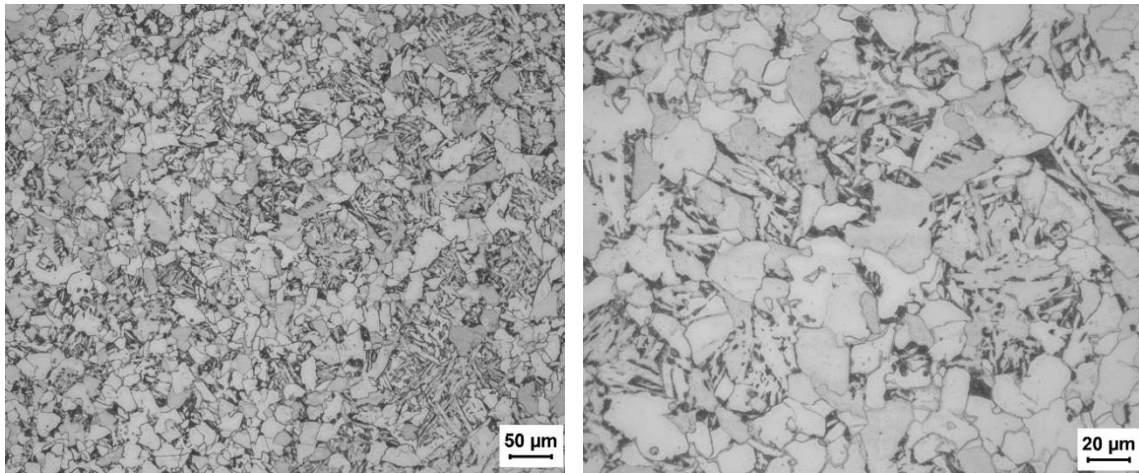


Figura 31: Caracterização da ZTA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

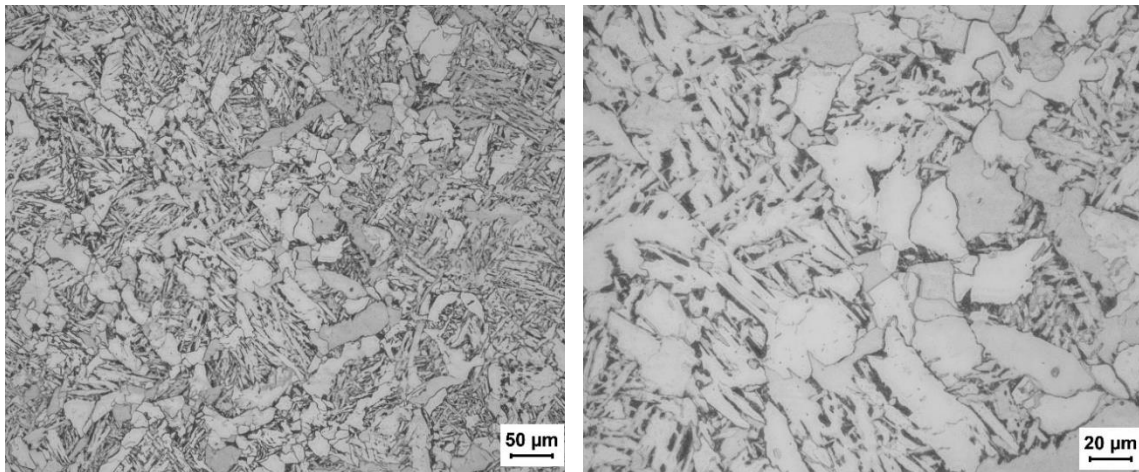


Figura 32: Caracterização da ZTMA do anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

A zona de mistura da junta soldada entre o tubo e o anel pode ser melhor visualizado na figura 33. De acordo com as micrografias pode-se analisar que a união metalúrgica foi realizada de maneira eficaz e satisfatória, produzindo uma solda de boa qualidade.

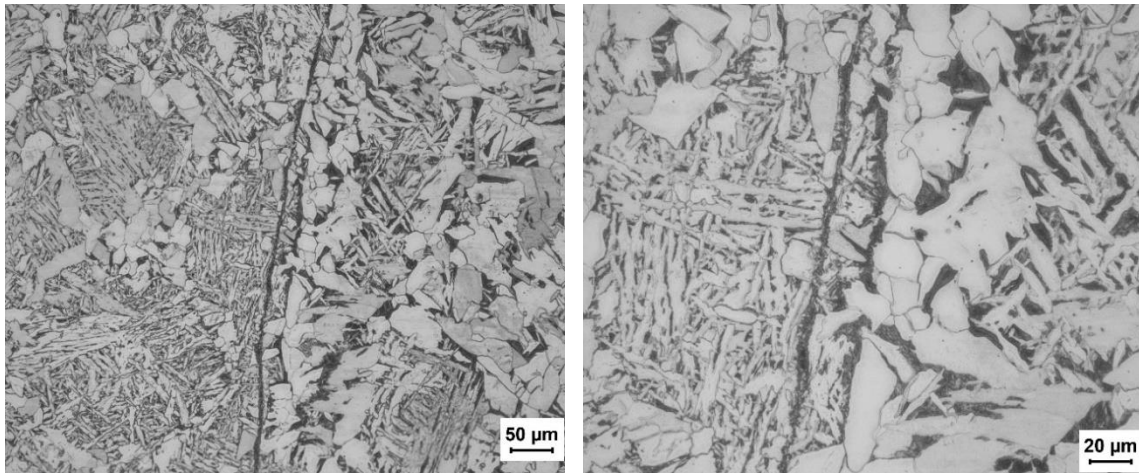


Figura 33: Caracterização da ZM do tubo-anel. Ataque Nital 2%. A esquerda, MO em 200x. A direita, MO em 500x.

5.4 Ensaio de microdureza

A partir do ensaio de microdureza foi possível iniciar uma caracterização mecânica das juntas soldadas. Os perfis iniciaram no material base do lado esquerdo dos tubos partindo no sentido da outra extremidade, passado pelas zonas termicamente afetadas, conforme já mostrado na figura 10. Todos os perfis foram realizados na parte central das amostras e os valores encontrados são apresentados nas figuras 34, 35 e 36.

No eixo horizontal é apresentado a distância, em mm, entre as endentações de um ponto a outro, enquanto no eixo vertical é apresentado o valor da dureza na escala Vickers (HV).

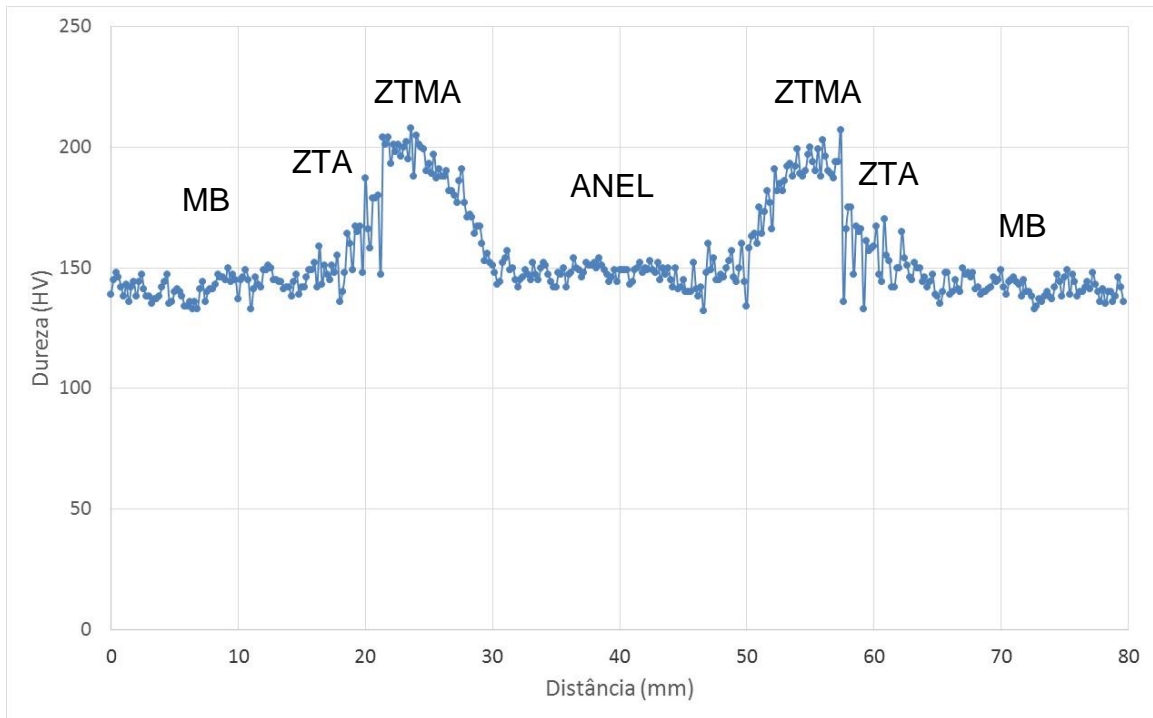


Figura 34: Perfil de microdureza da amostra 1.

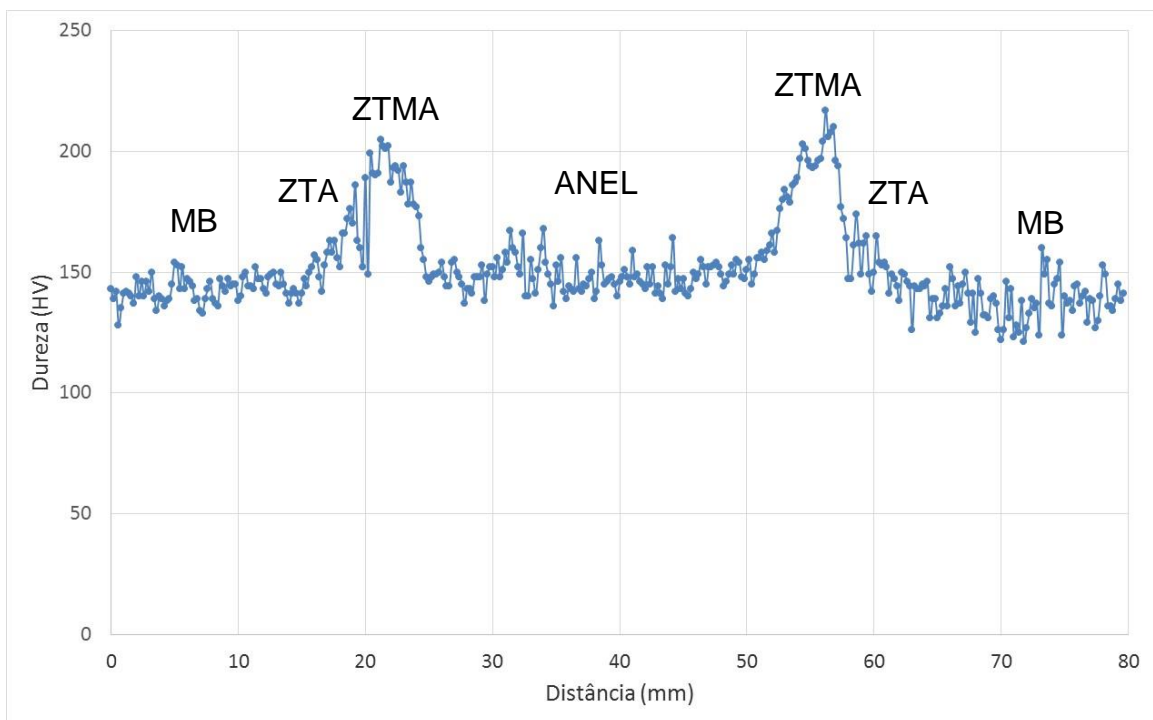


Figura 35: Perfil de microdureza da amostra 2.

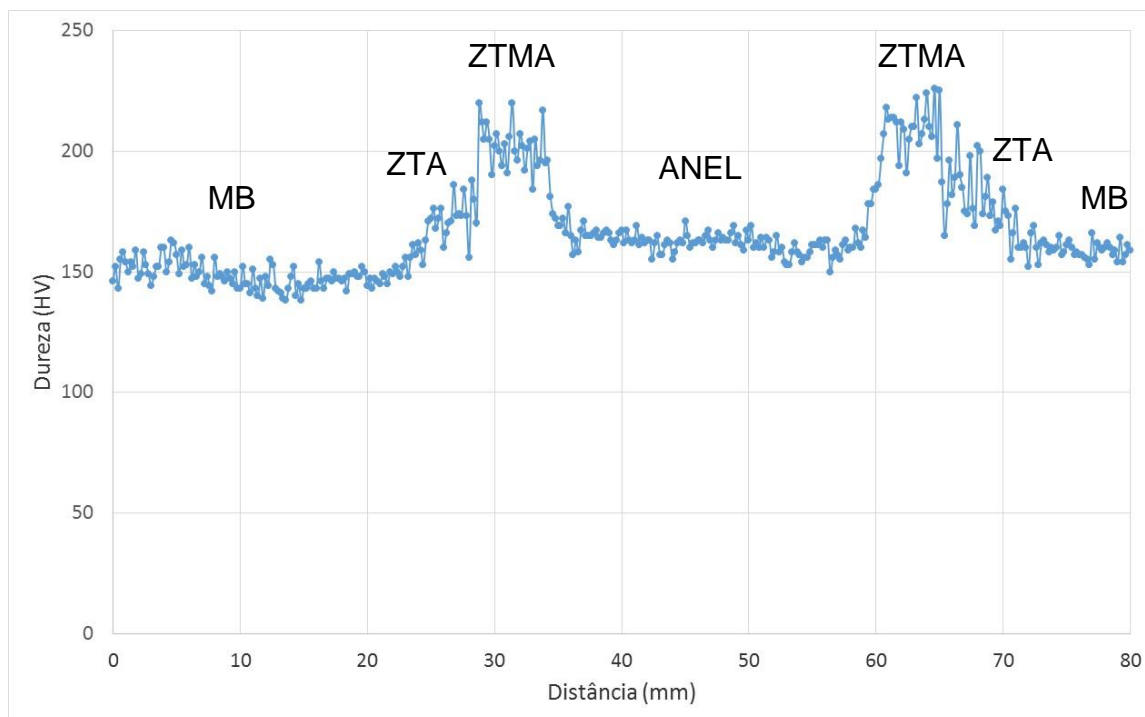


Figura 36: Perfil de microdureza da amostra 3.

Todas as amostras apresentaram valores de dureza semelhantes, aumentando gradualmente quanto mais perto das zonas de mistura. O material base das juntas soldadas apresentou um valor médio de 150 HV enquanto as zonas termicamente afetadas apresentaram picos de entre 210 e 230 HV, ambos valores aceitáveis de acordo com a norma API 5L. Esse aumento de dureza nas regiões da ZTA e da ZTMA são explicados pelas mudanças microestruturais e pelas deformações que ocorreram nestas regiões.

A amostra 2 foi a que apresentou uma faixa mais estreita de picos de dureza devido a menor extensão das zonas afetadas pelo calor do atrito, sendo isto um ponto importante em relação a tenacidade a fratura.

6. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas neste trabalho e nos resultados apresentados podemos concluir que:

- O processo de soldagem por fricção com anel intermediário se mostrou de grande competência na união de tubos produzidos com aço API 5L X65. Dentre os parâmetros utilizados neste trabalho, o que apresentou a solda de melhor qualidade foi a da amostra 2, soldada com uma força axial de 10 kN/s e um consumo de tubo igual a 15mm, uma vez que esta amostra se mostrou livre de defeitos e apresentou uma menor extensão da zona termicamente afetada, aproximadamente 20% menor quando comparada com as outras amostras.

- As amostras 1 e 3, soldadas, respectivamente, com força compressiva axial de 5 e 7,5kN/s e deslocamento de tubo de 15 e 20mm, apresentaram um desempenho intermediário, uma vez que não houve defeitos nas soldas, porém uma maior zona termicamente afetada foi encontrada em relação a amostra 2.

- A amostra 4 utilizou em seus parâmetros o menor deslocamento de tubo (consumo do componente igual a 10mm) e uma força compressiva intermediária de 7,5kN/s, causando uma falta de preenchimento na zona de mistura e, conseqüentemente, apresentando o pior desempenho entre as amostras analisadas.

- Pelo fato do aço API 5L X65 possuir baixo teor de fósforo e enxofre, todas amostras analisadas não apresentaram teores de inclusões significativas.

- O material base do tubo apresentou microestrutura composta por grãos ferríticos equiaxiais e colônias de perlita, com uma dureza média de 150 HV.

- Todas as amostras analisadas apresentaram na ZTMA microestrutura composta por ferrita equiaxial, ferrita acicular e ferrita de Widmanstätten, perlita e bainita superior, enquanto as ZTAs apresentaram microestruturas semelhantes ao MB, porém com grãos mais grosseiros.

- As amostras apresentaram valores aceitáveis de acordo com a norma API 5L, com maiores valores de dureza nas zonas termicamente afetadas do que no material base. Isso é explicado pela formação da fase de maior dureza e pela deformação causada pelo atrito naquelas regiões.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser complementado com a realização das seguintes sugestões propostas:

- Realização de mais ensaios mecânicos, como testes de tração e impacto;
- Realização de juntas soldadas com outras variações de parâmetros;
- Soldar e realizar as caracterizações mecânica e metalúrgica em diferentes aços da classe API;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Gorni, A., Silveira, J., & Reis, J. (2009). Metalurgia dos aços microligados usados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro. *Tubo & Companhia*, 52-63.
- 2 Silva, A. (2010). *Aços e ligas especiais*. São Paulo: Blucher.
- 3 Specification for Line Pipe (44^a ed.). (2007). Washington: American Petroleum Institute.
- 4 Cruz, C. (2012). Aços de alta resistência e baixa liga em oleodutos e gasodutos. *Science and Technology*, 20-24.
- 5 Grong, O., & Matlock, D. (1986). Microstructural development in mild and low-alloy steel weld metal. *International Materials Reviews*, 27-48.
- 6 Monte, I. (2013). Caracterização Microestrutural do aço API 5L X65 soldado por feixe de elétrons com diferentes aportes térmicos.
- 7 Honeycombe, R. W. (1982). *Aços, microestruturas e propriedades*. Cambridge, UK: Elsevier.
- 8 Akselmen, O., Grong, O., & Rorvik, G. (1990). Embrittlement phenomena in the grain coarsened heat affect zone of low carbon microalloyed steel. *Scandinavian Journal Materials Science and Technology of Metallurgy*, 258-264.
- 9 Silva, M. (2009). Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80. Tese de mestrado.
- 10 Gorni, A. (1999). Cálculo da temperatura de não-recristalização para aços microligados, em função da interação entre a precipitação e recristalização da austenita. *Escola de Minas*, 21-25.

- 11 Plaut, R., Gorni, A., Nakashima, J., Pereira, M., & Silveira, J. (2009). Estudo das propriedades mecânicas do aço API X70. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 7-12.
- 12 Handbook, A. (1994). *Welding, Brazing and soldering* (Vol. Vol. 6). United States: ASM International.
- 13 Hillenbrand, H.-G., Gräf, M., & Kalwa, C. (2001). Development and production of high strength pipeline steels. *Niobium*, 1-28.
- 14 Mattei, F. (2011). Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção. Tese de mestrado.
- 15 De Faria, P., & Bacarense, A. (2003). Soldagem por fricção. Tese de mestrado.
- 16 Sbalchiero, J. A. (2016). Substituição da soldagem MAG por soldagem por fricção em tubos hidráulicos. Tese de mestrado, 1-88.
- 17 Afschrift, P., Faes, K., & Patrick De Baets. (2004). Friex: friction welding of pipeline girth welds. *Pipeline world*, 23-27.
- 18 Chludzinski, M. (2015). Processo inovador de soldagem de dutos por fricção. 13ª Conferência sobre tecnologia de equipamentos.
- 19 Mattei, F., Kroeff, F., Chludzinski, M., Santos, R., Frainer, V., & Strohaecker, T. (2015). Máquina de solda por fricção a topo em elementos tubulares. 1-23.
- 20 Landell, R. M. (2016). Análise do fluxo de material no processo de soldagem por fricção com pino consumível. Tese de mestrado, 1-100.
- 21 Andrade, L. V. (2011). Projeto e construção de máquina de solda por atrito e análise de soldas dissimilares. Tese de mestrado, 1-98.
- 22 Pissanti, D. e. (2015). Development of a friction welding machine for pipes with rotatory ring and evaluation of a stainless steel duplex UNS32205 pipe weld joint. Rio pipeline conference & exposition.