



Associação Brasileira de Soldagem

XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
III CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
Joinville/SC Agosto de 2025

Avaliação de Juntas Soldadas pelo Processo MIG de Aços Inoxidáveis Austenítico 316L e Duplex 2205 para Recipientes de Rejeitos Nucleares Alocados em Poço de Descarte

(Evaluation of MIG Welded Joints of 316L Austenitic and 2205 Duplex Stainless Steels for Nuclear Waste Containers Located in a Borehole Disposal)

Ronnie Silva dos Anjos¹, José Castillo¹, Jesualdo Luiz Rossi¹, Mauricio David Martins das Neves¹

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil

anjos.ronnie@gmail.com, josecastillo@uol.com.br, jelrossi@ipen.br, mdneves@ipen.br

Resumo

Nesse trabalho, estudou-se a aplicação do aço inoxidável duplex AISI 2205 como material de base (MB) para fabricação de recipientes de rejeitos nucleares alocados em poço de descarte, em razão de suas melhores propriedades mecânicas, em relação ao aço inoxidável austenítico AISI 316L, atualmente usados na fabricação destes recipientes. Tal estudo baseou-se na soldagem do aço duplex 2205 pelo processo MIG, com aplicação de dois aportes térmicos, 1,00 KJ/mm e 1,37 KJ/mm, e na avaliação das juntas soldadas a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos. Os resultados para o aço duplex 2205 das amostras soldadas com o maior aporte mostraram maior limite de resistência a tração e energia absorvida ao teste de impacto Charpy, após ensaios mecânicos. Isso deveu-se ao fato, de que o aporte aplicado de 1,37 KJ/mm favoreceu a formação da austenita, em maior quantidade na junta, sendo esta uma fase com maior resistência mecânica em relação à ferrita. A utilização do aporte de 1,37 KJ/mm indicou uma maior tendência para a corrosão intergranular na interface entre os grãos de ferrita e austenita, propiciou juntas soldadas com um maior balanceamento entre as fases ferrítica e austenítica e maior resistência mecânica em relação as juntas soldadas com o menor aporte térmico e às juntas do aço AISI 316 L.

Palavras-chave: MIG/MAG. Aporte Térmico. AISI 2205. Propriedades Mecânicas. Microestrutura.

Abstract: In this work, the application of duplex stainless steel AISI 2205 was studied as a base material (BM) for the manufacture of nuclear waste containers allocated in a borehole disposal, due to its better mechanical properties, in relation to the austenitic stainless steel AISI 316L, currently used in the manufacture of these containers. This study was based on the evaluations of welded joints from destructive and non-destructive tests of duplex steel 2205 welded by the MIG process, with the application of two heat inputs, 1.00 KJ/mm and 1.37 KJ/mm, in relation to AISI 316L joints welded with 0.85 KJ/mm. The results for duplex steel 2205 of the samples welded with the higher heat input showed a higher tensile strength limit and absorbed energy in the Charpy impact test, after mechanical tests. This was due to the fact that the applied input of 1.37 KJ/mm favored the formation of austenite, in greater quantity in the joint, this being a phase with greater mechanical resistance in relation to ferrite. The use of a heat input of 1.37 KJ/mm indicated a greater tendency for intergranular corrosion at the interface between the ferrite and austenite grains, in addition to providing welded joints with a greater balance between the ferritic and austenitic phases and greater mechanical resistance, in relation to welded joints with the lowest heat input and to AISI 316L steel joints.

Key words: MIG/MAG. Heat Input. AISI 2205. Mechanical Properties. Microstructure.

1. Introdução

De acordo com [1], fontes radioativas seladas são elementos fechados hermeticamente em uma cápsula, ou ligada totalmente a material inativo envolvente, de forma que não possa haver dispersão da substância radioativa em condições normais e severas de uso.

Quando tais fontes entram em desuso, é necessário o seu descarte seguro e permanente, e uma forma que permite um melhor gerenciamento para essas fontes em desuso é a utilização de poços de descarte, os quais são

especialmente construídos com, pelo menos, 30 metros de profundidade para alocar cápsulas em uma embalagem de descarte que consiste em um recipiente robusto de aço inoxidável com revestimento interno de concreto [2].

Os recipientes de descarte, atualmente, são fabricados em aço inoxidável austenítico 316L, os quais precisam do processo de soldagem para a devida união de seus componentes (tampos e costado) [3]. Por existir materiais com propriedades mais interessantes contra corrosão, modo de degradação presente em poços de descarte, justifica-se um estudo com a finalidade de analisar a aplicação de aços de maior resistência a corrosão soldados por um processo apropriado com relação à espessura e produtividade.

O objetivo deste estudo é avaliar e comparar propriedades de juntas do aço duplex 2205 soldadas pelo processo MIG (Metal Inert Gas), com aportes de calor diferentes e em relação ao AISI 316L, visando a fabricação do recipiente de descarte de fontes seladas em desuso a partir desse MB. Para isso, pretende-se avaliar, a partir de ensaios não destrutivos (visual, líquido penetrante, ultrassom, radiografia) e ensaios destrutivos (metalografia, ensaio de tração, impacto, dobramento e dureza), as propriedades das juntas soldadas por meio da variação do aporte de calor teórico.

2. Materiais e Métodos

As primeiras atividades desenvolvidas foram as análises químicas dos materiais de base (MB), as operações de corte e preparação dos chanfros das amostras de chapas laminadas a serem soldadas (duplex AISI 2205 e AISI 316L). A composição química foi avaliada por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDS), utilizando o equipamento Tescan com detector EDS, usando um método semiquantitativo de análise em atmosfera de vácuo. Na Tabela 1 são mostradas as composições químicas dos metais de base, obtidas a partir do ensaio por EDS, os valores das composições químicas obtidos da norma ASME seção II e da especificação do fornecedor Aperam South America. A dimensão da amostra foi de 74 mm de largura e 220 mm de comprimento, com espessura de 6,35 mm para o AISI 316 L, no AISI 2205 a espessura foi de 4,6 mm. A junta foi de topo na posição 1G, o chanfro em V com ângulo de abertura de 60° e abertura de raiz de 3 mm. O material de adição (MA) para o AISI 316 L teve a designação ER308 e diâmetro de 1,2 mm, enquanto para o aço duplex AISI 2205 a designação foi a ER 2209 e diâmetro de 1,2 mm.

Tabela 1 – Composição química dos metais de base

| Composição química (%) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aço inoxidável austenítico 316L | | | | | | | | | |
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo | N |
| Aperam | 0,03 | 2,00 | 0,75 | 0,045 | 0,03 | 16,00-18,00 | 10,00-14,00 | 2,00-3,00 | 0,10 |
| ASME II | 0,03 | 2,00 | 1,00 | 0,045 | 0,03 | 16,00-18,00 | 10,00-15,00 | 2,00-3,00 | - |
| EDS | 0,02 | 1,84 | 0,75 | 0,04 | 0,02 | 16,50 | 9,41 | 2,23 | - |
| Aço inoxidável duplex 2205 | | | | | | | | | |
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo | N |
| Aperam | 0,03 | 2,00 | 1,00 | 0,03 | 0,015 | 22,00-23,00 | 4,50 – 6,50 | 3,00 – 3,50 | 0,14 – 0,20 |
| ASME II | 0,03 | 2,00 | 1,00 | 0,03 | 0,02 | 22,00-23,00 | 4,50 – 6,50 | 3,00 – 3,50 | 0,14 – 0,20 |
| EDS | 0,02 | 1,90 | 0,98 | 0,03 | 0,01 | 22,63 | 4,73 | 3,28 | - |

Posteriormente, foi realizada a soldagem das amostras de aço inoxidável Duplex 2205 com dois aportes térmicos definidos e com um nível de aporte térmico para aço inoxidável 316L, este último serviu para efeito de comparação. Em uma terceira etapa foram realizados Ensaios Não Destrutivos (END), para verificar a integridade da junta soldada, onde foi realizada a usinagem dos corpos de prova para ensaios destrutivos, a fim de avaliar a influência de distintos aportes de calor nas propriedades mecânicas e microestruturais das juntas. Realizou-se ainda ensaio de corrosão intergranular, de acordo com a prática A da norma ASTM A262, a fim de verificar a suscetibilidade dos MB a esse tipo de corrosão. A amostra foi submetida ao ataque eletroquímico com ácido oxálico e avaliação da microestrutura, para análise qualitativa da corrosão ao longo dos contornos dos grãos.

2.1. Soldagem das Amostras

Para a soldagem das amostras, foi usado o sistema robótico de solda ARC Mate 100iD da Fanuc e a fonte de Solda Power Wave R450 da Lincoln Electric, equipamentos alocados em uma estação com mesa fixa Auto-Mate DS, também da Lincoln Electric. A composição química e o diâmetro de arame, além do tipo de gás de proteção foram definidos com base no MB. Um modo de soldagem sinérgico foi utilizado para autoajustar os demais parâmetros e assim obter o resultado ideal. Na Tabela 2 pode ser observado os valores de aporte de calor e demais parâmetros de soldagem utilizados nesse estudo. Para o aço 2205 foram de 1,00 KJ/mm e 1,37 KJ/mm. Conforme [4], esses valores estão na faixa de emprego recomendada, que é de 0,5 KJ/mm a 2,5 KJ/mm. Tais valores de aporte também são próximos aos referenciados em trabalhos como descrito em [5]. Ainda se testou a aplicação do

aporte de calor, de 2,00 KJ/mm, todavia, esse aporte ocasionou na amostra soldada defeitos oriundos do excesso de voltagem e corrente, como penetração excessiva e, também, excesso de respingos. Assim sendo, tal condição não foi selecionada para os ensaios posteriores. Para o austenítico 316L, a faixa de aporte de calor entre 0,5 KJ/mm a 1,5 KJ/mm forneceu os melhores resultados combinados [6], com frações reduzidas de ferrita delta na ZTA (Zona Termicamente Afetada) e na ZF (Zona Fundida), regiões com menor dureza e menor grão austenítico. Assim, neste trabalho, optou-se por aplicar um aporte intermediário de 0,85 KJ/mm.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem para as amostras soldadas

| Amostras | 01 e 02 | 03 e 04 | 05 |
|-----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Metal de base | 2205 | 2205 | 316L |
| Posição | Plana | Plana | Plana |
| Espessura (mm) | 4,6 | 4,6 | 6,35 |
| Ângulo do bisel (°) | 30 | 30 | 30 |
| Abertura de raiz (mm) | 3 | 3 | 3 |
| Gás de proteção (%) | 98 (Ar) - 2 (N ₂) | 98 (Ar) - 2 (N ₂) | 98 (Ar) - 2 (N ₂) |
| Vazão (L/min) | 18 | 18 | 18 |
| Metal de adição | ER2209 | ER2209 | ER308 |
| Polaridade | DC+ (Inversa) | DC+ (Inversa) | DC+ (Inversa) |
| Corrente (A) | 337 | 385 | 380 |
| Tensão (V) | 24,2 | 24 | 24 |
| Velocidade de deslocamento (IPM) | 18 (7,62 mm/s) | 17 (7,19 mm/s) | 17 (7,19 mm/s) |
| Aporte de calor (KJ/mm) | 1,00 | 1,37 | 0,85 |

2.2. Ensaios Não Destrutivos

Ensaios não destrutivos foram executados nas juntas soldadas, em que não se altera de modo permanente suas propriedades dimensionais, mecânicas, químicas ou físicas. Eles são empregados para detectar e avaliar discontinuidades nos materiais. Estas, de modo geral, são caracterizadas por trincas, poros, mordedura, falta de fusão ou penetração ou ainda modificações nas propriedades estruturais, que podem levar à perda da resistência e, em seguida, à falha do material. Neste trabalho, foram realizados os seguintes Ensaios Não destrutivos: visual, líquido penetrante, ultrassom e radiográfico. Para o ensaio de ultrassom, utilizou-se o aparelho de ultrassom USM 100 da empresa Krautkrämer. As normas ASME (seção III e IX) foram utilizadas como referência para a execução dos ensaios, assim como, para os critérios de aceitação.

2.3. Ensaios Destrutivos

Análise da microestrutura por microscopia óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com auxílio Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) de amostras preparadas por técnicas de metalografia e ensaios mecânicos das juntas soldadas foram realizados. Os ensaios mecânicos de tração, dobramento, impacto e dureza realizados neste estudo tentam reproduzir as condições de serviço do componente, os quais devem possuir resistência a impactos, corrosão e vazamentos, além de garantir o confinamento da radiação. Assim, as propriedades de interesse são obtidas de forma padronizada por uma norma específica. As variáveis determinadas por estes ensaios, como ductilidade, dureza, limite de escoamento e limite de resistência mecânica são quantitativos que podem ser usados na especificação de materiais para preparação de projetos. Os equipamentos utilizados nos ensaios destrutivos, as normas de referência e as condições principais do ensaio estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Equipamentos e normas utilizadas nos ensaios destrutivos

| Ensaio | Equipamento | Norma | Condição |
|---------------|----------------------------------------------|---------------|-----------------------|
| Tração | Equipamento Instron; modelo 1331 | ASTM A370 | Vel. defor.: 2 mm/min |
| Dobramento | Prensa hidráulica motorizada Nowak (30 ton.) | ASME seção IX | Face e raiz |
| Charpy | Equipamento Zwick; modelo HIT25 | ASTM E23 | Temp. Ambiente |
| Dureza | Durômetro Leitz (Dureza Vickers) | ASME seção IX | Carga: 4,903 kgf |

3.2. Ensaios Destrutivos

Na análise de macrografia para o duplex 2205, na condição de maior aporte térmico (1,37 KJ/mm), ocorreu um aumento na área do cordão de solda em relação ao menor aporte empregado. Isso é devido ao aumento do calor fornecido à junta de solda, em que a quantidade de material fundido na junta é maior, resultando no aumento das dimensões da área do metal de solda (MS), vide Figura 3a. Os valores médios das áreas das seções, as quais foram obtidas a partir do software ImageJ, são apresentados no gráfico da Figura 3b.

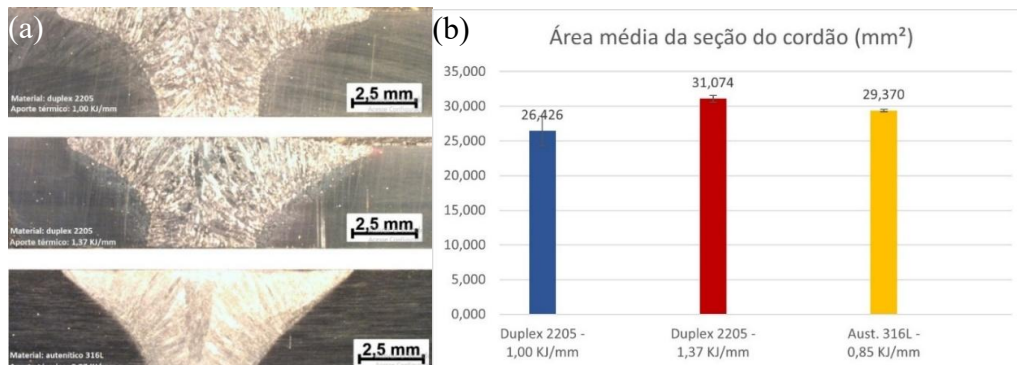


Figura 3 – (a) Macrografia das juntas soldadas e (b) área média da seção transversal do MS das juntas soldadas – Duplex 2205 e Austenítico 316L

Especificamente para a amostra 01, identificou-se, a partir da micrografia, obtida por microscopia ótica, uma região com preenchimento incompleto do metal líquido que pode ter auxiliado a nucleação de uma trinca localizada na interface da ZTA e MS, conforme pode ser observado na Figura 4. Esta observação está confirmando o resultado do ensaio de ultrassom, o qual, também indicou a existência de uma descontinuidade, detalhada a partir do ensaio metalográfico. O preenchimento incompleto pode estar relacionado com a falta de calor para fundir de forma adequada o MB e o MA, não permitindo o fluxo correto de metal líquido, no caso do aporte de calor de 1,0 KJ/mm.

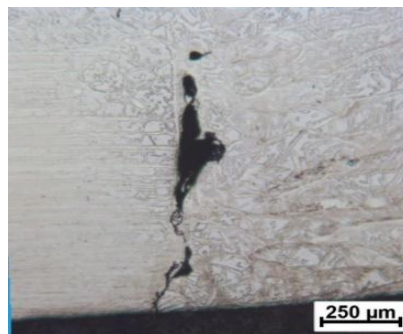


Figura 4 – Micrografia com indicação de trinca na amostra 01 (com lixamento, polimento em pasta de diamante de 6 e 1 µm e ataque eletrolítico com NaOH a 20% – corrente (I) de 1,3 [A] e tempo de 40 segundos)

A partir das micrografias, também foram identificadas as fases presentes. Na Figura 5, são indicadas as fases ferrita e austenita nas zonas fundidas dos materiais estudados. Conforme verificado também por [8], para o duplex 2205, os grãos de austenita apresentaram geometria acicular (agulhada) em matriz ferrítica. Para o austenítico 316L, a ferrita apresentou-se com morfologia ramificada (dendrítica) na matriz austenítica.

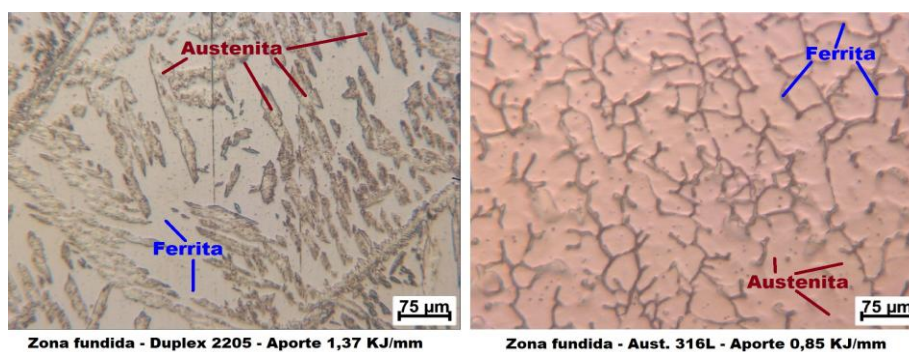


Figura 5 – Fases de ferrita e austenita na ZF (ataque eletrolítico com NaOH a 20% – I=1,3 [A] por 40 segundos)

Sobre o tamanho de grão para o duplex 2205 soldado neste trabalho, qualitativamente foi possível verificar que para o maior aporte térmico, mais expressivo é o crescimento dos grãos e da ZTA, modificação microestrutural dos processos de soldagem por fusão. São mostradas na Figura 6 as regiões das ZTA do duplex 2205 soldados com os dois aportes térmicos utilizados.

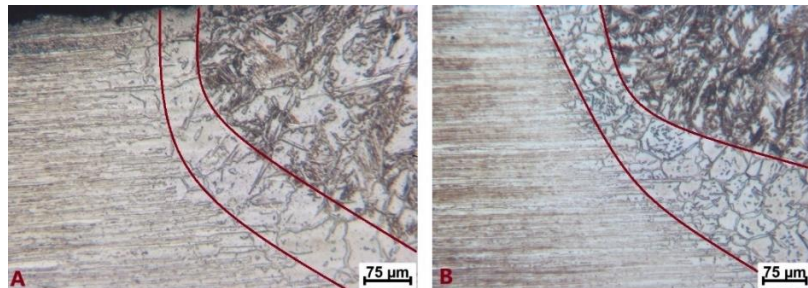


Figura 6 – Região de ZTA. (A) duplex 2205 soldado com 1,00 KJ/mm. (B) duplex 2205 soldado com 1,37 KJ/mm (ataque eletrolítico com NaOH a 20% – corrente de 1,3 [A] e tempo de 40 segundos)

Na micrografia do austenítico 316L, nota-se que para o aporte térmico aplicado, o qual é menor que os aplicados no duplex 2205, a ZF apresentou uma estrutura dendrítica. Conforme verificado por [9], o modo de crescimento dendrítico é o recorrente em materiais fundidos. Observou-se também a presença de ferrita delta (δ) na matriz austenítica, ou seja, não há somente a austenita na microestrutura do aço 316 L. Isso é devido ao processo de solidificação desse tipo de aço inoxidável após a soldagem, que ocorre como ferrita δ e após em reações de estado sólido para austenita [10]. Durante o resfriamento, gradualmente, a ferrita transforma-se em austenita. São mostradas na Figura 7 as regiões da junta soldada do austenítico 316L soldado com aporte de 0,85 KJ/mm.

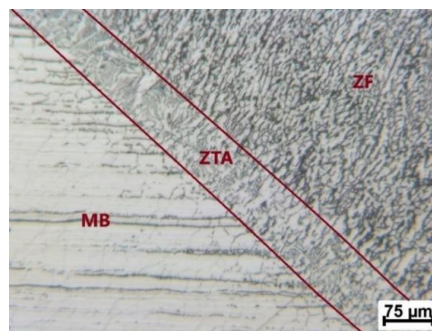


Figura 7 – Regiões da junta soldada do austenítico 316L soldado com aporte de 0,85KJ/mm (ataque eletrolítico com NaOH a 20% – corrente de 1,3 [A] e tempo de 40 segundos)

A partir da análise micrográfica, foi realizado para o aço 2205 a quantificação de fases presentes a partir do *software ImageJ*. O percentual de cada fase encontrada para cada aporte aplicado é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantitativo de fases para os materiais e aportes aplicados

| Material | Aporte (KJ/mm) | MB | | ZTA | | ZF | |
|-------------|----------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| | | % Ferrita | % Austenita | % Ferrita | % Austenita | % Ferrita | % Austenita |
| Duplex 2205 | 1,00 | 53,53±1,59 | 46,47±1,59 | 62,83±0,15 | 37,17±0,15 | 59,03±1,54 | 40,97±1,54 |
| | 1,37 | 53,53±1,59 | 46,47±1,59 | 60,82±0,62 | 39,18±0,62 | 57,53±2,22 | 42,47±2,22 |

A partir da análise da Tabela 4, nota-se que com o aumento do aporte térmico utilizado durante o processo de soldagem, ocorreu o aumento da quantidade de austenita e a redução da quantidade de ferrita. De acordo com [11] e [12], durante o processo de soldagem do aço duplex, os ciclos térmicos podem ocasionar o desbalanceamento da microestrutura, com a tendência de redução da ferrita em virtude do aumento do aporte térmico. Em razão desse aumento, há a diminuição da taxa de resfriamento, aumentando o tempo para a transformação da fase ferrítica para austenítica. Na Figura 8 (a), onde está mostrado o resultado da análise por EDS realizada nas regiões das juntas soldadas do duplex 2205, verificou-se que o nível de cromo, tanto para a ZTA, quanto para a ZF, é mais elevado nas amostras soldadas com o menor aporte térmico em relação às amostras soldadas com o maior aporte. O maior nível de cromo para o menor aporte aplicado pode ser justificado devido à variação da taxa de resfriamento, em que para o menor aporte, ocorreu menos tempo para uma maior difusão desse elemento. Em virtude do cromo ser estabilizador da fase ferrítica, o resultado do EDS é condizente com o quantitativo de fases indicado na Tabela 4, em que para o menor aporte, houve um acréscimo da ferrita.

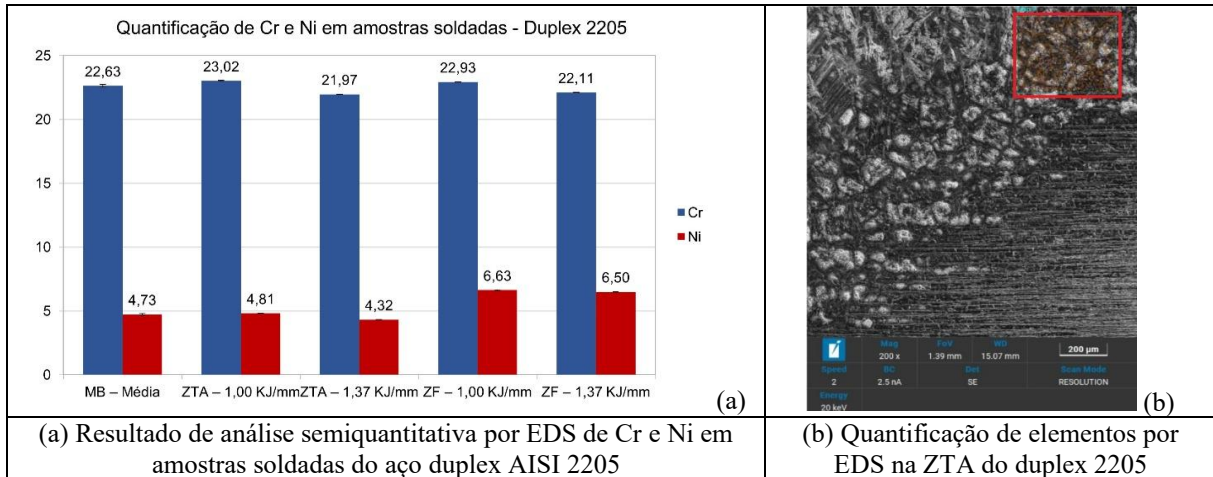


Figura 8 – Análise por EDS em amostras soldadas do aço 2205

No ensaio de tração, para a amostra do duplex 2205 soldada com aporte de 1,00KJ/mm, obteve-se uma média de tensão limite de resistência de $717 \pm 4,00$ MPa e uma média de alongamento de $4,82 \pm 1,18$ mm. Para a amostra do duplex 2205 soldada com aporte de 1,37KJ/mm, obteve-se uma média de tensão limite de resistência de $743 \pm 3,85$ MPa e uma média de alongamento de $6,62 \pm 1,13$ mm. Para a amostra de austenítico 316L, soldado com aporte de 0,85 KJ/mm, obteve-se uma média de tensão limite de resistência de $550 \pm 2,75$ MPa e uma média de alongamento de $22,5 \pm 2,49$ mm. O resultado médio obtido no ensaio de tração para a tensão limite de resistência e o resultado médio de alongamento estão mostrados na Figura 9. Na Figura 10 são mostrados três corpos de prova rompidos no ensaio de tração, relativos aos materiais e aportes aplicados.

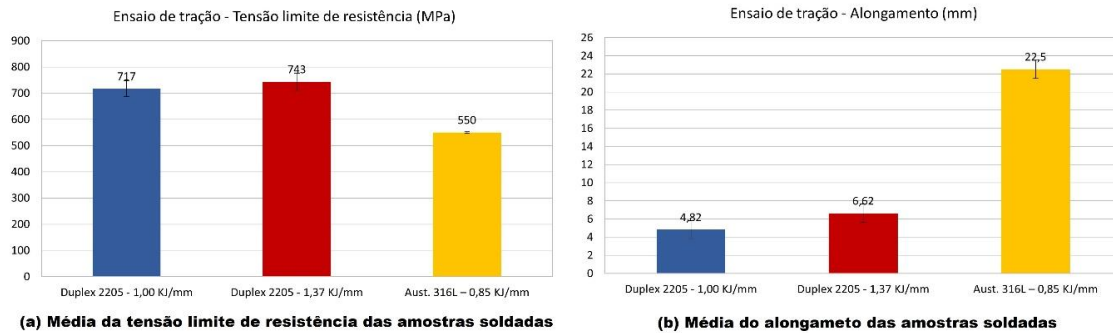


Figura 9 – (a) Média de tensão limite e (b) alongamento das amostras soldadas



Figura 10 – Três corpos de prova rompidos no ensaio de tração

Na Figura 9 pode-se observar os resultados dos Corpos de Prova (CP's) de tração do duplex 2205 soldados com os aportes de 1,00 e 1,37 KJ/mm e nota-se que, para o maior aporte aplicado, houve um aumento no valor de limite de resistência, ainda que a partir da análise estatística T de Student não tenha indicado diferenças significativas entre as médias dos valores analisados. O aumento do aporte de calor e a menor velocidade de resfriamento da junta promoveram a formação de austenita em maior teor, sendo esta a fase com maior resistência mecânica e aumentando a resistência à tração. Para o austenítico 316L, o resultado do ensaio indicou menor limite de escoamento, menor limite de resistência, e um maior alongamento em comparação ao duplex 2205. As regiões de rupturas nos CP's do austenítico 316L ocorreram no MB, indicando eficiência das juntas soldadas desse material, as quais apresentaram uma menor ZTA.

Os resultados do teste de impacto Charpy, para as regiões do MB, ZTA e da ZF para o duplex 2205 e para o austenítico 316L estão apresentados na Figura 11. Três medidas foram realizadas em cada região da junta soldada. No aço duplex 2205 soldado com aporte de 1,00 KJ/mm obteve-se a média de energia absorvida na ZTA de $25,38 \pm 0,90$ J e de $18,20 \pm 1,17$ J na ZF. No duplex 2205 soldado com aporte de 1,37 KJ/mm obteve-se a média de energia absorvida na ZTA de $25,87 \pm 1,13$ J e de $19,47 \pm 1,33$ J na ZF. No aço austenítico 316L soldado com aporte de 0,85 KJ/mm, obteve-se uma média de energia absorvida na ZTA de $19,04 \pm 1,21$ J e de $17,57 \pm 0,93$ J na ZF.

A partir da análise destes dados, ao comparar os resultados do duplex 2205 soldados com aportes distintos, verificou-se que, para o maior aporte houve um leve aumento nos valores de energia absorvida (J) para as regiões da ZTA e ZF em relação aos CP's soldados com o aporte inferior. Uma análise estatística foi efetuada com resultados e o teste T de Student também não indicou diferenças significativas entre as médias das regiões analisadas. Conforme mencionado, o aumento do aporte de calor e a menor velocidade de resfriamento da junta pode promover a formação de austenita em maior quantidade, possibilitando maior capacidade de absorção de energia.

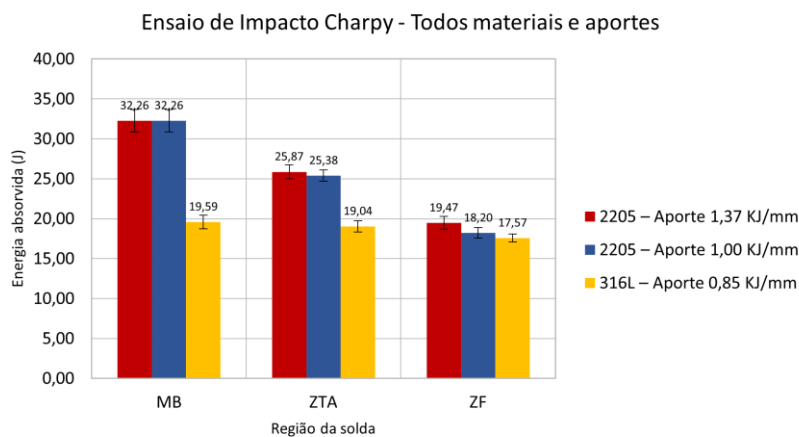


Figura 11 – Média de energia absorvida nos CP's do ensaio de impacto

Na região do MB, foi obtida a energia absorvida mais elevada. A microestrutura mais refinada do MB oriunda dos processos de conformação mecânica e tratamentos térmicos de alívio de tensões, além da baixa intensidade de tensões residuais do processo de soldagem e a melhor proporção entre as fases de austenita e ferrita contribuíram para esse resultado.

As ZTA's apresentaram energia absorvida intermediária entre MB e ZF, conforme verificado também por [9]. Os fenômenos de recristalização e o aumento no tamanho do grão que foram observados em razão das altas temperaturas atingidas, como consequência, uma morfologia de grão equiaxial foi observada, com a austenita ao redor dos grãos de ferrita, conforme pode ser observado na Figura 12. Essa morfologia é favorável, porque a austenita é mais resistente que a ferrita e dificulta que as descontinuidades oriundas na zona de ferrita se propaguem para outros grãos.

Na ZF dos materiais estudados ocorreu um menor valor de energia absorvida em relação ao MB. Conforme indicado por [13], isso pode ser relacionado pelo maior volume de ferrita nessa região, que facilitaria a propagação da fratura. A possibilidade de formação de nitreto de cromo, que é um microconstituente fragilizante em aços inoxidáveis duplex pode auxiliar na queda da energia absorvida [13].

Para o austenítico 316L, os CP's apresentaram uma menor energia absorvida em comparação ao duplex 2205, sendo que o nível de energia absorvida foi muito próximo para as três regiões.

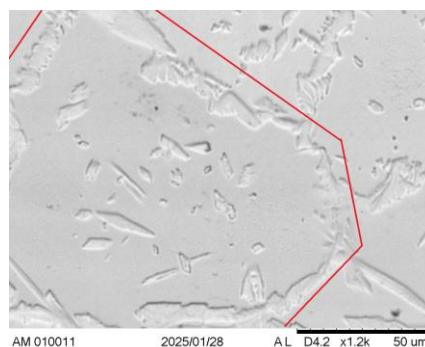


Figura 12 – Região de austenita ao redor dos grãos de ferrita na ZTA do duplex 2205 (MEV – 1200x)

Na Figura 13 são mostradas as superfícies de fratura dos CP's ensaiados. As regiões de fratura apresentam superfície fibrosa com maior deformação antes da falha e com expansão lateral, o que evidencia fratura do tipo dúctil. Tais superfícies apresentam coerência com os dados de energia absorvida obtidos, pois, verificou-se que para o aço 2205, quanto menor o aporte aplicado, maior é a abertura da fratura ocasionada pelo impacto e menor a região fibrosa, conforme indicado pela seta, em razão da menor porcentagem de austenita. Todos os CP's ensaiados apresentaram microcavidades (*dimples*) verificadas a partir da MEV, conforme mostrado na Figura 14 para os CP's das zonas fundidas.

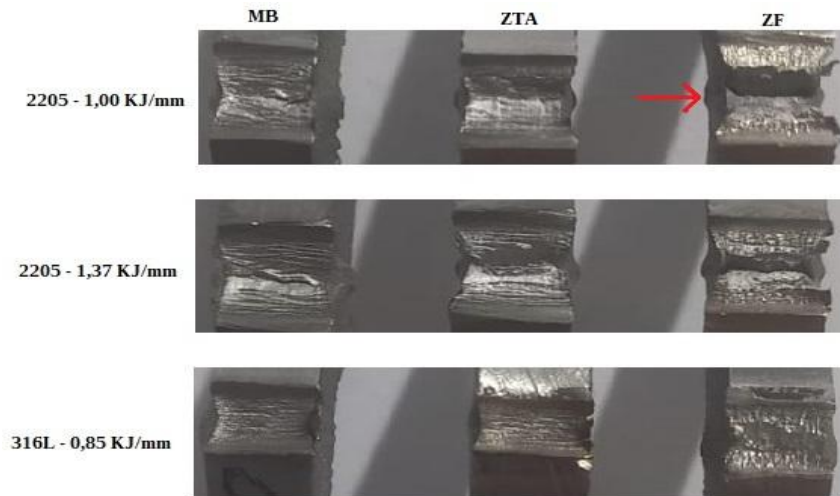


Figura 13 – Superfície das fraturas em amostras de CP's do ensaio de impacto

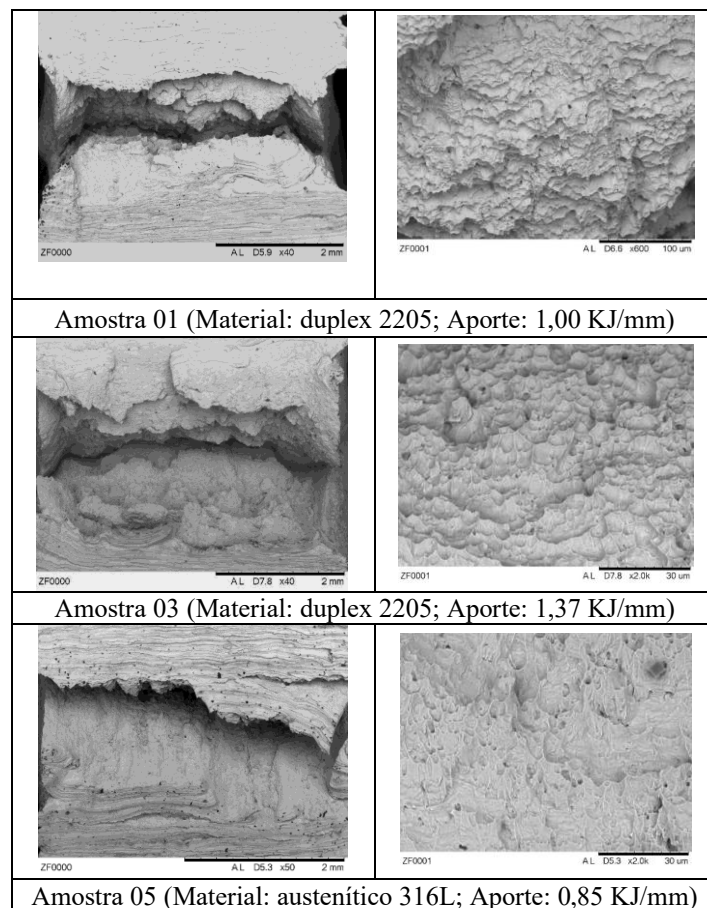


Figura 14 – Superfície das fraturas das zonas fundidas após ensaio de impacto

No ensaio de dobramento, a amostra 01 do aço 2205 apresentou fratura na raiz da solda. A fratura pode ser consequência do preenchimento inadequado, em razão do baixo aporte de calor. Os demais corpos de prova dos

materiais utilizados foram aprovados, tanto os que sofreram tração na raiz, quanto os que sofreram na face, o que demonstra o bom desempenho da solda. Assim, através do ensaio, não foi possível distinguir as juntas soldadas a partir dos aportes térmicos aplicados.

Os resultados dos testes de dureza para o aço 2205 e para o austenítico 316L são apresentados na Figura 15, utilizando a unidade HV05, para as regiões da MB, ZTA e da ZF, em que, três medidas foram realizadas no topo, meio e raiz de cada região descrita anteriormente.

Para o aço 2205 soldada com aporte de 1,00 KJ/mm, obteve-se uma média de dureza na ZTA de 286,82±2,23 HV e de 262,60±2,04 HV na ZF. Para a amostra do aço 2205 soldada com aporte de 1,37 KJ/mm, obteve-se uma média de dureza na ZTA de 285,60±1,79 HV e de 261,70±1,46 HV na ZF. Para a amostra de austenítico 316L, soldado com aporte de 0,85 KJ/mm, obteve-se uma média de dureza na ZTA de 185,77±2,48 HV e de 181,21±2,51 HV na ZF.

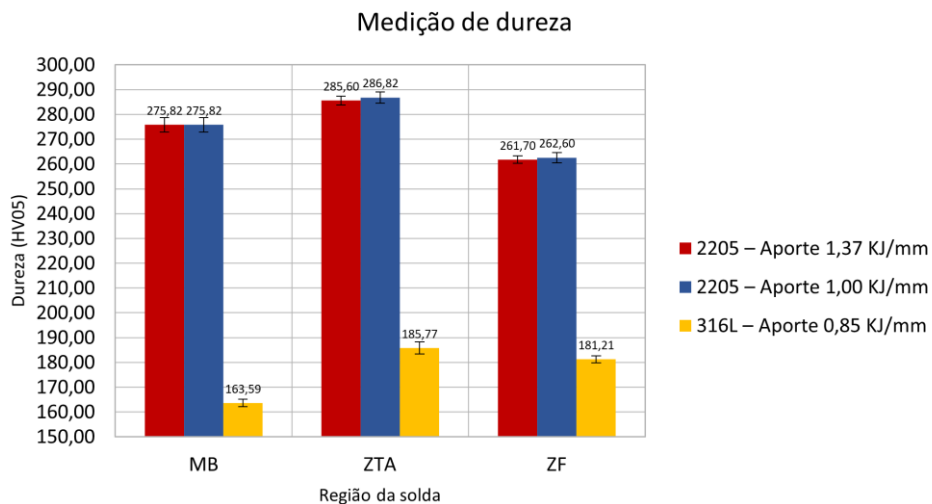


Figura 15 – Resultado do teste de microdureza para as juntas soldadas

No aço 2205, o maior valor de dureza do MB em relação à ZF pode ser justificado, pois o aço 2205 sofreu processo de conformação mecânica que ocasiona o encruamento do metal e tratamentos térmicos que aliviam a microestrutura encruada, refinam a microestrutura e aumentam a dureza. No MS ocorreram menores níveis de dureza na ZF em razão da microestrutura bruta de fusão, sem processo de conformação e encruamento, com menor dureza encontrada.

Comparando os efeitos individuais dos aportes aplicados no aço 2205, ainda que a partir da análise estatística T de Student não tenha indicado diferenças significativas entre as médias das regiões analisadas, foram observados valores ligeiramente maiores de dureza na ZTA e ZF para as juntas soldadas com o menor aporte térmico, o que pode estar relacionado à maior velocidade de resfriamento. De acordo com [14], em maiores aportes aplicados mais tempo de resfriamento é necessário e maior a difusão do Cr e N da ferrita para a austenita, diminuindo a dureza da microestrutura a partir da diminuição da quantidade de nitretos de cromo precipitados na ferrita.

No austenítico 316L, o resultado do ensaio foi condizente, pois todas as regiões das soldas apresentaram dureza menor em comparação ao duplex 2205. Ainda para o austenítico 316L, notou-se que a dureza da ZF foi maior que a do MB, em razão do maior teor de níquel do MA. No aço 2205, a dureza do MB foi maior que a da ZF.

No aço austenítico 316L, as imagens das micrografias obtidas por MEV do ensaio de corrosão intergranular pela prática A da norma ASTM A262 estão mostradas nas Figuras 16 (a), 16 (b) e 16 (c). A partir destas imagens é possível verificar a presença de estruturas de ferrita isolada, sem indicação de suscetibilidade à corrosão intergranular, pois não apresentam *ditches*, que são estruturas em valas que circundam totalmente os grãos, conforme apresentado na Figura 16 (d). Este resultado é esperado para uma soldagem do aço AISI 316L, o qual foi soldado com baixo aporte térmico, apresentando uma ZTA estreita. Este material possui controle de carbono em sua composição, mitigando assim o processo de segregação do cromo para o contorno de grão. Portanto, considera-se que a junta soldada da amostra de 316L apresentou boa resistência à suscetibilidade de corrosão intergranular.

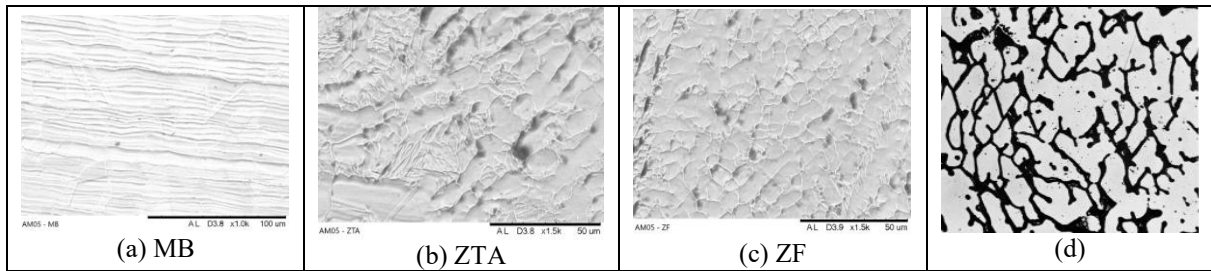


Figura 16 – Micrografias do ensaio de corrosão intergranular do AISI 316L: MB (a), ZTA (b) e ZF (c). Exemplo de *ditches* dendríticos conforme norma ASTM A262 (d).

Nas Figuras 17 e 18, também obtidas por MEV, são mostradas imagens das amostras submetidas ao ensaio de corrosão intergranular para as juntas soldadas do aço 2205. Conforme verificado por [15] e indicado na Figura 17, na ZF, a corrosão com ácido oxálico promoveu corrosão preferencial da matriz de ferrita. Na ZTA da amostra do duplex soldado com 1,37 KJ/mm, ocorreu uma maior suscetibilidade à corrosão intergranular na interface entre os grãos de ferrita e austenita, em comparação com a amostra soldada com aporte de 1,00 KJ/mm, conforme cavidades indicadas por círculos na Figura 18. Ainda que, sem comprometer as propriedades mecânicas, conforme indicado pelos resultados do ensaio de tração e impacto.

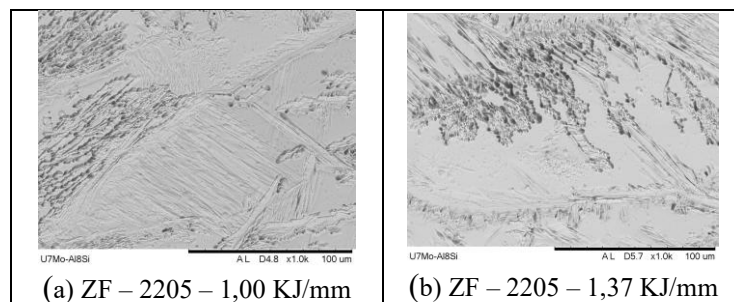


Figura 17 – Micrografias do ensaio de corrosão intergranular do AISI 2205. ZF da amostra 01 (a) e ZF da amostra 03 (b)

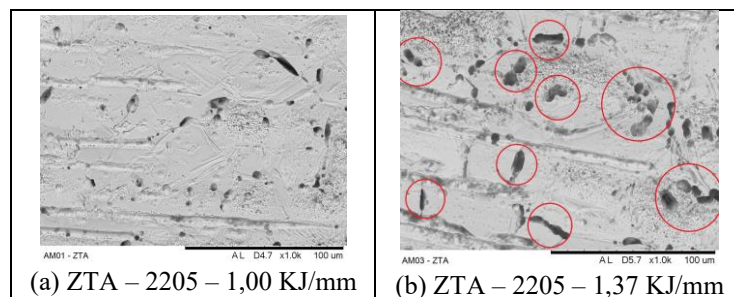


Figura 18 – Micrografias do ensaio de corrosão intergranular do AISI 2205. ZTA da amostra 01 (a) e ZTA da amostra 03 (b)

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que:

- O ensaio visual e por líquido penetrante não indicaram descontinuidades no comprimento útil das soldas, o que indica que elas tiveram bom acabamento superficial;
- Em virtude da diferença dos resultados dos ensaios volumétricos (ultrassom e radiografia), entende-se que tais ensaios são complementares;
- Utilizando-se o *software ImageJ*, imagens obtidas por microscopia verificou-se que as juntas soldadas com o maior aporte térmico, 1,37 KJ/mm, apresentaram maior quantidade de austenita na ZTA (aumento de 5,40%) e na ZF (aumento de 3,66%) em relação às juntas soldadas com 1,00 KJ/mm;
- No ensaio de tração, verificou-se que para os CP's de tração do duplex 2205 soldados com aporte de 1,37 KJ/mm (maior aporte aplicado) houve um aumento de 3,62% no limite de resistência (MPa);
- Resultados do ensaio de impacto Charpy indicaram que, para o maior aporte, houve um aumento da energia absorvida (J) para as regiões da ZTA (aumento de 1,93%) e da ZF (aumento de 6,97%), em relação aos resultados obtidos com o menor aporte;

- Verificou-se no ensaio de dureza para o menor aporte um ligeiro aumento nos valores de dureza (HV05) nas regiões da ZTA (aumento de 0,42%) e ZF (aumento de 0,34%) em relação aos CP's soldados com o maior aporte;
- No ensaio de corrosão intergranular, na ZTA da amostra do aço 2205 soldado com 1,37 KJ/mm, ocorreu maior suscetibilidade à corrosão intergranular na interface entre os grãos de ferrita e austenita, em comparação com a amostra soldada com aporte de 1,00 KJ/mm.
- O aço AISI2205 apresentou juntas soldadas com maior resistência mecânica em relação ao aço austenítico 316L, sendo recomendado para a fabricação de recipientes de rejeitos nucleares alocados em poço de descarte. Durante o processo de fabricação por soldagem, entre os aportes utilizados nesse estudo, recomenda-se a utilização do aporte térmico de 1,37 KJ/mm, pois essa utilização obteve juntas soldadas com um maior balanceamento das fases e uma maior resistência mecânica em relação as juntas soldadas com o aporte térmico de 1,00 KJ/mm.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Dra. Isolda Costa, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo apoio incondicional na realização desse projeto.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Estratégia Nacional para Detecção e Recuperação de Fontes Órfãs, 2023;
- [2] IAEA. Borehole disposal facilities for radioactive waste: safety guide, IAEA, Vienna, ISSN 1020-525X, 2009;
- [3] IAEA. BOSS. Borehole disposal of disused sealed sources: A technical manual, IAEA, Vienna, ISSN 1011-4289, 2011;
- [4] KOTECKI, D. J. Some Pitfalls in Welding of Duplex Stainless Steels. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 15, 2010;
- [5] FONSECA, C. S.; PINHEIRO, I. P.; SILVA, S. N. Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205. Revista Matéria, v.21, n.1, p. 227-234, 2016;
- [6] DEMARQUE, R.; SANTOS, E. P.; SILVA, R. S.; CASTRO, J. A. Evaluation of the effect of the thermal cycle on the characteristics of welded joints through the variation of the heat input of the austenitic AISI 316L steels by the GMAW process. Science and Technology of Materials, n.30, p. 51-59, 2018;
- [7] ANDREUCCI, R.; A radiologia industrial. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, São Paulo, 2008;
- [8] NETO, S. A. A. Caracterização metalúrgica de juntas de aço inoxidável superduplex soldadas por processo TIG autógeno. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011;
- [9] SILVA, E.; FONSECA, G.; DOS SANTOS, L. L. Análise microestrutural da solda similar do aço inoxidável austenítico 316L com o aumento do aporte térmico. 74º Congresso Anual da ABM, 2019;
- [10] FONSECA, C. S.; SILVA, I. P. P.; BRANT, G. S. C. Influência do aporte térmico sobre a microestrutura em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304. ENGEVISTA, V. 19, n.1, p. 1-8, Janeiro 2017;
- [11] FONSECA, C. S.; PINHEIRO, I. P.; SILVA, S. N. Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205. Revista Matéria, v.21, n.1, p. 227-234, 2016
- [12] CHACÓN-FERNÁNDEZ, S.; GARCIA, A. P.; LABANDA, G. R. Influence of parameters on the microstructure of a duplex stainless steel joint welded by a GMAW welding process. Progress in Natural Science: Materials International, n. 32, p. 415-423, 2022;
- [13] NUNES, E. B.; MOTTA, M. F.; ABREU, H. F. G.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; JUNIOR, F. N. A. Avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas de aço inoxidável duplex UNS S31803. 65º Congresso Anual ABM. ISSN 1020-525X, 2010;
- [14] PAULI, E.; Estudo da soldabilidade do aço inoxidável lean duplex UNS S82441 utilizando o processo MIG/MAG com diferentes energias de soldagem. 2017. 200 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-12032018-133542/pt-br.php>;
- [15] PEREIRA, H. B.; PIMENTEL, T. H. C.; DA SILVA, C. A.; PANOSSIAN, Z.; AZEVEDO, C. R. F.; Influence of Welding Energy on Intergranular and Pitting Corrosion Susceptibility of UNS S32205 Duplex Stainless-steel Joints. Revista Materials Research, 2022.