

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL
LEAN DUPLEX UNS S32304 USANDO O PROCESSO GMAW-P
E CONSUMÍVEL ALTERNATIVO DESTINADO A SOLDAGEM DE
AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX PADRÃO

WILSON CARLOS FARIA

Orientador

Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho

Co-orientador

Prof. Dr. Carlos Roberto Xavier

Roteiro

- Introdução
- Objetivo
- Metodologia experimental
- Resultados
- Conclusão

Introdução

História do aço inoxidável

O aço inoxidável foi descoberto por Harry Brearley (1871-1948), que começou a trabalhar como operário numa produtora de aço com a idade de 12 anos, na sua terra natal, Sheffield (Inglaterra). Em 1912, Harry começou a investigar, a pedido dos fabricantes de armas, uma liga metálica que apresentasse uma resistência maior ao desgaste que ocorria no interior dos canos das armas de fogo como resultado do calor liberado pelos gases.

De início a sua pesquisa consistia em investigar uma liga que apresentasse uma maior resistência ao desgaste. Porém, ao realizar o ataque químico para revelar a microestrutura desses novos aços com altos teores de cromo que estava a pesquisar, Brearley notou que o ácido nítrico - um reativo comum para os aços - não surtia efeito algum. Brearley não obteve uma liga metálica que resistia ao desgaste, obteve porém uma liga metálica resistente a corrosão. A aplicação imediata foi destinado para a fabricação de talheres, que até então eram fabricados a partir de aço carbono e se corroíam com facilidade devido aos ácidos presentes nos alimentos

Introdução

- Tipos de aços inoxidáveis.

Aço inoxidável é o nome dado à família de aços resistentes à corrosão e ao calor contendo no mínimo 10,5% de cromo. Enquanto há uma variedade de aços carbono estrutural e de engenharia atendendo a diferentes requisitos de resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade, há também uma grande variedade de aços inoxidáveis com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão e resistência mecânica. Isso é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um deles originando atributos específicos com relação a resistência mecânica e possibilidade de resistir a diferentes meios ambientes. Os tipos de aço inoxidável podem ser classificados em cinco famílias básicas: ferrítico, martensítico, austenítico, dúplex e endurecível por precipitação.

Introdução

- Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são os maiores, em termos de número de ligas e de utilização. Como os ferríticos, os austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, tendo o nível de teor de carbono restrito, mas as adições principalmente de níquel muda a estrutura em temperatura ambiente para arranjo atômico cúbico de face centrado que é também não magnético (ou seja, tem uma baixa permeabilidade magnética). Dependendo do teor de níquel os aços austeníticos respondem a trabalho a frio com aumento da resistência mecânica, podendo ser utilizado em operações severas de conformação, evitando ruptura prematura e trinca. O endurecimento por encruamento é acompanhado pelas mudanças parciais na estrutura, com a conformação de uma fase de martensita ferro magnética, o que explica porque com a deformação a frio pode ocorrer os aços austeníticos “magnéticos” .

Os aços mais usados tipo 304 (1.4301) tem 17% de cromo e 8% de níquel com excelente ductilidade, conformabilidade e tenacidade e até em temperaturas criogênicas.

Introdução

- Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são similares aos aços carbono e de baixa liga. Eles tem uma estrutura similar aos ferríticos com estrutura cristalina “tetragonal de corpo centrado”. Devido a adição de carbono, podem ser endurecido e a resistência aumentada pelo tratamento térmico, da mesma forma que os aços carbono. São classificados como uma família ferro magnético “duro”. O principal elemento de liga é o cromo, com um teor típico de 12 – 15%. A melhor resistência a corrosão é obtida no tratamento térmico, ou seja, na condição temperado e revenido. Os martensíticos foram desenvolvidos com adições de nitrogênio e níquel mas com teores de carbono mais baixos que os tipos tradicionais. Estes aços tem melhor tenacidade, soldabilidade e resistência à corrosão.

Os exemplos de aços martensíticos são 420 (1.4028), 431 (1.4057) como tipos temperáveis com carbono normal e 248 S V (1.4418) como tipo de aço com baixo teor de carbono e mais o nitrogênio.

Introdução

- Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos tem uma estrutura cristalina cubico de corpo centrado, que é o mesmo do ferro puro a temperatura ambiente. O principal elemento de liga é o cromo com teores tipicamente entre 11 e 17%. O teor de carbono é mantido baixo o que resulta nestes aços uma limitada resistência mecânica. Não são endurecíveis pelo tratamento térmico e no estado recozido o limite de escoamento é de 275 a 350 MPa. Os aços ferríticos são do tipo de baixo custo mas tem limitada resistência à corrosão comparado com os austeníticos mais comuns. Da mesma forma são limitados na tenacidade, conformabilidade e soldabilidade em comparação aos austeníticos. As dimensões de fornecimento (ou seja espessura) são restritas devida a baixa tenacidade. São entretanto do grupo ferro magnetico “mole” e tem assim algumas utilizações especiais, como por exemplo núcleo de vavulas solenóides.

Exemplos de aços ferríticos são 3 Cr 12 (1.4003) e 430 (1.4016)

Introdução

- Endurecíveis por precipitação.

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (PH) são endurecíveis por tratamento de envelhecimento e assim tem algumas similaridades com os aços martensíticos, entretanto o processo metalurgico para endurecimento é diferente. Estes aços são capazes de atingir a resistência a tração até 1700 MPa. Normalmente tem estrutura martensítica e assim são ferro magnéticos. Os aços endurecíveis por precipitação (PH) tem boa ductilidade e tenacidade, dependendo do tratamento térmico. Sua resistência à corrosão é comparável ao aço austenítico 304 (1.4301). Podem ser soldados mais facilmente que os aços martensíticos comuns, estão desenvolvidos e usados de forma ampla tanto nos Estados Unidos como no Reino Unido por exemplo nas aplicações aeroespaciais. Exemplo de aços PH são 17 – 4 PH (1.4542) e 520 B (1.4594).

Introdução

- Duplex

Os aços inoxidáveis duplex tem uma estrutura mixta de austenita e ferrita e como resultado tem características desses tipos básicos. Uma composição química típica tem 22% de cromo, 5% de níquel e 3% molibdênio com pequena adição de nitrogênio. Os aços duplex são endurecíveis por tratamento térmico mas são mais duros que os aços ferrítico e austenítico na condição recozida mole e tem limite de escoamento médio em torno de 450 MPa. Como os aços ferrítico são ferro magneticos, mas tem uma boa conformabilidade e soldabilidade dos aços austeníticos. (Entretanto são necessários maiores esforços na conformação devido a sua maior resistência). Estes aços podem ser utilizados em projeto com secções mais finas que os aços austeníticos mas sua grande vantagem é sua maior resistência a corrosão sob tensão. O molibdênio é normalmente adicionado para aumentar a resistência a corrosão galvanica e por pite. Exemplos de aços duplex: 2205 (1.4462) e 1.4501

Introdução

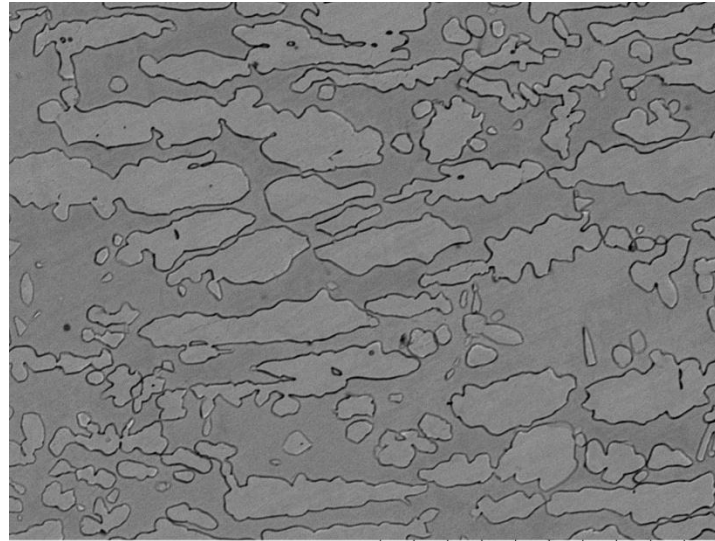
- Lean Duplex

Os recentes desenvolvimentos em aços inoxidáveis são impulsionados, dentre outros fatores, pelo baixo custo do material final. Este fato levou à evolução do subgrupo de aço inoxidável duplex conhecido como “Lean Duplex”, que possui menor teor de elementos de liga em relação aos aços inoxidáveis duplex padrão. Entretanto, suas propriedades mecânicas são duas vezes maiores que dos aços austeníticos, além de possuírem melhor resistência à corrosão e limite de escoamento superior.

Tais ligas substituem com sucesso aços inoxidáveis austeníticos, pois apresentam melhor resistência à corrosão e limite de escoamento superior. As propriedades mecânicas do Lean Duplex são mais de duas vezes superior em relação aos aços inoxidáveis austeníticos, de modo que possibilitam uma redução na espessura dos produtos. Estas vantagens fazem das ligas Lean Duplex alternativas atraentes para muitas aplicações. Alguns exemplos incluem tanques de armazenamento e transporte para uma variedade de substâncias, aplicações estruturais, linhas de fluxo e tubos para a indústria de petróleo e gás.

Introdução

Aços Inoxidáveis Lean Duplex (AILD):



DULPEX0177

2014/09/10 22:01 N

100 um

- Teores reduzidos de molibdênio e níquel.
- Resistência a corrosão e propriedades mecânicas superiores aos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L e AISI 316L
- AILD: UNS S32304; UNS S2205 e UNS S31803.

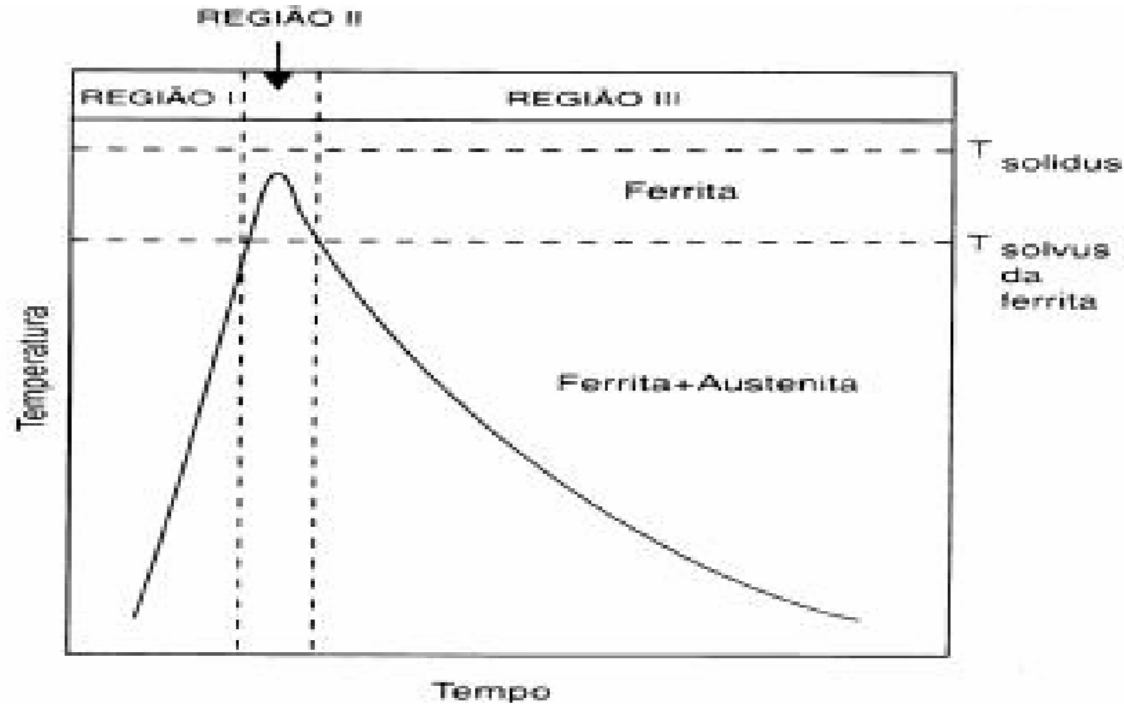
Introdução

Soldagem dos Aços Inoxidáveis Lean Duplex

- Manter a proporção austenita (γ) ferrita (α) na junta soldada sem que haja precipitação de novas fases.
- O comportamento mecânico dos aços inoxidáveis duplex esta intimamente relacionado com a característica de cada fase, por isso o balanceamento entre frações volumétricas de austenita e ferrita deve estar próximo de 50% para cada uma das fases, a fim de maximizar as propriedades mecânicas.
- Em soldas realizadas com multipasses existe a possibilidade da ocorrência de novas fases, tais como: fase sigma, nitreto de cromo ou carbonetos, austenita secundária.

Introdução

Ciclo térmico na ZTA



Região I : mudanças microestruturais são dominadas pela dissolução de austenita e os precipitados presentes no material base

Região II: predomina o crescimento de grão ferrítico.

Região III: as mudanças microestruturais incluem a reformação de austenita e a precipitação de fases intermetálicas, como produto da velocidade de resfriamento, que é relacionado ao tempo de resfriamento

Introdução

- Objeto de estudo o UNS S32304.
- Processo de soldagem GMAW P multipasses.
- Três corpos de prova com três tipos energia de soldagem 0,6; 1,8 e 3,0 kJ/mm
- Metal de adição (consumível) AWS ER2209 1,0 mm diâmetro.
- Junta em V.

Composição química do AILD UNS S32304 e do Consumível AWS ER2209

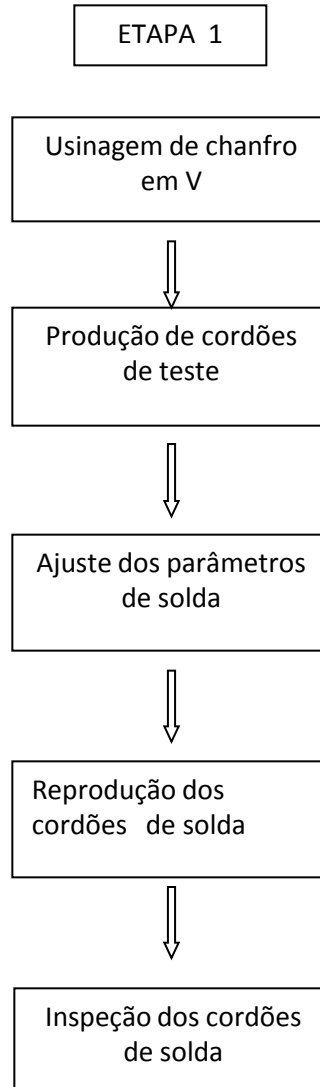
Material	Composição (% em massa)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Metal base	0.016	1.49	0.41	0.03	0.001	22.6	3.58	0.24	0.117
Consumível	0.01	1.6	0.6	0.01	0.01	23.0	9.0	3	0,1

OBJETIVO

- Verificar o desempenho das soldas com três diferentes tipos de energia de soldagem, utilizando consumível alternativo destinado à soldagem de aço inoxidável duplex tipo padrão como o UNS S31803, em chapas de 16 mm de espessura em um AILD UNS S32304, avaliando a influência da energia de soldagem, influência de multipasses na microestrutura, resistência a tração, dobramento e resistência à corrosão.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este experimento foi realizado em 2 etapas, conforme o fluxograma:



METODOLOGIA EXPERIMENTAL

ETAPA 2

Produção de solda com
aporte de 0,6 kJ/mm



Produção de solda com
aporte de 1,8 KJ/mm



Produção de solda com
aporte de 3,0 KJ/mm



Preparação para ensaios



Tração

Dobramento

Metalografia

Quantificação de fases

Corrosão

Etapa 1



Amostra com chanfro em V



Equipamento solda



Produção do cordão de teste

$$H = \frac{(I \cdot V \cdot \eta)}{v \cdot 1000}$$

H = Energia de soldagem (kJ/mm)

I= Corrente (A)

V= Tensão (V)

η = Rendimento (0,80)

v= velocidade (mm/s)

ETAPA 2

Após aprovação dos parâmetros de soldagem foram produzidas 3 juntas soldadas, definidas como amostras A2, A3 e A5

Amostra	Energia de soldagem H kJ/mm	I Corrente A	V Tensão	η rendimento	V Velocidade (mm/s)
A2	0,6	200	24,5	0,8	7,8
A3	1,8	200	24,5	0,8	2,6
A5	3,0	200	24,5	0,8	1,6

Metodologia experimental

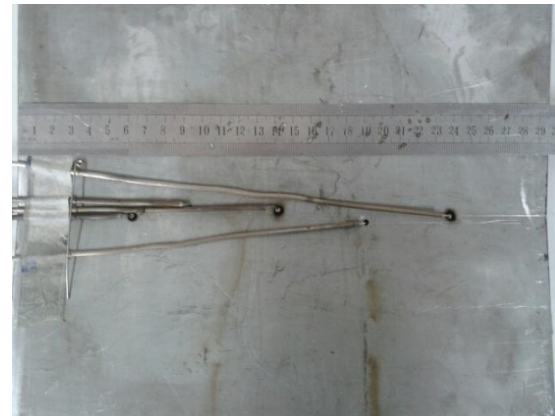
- Para a solda de raiz utilizou se energia de soldagem de 0,6 kJ/mm para todas as amostras.
- Os valores de tensão e corrente foram coletados por sistema de coleta de dados CATMAN 4.5 da CATMAN.

Metodologia experimental

Termopares do tipo K, diâmetro de 2 mm, posicionado na parte de trás da amostra na região do chanfro



Posição dos termopares amostras
A2 e A3

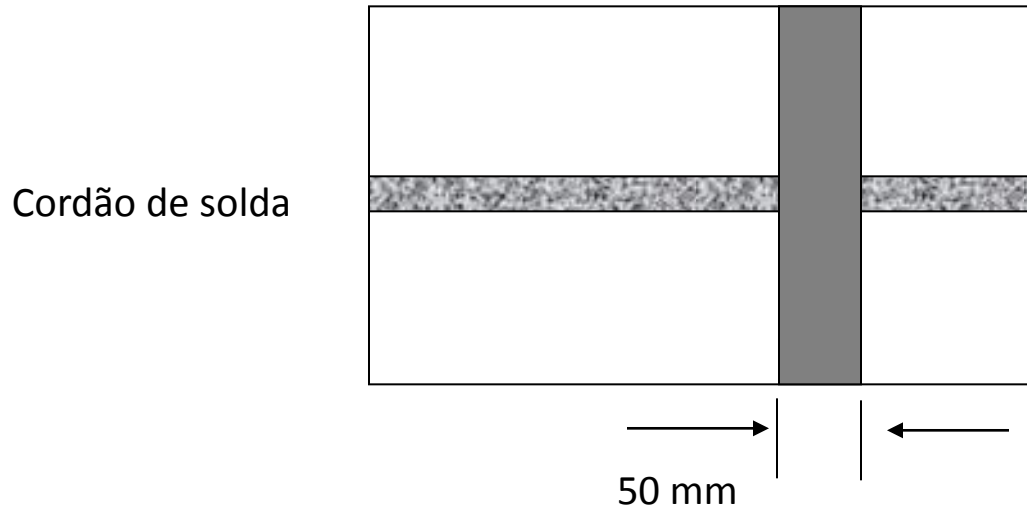


Posição dos termopares amostra A5

Metodologia experimental

Preparação para ensaios mecânicos

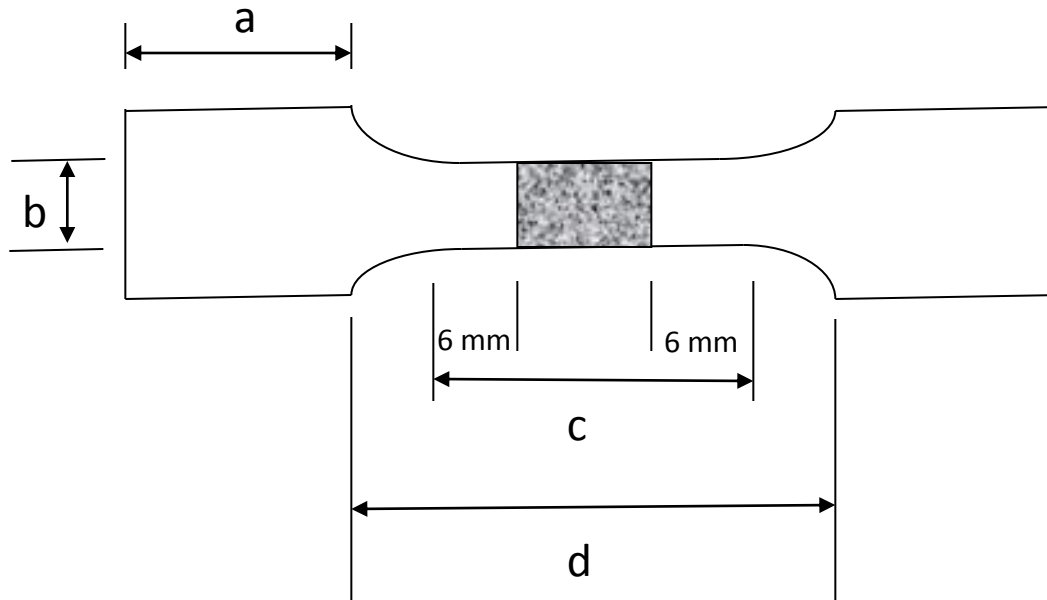
As juntas soldadas foram cortadas no sentido transversal ao sentido dos cordões de solda, formando amostras de 50 mm de largura para ensaio de dobramento e tração.



Foram reservadas 3 amostras para ensaio metalográfico e 3 amostras para ensaio de corrosão.

Metodologia experimental

O corpo de prova para ensaio de tração foi usinado segundo a norma ASME IX QW462.1



- a – Comprimento suficiente para penetrar na garra.
- b – 38 mm aproximadamente, porém não menor que 25 mm.
- c – Comprimento paralelo= maior largura da solda mais 12 mm.
- d- Trecho usinado por fresagem.

Metodologia experimental

Ensaio de tração

Este ensaio teve como objetivo observar se o corpo de prova, referente às soldas com energia de soldagem de 0,6 ; 1,8 e 3,0 kJ/mm, quando submetidos à tração iriam romper fora da região da solda.

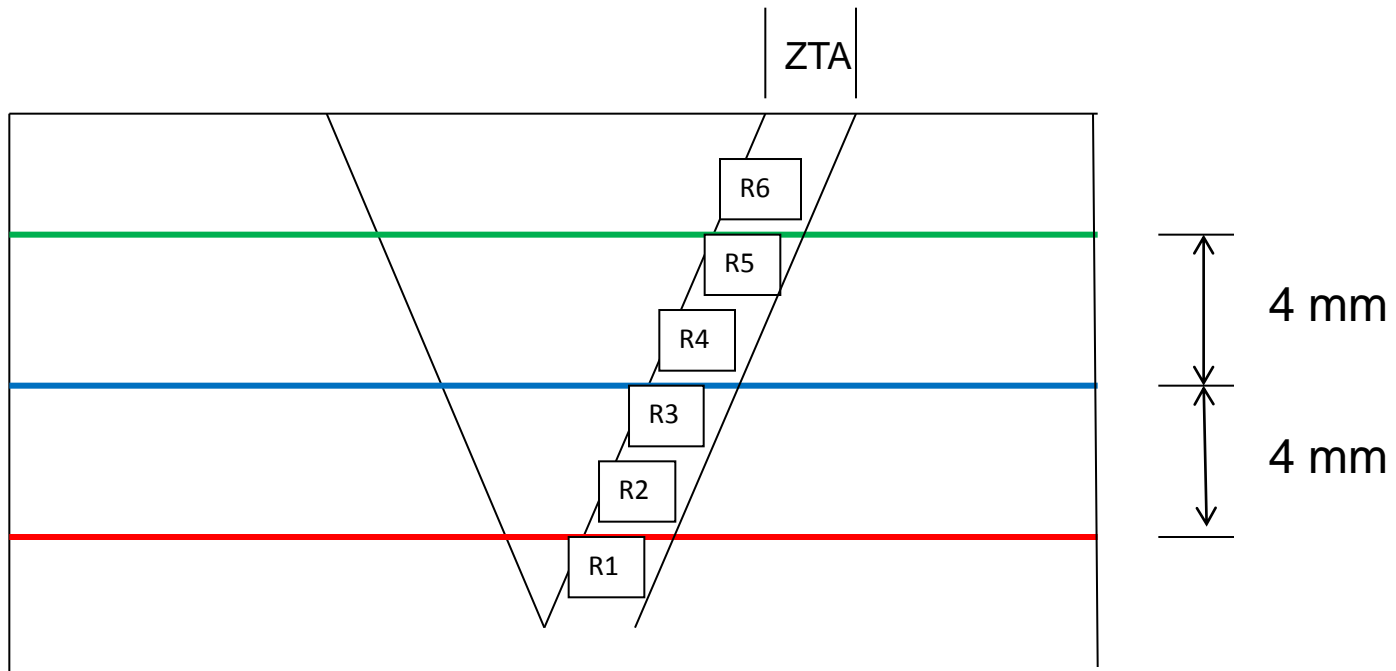
Metodologia experimental

Ensaio metalográfico

- Lixamento com granulações #200, #320, #400, #600, #1000, #1200 e #1500
- Ataque utilizando reativo BEHARA modificado.
- Teste de quantificação de fases presentes, através de microscópio ótico LEITZ modelo METALLOVERT com câmera fotográfica modelo EVOLUTION LC COLOR e software IMAGE PRO-PLUSimage para coleta e quantificação de fases.

Metodologia experimental

Para as amostras A2, A3 e A5 foram realizadas imagens com aumento de 500X, nas regiões: R1,R2,R3,R4,R5 e R6



Metodologia experimental

- Ensaio de corrosão

As amostras foram submetidas a ensaio de corrosão, conforme norma ASTM G48-11 e ASTM G1-03

(cloreto ferríco por 72 horas.)

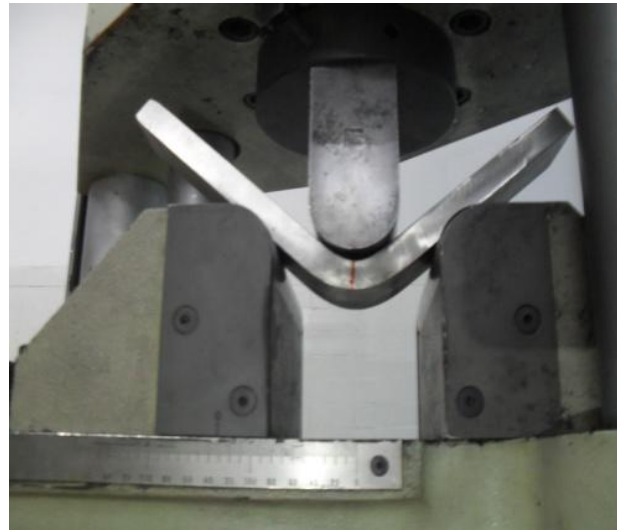
A norma ASTM A923-14 método C, também foi utilizada para validar o ensaio, que determina como taxa máxima de corrosão aceitável de 10 mdd ($\text{mg}/\text{dcm}^2 \times \text{days}$)

Analizadas no MEV para verificar a ocorrência de pitting e realização do cálculo da taxa de corrosão.

Metodologia experimental

- Ensaio de dobramento

Realizado conforme norma ASME IX QW-466.1,



O resultado esperado deste ensaio é que os corpos de prova, ao serem dobrados à 180°, não apresentem trinca na região da solda

Resultados

Produção de cordões de solda

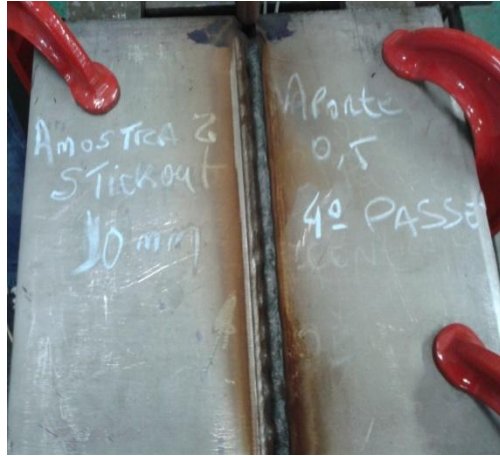
Amostra A2 – Energia de soldagem 0,6 kJ/mm

$$P = \sum_{i=1}^n V \cdot I$$

$$H = \frac{P \cdot \eta}{v}$$

Cordão	Aporte Térmico (kJ/mm)
Raiz	0,66
1º	0,65
2º	0,65
3º	0,65
4º	0,64
5º	0,63
6º	0,64
7º	0,63
8º	0,64
9º	0,65

Resultados



Resultados

Produção de cordões de solda

Amostra A3 – Energia de soldagem 1,8 kJ/mm

$$P = \sum_{i=1}^n V \cdot I$$

$$H = \frac{P \cdot \eta}{v}$$

Cordão	Aporte térmico (kJ/mm)
Raiz	0,61
1º	1,87
2º	1,86
3º	1,87

Resultados



Resultados

Produção de cordões de solda

Amostra A5 – Energia de soldagem 3,0 kJ/mm

$$P = \sum_{i=1}^n V \cdot I$$

$$H = \frac{P \cdot \eta}{v}$$

Cordão	Aporte térmico (kJ/mm)
Raiz	0,65
1º	2,98
2º	3,02
3º	3,04

Resultados



1º passe



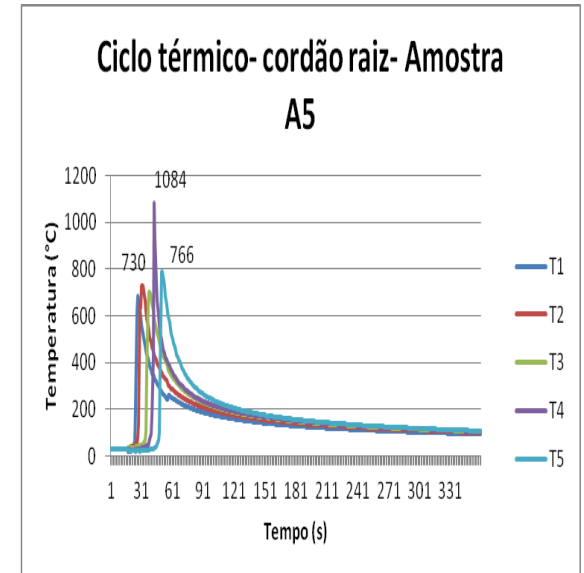
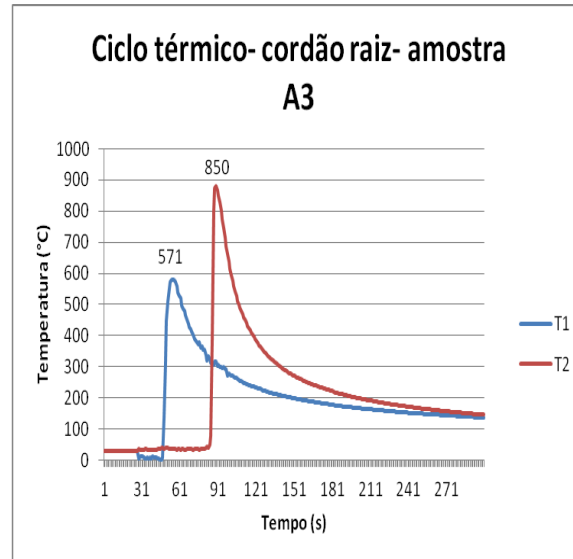
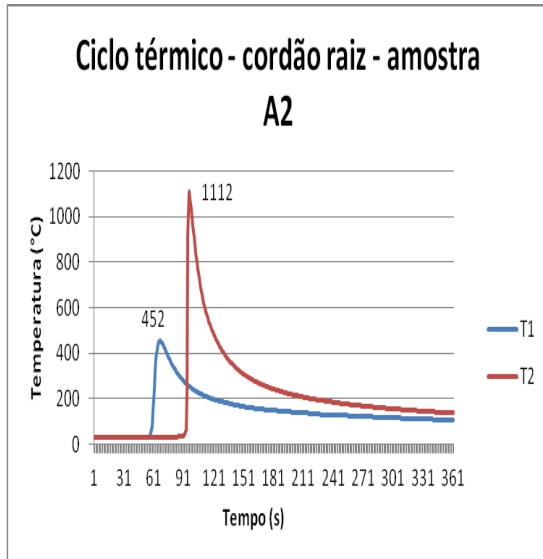
2º passe



3º passe

Resultados

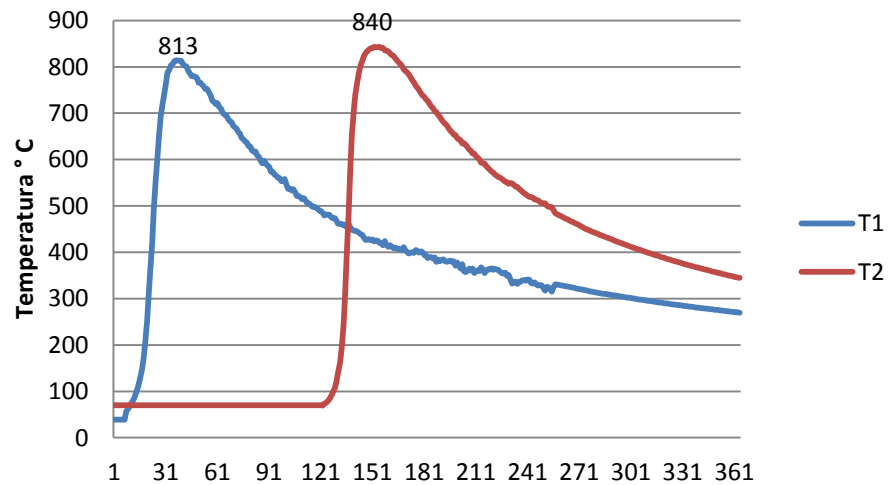
- Ciclo térmico – cordão de raiz da energia soldagem 0,6 kJ/mm(amostra A2) , 1,8 kJ/mm (amostra A3) e 3,0 kJ/mm (amostra A5)



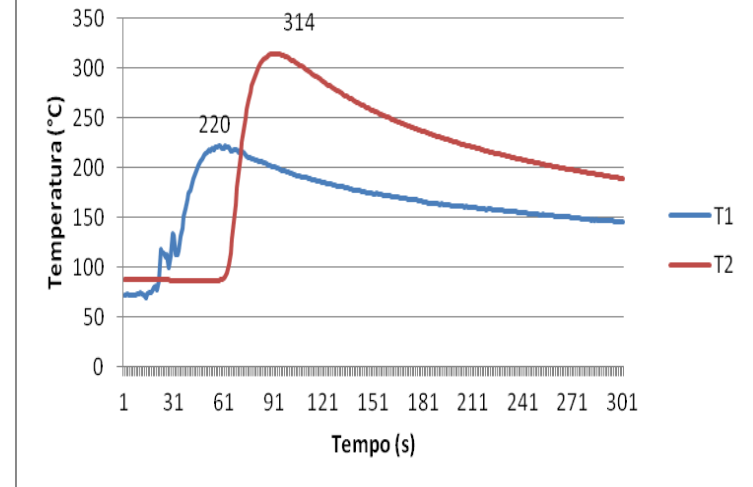
Resultados

Ciclo térmico – energia de soldagem 0,6 kJ/mm

Ciclo térmico 2º cordão - Amostra A2

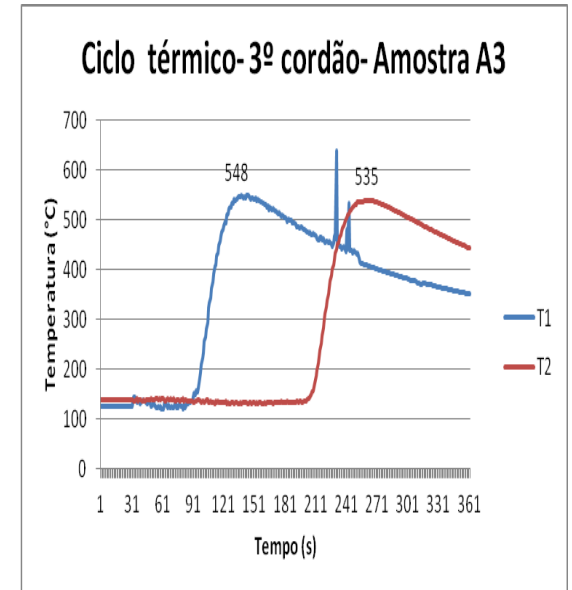
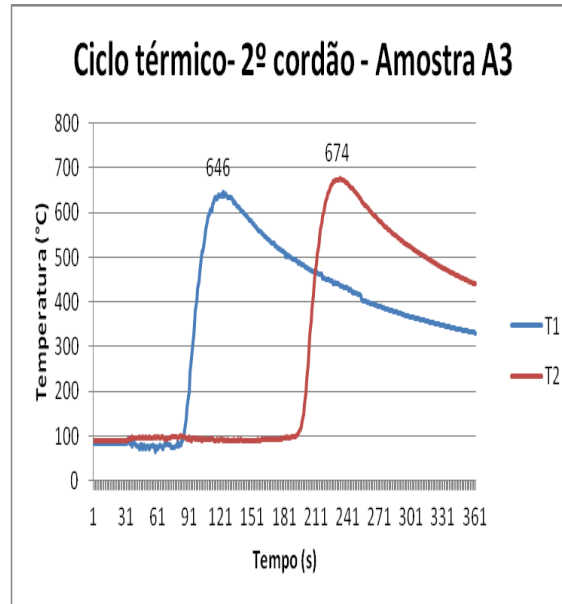
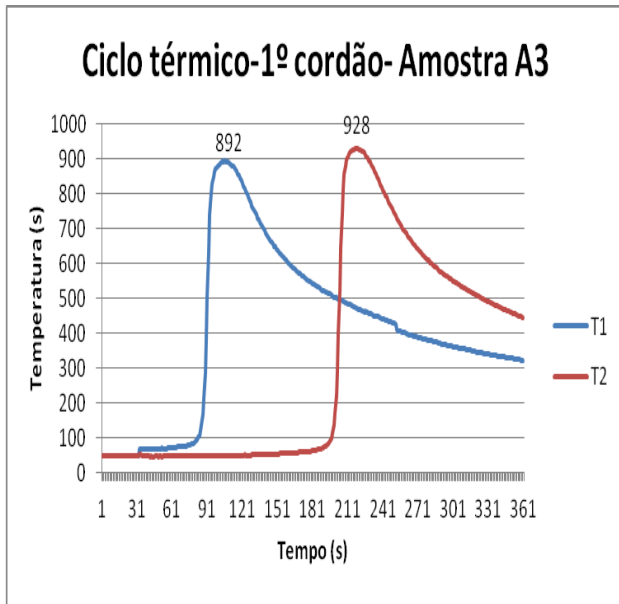


Ciclo térmico- 5º cordão - Amostra A2



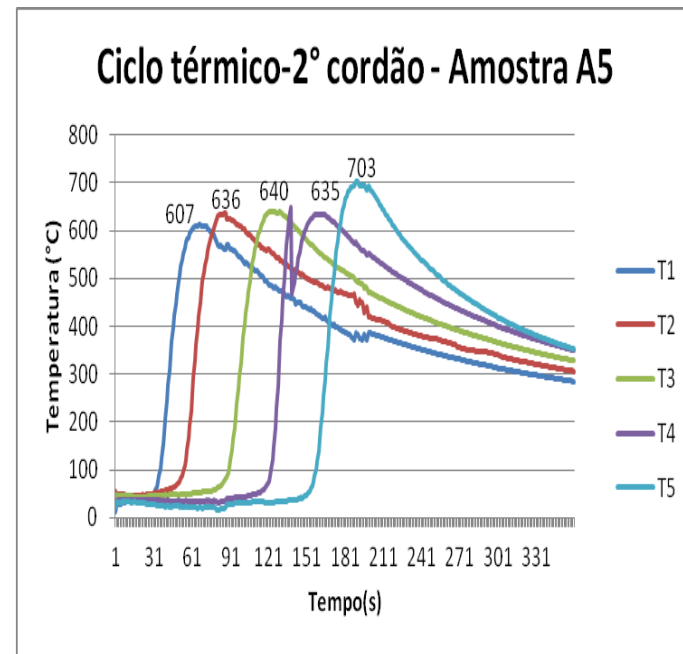
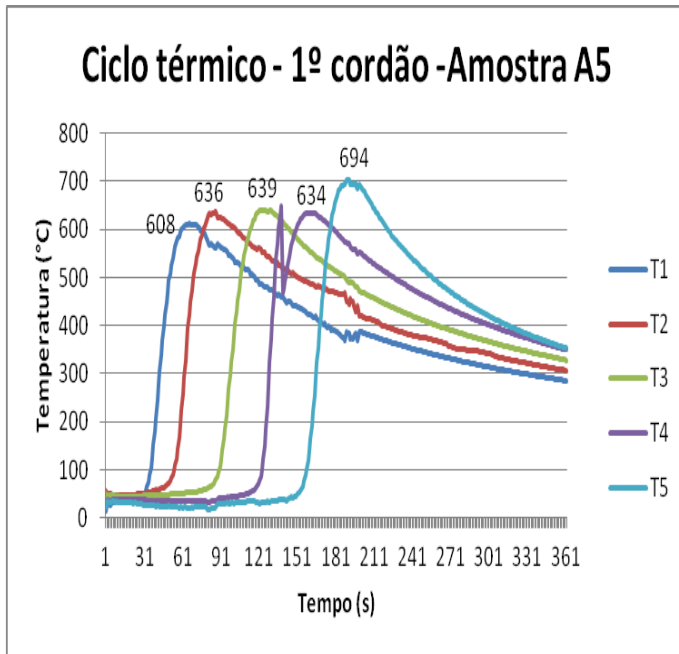
Resultados

Ciclo térmico – energia de soldagem 1,8 kJ/mm.



Resultados

Ciclo Térmico – energia de soldagem 3,0 kJ/mm



Resultados

Ensaio de tração



Energia de soldagem 0,6 kJ/mm



Energia de soldagem 1,8 kJ/mm



Energia de soldagem 3,0 kJ/mm

Resultados

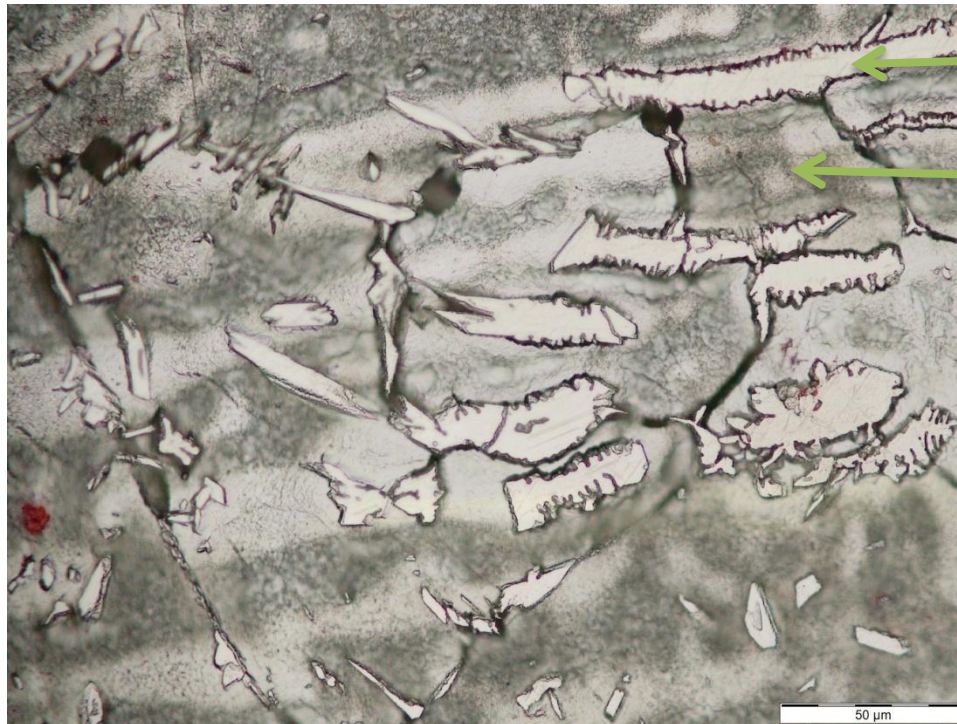
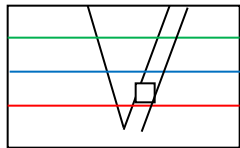
Ensaio de dobramento



Resultados

METALOGRAFIA - Quantificação de fases

amostra A2- energia de soldagem 0,6 kJ/mm -
Região R2



Austenita 38%

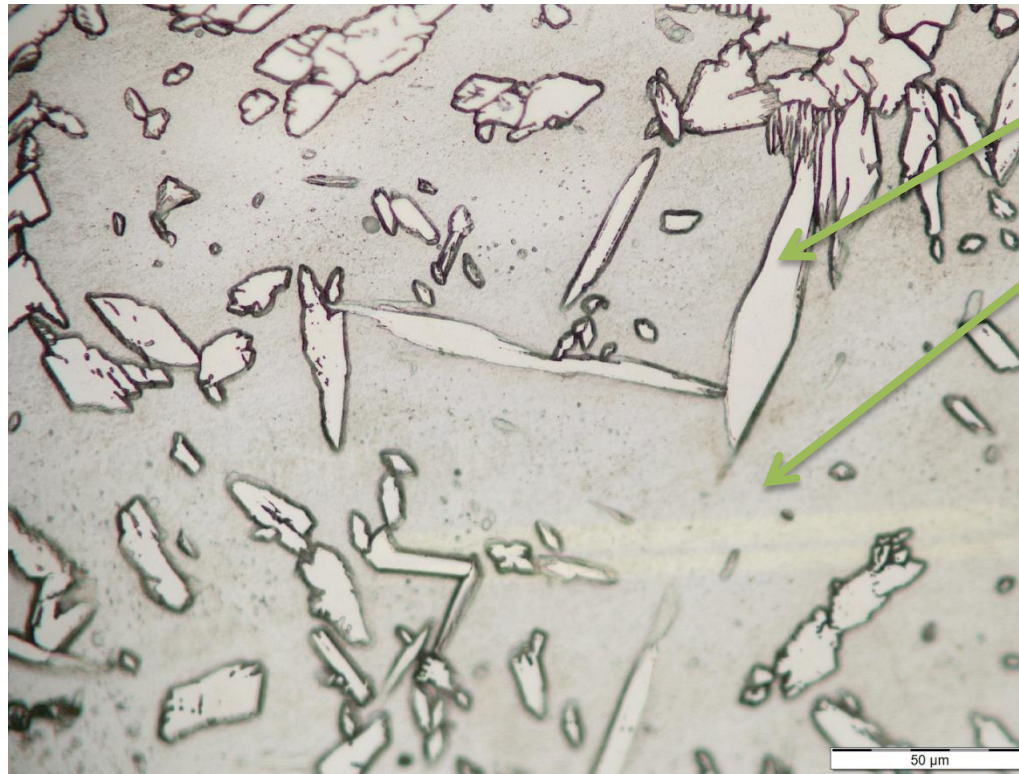
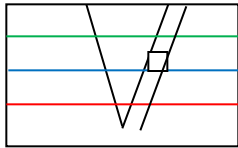
Ferrita 62%

As demais regiões apresentaram valor médio de 56% de ferrita e 44% de austenita.

Resultados

METALOGRAFIA - Quantificação de fases

amostra A3- Energia de soldagem 1,8 kJ/mm
Região R4



Austenita 46%

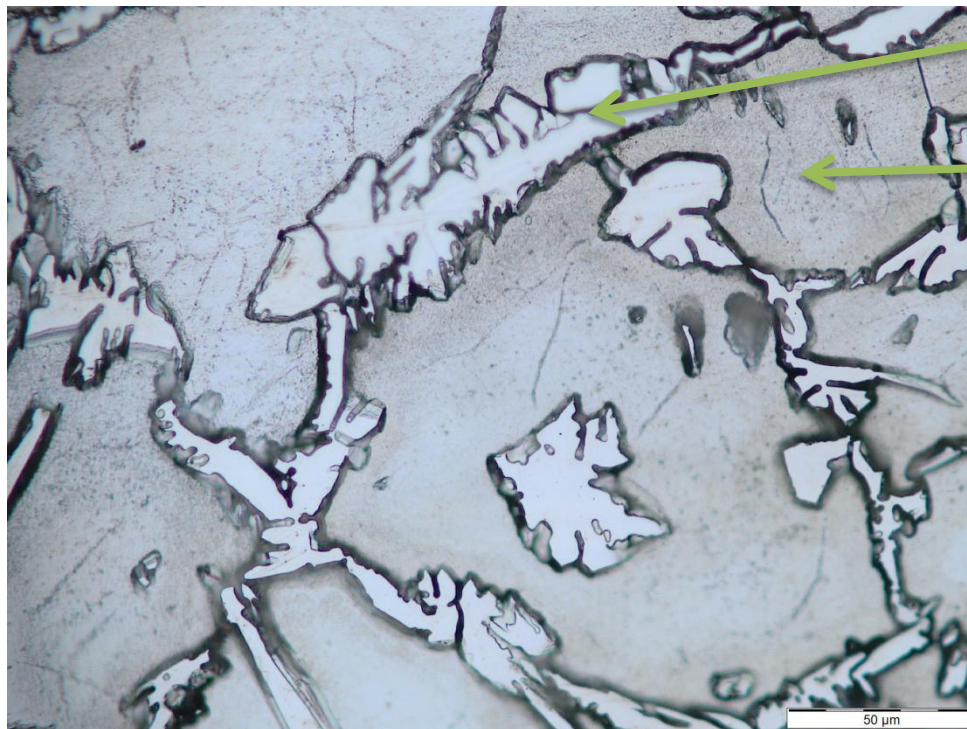
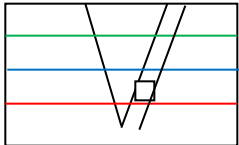
Ferrita 54%

As demais regiões apresentaram valor médio de 57 % de ferrita e 43 % de austenita.

Resultados

METALOGRAFIA - Quantificação de fases

amostra A5- Energia de soldagem 3,0
kJ/mm Região R2



Austenita 39%

Ferrita 61%

As demais regiões apresentaram valores médios de 59% de ferrita e 41% de austenita.

Resultados

Ensaio de corrosão

As amostras A2, A3 e A5 foram submetidas a ensaio de corrosão, conforme norma ASTM G48-11 apresentou variação de massa conforme tabela.

Amostra	M_i (g)	M_f (g)	Diferença (g)	%	Dimensão (mm)
A2	187,2850	186,5290	0,7560	0,40	75,0 x 20,0 x 16,0
A3	191,8350	191,1316	0,7034	0,38	80,0x 20,0 x 16,0
A5	136,1961	135,6695	0,5286	0,39	74,0 x 15,0 x 16,0

Resultados

Ensaio de corrosão

Taxa de corrosão, conforme norma ASTM G1-03 item 8

$$\textit{Corrosion rate} = \frac{(K.W)}{(A.T.D)}$$

K= constante $8,76 \times 10^7$ mm/ano

T= tempo de exposição em horas

A= área em cm^2

W= massa perdida em gramas

D= densidade em g/cm^3

Aporte kJ/mm	Taxa de corrosão mm/ano
0,6	$1,87 \times 10^{-5}$
1,8	$1,25 \times 10^{-5}$
3,0	$2,1 \times 10^{-5}$

Resultados

Ensaio de corrosão

A norma ASTM A923-14 (método C) foi utilizada para efeito de confirmação dos resultados , sendo considerado como condição de aprovação valores abaixo de 10 mdd (mg/dm²xdias).

Aporte kJ/mm	Taxa de corrosão mdd
0,6	2,1
1,8	1,83
3,0	1,49

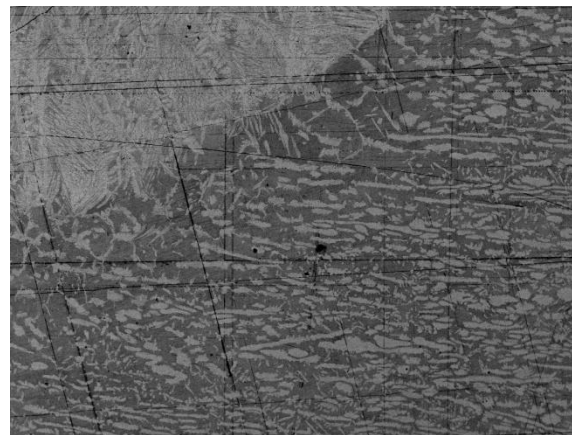
Resultados

Imagens do MEV – ocorrência de pitting



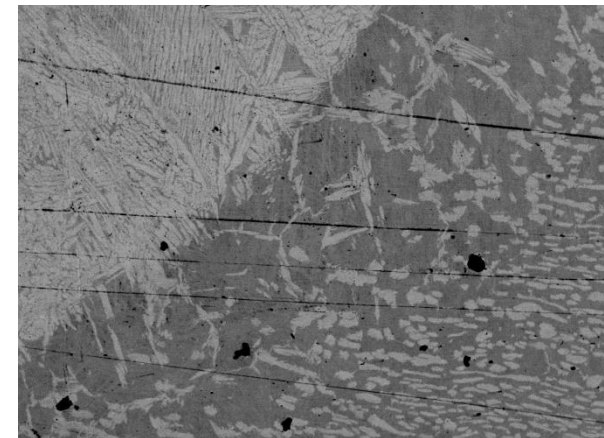
APORT 0,5 F D8.1 x100 1 mm

Energia de soldagem 0,6 kJ/mm



DUPLEX 1,5 F D4.5 x150 500 um

Energia de soldagem 1,8 kJ/mm



DUPLEX 3,0 F D5.8 x150 500 um

Energia de soldagem 3,0 kJ/mm

Análise MEV austenita secundária

Foram analisadas a ZTA das amostras A2, A3 e A5 , verificando o percentual em peso de Cr e Ni. As três amostras apresentaram regiões, na qual ocorreram enriquecimento de Ni e um empobrecimento de Cr. Caracterizando a formação de austenita secundária.

Análise MEV austenita secundária

Amostra A2 0,6 kJ/mm

Formação de austenita secundária na região entre o 4º e 5º passe



Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Chromium	22.544	0.488	23.869
Iron	72.812	0.647	71.776
Nickel	4.644	0.571	4.355

Análise MEV austenita secundária

Amostra A3 1,8 kJ/mm

Formação de austenita secundária na região entre o 2º e 3º passe

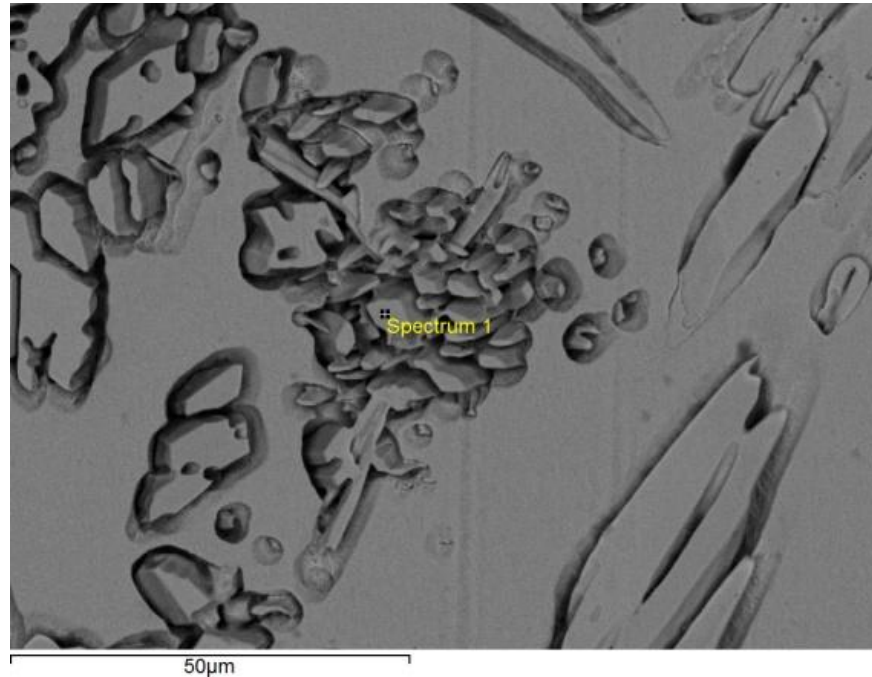


Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Chromium	22.962	0.551	24.305
Iron	72.283	0.718	71.236
Nickel	4.756	0.623	4.458

Análise MEV austenita secundária

Amostra A5 3,0 kJ/mm

Formação de austenita secundária na região entre o 2º e 3º passe.



Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Chromium	22.570	0.469	23.889
Iron	73.367	0.616	72.302
Nickel	4.063	0.537	3.809

CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados, os resultados podem ser sumarizados da seguinte forma:

- A utilização do processo GMAW-P é adequado para realizar a soldagem do AILD UNS S32304.
- Os resultados obtidos mostraram microestruturas na zona afetada pelo calor compostas de ferrita e austenita, com formação ocasional de austenita secundária com alteração do aspecto da austenita com a evolução dos passes de soldagem.
- Apesar do balanço inicial entre as fases ferrita e austenita ter sido afetado, as frações dessas fases se apresentaram dentro da faixa aceitável para aplicação.

CONCLUSÃO

- A utilização do consumível AWS ER2209, provou ser uma opção importante como consumível alternativo, visto que não afetou os resultados.
- Os resultados obtidos do ensaio de corrosão demonstram que as soldas realizadas com três diferentes aportes térmicos (0,6; 1,8 e 3,0 kJ/mm) apresentam taxa de corrosão em mm por ano dentro dos critérios de aceitação da normas ASTM G48-11, ASTM G1-03 e ASTM A923-14
- A formação de austenita secundária era esperada em função dos diversos ciclos de aquecimento e resfriamento, porém não comprometeu os resultados