



ARTIGOS

**REVISTA UNICREA**  
REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE CORPORATIVA DO CREA/SC

## CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS PELOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO EM AÇO FUNDIDO ASTM A743-CA6NM SEM TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES POSTERIOR

Luiz Eloi Vieira Jr<sup>1</sup>  
Sérgio Schmidt Jr<sup>2</sup>

### RESUMO

Usualmente, aços inoxidáveis martensíticos fundidos necessitam reparos por solda devido aos desvios de projeto ou processos de fundição. Assim, o tratamento térmico de alívio de tensões posterior à soldagem se torna problemático, pois as peças nas condições de aplicação possuem tolerâncias dimensionais restritas que podem distorcer durante o tratamento térmico e não atender ao requisito de montagem. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da produção de peças fundidas com reparos de solda sem a aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões. Fundiram-se placas do aço ASTM A743-CA6NM e realizaram passos de soldagem nos processos Eletrodo Revestido, MIG e TIG. A caracterização deu-se com técnicas de análise química, além das propriedades mecânicas pelos ensaios de tração, impacto e dureza. Ao final, apenas o processo TIG foi aprovado, de acordo com a norma do material. O processo de Eletrodo Revestido não foi aprovado nos ensaios de dureza e impacto, enquanto o processo MIG não foi aprovado no ensaio de impacto. Sugere-se que os processos MIG e Eletrodo Revestido não passaram devido às características dos cordões e o maior aporte térmico por ambos os processos e a composição química do consumível do processo Eletrodo Revestido.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis. A743-CA6NM. Solda MIG. Solda TIG. Solda Eletrodo Revestido.

<sup>1</sup> Professor. Doutor. Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Elétrica e Mecânica – Universidade Regional de Blumenau. E-mail: [levieira@furb.br](mailto:levieira@furb.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico. Eletroação Altona. E-mail: [ssergio.schmidt@altona.com.br](mailto:ssergio.schmidt@altona.com.br)

# **MECHANICAL CHARACTERIZATION OF JOINTS WELDED BY THE ELECTRIC ARC WELDING PROCESSES IN CAST STEEL ASTM A743-CA6NM WITHOUT POST-STRESS RELIEF HEAT TREATMENT**

## **ABSTRACT**

*Usually, cast martensitic stainless steels require weld repairs due to design deviations or casting processes. Thus, stress relieving heat treatment after welding becomes problematic as parts under application conditions have tight dimensional tolerances that can distort during heat treatment and not meet the assembly requirement. Thus, this work aims to evaluate the feasibility of producing castings with weld repairs without the application of stress relief heat treatment. Then, ASTM A743-CA6NM steel plates were cast and welding steps were carried out in the SMAW, MIG and TIG processes. The characterization was carried out with chemical analysis techniques, in addition to the mechanical properties by tensile, impact and hardness tests. In the end, only the TIG process was approved, according to the material standard. The SMAW process did not pass the hardness and impact tests, while the MIG process did not pass the impact test. It is suggested that the MIG and SMAW processes did not pass due to the characteristics of the beads and the greater heat input by both processes and the chemical composition of the consumable of the SMAW.*

**Keywords:** *Stainless steels. A743-CA6NM. MIG welding. TIG weld. Coated Electrode Welding.*

## **1 INTRODUÇÃO**

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas (Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni) com teor mínimo de 10,5% em peso de cromo, necessário para prevenir à oxidação e corrosão proveniente da atmosfera de trabalho.

### **1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS**

Estes aços obtêm a nomenclatura de inoxidáveis pela formação de um filme invisível a olho nu, aderente e impermeável de óxido rico em cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Este óxido forma-se e regenera a si mesmo na presença do oxigênio. Outros elementos químicos podem ser adicionados para melhorar as características desta liga como níquel, manganês, molibdênio, cobre, titânio, silício, nióbio, alumínio, enxofre e selênio. O

carbono, em certos tipos de aços inoxidáveis, possui teor entre 0,03% até 1,0% em peso [1 – 3].

De acordo com a composição química e microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser divididos em até cinco grupos, podendo ser austeníticos, martensíticos, ferríticos, dúplex e os endurecidos por precipitação. Possuem boa resistência à oxidação, mesmo a temperaturas altas e citados também como ligas de resistência ao calor, sendo que algumas ligas com alto teor de cromo (de 25 a 30% em peso) podem ser utilizadas a temperaturas de até 1000°C, assim aplicados em ampla variedade de setores da indústria como energia, química e metal mecânica [4, 6].

### 1.1.1 Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são baseados em um sistema ternário de Fe-Cr-C. A presença de teores superiores de carbono na sua composição química permite a ampliação do campo austenítico mesmo com quantidades elevadas de cromo. Desta forma, o uso do sistema ternário Fe-Cr-C é importantíssimo para a fabricação dos aços inoxidáveis martensíticos, pois para que a martensita se forme durante o resfriamento [7].

Estes aços geralmente são denominados como endurecidos ao ar, porque quando retirados do forno como austeníticos, o resfriamento em ar calmo é suficientemente rápido para produzir transformação martensítica. Assim, taxas normais de resfriamento de soldas também são suficientemente rápidas para produzir metal de solda e ZTA com microestruturas predominantemente martensíticas. Os aços inoxidáveis martensíticos podem alcançar valores de limite de escoamento de até 1900 MPa em condições de temperado e revenido.

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos é menor, se comparada aos outros graus de aços inoxidáveis devido ao seu teor baixo de cromo (12 a 14% em peso) e o alto teor de carbono (comparado aos outros). Esta combinação de propriedades viabiliza a sua seleção na fabricação de diversos componentes, como por exemplo pás para turbinas à vapor, gás e a jato, que operam a temperaturas baixas, além de dutos de vapor, grandes turbinas hidráulicas, canais de água, tubulações e válvulas para indústrias de petróleo, etc [8].

### 1.1.2 Aço inoxidável martensítico fundido ASTM A743-CA6NM

Os aços inoxidáveis martensíticos CA6NM foram desenvolvidos na Suíça no início dos anos 1960 e continuam em constante desenvolvimento devido a exigências cada vez mais restritivas dos mesmos. Aplicações típicas destes aços envolvem serviços a baixas temperaturas com requeridos valores altos de tenacidade e em ambientes sujeitos à sulfetos de hidrogênio, o qual requerem resistência à fragilização causada por estes sulfetos [9]. Os aços inoxidáveis martensíticos CA6NM com baixo carbono 13%Cr-4%Ni, tais como as ligas 410 (410NiMo), são utilizados para ambientes corrosivos e com elevadas temperaturas como os rotores de turbinas hidráulicas, indústrias químicas e de geração de energia devido suas boas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Estes aços possuem alta resistência mecânica, tenacidade, resistência à cavitação e soldabilidade razoável. Aços inoxidáveis martensíticos com baixo teor de carbono são sempre temperados e revenidos para a maximização das suas propriedades mecânicas [10 – 12].

Os aços CA6NM possuem ainda adição de níquel para aumentar a temperabilidade e permitir a transformação martensítica e o revenido. Assim, as resistências mecânicas e ao impacto do material são melhoradas. Os aços inoxidáveis 13Cr4Ni solidificam-se para ferrita  $\delta$ , então iniciam a transformação para austenita a cerca de 1300°C e terminam, em condições termodinâmicas equilibradas, a cerca de 1200°C [11 – 13].

### 1.1.3 Soldabilidade do aço inoxidável martensítico fundido ASTM A743-CA6NM

Recomenda-se para a soldagem de aços inoxidáveis martensíticos a utilização de consumíveis de soldagem, como eletrodos revestidos, arames e varetas, que possuam teores de carbono menor do que 0,04% em sua composição, cerca de 12% de cromo e faixas de 4 a 6% de níquel, pois estes valores auxiliarão na obtenção de um teor máximo de cerca de 5% de ferrita delta. O controle de hidrogênio difusível nos consumíveis com valores máximos de 5mL/100g e pré-aquecimento mínimo de 100°C a fim de evitar trincas a frio [13].

Na maioria dos casos, os aços inoxidáveis são soldáveis com processos especiais, sendo que os resultados da soldagem causam significativas alterações no metal de solda e à ZTA relativa ao metal de base. Isto pode constituir uma alteração ao balanço de fases, na formação de microconstituintes intermetálicos, crescimento de grão, segregação de elementos de liga e impurezas [5]. Os aços inoxidáveis martensíticos CA6NM por terem teores baixos de carbono (máximo 0,06% em peso), além da adição de teores de 3,5 a 4,5% de níquel e de cerca de 0,60% de molibdênio, apresentam soldabilidade razoável, mesmo sem pré-aquecimento [9]. Seu baixo teor de carbono leva a formação de uma estrutura martensítica na forma de ripas, permitindo tanto a redução de precipitação de carbonetos como uma boa soldabilidade através de técnicas de soldagem por arco elétrico [14, 15].

A soldagem é extensivamente utilizada para a montagem e reparos de componentes do aço CA6NM. Tipicamente, a microestrutura resultante em temperatura ambiente consiste em martensita revenida, podendo conter pequenas quantidades de ferrita  $\delta$  e austenita retida [12]. A austenita retida melhora as propriedades mecânicas de impacto, enquanto a presença de ferrita  $\delta$  deteriora as propriedades de impacto [16 – 19]. A redução da tenacidade, bem como as altas tensões residuais, pode encurtar a vida útil das peças e acelerar o processo de corrosão por cavitação, por exemplo em componentes hidráulicos. O processo de tratamento térmico posterior à soldagem (TTPS) para este tipo de aço é aplicado para garantir mínimas tensões residuais do componente e aumentar sua tenacidade [20]. Além disso, o uso do TTPS é requerido para reverter a martensita frágil.

O uso do aço CA6NM com metal de solda sem TTPS não é recomendado devido aos altos níveis de tensão residual, trincas de tensão e baixa resistência à fadiga. O tempo e temperatura de revenido tem uma grande influência na microestrutura formada. Isto se deve ao fato de temperaturas mais baixas (cerca de 550°C) e com tempos de patamar menores (cerca de 2 horas) praticamente não permitam a formação de austenita retida no material de base, enquanto temperaturas mais altas (cerca de 610°C) e tempos de patamar maiores (cerca de 8 horas) permitam a formação de austenita retida na microestrutura [5, 12, 21 – 23].

As zonas de fusão durante a soldagem de aços inoxidáveis martensíticos se solidificam como ferrita  $\delta$ . A segregação de carbono e outros elementos de liga

durante a solidificação podem, em alguns casos, resultar na formação de austenita ou uma mistura de ferrita e austenita. Como o metal de solda resfria rapidamente no estado sólido, a austenita irá consumir a ferrita, resultando numa estrutura de austenita completa a cerca de abaixo de 1100°C. A austenita ainda irá se transformar em martensita com a continuação do resfriamento [5]. A partir do que foi descrito, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade da produção de reparos com solda em amostras na forma de placas fundidas do aço ASTM A743-CA6NM sem o tratamento térmico de alívio de tensões.

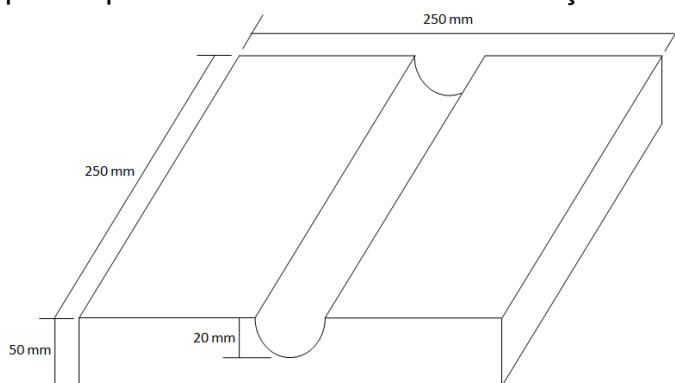
## 1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.2.1 Obtenção e preparação das placas de solda

As seis placas de solda de aço inoxidável martensítico ASTM A743-CA6NM foram produzidas a partir da fusão em um forno a indução de um lingote de mesmo material já refinado em um conversor AOD (UHT - *Uvan Hagfors Teknoloi AB*, Suécia). Estas placas foram vazadas a uma temperatura de 1550°C em moldes de areia *pep set* (Crios, Brasil) com proporção de areia nova e recuperada de 65/35 variando entre 0,9 até 1,1% de resina em peso de areia, fabricados durante o processo de moldagem.

A Figura 1 abaixo mostra os desenhos da placa inteira (Figura 1a) e as divisões dela para a produção dos corpos de prova (Figura 1b).

Figura 1 - Croqui das placas fundidas e soldadas de aço ASTM A743-CA6NM



(a) Dimensões e geometria das placas de solda.

Descarte	Tração cilíndrico	Impacto solda	Impacto solda	Impacto solda	Impacto ZAT	Impacto ZAT	Impacto ZAT	Tração cilíndrico	Macrografia e dureza	Guardar			
25	30	12	12	12	12	12	12	30	12	Restante			

(b) Divisões das seções úteis às produções dos corpos de prova das placas soldadas.

Ressalta-se que as placas fundidas têm dimensões de 250 x 250 x 50 mm e geometria do chanfro em U, com profundidade de 20 mm e abertura de 60°. A composição química das placas foi determinada com auxílio de um espectrômetro de emissão óptica *SpectroMaxx* (SPECTRO, EUA).

### 1.2.2 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido foram realizados em um forno de câmara isolada com módulo de fibra cerâmica do tipo carro (Sauder, Brasil). O ciclo do tratamento térmico de têmpera possui uma rampa de aquecimento de 50°C/h até a temperatura de patamar de 1040°C, onde permaneceu por 12 horas em patamar. Posteriormente ao tempo de patamar, ocorreu o resfriamento ao ar calmo. O ciclo de revenido se deu com rampa de aquecimento de 50°C/h até a temperatura de patamar de 610°C, onde permaneceu por 14 horas em patamar. Posteriormente ao tempo de patamar, ocorre o resfriamento ao ar calmo.

### 1.2.3 Ensaios não destrutivos

Seguido ao tratamento térmico, as placas foram limpas por jateamento com granalha de microesferas de aço para serem ensaiadas, à temperatura ambiente, pelos ensaios não destrutivos de Visual, Líquido penetrante SKL-WP II-A (MAGNAFLUX, Brasil), Partículas magnéticas P-1500-2300004 (MAGNAFLUX,

Brasil) e Ultrassom Olympus (Krautkramer, EUA), com o intuito de garantir que possíveis defeitos provenientes do metal de base pudessem ser removidos e não influenciassem nos resultados de ensaios mecânicos das juntas soldadas.

### 1.3 SOLDAGEM DAS PLACAS

Foram escolhidas duas placas para cada processo de soldagem. Os procedimentos de soldagem estão descritos no Quadro 1 abaixo. Os consumíveis escolhidos para a soldagem das placas foram os da classe AWS E410NiMo-26 (eletrodo revestido ER - Böhler, Brasil) e AWS ER410NiMo (arame MIG e vareta TIG - fabricante Weld Inox, Brasil). A escolha destes consumíveis para soldagem é devido à sua composição química muito similar ao metal de base.

Quadro 1 - Parâmetros de soldagem das placas

Parâmetros / Placas de solda	WK409	WK410	WK411-01	WK411-02	WK412-01	WK412-02
Processo	ER	ER	MIG	MIG	TIG	TIG
Consumível	E410NiMo-26	E410NiMo-26	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo
Diâmetro (mm)	05	05	1,2	1,2	2,4	2,4
Polaridade	CC+	CC+	CC+	CC+	CC-	CC
Corrente elétrica (A)	150 - 190	150 - 190	140 - 230	140 - 230	100 - 140	100 - 140
Tensão elétrica (V)	20 - 26	20 - 26	20 - 26	20 - 26	08 - 13	08 - 13
Temperatura de pré-aquecimento mínima (°C)	150	100	100	150	100	150
Temperatura de interpasses máxima (°C)	200	150	150	200	150	200
Gás de proteção	N/A	N/A	97Ar/3CO <sub>2</sub>	97Ar/3CO <sub>2</sub>	Argônio	Argônio
Vazão do gás (L/min)	N/A	N/A	15 - 18	15 - 18	15 - 18	15 - 18



O Quadro 2 abaixo apresenta a composição química do certificado dos fabricantes destes três tipos de consumíveis.

Quadro 2 - Composições químicas dos três tipos de consumíveis de solda

Composição química / Tipo de consumível	Eletrodo revestido	Arame sólido	Vareta sólida
C (%)	0,036	0,01	0,01
Si (%)	0,20	0,36	0,39
Mn (%)	0,43	0,49	0,51
P (%)	0,017	0,015	0,018
S (%)	0,007	0,007	0,010
Cr (%)	11,84	12,14	12,14
Mo (%)	0,51	0,52	0,53
Ni (%)	4,26	4,24	4,14
Cu (%)	0,09	0,09	0,12

As seis placas foram soldadas em multipasses e os parâmetros de processo são mostrados conforme o Quadros 3. A temperatura de interpases máxima foi medida com um termômetro infravermelho (pirômetro) à cerca de 20 mm do cordão de solda (metal base).

Quadro 3 - Parâmetros dos processos de soldagem das placas fundidas

Placa	Nº de passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Largura do cordão (mm)	Temperatura do cordão (°C)	Tempo de soldagem (s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Aporte térmico (KJ/mm)
WK409	14	197,36 ± 9,62	22,29 ± 0,73	13,50 ± 1,95	179,21 ± 8,43	79,57 ± 10,43	3,17 ± 0,36	1,40 ± 0,18
WK410	13	201,38 ± 7,30	22,62 ± 0,65	13,38 ± 1,85	128,54 ± 14,71	72,69 ± 8,71	3,48 ± 0,38	1,32 ± 0,11
WK411-1	9	193,56 ± 8,80	25,44 ± 0,53	16,67 ± 1,12	133,22 ± 6,44	86,11 ± 12,64	2,97 ± 0,48	1,70 ± 0,27
WK411-2	9	195,56 ± 15,36	26 ± 0,00	15,78 ± 2,11	175,78 ± 8,30	87,00 ± 14,07	2,93 ± 0,40	1,77 ± 0,33
WK412-1	60	140,00 ± 0,00	13,00 ± 0,00	8,67 ± 1,32	131,11 ± 13,21	143,00 ± 15,37	1,77 ± 0,20	1,04 ± 0,11
WK412-0	60	140,00 ± 0,00	13,00 ± 0,00	8,67 ± 1,50	170,44 ± 13,10	138,44 ± 23,79	1,86 ± 0,37	1,01 ± 0,17

Este processo de medição de temperatura é necessário ao final de cada passe para a liberação do passe seguinte desde que a temperatura medida esteja abaixo da máxima permitida.

## 1.4 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A remoção e preparação dos corpos de prova de cada placa foi realizada seguindo as definições da norma técnica [24], que define os processos e parâmetros para a qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores. Desta forma, esta faixa removida garante que estes possíveis defeitos provenientes da regulagem dos parâmetros não estejam nos corpos de provas a serem ensaiados. De cada placa soldada foram removidos e preparados corpos de prova conforme Quadro 4.

Quadro 4: Técnicas utilizadas para determinação das propriedades mecânicas das placas soldadas

Caracterizações	Região da amostra
Ensaio de Tração	Metal base, Solda e ZTA
Teste de Impacto Charpy	
Metalografia e Dureza Brinell	

Os primeiros 25 mm de cada placa, em relação à direção de soldagem, são descartados a fim de evitar que possíveis defeitos de solda ocasionem falhas nos corpos de prova.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho, foram soldadas seis placas fundidas no material ASTM A743-CA6NM com aproximadamente 240 mm de comprimento. Os processos de soldagem a arco utilizados foram os de Eletrodo Revestido, MIG e TIG, sendo utilizadas duas placas para cada processo. Entre as duas placas de cada processo, foram utilizadas duas faixas de temperatura de pré-aquecimento e interpasses máximo, sendo uma com uma faixa 100 à 150°C e a outra de 150°C à 200°C. Após a soldagem das placas, foram retirados e preparados corpos de prova para determinação da composição química, além de ensaios mecânicos de tração, dureza e impacto, conforme as definições e parâmetros do código de qualificação de procedimentos de soldagem.

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS JUNTAS SOLDADAS

### 2.1.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados na máquina universal de ensaios Universal Prüfmaschine UHE 60 (Losenhausen, Alemanha) com velocidade de avanço de 5,0 mm/s. a captura dos dados gerados durante os ensaios foi realizada com software ATMI 2004, versão 3.19 (Panatec, Brasil) conforme norma ASTM A370 [25]. As medições das deformações dos corpos de prova foram feitas manualmente, com auxílio de paquímetro.

### 2.1.2 Ensaio de impacto *Charpy*

Os ensaios de impacto do tipo *Charpy* foram realizados na máquina ATMI (Panantec, Brasil), com um pêndulo de capacidade de 300 J. Os corpos de prova foram preparados conforme código ASME Seção VIII [26]. Os corpos de prova tiveram seus entalhes de 45° feitos no centro do corpo de prova, na face oposta à direção de avanço do pêndulo, sendo que cada jogo de impacto das placas de solda (três corpos de prova) foi para ensaio de uma região - um para o metal de base, um para a solda e um para a ZTA.

Os ensaios foram realizados à 0°C com o resfriamento dos corpos de prova por imersão em uma mistura de água com gelo seco (proporção realizada empiricamente em aproximadamente 60% de água e o restante de gelo seco até atingir-se a temperatura objetivada). Assim que a temperatura da mistura atingiu 0°C, os corpos de prova ficaram mergulhados durante cinco minutos antes de serem removidos para homogeneização da temperatura. Os resultados obtidos nos ensaios de impacto do tipo *Charpy* foram realizados à temperatura de 0°C, medidos com termômetro de contato SMARTMETER (NOVUS, Brasil) sendo compostos por três corpos de prova, sendo um do metal de base, um da solda e um da ZTA para cada placa de solda.

### 2.1.3 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados no durômetro Rockwell C HTI (*Sussen Wolpert Testor*, Alemanha) com carga de 150 kg em pontos do metal de base, solda e ZTA (seis pontos para cada região). Os valores foram então convertidos para a escala de Dureza Brinell (HB) seguindo a DIN EN ISO 18265 [27]. O ensaio é um requisito suplementar da norma do material e é definido com o valor máximo especificado de 285 HB. A execução de todos os procedimentos e ensaios deste trabalho foi guiada através das recomendações e diretrizes da norma [24], código este que define os parâmetros necessários para execução e qualificação de procedimentos de soldagem para equipamentos como vasos de pressão, caldeiras, válvulas, etc.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SOLDADA

As composições químicas obtidas por espectrometria nas seis placas soldadas e a do metal de base realizada após vazamento são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Composição química das regiões de solda e do metal base

Região	Placa de solda	Processo de soldagem	Consumível	Composição química (%)										
				C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	V	Al	Cu
Metal base	Todas (corrida)	N/A	N/A	0,01	0,87	0,58	12,84	3,57	0,44	0,03	0,01	0,03	0,03	0,08
Solda	WK409	Eletrodo revestido	E410NiMo-26	0,054	0,58	0,461	12,22	4,94	0,56	0,018	0,015	0,014	0,001	0,022
Solda	WK410	Eletrodo revestido	E410NiMo-26	0,061	0,57	0,462	12,21	4,94	0,56	0,016	0,015	0,014	0,001	0,022
Solda	WK411-01	MIG	ER410NiMo	0,024	0,49	0,411	12,16	4,21	0,57	0,018	0,015	0,02	0,001	0,057
Solda	WK411-02	MIG	ER410NiMo	0,033	0,53	0,419	12,23	4,17	0,57	0,016	0,016	0,02	0,001	0,058
Solda	WK412-01	TIG	ER410NiMo	0,002	0,54	0,47	12,31	4,06	0,57	0,017	0,016	0,021	0,001	0,092
Solda	WK412-02	TIG	ER410NiMo	0,006	0,54	0,435	12,48	4,06	0,58	0,018	0,017	0,022	0,001	0,092

O resultado obtido da análise da composição química do metal base fundido referente à corrida de aciaria atende à composição química definida pela norma técnica [2]. Já as composições químicas referentes às regiões soldadas são muito similares entre os tipos de consumíveis, exceto aos teores de carbono, com exceção

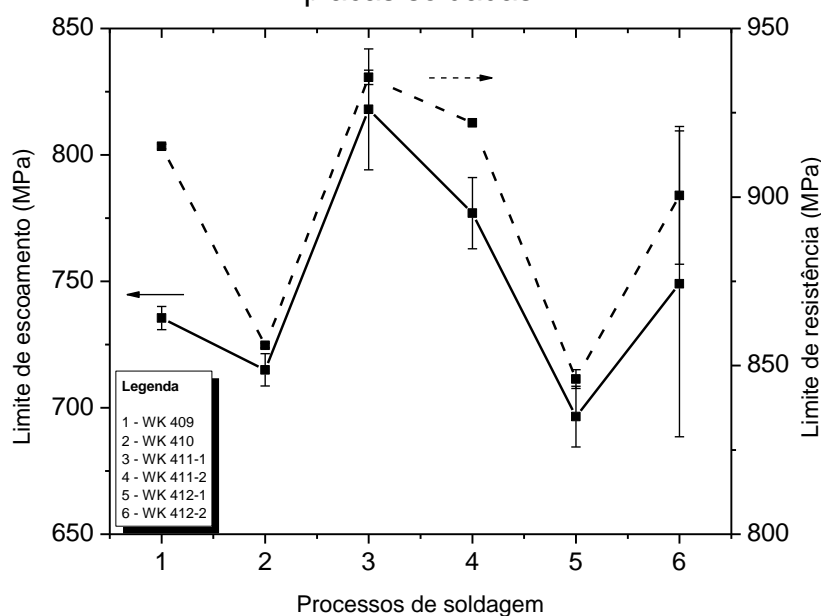
do teor de carbono do eletrodo revestido referente à placa WK410, o qual ficou 0,001% mais alto do que o permitido por norma (0,06% máximo).

## 3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRAÇÃO, IMPACTO E DUREZA DAS JUNTAS SOLDADAS

### 3.2.1 Resistência à tração

A Figura 2 abaixo estratifica os valores médios obtidos de limite de escoamento (LE – linha cheia) e de limite de resistência (LR – linha tracejada) da junta soldada de cada placa com os desvios padrões.

Figura 2 - Resultados obtidos após ensaios dos ensaios de tração nas placas soldadas



Os valores alcançados remetem-se aos do metal de base das placas de solda e atendem aos mínimos de 400 MPa, solicitados na norma do material [24]. Campos de prova de tração (Figura 3).

Figura 3 - Corpos de prova de após ensaios de tração com as regiões soldadas destacadas em vermelho



(a) Eletrodo revestido



(b) MIG



(c) TIG

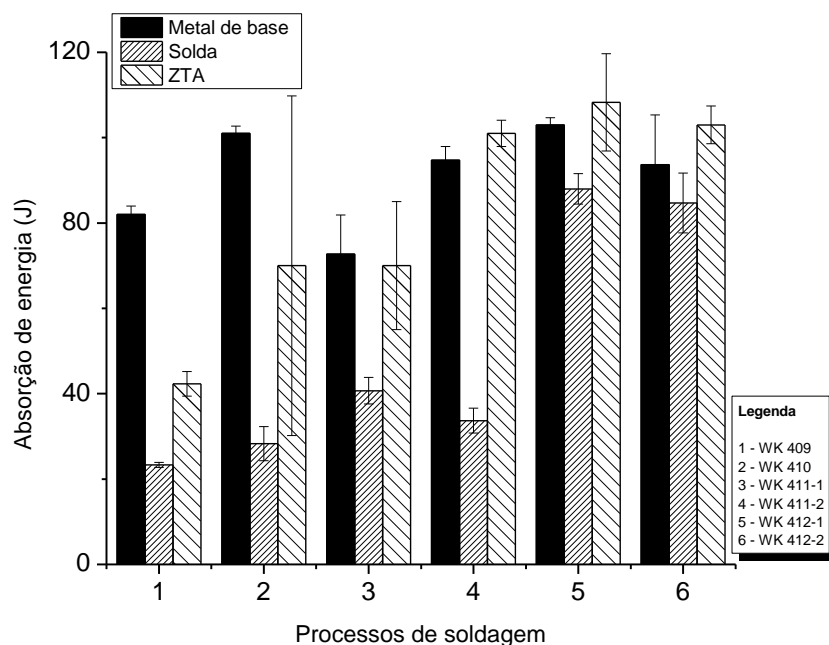
Cabe ressaltar que os valores de desvios padrões se apresentaram muito amplos. Isto pode estar associado com a presença de defeitos presentes nos corpos de prova como inclusões ou óxidos por exemplo.

Isto pode estar relacionado com heterogeneidades microestruturais, onde tem-se uma microestrutura mais refinada da região da solda, visto que esta região não apresentou inclusões e tem uma quantidade de ferrita delta maior e espalhada pela microestrutura, aumentando assim sua resistência mecânica. Os corpos de prova de tração apresentados na Figura 3 mostra os locais de ruptura na região do metal de base de todos os corpos de prova, onde é possível ver que a região de solda praticamente permaneceu sem deformação.

### 3.2.2 Ensaio de impacto *Charpy*

A Figura 4 abaixo apresenta os valores médios obtidos das placas de solda.

Figura 4 - Resultados obtidos dos ensaios de impacto nas placas soldadas



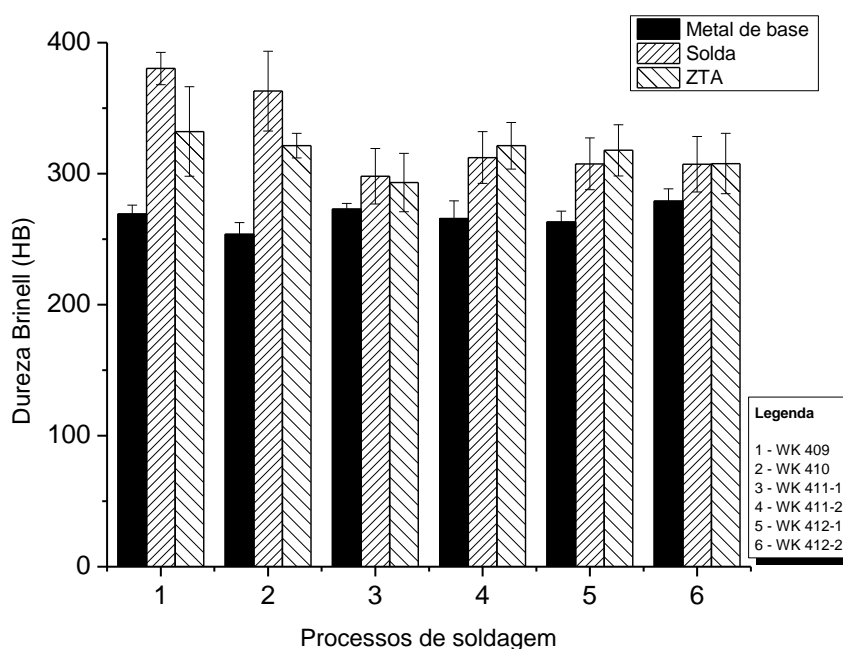
Nota-se que os valores obtidos no metal de base estão todos aprovados e mais homogêneos, visto que as placas foram produzidas na mesma carga de aciaria, bem como tratadas termicamente nas mesmas cargas de fornos. Já os valores apresentados na região de solda diferem muito entre o processo TIG e os processos ER e MIG. Os valores obtidos no processo TIG estão maiores do que 50% acima dos valores obtidos nos outros processos. Isto pode estar correlacionado com a microestrutura mais refinada obtida no processo TIG em relação ao seu aporte térmico mais baixo se comparado aos outros processos.

Além disso, os menores teores de carbono no consumível do processo TIG reduzindo a dureza da solda, aliado a maior quantidade de cordões de solda, cerca de quatro vezes mais do que os outros processos em um chanfro de mesmo tamanho. Isso deve-se ao fato de os cordões subsequentes revenirem a martensita dos cordões das camadas abaixo, conduzindo à redução de resistência mecânica na região e consequentemente um aumento da tenacidade.

### 3.2.3 Ensaio de dureza

As durezas da junta soldada das placas foram realizadas em um durômetro de bancada. Foram realizadas medições no metal de base, na solda e na ZTA na escala Rockwell C (HRC) e depois convertidas para Brinell (HB) de acordo com a norma DIN EN ISO 18265. Apesar da norma do material não definir valores de dureza, a maioria dos clientes da empresa define valores máximos de 285 HB para o metal de base e de 330 HB para regiões de solda e ZTA. Os valores médios obtidos no ensaio são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Valores de dureza convertidas para a escala Brinell para as placas soldadas



Novamente, nota-se que os valores de dureza obtidos no metal de base estão todos aprovados e mais homogêneos entre si. Isto porque os metais de base foram produzidos em uma mesma carga de aciaria, bem como tratados termicamente nas mesmas cargas de fornos. Já os valores de dureza apresentados na região de solda diferem apenas entre o processo ER e os processos TIG e MIG. Os valores obtidos no processo ER estão mais altos que os valores obtidos nos outros processos. Isto pode ser evidenciado devido a teores mais altos de carbono na composição química



do consumível de eletrodo revestido, sendo duas vezes maior do que nos consumíveis de MIG e até 10 vezes nos de TIG, visto que não houve muita diferença entre os processos MIG e TIG.

Os valores apresentados na região de ZTA já estão mais homogêneos entre os processos do que na região soldada. Deve-se ao fato de como nesta região pode haver uma menor formação de austenita e conseqüente maior presença de fases de ferrita, levando a uma redução da dureza das regiões de ZTA. Um fato relevante de que deve ser constatado e que pode influenciar no resultado dos ensaios também é que como as medições foram realizadas em um durômetro de bancada (escala Rockwell C), as impressões realizadas sobre a região de ZTA podem estar em cima também de regiões de solda e metal de base, influenciando o resultado para mais ou para menos, devido ao tamanho da impressão ser maior do que a espessura da região de ZTA. Os desvios padrões apresentados nas regiões de solda apresentam variações consideráveis possivelmente devido à microestrutura presente no ponto de medição. Já os desvios nas regiões de ZTA também apresentam variações maiores, isto provavelmente devido à dificuldade de se atingir apenas a região da ZTA durante a impressão realizada pelo equipamento, pois o penetrador eventualmente atinge mais de uma fase, no caso a ZTA e metal base ou ZTA e solda.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos testes deste trabalho, chegou-se as seguintes conclusões:

1. As composições químicas obtidas no metal de solda das placas entre os processos estão bastante homogêneas entre si, exceto os teores de carbono, que permite concluir que o elemento é bastante significativo nas alterações de dureza na região soldada, influenciando negativamente nos resultados de resistência ao impacto;
2. Quanto aos resultados obtidos nos ensaios de tração, não se pode comparar os valores de resistência mecânica da solda entre os processos, visto que todos os corpos de prova romperam no metal de base e nenhum apresentou deformação considerável na região soldada. Apesar disso, todos os resultados obtidos estão aprovados de acordo com a norma de material ASTM A743-CA6NM (edição 2020);

3. Nos ensaios de impacto, apenas o processo TIG aprovou em todas as regiões da junta soldada (metal de base, solda e ZTA). Isto leva a concluir que nas condições dos testes realizados neste trabalho e os valores especificados neste, apenas o processo TIG é hábil a realizar reparos em peças fundidas de aço inoxidável martensítico ASTM A743-CA6NM sem tratamento térmico de alívio de tensões posterior à soldagem. Os processos ER e MIG não se aplicam devido à condição de que as regiões de solda ficaram com valores de impacto abaixo dos valores mínimos especificados, pois faltaram mais camadas de solda para reaver os cordões de camadas abaixo, além dos valores de aporte térmico maiores ocasionando uma microestrutura menos refinada do que as obtidas no processo TIG;

4. Já nos ensaios de dureza, é possível deduzir que com os resultados obtidos nos processos MIG e TIG seria possível atender a requisitos de dureza sem tratamento térmico posterior. Apesar disso, não há a possibilidade de concluir com certeza os resultados obtidos na região de ZTA dos corpos de prova, pois a forma de medição de dureza com o durômetro de bancada não permite ter confiabilidade de que apenas a região de ZTA esteja sendo medida e não uma junção entre ZTA, metal de base e metal de solda devido ao tamanho da impressão. Uma alternativa para atestar com certeza os valores obtidos em ZTA, seria realizar os ensaios de dureza desta região em um microdurômetro Vickers, que possibilitaria a medição com maior precisão devido ao menor tamanho da impressão formada;

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da empresa Eletro Aço Altona pela doação dos materiais e realização de todas as etapas experimentais deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] ASM, Alloy Digest Sourcebook: Stainless Steels, A. International, Ed., Ohio, 2000, 584 p.
- [2] ASTM, ASTM A743: Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application, 6 ed., West Conshohocken, 2006.
- [3] STROBEL FILHO, E.; LIMA. A.P.; MARIANO, N. Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C Revista Escola de Minas, v. 60, p. 123-127, 2007.
- [4] PORTO, J. Aços inoxidáveis planos, São Leopoldo: Unisinos, 2012, 168 p.
- [5] LIPPOLD, J.; KOTECKI, D. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, New Jersey: John Willey & Sons, 2005, 376 p.
- [6] PUKASIEWICZ, A.; OLIVEIRA, F.; CAPRA ; PAREDES, R. Influência da refusão por plasma na microestrutura de um revestimento Fe-Mn-Cr-Si depositado por aspensão térmica arco elétrico sobre aço inoxidável ASTM A743-CA6NM, Soldagem e Inspeção, v. 17, p. 65-75, 2012.
- [7] BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R. Steels: microstructure and properties, 4 ed., Butterworth-Heinemann, 2017, 448 p.
- [8] GOUVEIA, R.; PUKASIEWICZ, A.; CAPRA, A.; HENKE, S.; OKIMOTO P., Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM, Soldagem e Inspeção, v. 18, p. 127-136, 2013.

- [9] NALBONE, C. Effects of carbon content and tempering treatment on the mechanical properties and sulfide stress-corrosion cracking resistance of AOD-refined CA6NM, In. Stainless Steel Castings, ASTM International, 1982, p. 315-331.
- [10] HUTH, H. Fatigue design of hydraulic turbine runners: 2005. 178 p. Thesis (Doctorate) - Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Department of Engineering Design and Materials Trondheim, Norway
- [11] GOUVEIA, R.; PUKASIEWICZ, A.; CAPRA, A.; HENKE, S.; OKIMOTO, P. Effect of interpass temperature on microstructure, impact toughness and fatigue crack propagation in joints welded using the GTAW process on steel ASTM A743-CA6NM, Welding International, v. 29, p. 433-440, 2014.
- [12] BILMES, P. D.; SOLARI, M.; LLORENTE, C. L. Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13Cr-NiMo martensitic steel weld metals, Materials Characterization, v. 46, p. 285-296, 2001.
- [13] FOLKHARD, E. Welding Metallurgy of Stainless Steels, New York: Springer, 1988, 168 p.
- [14] BHADESHIA, H. Steels for bearings, Progress in materials science, v. 57, p. 268-435, 2012.
- [15] LOVELESS, R.; SMITH, W.; TEMPLETON, H. Weld Procedure, Filler Metal, and Post-Weld Heat Treatment - Their Effect on the Hardness and Quality of Welds in CA6NM Alloy, In. Stainless Steel Castings, ASTM International, 1982, p. 394-402.
- [16] THIBAUT, D. Residual stress and microstructure in welds of 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, v. 209 p. 2195-2202, 2008.
- [17] WANG, P.; LU, S.; XIAO, N.; LI, D.; LI, Y. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel, Materials Science Engineering A, v. A527, p. 3210-3216, 2010.

- [18] CARROUGE, D.; BHADSHIA, H.; WOOLIN, P. Effect of d-ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zones, *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 09, p. 377-389, 2004.
- [19] TRUDEL, A.; LÉVESQUE, M.; BROCHU, M. Microstructural effects on the fatigue crack growth resistance of a stainless steel CA6NM weld, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 115, p. 60-72, 2014.
- [20] SILVA, R.; FARIA, M.; ALMEIDA, L.; NUNES, C.; VIEIRA D.; BORGES JÚNIOR, W. Microstructure and mechanical properties of ASTM A743 CA6NM steel welded by FCAW process, *Materials Research*, v. 20, p. 1622-1629, 2017.
- [21] GODIN, S.; BOUDREAU, J.; LÉVESQUE, B. Hazel, B.: On-site post-weld heat treatment of welds made of 410NiMo Steel, In. *Proceedings of MS&T-COM*, Quebec, 2013, p. 754-765.
- [22] KRAUSS, G. *Steels: Processing, Structure and Performance*, 2 ed., Ohio: ASM International, 2015, 613 p.
- [23] AKHIATE, A.; BRAUD, E.; THIBAU, D.; BROCHU, M. Carbon content and heattreatment effects on microstructures and mechanical properties of 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steel. In. *em Conference Of Metallurgist - COM 2014*, Vancouver, 2014.
- [24] ASME, *Qualification standard for welding, brazing and fusing procedures; welders; brazers; and elding, brazing and fusing operators*, New York: ASME, 2017.
- [25] ASTM A370: *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, Pennsylvania: ASTM, 2020.
- [26] ASME – The American Society of Mechanical Engineers. *Section VIII. Divison 1 – Design and Fabrication of Pressure Vessel*, New York: ASME International, 2015.
- [27] ISO 18265: *Metallic materials — Conversion of hardness values*, Geneva: ISO, 2013.

- [28] WU, W.; WHU L.; LIN, D.; LEE, J. Relationship between alloying elements and retained austenite in martensitic stainless steel welds, *Scripta Materialia*, v. 42, p. 1071-1076 , 2000.
- [29] TSAI, M. C.; CHIOU, J.; DU, C.; YANG, J. Phase transformation in AISI 410 stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, v. A332, p. 1-10, 2002.
- [30] VOORT, G. F. V. Martensite and retained austenite, *Industrial Heating*, v. 76, p. 51-54, 2009.