

## Análise das tensões residuais utilizando método DPC na soldagem GTAW multipasse do aço ASTM A131 AH36 com chanfros em “V” e em “U”

### Residual stress analysis using CPD method in ASTM A131 AH36 steel multipass welding by GTAW in “V” and “U” design joints

Danilo Helder de Melo Pereira<sup>1</sup> , Douglas Henrique de Melo Pereira<sup>1</sup>, Romulo Rocha de Araújo Lima<sup>1</sup>, Ionaldo Bezerra Alves dos Passos<sup>1</sup>, Lindemberg Pereira Costa Júnior<sup>1</sup>, Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil.

e-mail: danilomelo.eng@gmail.com, douglasmec@gmail.com, romuloroch79@yahoo.com.br, ionaldo.passos@ufpe.br, ljunior16@gmail.com, ricardo.sferreira@ufpe.br

#### RESUMO

Análise de tensões residuais realizada em juntas soldadas pelo processo TIG utilizando metal de base ASTM A131 AH36 comparando diferentes projetos de junta. Uma parte com chanfro usinado em formato de “V” e outra em forma de “U”. Também foi correlacionado variáveis de acabamento com passe único oscilante ou com passe duplo retilíneo. O resultado das tensões foi obtido através do método DPC (deslocamento de pontos coordenados). Os corpos de prova foram soldados segundo as normas (fabricação e qualificação) AWS D1.1. Após a soldagem foram realizadas furações na zona termicamente afetada nas mediações centrais do eixo de soldagem em uma mesa de medição por coordenadas. As soldas foram submetidas a tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) e mensurou-se os deslocamentos dos furos causados pelo TTAT, possibilitando o cálculo das tensões residuais. Os resultados demonstraram menores níveis de tensões juntas em “U” e boa aplicabilidade do método DPC.

**Palavras-chave:** Deslocamento de Pontos Coordenados; Método DPC; Tensões Residuais.

#### ABSTRACT

Analysis of residual stresses in welded joints by TIG process using base metal ASTM A131 AH36 comparing different joint design, some specimens were machined with joint in “V” shape and others in “U” shape. It was also correlated with finishing with a single oscillating pass or with straight double pass. The results were performed using the DCP method (displacement of coordinated points). The specimens were welded according to the standards (manufacturing and qualification) AWS D1.1. After welding, holes were made in the thermally affected zone in the central region of the welding axis, which were then referenced on a coordinate measuring table. Then, the welds were subjected to a post weld heat treatment (PWHT) and measured the displacements of the holes caused after PWHT in coordinate plan, allowing the calculation of the residual stresses. The results demonstrated lower stress levels in “U” design joints and good applicability of the DPC method.

**Keywords:** Coordinate Point Difference; CPD Method; Residual Stresses.

#### 1. INTRODUÇÃO

As tensões residuais de um equipamento podem interferir no desempenho da peça ou equipamento. Essas tensões podem ser criadas por um procedimento de soldagem, jateamento, granalhamento, fundição, conformação, usinagem e tratamentos térmicos conforme RODACOSKI [1]. Segundo OKUMURA e TANIGUCHI [2], as tensões têm grande influência na fratura frágil de uma junta soldada. De acordo com KANG *et al.* [3] o alívio das tensões residuais tem influência na resistência à fadiga de juntas soldadas.

Segundo SCOTTI [4], as tensões residuais de soldagem são oriundas devido à existência de regiões menos aquecidas do material durante o ciclo térmico, causando restrição à dilatação e contração da região aquecida, tensões trativas ou compressivas são geradas, tanto na região aquecida (geradora), como nas menos aquecidas (restritoras).

É importante também prever a natureza das tensões residuais superficiais conforme a American Society for Materials (ASM) [5], a tensão estática compressiva melhora a resistência a fadiga do material pois retarda o surgimento de trincas, assim como tensões residuais de tração reduzem a durabilidade do material para este tipo de aplicação. De acordo com GENTIL [6], a formação de trincas superficiais pode desencadear um uma pilha eletroquímica localizada no interior da trinca causando a possibilidade de ocorrência de corrosão sob tensão, o que tornaria um material dúctil suscetível a uma fratura de natureza frágil.

De acordo com MACHERAUCH e KLOOS [7], as tensões residuais são tensões auto equilibradas existentes nos materiais na ausência de esforços externo, deslocamentos ou gradientes de temperatura. A previsão das tensões residuais nos processos de soldagem através de modelos analíticos e numéricos ainda é imprecisa devido à grande quantidade de variáveis e inexistência de valores de propriedades termo físicas e mecânicas de diferentes aços em função da temperatura conforme experimento de ANTONINO *et al.* [8]. Tornando assim os métodos experimentais uma ferramenta para os estudos das tensões residuais.

Segundo MODENESI *et al.* [9], o projeto da junta é uma variável importante de um procedimento de soldagem em busca da obtenção de soldas adequadas, bem como outras variáveis como temperatura de inter-passe, corrente, tensão, velocidade de soldagem, número de passes, entre outros. Conforme ASME IX [10], no QW-253 a 256 para os principais processos de soldagem a arco elétrico o projeto da junta é considerado uma variável não essencial, ou seja, que não requer uma requalificação do procedimento caso o projeto seja alterado. A energia de soldagem que correlaciona parâmetros de corrente, tensão e velocidade de soldagem é considerado uma variável suplementar essencial, ou seja, é considerada essencial apenas para os materiais que a norma exigir teste de impacto na qualificação.

Conforme OKUMURA e TANIGUCHI [2], no processo TIG o fato do arame de enchimento não participar da formação do arco elétrico propiciando um maior controle da poça de fusão sendo possível obter a penetração desejada, reduzindo assim níveis de defeitos internos como falta de penetração e falta de fusão. A ausência de escória evita riscos de inclusões desnecessárias prejudiciais e devido aos menores níveis de aporte térmico de soldagem a zona de solda apresenta excelente qualidade e uma menor zona termicamente afetada pelo calor, torna esse processo ideal para soldagens mais complexas desde materiais mais leves até os extremamente pesados, assim como soldas com melhores índices de aprovações em ensaios e inspeções.

A aplicação dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), como é o caso do AH36 tem aplicação usual na indústria naval, principalmente devido a correlação resistência mecânica, a tenacidade, soldabilidade e custos. Segundo SHOW *et al.* [11], o endurecimento por precipitação conseguido pela formação de carbonetos e nitretos formados pelo Vanádio, Nióbio e Titânio contribuem para o aumento do limite de resistência nestes aços. Segundo FONSTEIN [12], precipitação de nitreto de vanádio nos ARBL também melhora as propriedades mecânicas devido ao refinamento de grãos, pois possui uma menor solubilidade na austenita do que o carboneto de vanádio.

De acordo com DIETER [13], o aumento na relação entre a adição do manganês pelo percentual de carbono são os principais responsáveis na redução das temperaturas de transição dúctil frágil, característica indispensável para materiais estruturais de projetos navais. Segundo OKUMURA e TANIGUCHI [2], a redução do teor de carbono e aumento do teor de manganês nos ASTM 131 AH36 acarreta diminuição de aproximadamente 30% em peso.

Segundo WAINER *et al.* [14], juntas com geometria mais complexas como as de chanfro em “U” exigem muito mais tempo de usinagem que uma junta do tipo “V”. A depender da posição de soldagem o ângulo do chanfro pode ou não ajudar na operação, dependendo das componentes de tensão superficial, tornando o chanfro em “U” mais fácil de soldar que o chanfro em “V”.

A metodologia de Deslocamento de Ponto Coordenado (DPC) utilizada neste estudo conforme mostrado em SIQUEIRA FILHO *et al.* [15] demonstrando resultados dentro da margem de erro da difração de raio X, sendo uma ferramenta de baixo custo. O método possui fácil aplicação e bons resultados como demonstrado em MELO *et al.* [16], sensível aos efeitos da anisotropia em experimentos de SUGAHARA *et al.* [17] e conforme PEREIRA *et al.* [18], o método é aplicável utilizando soldagens multipasses em chapas de alta espessura.

O presente estudo tem objetivo de fazer um comparativo das tensões residuais oriundas do processo de soldagem entre projetos da junta em “V” e “U” assim como analisando o modo de acabamento com passe duplo e simples oscilante.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Metal de base

O metal de base utilizado nos experimentos foi o de especificação ASTM 131 AH36 [19], sendo um aço de alta resistência e baixa liga de ampla aplicação na indústria naval. As chapas cuja composição química foi analisada por espectrometria de emissão em um laboratório acreditado pelo IMETRO e certificado pela VER 17025, conforme Tabela 1.

Os corpos de prova foram cortados em serra de fita com as dimensões de 225 mm × 70 mm × 12,7 mm, chanfradas com ângulo de 25° e posteriormente montados em pares, com uma abertura de raiz de 4 mm, fixadas a duas chapas de 12,7 mm como dispositivo auxiliar de montagem. Foram montados 6 corpos de provas, sendo quatro com chanfro tipo V, e dois com chanfros em U com dimensionamento conforme Figura 1.

### 2.2. Consumíveis de soldagem

Os consumíveis de soldagem utilizados nesta pesquisa são homologados pela Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS) sendo eles vareta de classificação ER-70S-3, diâmetro de 3,25 mm e gás de proteção argônio com vazão média de 20 litros por minuto.

### 2.3. Procedimento de soldagem

Inicialmente, as juntas foram ponteadas e soldadas a chapas auxiliares de montagem de 12,7 mm de espessura para restringir as deformações. Não foi realizado pré-aquecimento. Os parâmetros de soldagem de ambos os processos foram extraídos de EPS previamente qualificada. Foi inspecionado e registrado os parâmetros de cada passe por profissional qualificado segundo o sistema nacional de qualificação e certificação (SNQC) para determinação dos parâmetros realizados em cada corpo de prova. A velocidade da soldagem foi medida através da razão entre o comprimento médio dos passes pelo tempo médio de suas execuções.

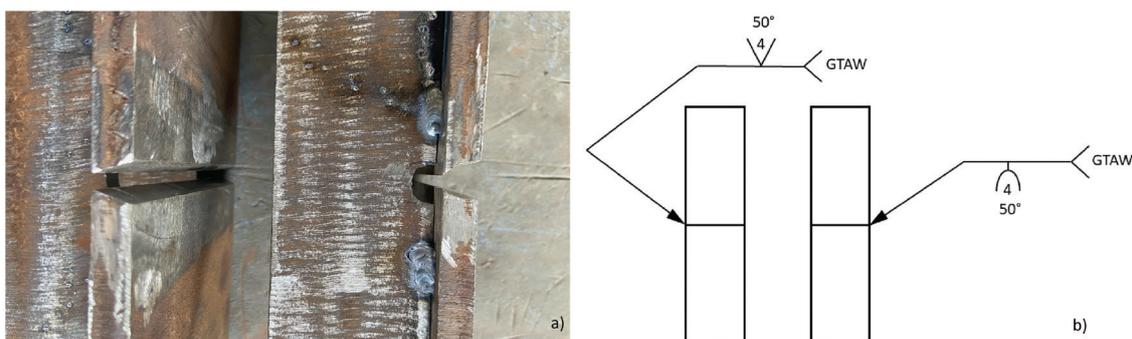
As soldagens foram realizadas conforme os procedimentos de soldagem qualificados conforme a norma AWS D1.1 [20] e recomendações Petrobrás N-133 [21] e realizadas por apenas um soldador qualificado nas mesmas condições e equipamentos.

Os corpos de prova foram divididos em pares, os dois primeiros tagueados V1 e V2 com chanfro em “V” e outros dois U1 e U2 com chanfro em “U” soldado com acabamento passe duplo (ver Figura 2). Foram também soldados dois corpos de prova com chanfro em “V”, porém executando uma sequência de soldagem com acabamento único, esses últimos foram tagueados como T1 e T2.

Todos os passes foram dados na mesma direção com paradas mais breves possível desde o passe de raiz até o acabamento para uniformizar o tempo de paradas entre os corpos de prova. No término de cada soldagem

**Tabela 1:** Composição química do metal de base na espectrometria em percentual.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu	Al
0,1000	0,2830	1,6000	0,0360	0,0200	0,0130	0,0040	0,1660	0,0240
V	Nb	Ti	Pb	Sn	Co	As	B	Fe
0,0370	0,0360	0,0150	0,0010	0,0010	0,0030	0,0030	0,0004	BASE



**Figura 1:** a) Detalhe do chanfro nos corpos de prova em V e em U. b) Simbologia de soldagem.

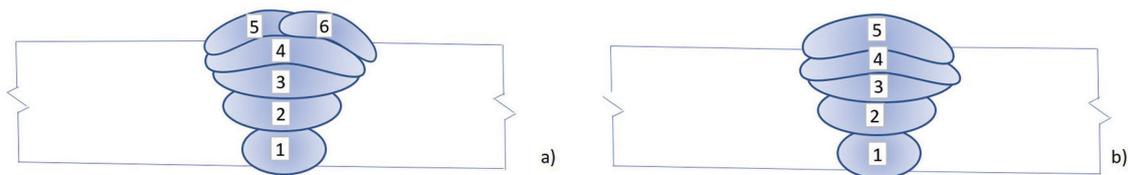


Figura 2: (a) Sequência de soldagem acabamento passe duplo. (b) sequência de soldagem com acabamento passe único.



Figura 3: Medições de temperaturas na ZTA através de câmera termográfica logo após soldagem.

foi mensurada a temperatura na zona afetada termicamente em cada teste através de uma câmera termográfica, conforme Figura 3.

#### 2.4. Cálculo da energia de soldagem

Através de dados obtidos durante o acompanhamento das soldagens foi calculada a energia de soldagem de cada corpo de prova utilizando o coeficiente de eficiência térmica média ( $\eta_T$ ) de 68,4% para o processo TIG segundo estudos de DONEGÁ *et al.* [22] conforme equação abaixo, resultados mostrados na Tabela 2.

$$E = \eta_T \times V \times I / v \tag{1}$$

#### 2.5. Marcação e furação dos pontos de medição

Cada corpo de prova recebeu cinco puncionamentos centralizados em relação ao eixo da soldagem, para marcação de furações na ZTA, sendo três furos a 3 mm de afastamento da margem da solda afastados entre si a aproximadamente 15 mm, assim como dois furos, intercalando os anteriores, a 5 mm de afastamento da mesma conforme esquema da Figura 4, numerados em ordem crescente com relação a direção da soldagem.

Foram realizadas furações com broca de centro de diâmetro 2,0 mm a uma profundidade de 2 mm no metal de base. Na mesma chapa com as furações de medições foi executado um furo referencial tomando o centro como origem das medições cartesianas. As coordenadas X e Y dos centros dos furos em relação a origem foram mensuradas conforme esquema da Figura 4 em uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) de controle numérico computadorizado com resolução de 0,0005 mm.

Segundo MODENESI *et al.* [9], as tensões residuais em uma soldagem isolada possuem tendência conforme linhas contínuas da Figura 5, onde o eixo x-x é o eixo longitudinal da soldagem. A linha tracejada caracteriza uma soldagem de uma estrutura incluindo restrições e outras soldas onde as tensões de origem térmicas se somam as tensões de reação.

Tabela 2: Cálculo da energia de soldagem média.

PARÂMETROS (MÉDIA)	V1	V2	U1	U2	T1	T2
Tensão (V)	12,57	12,27	12,53	12,35	12,26	12,34
Corrente (I)	91,57	92,46	82,48	89,3	103,06	97,94
Velocidade de Soldagem (v) [mm/min]	59,64	72,56	66,72	63,72	55,97	59,61
Energia de Soldagem (E) [KJ/mm]	14,02	11,80	13,15	12,81	16,03	14,96
Temperatura pós soldagem na ZTA [°C]	247	254	286	272	287	278

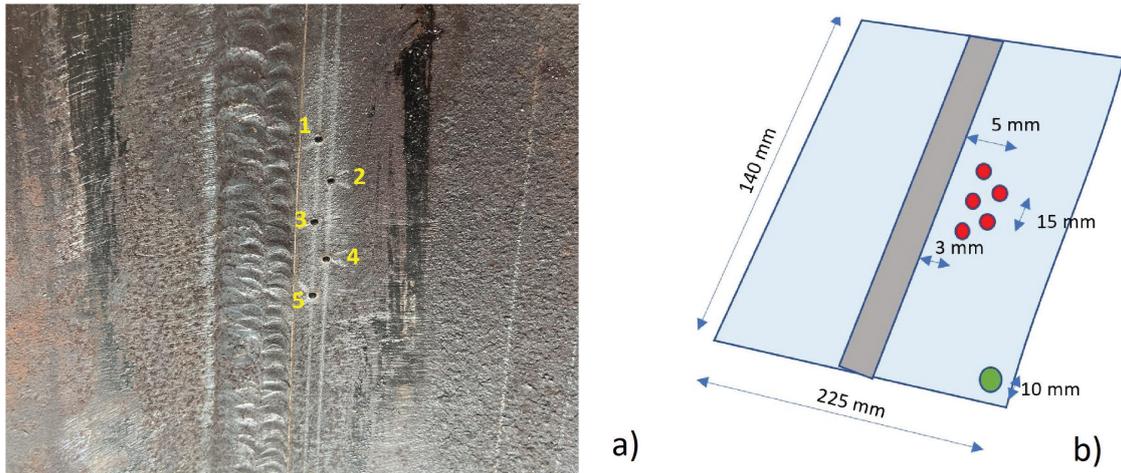


Figura 4: Posicionamento e nomeação das furações.

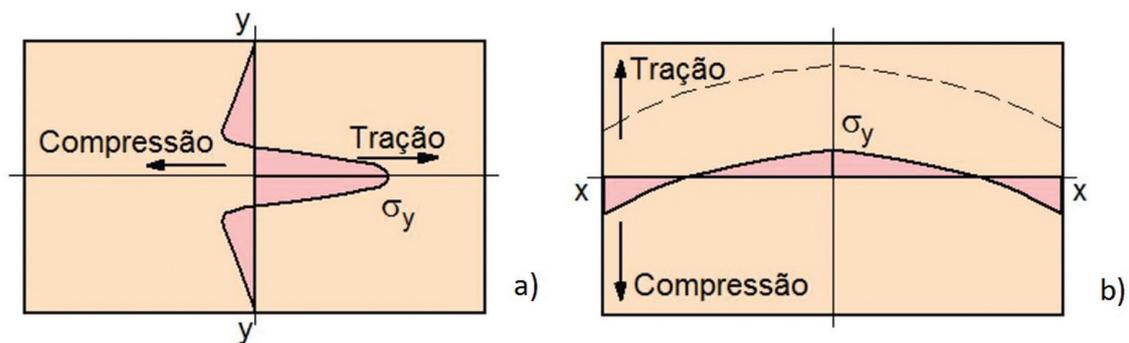


Figura 5: (a) tensão longitudinais ao eixo de soldagem. (b) tensões transversais ao eixo de soldagem.

### 2.6. Tratamento Térmico para Alívio de Tensões (TTAT) e cálculos das tensões

As chapas de teste foram submetidas a um TTAT. Os tratamentos foram realizados num forno tipo mufla, previamente calibrado e estabilizado numa temperatura de 680°C (abaixo da temperatura de recristalização) durante 60 minutos como sugerido em GONÇALVES [23] com resfriamento em temperatura ambiente de 28 °C.

Após o tratamento térmico, foram realizadas novas medições das coordenadas (X,Y) dos furos, para determinação dos deslocamentos produzidos pelo tratamento térmico. A partir da extensão dos deslocamentos dos furos, foram calculadas as tensões residuais utilizando os valores de módulo de elasticidade 207 GPa e coeficiente de Poisson 0,3 conforme CALLISTER [24] através das equações:

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \tag{2}$$

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y + \nu\epsilon_x) \tag{3}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{4}$$

Onde:

$\sigma_x$  = Tensão residual longitudinal (paralela ao eixo de soldagem) [Pa];

$\sigma_y$  = Tensão residual transversal (perpendicular ao eixo de soldagem) [Pa];

E = Módulo de elasticidade [Pa];

$\epsilon_x$  = Deformação longitudinal a direção de soldagem;

$\epsilon_y$  = Deformação transversal a direção de soldagem;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

$\Delta L$  = Deslocamento dos pontos [mm];

$L_0$  = Comprimento útil do cordão de solda [mm];

O cálculo das tensões residuais em diferentes pontos da junta foi baseado nos deslocamentos dos centros furos (DPC), antes e após tratamento térmico. Com finalidade de redução dos erros aleatórios, neste trabalho foram utilizados 20 pontos de medição nas margens de cada furo para determinação dos centros.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Erros aleatórios medições são principalmente devido a imprecisão da usinagem. Utilizando médias das medições foram obtidos os seguintes resultados de tensão residual em cada ponto de medição conforme Tabela 3.

Foi observado uma tendência de crescimento das tensões na sequência dos pontos em relação ao centro da chapa. Segundo MARQUES *et al.* [25] em soldagem de chapas espessas em juntas de topo, com restrição de movimento as tensões de reação tendem a ser somada às tensões de origem térmica, resultando em maiores valores de tensões residuais transversais em relação às longitudinais, com o pico de tensão localizado ao centro da chapa. Sendo os pontos 1 e 5 que apresentaram, em média, menores níveis de tensões com tendência de aumento nos pontos mais centralizados ao eixo de soldagem com uma tendência de maiores tensões na direção transversal ao eixo de soldagem (eixo y) conforme Tabela 4.

Analisando a Figura 6, observa-se a natureza da tensão residual obtida em cada ponto de medição sendo representado no eixo das ordenadas as tensões positivas de tração, enquanto as negativas de natureza compressiva. Destaca-se as tensões máximas de tração encontradas nas regiões centralizadas nos corpos de prova.

O cálculo das tensões residuais foi separado em tensões residuais longitudinais (paralelas ao eixo de soldagem), transversais e a soma vetorial das duas. Observa-se que os corpos de prova de Chanfro em “U” obtiveram menores tensões residuais em relação ao chanfro “V”.

**Tabela 3:** Módulo de tensões residuais médias obtida em cada ponto.

CP	Tensão (Mpa)										
V1.1	150,46	V2.1	187,39	U1.1	146,75	U2.1	115,24	T1.1	148,65	T2.1	231,23
V1.2	381,84	V2.2	132,01	U1.2	198,64	U2.2	286,29	T1.2	173,57	T2.2	205,93
V1.3	371,86	V2.3	321,81	U1.3	195,47	U2.3	293,13	T1.3	241,78	T2.3	173,70
V1.4	405,98	V2.4	521,97	U1.4	305,71	U2.4	141,40	T1.4	322,13	T2.4	117,33
V1.5	141,89	V2.5	224,91	U1.5	148,80	U2.5	335,93	T1.5	332,27	T2.5	148,45

**Tabela 4:** Módulos de tensões residuais médias obtidas em cada ponto [MPa].

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Tensão total	163,29	229,71	299,65	269,06	222,04
Tensão longitudinal	100,20	140,96	183,88	165,10	136,25
Tensão transversal	128,93	181,38	236,60	212,45	175,32

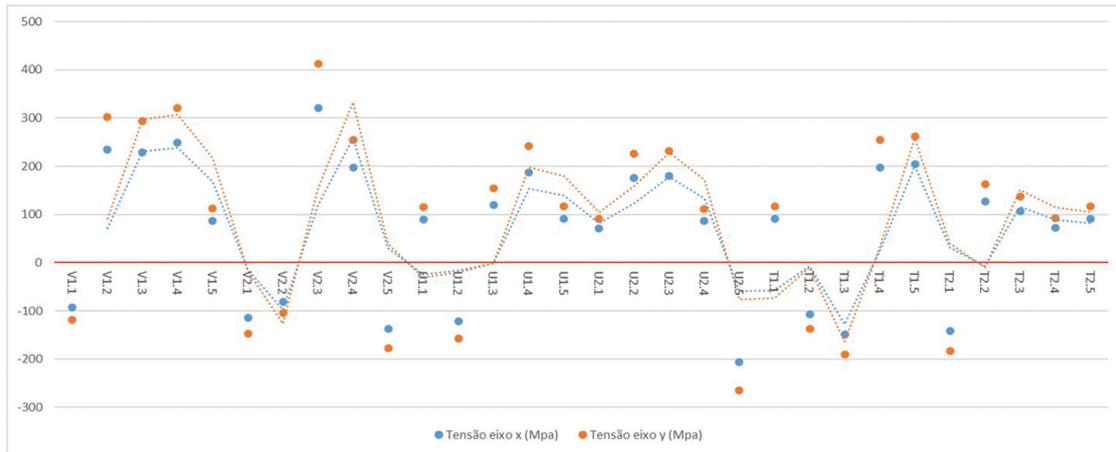


Figura 6: Distribuição de tensões obtidas nos pontos de medições em MPa.

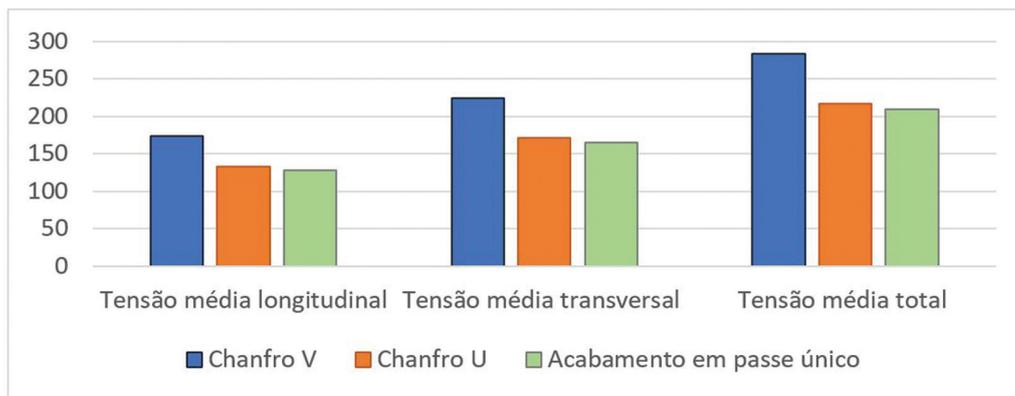


Figura 7: Médias de tensões residuais em módulo calculadas por tipo de teste em MPa.

Os corpos de prova com acabamento único obtiveram menores valores de tensões residuais, porém com resultados próximos aos de chanfro tipo “U” como pode-se visualizar na Figura 7. A utilização de passes oscilantes pode tornar o processo mais suscetível a erros manuais acarretando maior risco de obtenção de defeitos na solda devido a isso as normas de qualificação de soldagens determinam oscilação máxima tomando referência o diâmetro do eletrodo utilizado.

Os parâmetros utilizados nas soldagens de cada corpo de prova de velocidade de soldagem, energia de soldagem, velocidade e temperatura final obtida na zona termicamente afetada no acabamento da solda pode-se correlacionar com os resultados obtidos nas tensões residuais em cada corpo de prova na Figura 8.

Conforme estudos de GUNNERT [26], foi verificado que as tensões residuais na superfície de chapas soldadas com restrições de movimento e elevada espessura podem atingir níveis de tensões extremamente elevados, próximos ao limite de escoamento do material. Visto que na ASME VIII [10] para materiais caracterizados neste agrupamento (P-number) o tratamento térmico é requerido a partir de espessuras de 32 mm. No presente estudo com considerável espessura de metal de base utilizando restrições externas foi obtido altos níveis de tensões residuais superficiais, assim como em estudos realizados por GUNNERT [26], TENG *et al.* [27] e MISHCHENKO e SCOTTI [28].

As amostras com chanfro tipo “U” apresentaram em média 26% menos tensões residuais comparadas aos chanfros do tipo “V”. O resultado encontrado foi conforme previsto em WAINER *et al.* [14], que explica que a distorção é controlada através da área do projeto da junta acarretando um menor o grau de distorções de uma junta tipo “U” comparada a uma junta tipo “V”.

Segundo TENG *et al.* [27] o aumento na velocidade da deposição e tendem a redução das tensões residuais totais. Modenesi [9], explica como a velocidade de soldagem influencia o formato da poça alterando assim

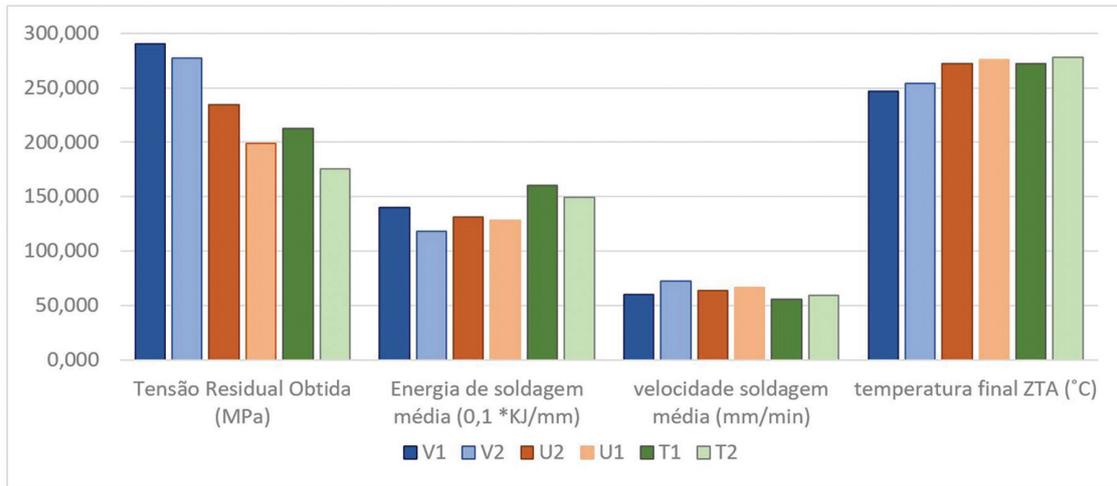


Figura 8: Médias de tensões residuais em módulo calculadas por tipo de teste em MPa.

as curvas isotérmicas e direções de solidificação e conseqüentemente, tensões oriundas de contração. No presente estudo, o aumento da velocidade de soldagem foi observado nos corpos de prova com menores residuais.

Conforme RAMJAUN *et al.* [29] as tensões residuais podem ser aliviadas através da temperatura interpassa das camadas posteriores em soldagem multipasses atuando como um alívio de tensões residuais. O aumento da temperatura pode causar uma redistribuição das tensões residuais, propiciando em uma redução total das tensões.

Conforme experimentos em elementos finitos de GARCIA *et al.* [30], demonstrou que a geometria da poça de fusão e os ciclos térmicos obtidos na soldagem podem influenciar de forma significativa as deformações, oriundas das tensões residuais, e que o aporte térmico na sobreposição dos passes é fundamental para o efeito de refinamento dos grãos da zona termicamente afetada.

O número de passes e a seqüência da soldagem influenciam significativamente o alívio das tensões residuais. No presente estudo os corpos de prova do tipo “U” e de acabamento em passe único obtiveram maiores temperaturas obtidas no último passe assim como resultados menores de tensões residuais.

O tempo de preparação nos corpos de prova tipo “V” na fase de usinagem foi consideravelmente menor que o tipo “U”, assim como foi exigido equipamentos de usinagem mais baratos e de operação menos complexa, tornando menores os custos e velocidade do processo. Esses parâmetros devem ser analisados na escolha do projeto da junta para cada aplicação.

O método CPD para análise de tensões residuais devido a sua versatilidade pode ser implementado em aplicações de canteiros de obras e linhas de produção, porém para garantir a confiabilidade dos testes deve ser realizado um processo de usinagem de qualidade na obtenção dos furos.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente estudo foi observado que os corpos de prova com chanfro tipo “U” obtiveram tensões residuais de soldagem menores do que os preparados em chanfro em “V” soldados com condições, energia média de soldagem e velocidade de soldagem similares. Observa-se também no chanfro tipo “U” temperaturas mais elevadas comparada ao chanfro em “V” justificado por consequência de maior quantidade de material depositado.

Os corpos de prova de passe de acabamento único registraram menores tensões residuais médias, aproximadamente 26% a menos que corpos de prova com mesmo projeto de junta. Este efeito é explicado devido à grande energia de soldagem no passe do acabamento atingindo maiores temperaturas obtidas ao término da soldagem causando um efeito de alívio parcial de tensões dos passes anteriores.

Foi observado uma maior concentração de tensões de tração no ponto em estudo, com uma tendência de picos de tensões residuais nas áreas mais próximas ao centro do eixo de soldagem. A energia de soldagem, a velocidade de soldagem e a temperatura final na ZTA apresentaram neste estudo correlações com as tensões residuais.

Tais análises corroboram com a aplicabilidade do método de deslocamento de pontos coordenados (DPC) no estudo das tensões residuais como ferramenta rápida e de baixo custo com ótimos resultados obtidos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao PPGEM da Universidade Federal de Pernambuco, SENAI e ao CNPQ e CAPES pelo suporte financeiro.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] RODACOSKI, M.R., *Medição de tensões residuais em holografias eletrônicas*, Florianópolis. UFSC, 2002.
- [2] OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. *Engenharia de soldagem e aplicações*, São Paulo, LTC, 1982.
- [3] KANG, H.T., LEE, Y.L., SUN, V.J., “Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments”, *Materials Science and Engineering A*, v. 497, n. 1-2, pp. 37–43, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2008.06.011>
- [4] SCOTTI, A., “Five bars and one bar models for thermal stress generation in the FZ, HAZ and BM during arc welding”, *Soldagem e Inspeção*, v. 19, n. 1, pp. 82–90, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100010>
- [5] American Society for Metals, *Metals handbook, failure analysis and prevention*, 8. Ed., Metals Park, Ohio, USA, American Society for Metals, 1975.
- [6] GENTIL, V., *Corrosão*, 6 ed., Rio de Janeiro, Editora Livros Técnicos Científicos, 2011.
- [7] MACHERAUCH, E., KLOOS, K.H., “Origin, measurements and evaluation of residual stresses, residual stresses in science and technology”, *Residual Stress in Science and Technology*, v. 1, pp. 3–27, 1987.
- [8] ANTONINO, T.S., GUIMARÃES, P.B., ALÉCIO, R.A., *et al.*, “Measurements of the thermophysical properties of the API 5L X80”, *Materials Sciences and Applications*, v. 5, n. 8, pp. 617–627, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2014.58064>
- [9] MODENESI, P.J., MARQUES, P.V., SANTOS, B.D., *Introdução à Metalurgia de Soldagem, janeiro 2012*, <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>, acessado em julho de 2023.
- [10] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, *ASME Section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators*, 9 ed., New York, ASME, 2017.
- [11] SHOW, B.K., VEERABABU, R., BALAMURALIKRISHNAN, R., *et al.*, “Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel”, *Materials Science and Engineering A*, v. 527, n. 6, pp. 1595–1604, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.049>.
- [12] FONSTEIN, N., *Advanced high strength sheet steels: physical metallurgy, design, processing, and properties*, Cham, Springer, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
- [13] DIETER, G.E., *Metalurgia mecânica*, 2 ed., Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 1981.
- [14] WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., *Soldagem: processos e metalurgia*, 4. Ed., São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 2004.
- [15] SIQUEIRA FILHO, A.V., ROLIM, T.L., YADAVA, Y.P., *et al.*, “Development of methodology for measurements of residual stresses in welded joint based on displacement of points in a coordinated table”, *Materials Research*, v. 16, n. 2, pp. 322–326, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000001>
- [16] MELO, L.G.T.C., CARDOSO, F.I., MENDES, C.E., *et al.*, “Welded joints’ heat affected zone’s extension prediction by switching welding parameters”, *Materials Research*, v. 20, pp. 651–656, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1019>
- [17] SUGAHARA, H.J., BARROS, P.S., MELO, L.G.T.C., *et al.*, “Measurement of residual stresses in welded joints processed by DCP method”, *Materials Research*, v. 21, n. 4, pp. e20170926, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0926>
- [18] PEREIRA, D.H.M., PEREIRA, D.H.M., ROLIM, T.L., *et al.*, “Análise das tensões residuais utilizando o método DPC na soldagem multipasse do aço ASTM A131 AH36 pelos processos SMAW e FCAW”, *Soldagem e Inspeção*, v. 25, pp. e2513, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si25.13>
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM A131 / A131M-19: standard specification for structural steel for ships*, West Conshohocken, PA, ASTM International, 2019
- [20] AMERICAN WELDING SOCIETY, *AWS D1.1/D1.1M: 2010: structural welding code – steel*, Miami, AWS, 2010.

- [21] PETROBRAS, *N-133 N: Soldagem*, Rio de Janeiro, Petrobras, 2017.
- [22] DONEGÁ, T.J., COSTA, T.F., ARENCIBIA, R.V., *et al.*, “Comparison of thermal efficiency between A-TIG and conventional TIG welding”, *Weld International*, v. 30, n. 4, pp. 255–267, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2015.1096472>
- [23] GONÇALVES, I.L., “*Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta soldada baseado no método DPC*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.
- [24] CALLISTER, W.D., *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5 Ed., São Paulo, LTC, 2002.
- [25] MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., *Soldagem fundamentos e tecnologia*, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.
- [26] GUNNERT, R., “Method for measuring tri-axial residual stresses (Doc. IIW X-184-57-OE)”, In: *Commission X of the International Institute of Welding*, 1958.
- [27] TENG, T., FUNG, C., CHANG, P., “Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 79, n. 7, pp. 467–482, 2002. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00060-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00060-1)
- [28] MISHCHENKO, A., SCOTTI, A., “Tensões residuais em soldagem a arco: uma visão holística”, *Soldagem e Inspeção*, v. 23, n. 1, pp. 93–112, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.10>
- [29] RAMJAUN, T.I., STONE, H.J., KARLSSON, L., *et al.*, “The effect of inter-pass temperature on residual stresses in multi-pass welds produced using a low transformation temperature filler alloy”, *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 19, n. 1, pp. 44–51, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000162>
- [30] GARCIA, D.N., BERNARDI, R.A., LIMA, A.K.F., “Análise da zona afetada pelo calor em soldagem dupla camada utilizando o método dos elementos finitos”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, pp. e12643, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1043>