

Avaliação de tensões residuais em juntas soldadas de aços API 5L X65 e X70

Evaluation of residual stress in API 5L X65 and X70 steel welded joint

Anderson Laursen^{1*}, Theophilo Moura Maciel², Aureliano Xavier dos Santos³

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os níveis de tensões residuais em juntas soldadas dos aços API 5L X65 e X70 utilizados na fabricação de dutos para escoamento de petróleo e gás, através de diferentes processos e consumíveis de soldagem. Os processos utilizados foram soldagem ao arco elétrico com: Eletrodo Revestido (SMAW); Arame Tubular (FCAW – com proteção gasosa), e; Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW). As tensões residuais transversais e longitudinais foram medidas nas regiões dos passes de raiz (inferior) e de acabamento (superior), através da técnica de difração por raios-X. Utilizou-se uma ferramenta de simulação, criada e executada na plataforma MATLAB, para facilitar a visualização do fluxo de calor. Para o passe raiz, utilizou-se os processos SMAW e GTAW, enquanto que o enchimento foi executado através dos processos SMAW e FCAW, resultando em quatro condições de soldagem para cada aço. Os resultados obtidos mostraram que os maiores valores de tensões residuais no passe raiz (321MPa) e no acabamento (354MPa) foram encontrados, respectivamente, quando se usou os processos de soldagem SMAW e FCAW, e metal de base de maior espessura (API 5L X70). Maiores ZTAs foram observadas nos processos GTAW e SMAW, nos quais a velocidade de soldagem foi menor.

Palavras-chave: Tensões residuais, Zona termicamente afetada, Processos de soldagem, Aços API 5L X65 e X70.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the residual stress level in welded joint of API 5L X65 and X70 steels used in the manufacture of oil and gas pipelines, through different welding processes and consumables. These processes were electric arc welding with: Shielded Metal (SMAW); Flux-cored (FCAW – with gas protection); and, Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). The transverse and longitudinal residual stresses were measured in the root (bottom) and finishing (top) pass regions, using the X-ray diffraction technique. A simulation tool, created and executed on the MATLAB platform, was used to promote the visualization of the heat flow. For the root pass, the SMAW and GTAW processes were used, while the filling was performed through the SMAW and FCAW processes, resulting in four welding conditions for each steel. The results showed that the highest residual stress values in the root and filling pass were 321 MPa and 354 MPa, respectively, when it was used API 5L X70 plates with greater thickness, and the SMAW and FCAW as welding process. Higher ZTAs were observed in the GTAW and SMAW welding processes, in which welding speed was lower.

Keywords: Residual stress, Heat affected zone, Welding process, API 5L X65 and X70 steel.

1. Universidade Federal de Campina Grande - Departamento de Ciências e Engenharia de Materiais – Campina Grande (PB), Brasil.

2. Universidade Federal de Campina Grande - Departamento de Ciências e Engenharia Mecânica – Campina Grande (PB), Brasil.

3. Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho – Cabo de Santo Agostinho (PE), Brasil.

* **Autor correspondente:** andersonlaursen@yahoo.com.br

Recebido: 16 Jun 2020 **Aprovado:** 12 Ago 2020

INTRODUÇÃO

Tanto na ciência quanto na engenharia de materiais há quatro componentes importantes que estão relacionados entre si, a saber: o processamento, a estrutura interna, as propriedades e o desempenho. A metodologia de processamento implicará em uma estrutura interna característica que, por sua vez, estará influenciando diretamente as propriedades desejadas. O desempenho na sua aplicação é função das propriedades adquiridas.

O escoamento de petróleo e gás até os grandes distribuidores acontece, normalmente, por dutos. Essas tubulações estão sujeitas a inúmeras condições de uso: marítimo (subaquático), terrestre (enterrado ou aparente em relevos montanhosos), bem como outros meios. Uma região desses dutos que está mais sujeita a falhas é a região soldada ou, especificamente, a junta soldada.

A junta soldada pode ter uma ótima qualidade visual e não possuir defeitos superficiais e/ou subsuperficiais, porém, as tensões internas originadas pela dilatação e/ou compressão durante a operação, denominadas de tensões residuais, podem comprometer a vida útil da estrutura soldada. Se uma junta soldada se romper, os prejuízos ambientais e econômicos serão catastróficos. Portanto, é necessário ter um conhecimento profundo na mensuração e atenuação dos valores dessas tensões originadas pós-processo de união.

As tensões residuais, presentes em praticamente todos os componentes fabricados quanto nas estruturas montadas, podem alterar a capacidade de carga destes quando submetidos à tensões externas. Em particular, tensões residuais oriundas da soldagem podem diminuir a resistência à flambagem, causar fratura frágil e diminuir a vida em fadiga. É, então, importante estimar a distribuição dessas tensões e seus efeitos no desempenho de estruturas soldadas¹.

Há vários fatores que influenciam o nível de tensões residuais em soldagem, entre eles, pode-se destacar: o processo de soldagem, o tipo de chanfro empregado, o material a ser soldado, a energia de soldagem e a técnica de soldagem empregada².

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar os níveis de tensões residuais em passe de raiz e no passe de acabamento de juntas soldadas dos aços API 5L X65 e API 5L X70 com diferentes espessuras e utilizando diferentes processos de soldagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizadas duas chapas de aço com as especificações API 5L X65 e X70, fornecidas pela USIMINAS, como metal de base, com espessuras de 11 e 19 mm, respectivamente, as quais foram cortadas nas dimensões de 100 mm x 100 mm, chanfradas por fresagem a um ângulo inicial de 45° e submetidas a outra usinagem para confecção do “nariz” de 2,5mm. A Tabela 1 apresenta a composição química desses aços. Os processos utilizados para o passe de raiz foram: Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW), utilizando os eletrodos AWS E8010G e AWS E8018G para os passes de raiz e acabamento, respectivamente, ambos com diâmetro de 4 mm; e, Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW), utilizando o consumível AWS ER 70S com diâmetro de 4 mm. Para o passe de enchimento e acabamento, além do processo SMAW, utilizou-se o processo ao Arco Elétrico com Arame Tubular (FCAW) e o arame AWS E91T1 com diâmetro de 1,2 mm. O gás de proteção utilizado no processo de soldagem GTAW foi o Argônio e, no processo FCAW, utilizou-se uma mistura contendo 20% de CO₂ e 80% de Argônio.

Para o metal de base de menor espessura, aço API 5L X65 com 11 mm, foram executados cinco passes de soldagem além do passe raiz. Utilizando como metal de base o aço API 5L X70, foram executados dezenove passes de soldagem com o processo SMAW dos quais dois passes quentes, doze de enchimento e cinco passes de acabamento. No processo de soldagem FCAW, esse número foi maior, totalizando 22 passes, dos quais dois quentes logo após o cordão da raiz, quinze de enchimento e cinco de acabamento final. Todos os cordões foram executados manualmente, não houve temperatura de pré-aquecimento e as juntas foram soldadas sem restrição. Como o alvo deste estudo é avaliar as propriedades somente na região do passe raiz e na região que compreende os passes de acabamento, as tabelas deste artigo limitam-se aos dados desses respectivos passes.

Na Tabela 2 estão descritos os consumíveis utilizados para as diferentes condições de soldagem da junta.

Tabela 1: Composição química dos aços utilizados em % peso

Aço	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
X65	0,07	0,18	1,37	0,019	0,004	0,186	0,021	0,0009	0,026	0,037
X70	0,10	0,24	1,58	0,013	0,004	0,174	0,022	0,002	0,029	0,048

Tabela 2: Consumíveis utilizados nas diferentes juntas e processo

Junta	Passe de Raiz	Passe de Enchimento	Passe de Acabamento	Processos
I-V	E8010G	E8018G	E8018G	SMAW
II-VII	E8010G	E91T1	E91T1	SMAW+FCAW
III-VII	ER70S	E8018G	E8018G	GTAW+SMAW
IV-VIII	ER70S	E91T1	E91T1	GTAW+FCAW

A composição química dos consumíveis utilizados é exibida na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química dos consumíveis utilizados* (% em peso)

Metal de Adição	C	Mn	Si	Ni	Mo	Cr
E8010G	0,07	0,60	0,13	0,70	0,30	
E8018G	0,06	1,10	0,40	1,65		
ER70S	0,10	1,10	0,60			
E91T1	0,05	1,00	0,45		1,00	2,15

* Composição química fornecida pelo fabricante.

As Tabelas de 4 a 7 apresentam os parâmetros de soldagem para as juntas I, II, III e IV, utilizando o aço API 5L X65 com 11 de espessura.

Tabela 4: Parâmetros de soldagem para a junta I

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	120	23	2,71	8,15
2	Quente	160	23	2,87	10,26
3	Quente	160	23	3,02	9,75
4	Acabamento	180	23	2,93	11,30
5	Acabamento	180	23	2,85	11,62
6	Acabamento	180	23	2,96	11,19

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem para a junta II

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	120	23	2,76	8,00
2	Quente	156	26	3,44	9,43
3	Quente	156	26	3,72	8,72
4	Acabamento	156	26	3,79	8,56
5	Acabamento	156	26	4,11	7,89
6	Acabamento	156	26	4,19	7,74

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$; FCAW $\eta=0,8$.

Tabela 6: Parâmetros de soldagem para a junta III

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)
1	Raiz	140	23	0,85	24,62
2	Quente	160	23	2,87	10,25
3	Quente	160	23	2,94	10,01
4	Acabamento	180	23	2,90	11,42
5	Acabamento	180	23	2,93	11,30
6	Acabamento	180	23	2,89	11,46

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$; GTAW $\eta=0,65$.

Tabela 7: Parâmetros de soldagem para a junta IV

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	140	23	0,89	23,51
2	Quente	156	26	3,75	8,65
3	Quente	156	26	3,81	8,52
4	Acabamento	156	26	3,96	8,19
5	Acabamento	156	26	4,05	8,01
6	Acabamento	156	26	4,08	7,95

* Eficiência térmica: FCAW $\eta=0,8$; GTAW $\eta=0,65$.

As tabelas de 8 a 11 ilustram, respectivamente, os parâmetros de soldagem para as juntas soldadas, tendo como metal de base o aço API 5L X70 (V-VI-VII-VIII).

Tabela 8: Parâmetros de soldagem para a junta V

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	120	23	2,99	7,38
2	Quente	160	23	2,74	10,75
3	Quente	160	23	3,13	9,41
15	Acabamento	180	23	3,02	10,97
16	Acabamento	180	23	3,05	10,86
17	Acabamento	180	23	2,82	11,75
18	Acabamento	180	23	3,05	10,86
19	Acabamento	180	23	2,96	11,19

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$.

Tabela 9: Parâmetros de soldagem para a junta VI

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	120	23	3,42	6,46
2	Quente	156	26	4,36	7,44
3	Quente	156	26	3,59	9,04
18	Acabamento	156	26	3,97	8,17
19	Acabamento	156	26	4,19	7,75
20	Acabamento	156	26	4,19	7,75
21	Acabamento	156	26	4,06	7,99
22	Acabamento	156	26	4,04	8,03

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$; FCAW $\eta=0,8$.

Tabela 10: Parâmetros de soldagem para a junta VII

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	140	23	0,82	25,52
2	Quente	160	23	2,80	10,51
3	Quente	160	23	2,78	10,59
15	Acabamento	180	23	3,11	10,65
16	Acabamento	180	23	3,01	11,00
17	Acabamento	180	23	3,09	10,72
18	Acabamento	180	23	3,12	10,62
19	Acabamento	180	23	3,06	10,82

* Eficiência térmica: SMAW $\eta=0,8$; GTAW $\eta=0,65$.

Tabela 11: Parâmetros de Soldagem para a junta VIII

Passe	Local	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. de Soldagem (mm/s)	Energia (KJ/cm)*
1	Raiz	140	23	0,8	26,16
2	Quente	156	26	3,42	9,49
3	Quente	156	26	3,80	8,54
18	Acabamento	156	26	4,44	7,31
19	Acabamento	156	26	4,08	7,93
20	Acabamento	156	26	3,94	8,23
21	Acabamento	156	26	4,70	6,90
22	Acabamento	156	26	4,1	7,91

* Eficiência térmica: FCAW $\eta=0,8$; GTAW $\eta=0,65$.

Medidas das tensões residuais

O método empregado para avaliação das tensões residuais foi por difração de raios-X, através de um difratômetro portátil – *Portable Stress Analyser STRESSRAD* (RADICON Ltd. Scientific Instruments), Fig. 1, que utiliza o software Stress.



Figura 1: Difratorômetro portátil para análises das tensões residuais. Fonte: autor.

No tubo de raios-X desse difratômetro, um feixe de elétrons é acelerado através de uma grande diferença de potencial, 25 kV, colidindo com o anodo com uma energia significativa e, como consequência, são gerados raios-X. Uma grande parte da energia é dissipada em forma de calor e apenas 2% dela é transformada em raios-X. O método utilizado foi o $\text{sen}2\psi$.

Foram analisados quinze pontos do lado esquerdo da junta, e quinze pontos do lado direito da junta soldada, com espaçamento de 2 mm entre cada uma. A disposição dos pontos está ilustrada na Fig. 2.

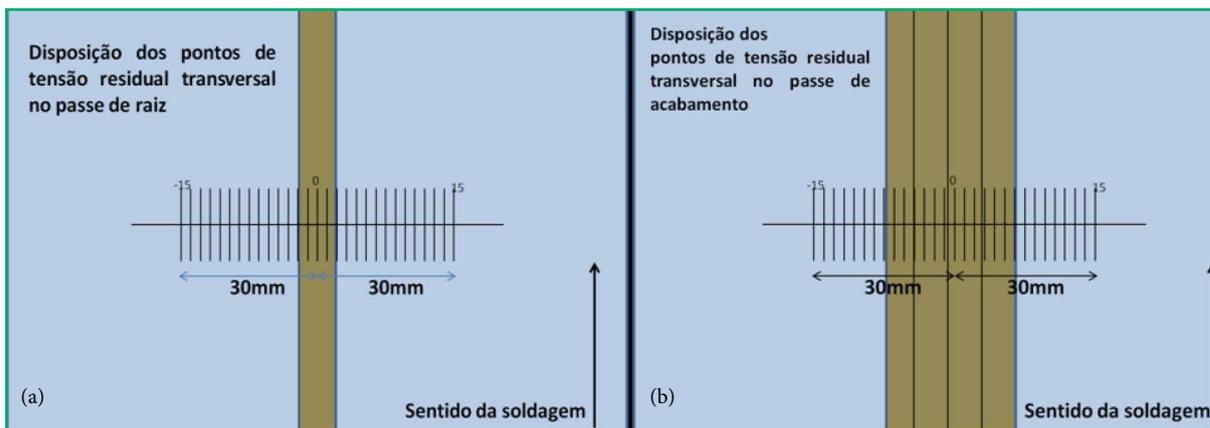


Figura 2: Disposição dos pontos para análise de tensões residuais no passe de raiz (a), e no passe de acabamento (b). Fonte: autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 apresenta o perfil de tensões residuais longitudinais no passe de raiz para todas as condições estudadas. O gráfico é representado no eixo das abscissas pela distância ao centro da solda em milímetros (mm), no qual os valores marcados em negativo representam o lado esquerdo da linha central do metal de solda. No eixo das ordenadas, está plotada a magnitude da tensão residual em Mega Pascal (MPa) cujos valores positivos significam as tensões do tipo trativas e os valores negativos, as tensões compressivas.

As linhas vermelhas tracejadas verticalmente indicam a qual distância do centro do cordão de solda foi tomada para efeitos de comparação de tensões residuais trativas e compressivas.

O perfil das curvas obtidas é semelhante para todas as condições analisadas, predominando tensões compressivas na região do metal de solda e tensões trativas na zona termicamente afetada. A região próxima a linha de fusão (tracejada em vermelho) foi a que apresentou os maiores valores de tensão residual trativa. Os maiores valores de tensão trativa no passe de raiz foram de 321 MPa e 249 MPa, utilizando o processo SMAW (juntas V e VI) em um ponto localizado no lado direito da chapa a uma distância de 14 mm do centro da solda. Esses valores maiores ocorreram na chapa de maior espessura, a qual foi soldada com maior velocidade de soldagem.

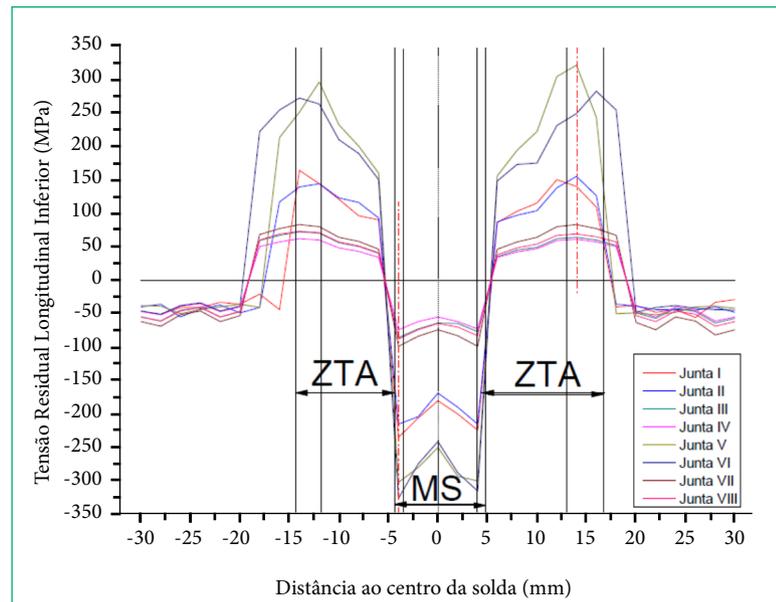


Figura 3: Perfil de Tensões Residuais Longitudinais no passe raiz.

O enchimento da junta do aço de maior espessura necessitou de um maior número de passes, resultando em uma maior quantidade do metal de solda. As Juntas I e II apresentaram menores níveis de tensões residuais que as juntas V e VI, assim como a comparação entre as juntas III e IV (API 5L X65) com as juntas VII e VIII (API 5L X70), evidenciando a influência da espessura na magnitude das tensões residuais devido ao gradiente térmico ocasionado.

Diferentemente do que a literatura diz, o perfil das tensões residuais mostrou-se diferente do modelo tradicionalmente conhecido para chapas soldadas com apenas um único passe. Neste trabalho, as tensões compressivas no MS e as tensões trativas na ZTA foram predominantes. Alguns estudos já vêm discutindo essa diferença há algum tempo, principalmente quando são utilizadas soldas multipasses, soldagem de tubulações e execução dos processos de soldagem em chapas de espessuras elevadas³⁻⁵.

Durante a execução dos passes de enchimento de uma junta com espessura considerável, o ângulo de abertura do chanfro em conjunto com as tensões térmicas de contração tendem a flexionar a junta causando distorção⁶. Esses fatores podem ajudar na formação de tensões compressivas no metal de solda. Ao mesmo tempo, essa flexão pode aliviar tensões previamente geradas a cada aplicação de um passe de soldagem, através de deformações plásticas oriundas desta flexão³.

Os perfis das tensões residuais longitudinais na região dos passes de acabamento são mostrados na Figura 4. Como a região analisada compreende uma maior área do MS em comparação à região do passe de raiz e também pelo fato da execução da soldagem ter sido realizada de forma manual, o perfil plotado não foi tão simétrico quanto ao encontrado na região inferior, porém, as regiões da ZTA e MS são muito bem visualizadas.

Da mesma forma que no passe de raiz, observou-se valores predominantemente compressivos na região do MS enquanto que grande parte da ZTA comportou-se de forma trativa. Na posição de 18 mm ao lado direito da chapa, correspondente à região modificada termicamente, foram encontradas as maiores magnitudes de tensões residuais do tipo trativa, com máximo de 354MPa na junta VIII. Também do lado direito e na junta VIII à distância de 10 mm do centro da solda (MS), verificou-se o maior valor de tensão compressiva, -386MPa.

O perfil de tensões residuais em juntas soldadas pode ser alterado por três fatores: contração, resfriamento superficial super intenso e transformação de fases. Esses efeitos podem influenciar de forma individual na intensidade e no perfil das tensões⁷.

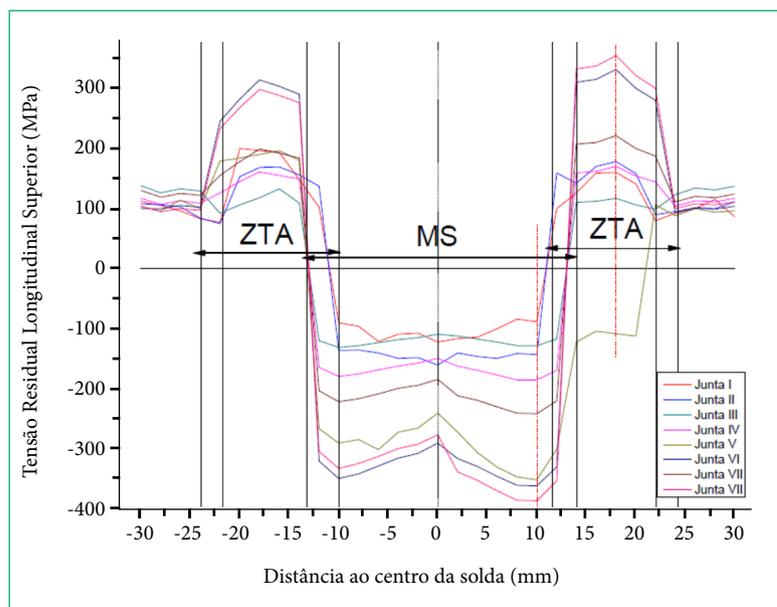


Figura 4: Perfil de Tensões Residuais Longitudinais no passe de acabamento.

Neste trabalho, observou-se que a energia de soldagem (H) que, por si só, não teve uma relação direta com os níveis de tensões residuais encontrados, pois é observado que assim como maiores valores de H proporcionam maiores magnitudes de tensões residuais, um menor aporte térmico também foi responsável por maiores valores.

Observou-se, principalmente, na execução do passe de raiz, onde se obteve a maior discrepância da energia de soldagem, que esse não foi o parâmetro mais importante. O que mais influenciou nesta condição, foi o elevado tempo para soldar, ou seja, uma velocidade lenta de soldagem. Isso gerou tensões residuais trativas 30% menores que no processo SMAW, ainda que esse tenha apresentado uma menor energia de soldagem. Isso demonstra a importância da velocidade de soldagem no perfil de tensões residuais e que esse parâmetro deve ser bem controlado.

Na execução do passe de acabamento, não houve uma discrepância entre as energias de soldagem como ocorreu no passe de raiz, mas o parâmetro que mais pode ter afetado a magnitude das tensões residuais foi a maior velocidade de soldagem para o processo FCAW aliado com uma maior contração que ocorreu nessas chapas, o que gerou, principalmente, no aço API X70 tensões trativas na ZTA maiores que 300 MPa.

Através de interface gráfica desenvolvida no software MATLAB, foi possível simular a zona termicamente afetada para todas as condições. Como neste trabalho houve dois tipos de processo no passe de raiz (SMAW e GTAW) e dois no passe de acabamento (SMAW e FCAW), e ainda as energias de soldagem encontradas entre os dois aços utilizados foram semelhantes, com valores de corrente e tensão iguais com mínima diferença na velocidade de soldagem, não houve necessidade de simular dezesseis ZTAs, mas uma para cada processo, ou seja, apenas quatro. A Tabela 12 mostra os parâmetros de processos utilizados para a simulação no MATLAB.

Tabela 12: Parâmetros de soldagem na simulação da ZTA

Local	Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Eficiência
Raiz	SMAW	120	23	2,80	0,8
Raiz	GTAW	140	23	0,85	0,65
Acabamento	SMAW	180	23	2,90	0,8
Acabamento	FCAW	156	26	4,10	0,8

A Fig. 5 a seguir ilustra a distribuição da temperatura para os processos utilizados neste trabalho.

Analisando a distribuição de temperatura ao longo da chapa no passe raiz, verificou-se que o aporte térmico produzido pelo processo GTAW (c) é muito maior em comparação ao processo SMAW (a). Por exemplo, a distância de 10 mm da tocha, no processo SMAW, a temperatura é de 214°C, enquanto no processo GTAW, ela é de 656°C. Portanto, nesse caso, a energia de soldagem não está diretamente influenciando o nível de tensões residuais.

Para as condições de acabamento observa-se, também pela Figura 4, que o processo FCAW (d) apresentou uma ZTA ligeiramente menor que o processo SMAW (b) devido a maior velocidade de execução dos passes, resultando no menor aporte térmico. A influência da energia de soldagem nas tensões residuais no passe de acabamento comportou-se semelhante ao passe raiz, no qual foram encontrados valores menores de tensões nos passes executados com maior energia de soldagem.

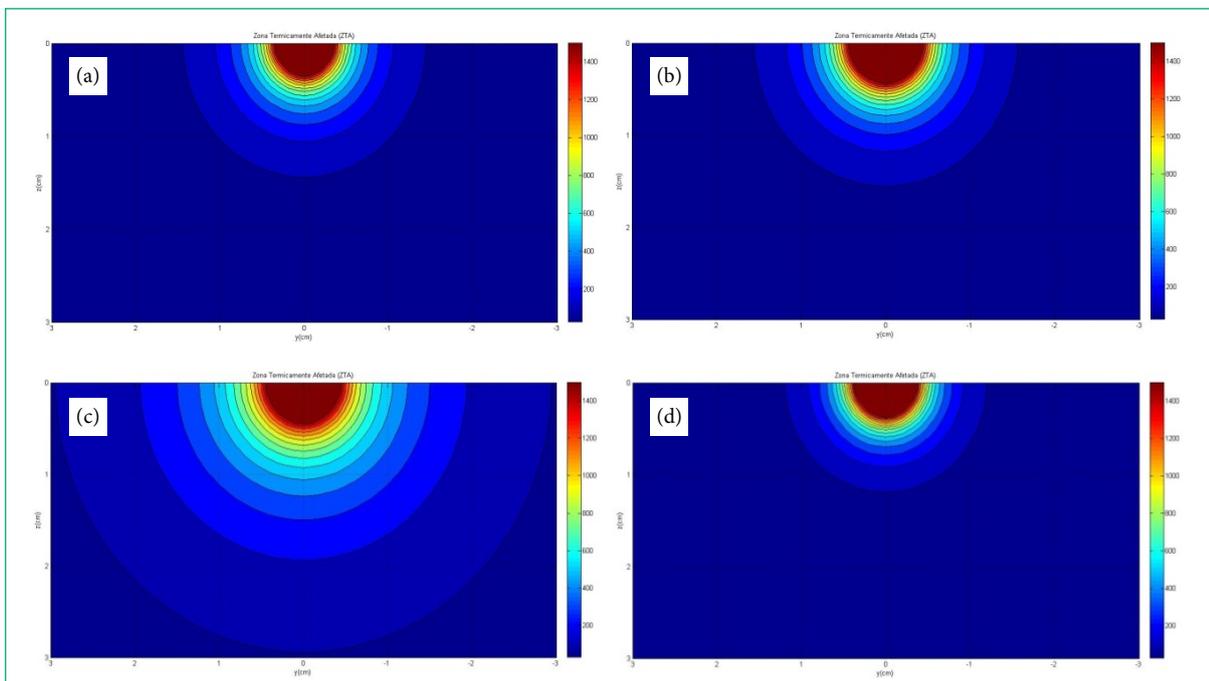


Figura 5: Distribuição de temperatura: (a) passe raiz SMAW; (b) passe acabamento SMAW; (c) passe raiz GTAW; (d) passe acabamento FCAW. Fonte: autor.

CONCLUSÃO

As tensões residuais de caráter compressivo no metal de solda e trativo na ZTA demonstraram a influência da superposição dos ciclos térmicos proporcionado pelos passes subsequentes em uma solda multipasse com relação à mudança no perfil dessas tensões quando comparada com uma solda monopasse.

A redução em torno de 30% dos valores das tensões residuais no passe de raiz das juntas executadas pelo processo GTAW com relação ao processo SMAW demonstra a importância do efeito da velocidade de soldagem sobre estes valores. Maiores valores de tensões residuais no passe raiz foram encontrados para a condição que utilizou o processo SMAW. O aumento da espessura da chapa, ou seja, o aço API 5L X70, implicou em maiores valores dessas tensões.

Os altos valores de tensões residuais trativas na ZTA do passe de acabamento, superior a 70% do limite de escoamento do metal de base principalmente nas juntas executadas pelo processo FCAW nas chapas do aço API 5L X70 de maior espessura, demonstram a necessidade do controle na execução do último passe.

A análise da ZTA, através da interface gráfica, permitiu uma melhor visualização e simulação das condições de processo sobre a distribuição de temperatura ao longo da junta. Maiores ZTAs foram observadas no passe raiz utilizando o processo GTAW.

REFERÊNCIAS

- Ju JB, Lee JS, Jang J, Kim W, Know D. Determination of welding residual stress distribution in API X65 pipeline using a modified magnetic Barkhausen noise method. *International journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003; 80:641-6. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(03\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(03)00131-5)
- ASM International. *ASM Handbook*. 1992; 6: 2647-65.
- Oliveira GLG. Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas do aço estrutural ASTM A516 G70 [dissertação na internet]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16198>
- Araújo BN. Avaliação do nível de tensão residual e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em juntas soldadas de aços API 5L X80 utilizados para transporte de petróleo e gás [tese na internet]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2013. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufc/7180>
- Silva CC. Avaliação das tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinaria de petróleo [dissertação na internet]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/598>
- Withers P J, Bhadesia HKD H. Residual stress. Part-1 – Measurement techniques. *Materials Science Technology*. 2001;17(4): 355-65. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>
- Macherauch E, Kloos KH. Origin, measurements and evaluation of residual stresses. In: Macherauch E, Hauk V, editors. *Residual Stresses in Science and Technology*. Oberusel: DGM Verlag; 1987. p.3-26.