

Desenvolvimento de Software para Rastreamento de Ciclos Térmicos na Fabricação de Juntas Soldadas e Reparadas

Filipe Porto Mendanha

Victor Eduardo Silva Alves

João Paulo Castro do Nascimento

Louriel Oliveira Vilarinho

Universidade Federal de Uberlândia, Laprosolda – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Unidade EMBRAPIL, Uberlândia, MG, Brasil

filipe.mendanha@ufu.br, victoralvesmec@gmail.com, jpcn1994@gmail.com, vilarinho@ufu.br

Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo para tratamento de dados de temperatura da união, remoção e reparo de juntas soldadas para determinação do ciclo térmico experimental. Os ensaios experimentais consistem das seguintes etapas: união de juntas soldadas pelo processo FCAW-G (Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding), goivagem (remoção de solda) a plasma e reparo pelo processo FCAW-G, constituindo assim um ciclo térmico. Assim, a aquisição de dados de temperatura instantâneas foram obtidas pelo software LabVIEW, para 4 termopares posicionados na região de ZAC (zona afetada pelo calor) ao longo do comprimento das chapas metálicas em que os ensaios foram realizados. Dessarte, o tratamento efetuado subdivide-se em dois programas computacionais: O primeiro, para triagem dos dados adquiridos em cada etapa (união/remoção/reparo) para definir a escolha da aquisição mais crítica de temperatura de um dos termopares; O segundo, para concatenar as curvas de temperatura de cada etapa com base nos termopares escolhidos para construção do ciclo térmico dos ensaios realizados. Desse modo, as informações obtidas permitem uma melhor compreensão das temperaturas de pico, taxas de aquecimento e resfriamento, além do comportamento da microestrutura do material ao ser submetido ao ciclo térmico ensaiado. Os programas de computador, responsáveis pelo tratamento, foram escritos em MATLAB.

Palavras chave: *Processamento de Dados. Ciclo Térmico. Soldagem. Goivagem. Reparo.*

1. INTRODUÇÃO

A avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas submetidas a múltiplos ciclos térmicos é de suma importância, principalmente para o setor de Petróleo, Gás Natural, Energia e Biocombustíveis, uma vez que, o controle da quantidade de reparos impacta em prazos e custos de construção e manutenção. Normas e especificações limitam em dois reparos localizados, quando há requisito de impacto Charpy ou três reparos localizados quando não há este requisito. Neste contexto é imprescindível abordagens que possibilitem a determinação do ciclo térmico experimental e contribuam para um melhor entendimento do comportamento do material ao longo de todo processo.

Desse modo, foram realizados ensaios experimentais de união, remoção da solda (goivagem a plasma) e reparo em chapas de aço. A fim de adquirir dados de temperatura para esses processos, com intuito de compreender o comportamento do material em cada etapa do ciclo térmico, incluindo temperaturas de pico, taxas de aquecimento e resfriamento ensaiados. Tais informações são fundamentais para validação de modelo numérico matemático de simulação computacional, por conseguinte, base para outras simulações físicas, tais como o simulador de zona afetada pelo calor (ZAC) por efeito joule, dilatômetro e Gleeble.

A ZAC constitui uma área resultante dos ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento durante um processo de soldagem sendo uma região do metal base, adjacente ao metal de solda que não foi fundida, as elevadas velocidades de aquecimento e resfriamento que experimentam esta pequena região produzem modificações na microestrutura alterando suas propriedades mecânicas, em relação ao metal de solda e metal de base (ANDIA, 2012).

O diagrama de fase Fe-C e o diagrama CCT (Transformação em Resfriamento Contínuo) para o tratamento térmico do aço carbono podem ser utilizados também para a soldagem, porém algumas considerações devem ser reconhecidas. O ciclo térmico durante a soldagem e o tratamento térmico do aço carbono difere-se significativamente conforme mostra a Figura 1. As temperaturas de pico atingidas na ZAC podem chegar a ~1500°C, com uma taxa de

aquecimento e resfriamento alta e o tempo de permanência acima de A3 curto. Em comparação, a temperatura de pico no tratamento térmico que pode chegar na faixa de 900°C, uma taxa de aquecimento baixa e o tempo de permanência acima de A3 é mais longo (ARAÚJO, 2008).

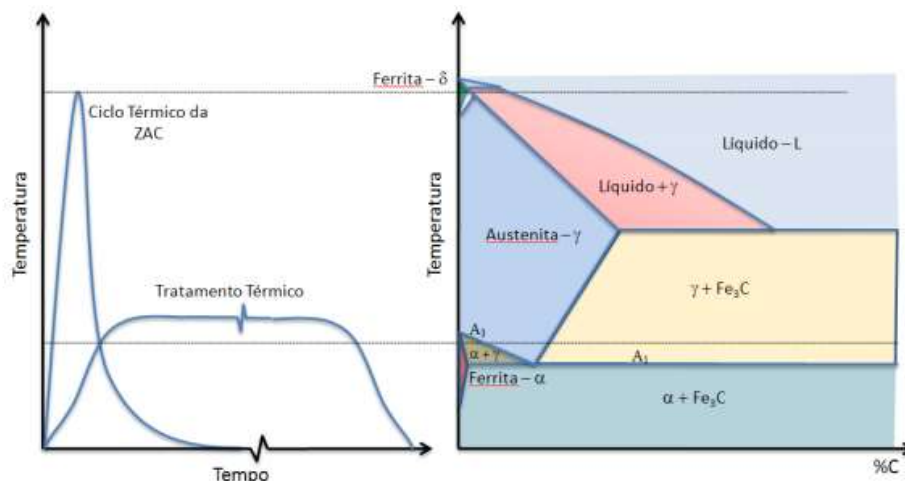


Figura 1- Diferença do Ciclo Térmico da Soldagem e do Tratamento Térmico (KOU, 2003 - Modificado)

O estudo do diagrama CCT para a soldagem começou por volta das décadas de 1950s e 1960s com a construção de um equipamento de dilatometria de alta velocidade para avaliar a transformação da austenita em ferrita durante o rápido ciclo de resfriamento térmico, característica da região da ZAC do processo de soldagem. Este tipo de estudo foi primeiramente para entender e resolver problemas de trincas a frio (trincas de hidrogênio) e tenacidade da ZAC (HARRISON & FARRAR, 1989).

Frequentemente tais problemas metalúrgicos estão associados à Zona Afetada pelo Calor (ZAC) na soldagem. Embora diferentes autores tenham abordado o estudo direto da ZAC, como por exemplo, Ikawa, Oshige, & Noi (1977); Mabuchi, Uemori, & Fujioka, (1996); Carrouge & Bhadeshia (2002); Meadows & Fritz (2005), esta região possui dimensões reduzidas, o que dificulta a verificação de propriedades mecânicas. Desta forma, sobressalta-se a importância de uma metodologia que consiga investigar a ZAC de uma forma ampliada, mas que garanta a transportabilidade dos resultados da metodologia para a soldagem real.

Portanto, o desenvolvimento de um código/algoritmo de programação para otimizar e automatizar a organização, processamento dos dados e construção do ciclo térmico foi imprescindível para atenuar o custo computacional e carga de trabalho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios experimentais consistem das seguintes etapas: união da junta soldada, goivagem (remoção da solda) e reparo, constituindo assim um ciclo térmico.

As placas de testes utilizadas são de um aço estrutural naval de classificação ASTM-A131 EH36 de dimensões 482x362x25.4 [mm], com chanfro em “V” de 60°, conforme Figura 2. As placas de teste são preparadas com abertura de raiz de 5 mm, com dois pontamentos nas bordas e um no centro, para que se mantenha o alinhamento durante a soldagem.

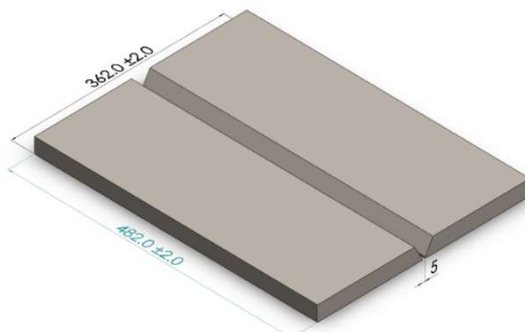


Figura 2- Croqui da placa de teste. Ilustração: Autor.

A união e o reparo foram realizados manualmente pelo soldador na posição plana. A fonte de soldagem utilizada foi a *Miller PipePro RFC* e seu alimentador de arame *Miller PipePro DX Dual Feeder*. O processo utilizado foi o FCAW-G e o metal de adição para ambos os processos, foi o arame tubular de classificação AWS E71T-1C de bitola nominal 1,20 mm (Lote F160F8G20C) de fabricação ESAB. O gás de proteção utilizado foi o CO₂ puro.

A remoção de solda foi realizada em um processo automatizado, em uma mesa de coordenadas XY, realizando a remoção de material na junta soldada em cinco passes, deixando apenas a raiz da junta. Foi utilizada a fonte de goivagem *Powermax 1650* da *HyperTherm* e tocha de modelo *T100M MATCH TCH ASSY 25*. Os consumíveis foram da mesma marca para a corrente de 80A, visto que foi o valor de corrente regulado na fonte que melhor atendeu para todos os cinco passes de remoções necessárias.

Assim, a aquisição de dados de temperatura instantâneas (na frequência de 2 Hz) foram obtidas pelo software LabVIEW, para 4 termopares posicionados na região de ZAC (zona afetada pelo calor), indicada pela cota de 1 mm na Figura 4, ao longo do comprimento (de modo uniforme), das chapas metálicas em que os ensaios foram realizados.

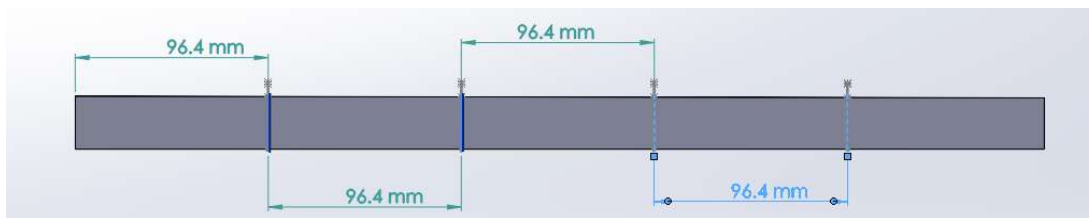


Figura 3- Croqui da distribuição de termopar na placa de teste. Ilustração: Autor.

Para inserção do termopar na região de interesse foi realizado um furo cego de 1/8" (polegadas) de diâmetro na região inferior da placa de teste, deixando a profundidade ($P = 19,76$ mm) e distância ($D = 11,30$ mm) correta até a região de interesse. Neste furo insere-se um pequeno tubo cerâmico que terá a função de isolar eletricamente e guiar a junta do termopar até o final do furo. A soldagem do termopar no ponto de interesse foi feita por descarga capacitiva.

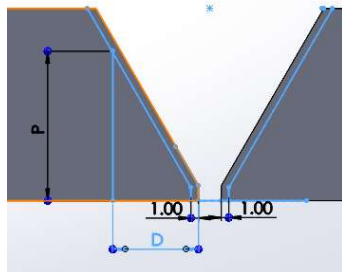


Figura 4- Croqui e macro (antes da goivagem) do posicionamento do furo do termopar. Ilustração: Autor

O monitoramento contínuo da temperatura nas zonas de interesse da junta soldada, goivada e reparada, foi realizado utilizando-se termopares do tipo K, cuja faixa linear de temperatura de trabalho é adequada para o trabalho (de 0 a 1300 °C). Para interpretar os sinais oriundos dos termopares, utilizou-se um módulo A/D para aquisição de temperatura modelo NI 9210 (resolução de 24 bits, taxa de amostragem total de 14 S/s e capacidade para até 4 termopares) acoplado à interface de protocolo USB, modelo cDAQ-9171, ambos da National Instruments.

Nesse sentido os ensaios servem para levantamento de dados experimentais que definirá o ciclo térmico da região da ZAC.

O ciclo da união (semelhante ao reparo) trata-se do preenchimento do chanfro com várias camadas de cordões de solda. A goivagem trata-se da remoção dos cordões e o reparo é o repreenchimento do chanfro. Nesse sentido, para cada cordão adicionado ou retirado é realizado uma aquisição de dados de corrente, tensão e temperatura. O objeto de estudo nesse caso é a diagramação do ciclo térmico em relação ao binômio tempo/temperatura. Portanto, cada aquisição foi separada de acordo com o respectivo processo, em seguida os arquivos de aquisição de temperatura, por ordem de camada e cordão, foram unidos em um único arquivo de texto, de forma que cada processo (união, remoção e reparo) tenha seu ciclo térmico.

3. LEVANTAMENTO DO CICLO TÉRMICO

Uma vez que, são realizados diversos ensaios (para cada etapa do ciclo térmico e diferentes processos), sendo cada ensaio multipasses, devido a espessura da chapa e ângulo do bisel, o tamanho e quantidade de arquivos de aquisição são elevados. Dessa forma torna inviável o processamento e diagramação desses dados adquiridos pelos processos tradicionais de utilização de softwares como Excel, Origin, SciDavis etc, devido a demanda computacional e tempo humano para organização e processamento desses dados para construção do ciclo térmico de uma placa de teste.

Por conseguinte, foi desenvolvido um algoritmo para tratamento de dados adquiridos de temperatura da união, remoção e reparo de juntas soldadas para determinação do ciclo térmico experimental. Dessarte, o tratamento efetuado subdivide-se em dois programas computacionais: o primeiro, para triagem dos dados adquiridos em cada etapa (união/remoção/reparo) para definir a escolha da aquisição mais crítica de temperatura de um dos termopares; o segundo, para concatenar as curvas de temperatura de cada etapa com base nos termopares escolhidos para construção do ciclo térmico dos ensaios realizados, que pode ser utilizado em futuras simulações físicas, como ensaios dilatométricos (Gleeble, dilatômetro, etc.), com base nos resultados já concebidos. Desse modo, as informações obtidas permitem uma melhor compreensão das temperaturas de pico, taxas de aquecimento e resfriamento, possibilitando um melhor entendimento do comportamento do material diante de múltiplos ciclos térmicos.

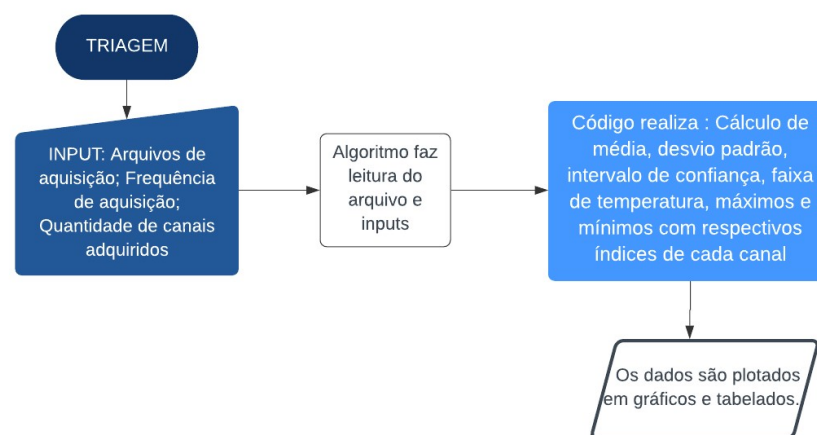


Figura 3- Fluxograma do algoritmo de triagem de dados. Ilustração: Autor.

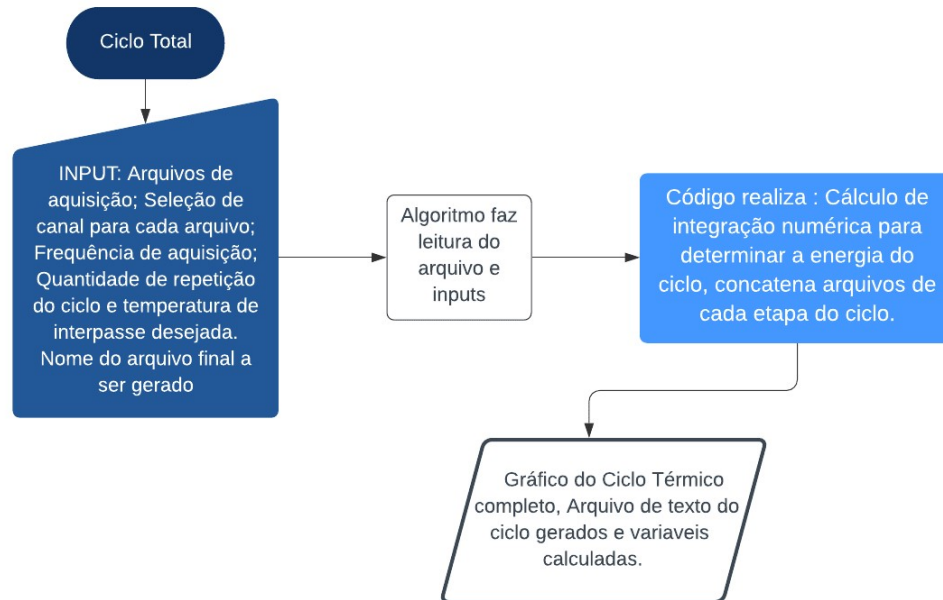


Figura 4- Fluxograma da construção do ciclo térmico completo. Ilustração: Autor.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

De modo a ampliar o escopo do trabalho e validar as metodologias desenvolvidas para outros materiais e métodos, após os ensaios físicos para o levantamento do ciclo térmico, foram realizados tratamentos dos dados adquiridos e plotados os gráficos dos ciclos térmicos para o aço ASTM A131 EH36.

A Figura 5 apresenta o resultado tabelado dos dados conforme explicado no fluxograma da Figura 3. O exemplo a seguir (conforme Figura 6), trata-se do ciclo térmico de reparo em FCAW-G na posição 3G para uma remoção parcial da junta soldada, cada gráfico refere-se à aquisição (de temperatura) de cada termopar e informações complementares. Logo, este primeiro algoritmo, denominado TRIAGEM, é útil para avaliar em quais termopares houve perda (total ou parcial) de aquisição de dados (como o exemplifica os gráficos 1,2 e 4 da Figura 6). Ademais, em condições ideais (quando não há perda de aquisição de dados), auxilia a determinar em qual termopar ocorreu a temperatura mais crítica, entre outras informações que ajudam a determinar a escolha de qual aquisição do processo fará parte do ciclo térmico total (concatenação das curvas união remoção e reparo da chapa soldada).

	Mean	DP	Max	IndexMax	Min	IndexMin	Range	Confidence	Interval 95
1	99.6439	38.8000	503.4819	14026	24.7192	5001	478.7627	99.1310	100.1318
2	98.1460	41.9983	869.8118	18029	24.6965	5001	845.1153	97.5561	98.6396
3	98.5611	41.2017	750.1040	14052	24.6713	5003	725.4327	97.9130	98.9780
4	94.9798	40.2984	541.5264	18059	24.7124	5003	516.8140	94.3420	95.3849

Figura 5- Triagem de dados, tabela união FCAW-G posição 1G. Ilustração: Autor.

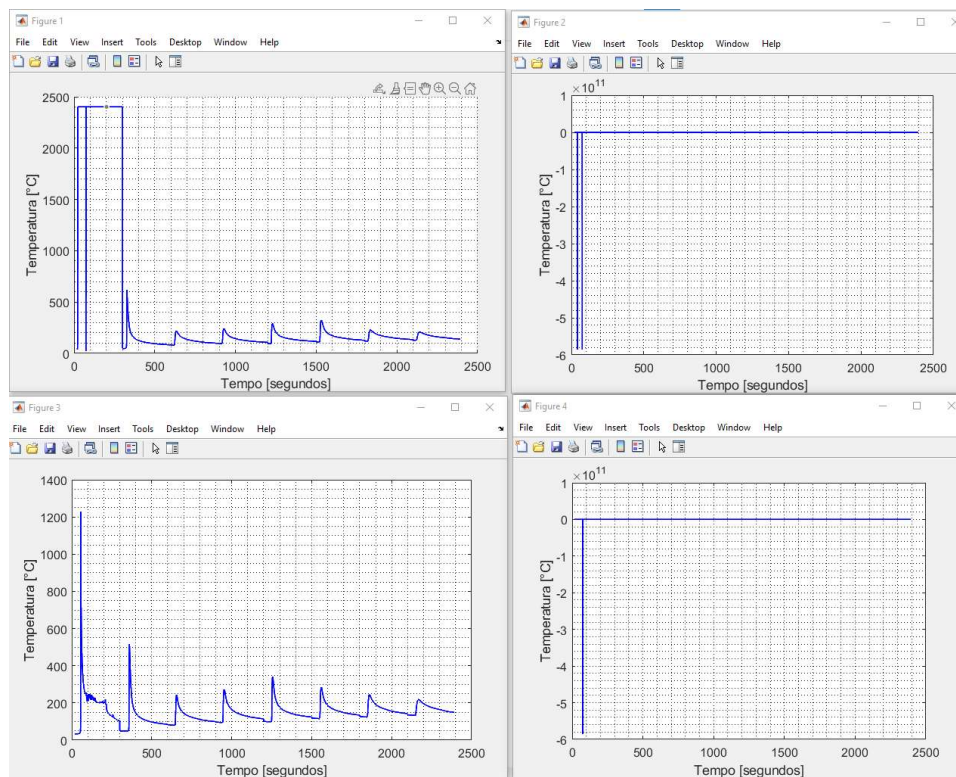


Figura 6- Triagem de dados, gráfico Reparo FCAW-G posição 3G. Ilustração: Autor.

Logo, o algoritmo denominado CicloTotal realiza a concatenação do ciclo térmico com base na triagem realizada de cada processo na respectiva ordem: União, Remoção, Reparo. Esse algoritmo além de plotar o gráfico, salva um arquivo de texto com duas colunas, referente aos dados tempo e temperatura. Com essas informações o código permite calcular a área sob o gráfico, para efeito comparativo entre ciclos térmicos a fim de avaliar a criticidade entre cada ciclo realizado e aporte térmico. O exemplo adiante (conforme a Figura 7) refere-se ao ciclo térmico completo composto pela união da junta soldada, goivagem e reparo.

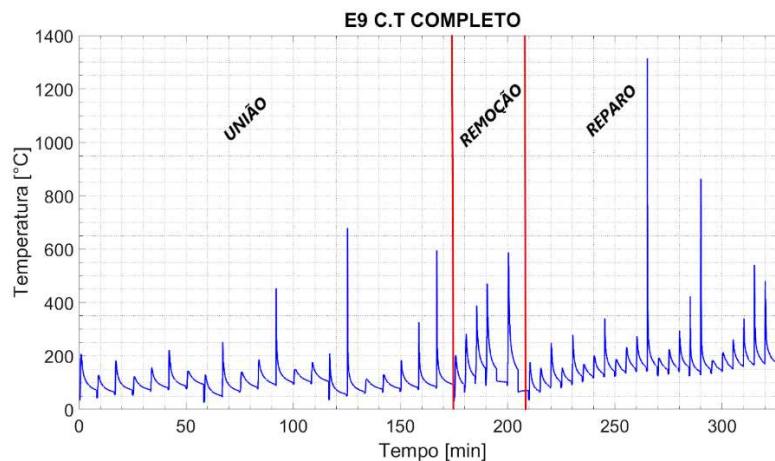


Figura 7- Ciclo térmico de junta soldada e reparada. Ilustração: Autor

5. CONCLUSÃO

Dessa forma, o software desenvolvido permite uma melhor compreensão do comportamento do material em cada etapa do ciclo térmico, incluindo temperaturas de pico, taxas de aquecimento e resfriamento ensaiados. Assim, contribui para a análise dos dados experimentais que definem o ciclo térmico da região da ZAC. Tais informações (do modelo experimental) são fundamentais para validação de modelo numérico matemático de simulação computacional.

Os *scripts* aplicados proporcionam a triagem de dados e a determinação do ciclo térmico experimental, conforme anteriormente explicitados, sendo de fácil adaptação para demais processos relacionados a esse tipo de tratamento de dados de modo geral. Por conseguinte o uso de algoritmo de programação para tratamento de dados viabilizou o manuseio dos arquivos de aquisição e auxiliou a construção do ciclo térmico de forma facilitada, de modo que atenua o custo computacional e carga de trabalho para organização e processamento dos dados ensaiados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDIA, J.L. M; SOUZA L.F.G.;BOTT, I.S. Haz Physical Simulation of API 5L X80: Pipeline Technology Conference. 8 th. Hannover, Germany, 2013
- ARAÚJO, D. B. Metodologia para Uso de Simulação Física no Estudo da ZAC e na Obtenção de Diagramas CCT para Soldagem. 2008. 104 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ASTM A131/A131M. Standard Specification for Structural Steel for Ships, 2014, 7p.
- AWS D1.1/D1.1M. Structural Welding Code – Steel, 2015, 603p.
- AWS. Excessive weld repair D1.8 demand critical. Disponível em: https://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=33932. Acesso em 02/01/2019. 2014.
- AWS. How many times can be weld a P91? Disponível em: http://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=3448. Acesso em 02/01/2019. 2003.
- AWS. Multiple welding repair in the same area. Disponível em: http://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=7304. Acesso em 02/01/2019. 2005.
- AWS. Repair attempts. Disponível em: http://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=32802. Acesso em: 02/01/2019. 2013.
- HARRISON, P. L., & Farrar, R. A. (1989). Application of Continuous Cooling Transformation Diagram for Welding of Steels. International Materials reviews, 34, 35-51.
- HYPERTHERM. Sistema de Corte e Goivagem arco plasma. Manual de operação 804487 – Revisão 1, 2003.
- KOU, S. (2003). Welding Metallurgy (Second Edition ed.).
- IKAWA, H., OSHIGE, H., & NOI, S. (1977). Austenite Grain Growth of Steel in Weld-Heat Affected Zone. Transactions of the Japan Welding Society , 8, 52-57.

MABUCHI, H., UEMORI, R., & FUJIOKA, M. (1996). The Role of Mn Depletion in Intra-Granular Ferrite Transformation in the Heat Affected Zone of Welded Joints with Large Heat Input in Structural Steels. *ISIJ International*, 36, 1406-1412.

MACHADO, M.V.R., et al. Sistema embarcado para monitoramento sem fio de sinais em soldagem a arco elétrico com abordagem tecnológica. *Soldagem e Inspeção*, v.17, p. 147- 157, 2012.

MEADOWS, C., & FRITZ, J. D. (2005). Understanding Stainless Steel Heat-Affected Zones. *Welding Journal*,

MILLER. PipePro 450 RFC. Manual do usuário - 2008.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Software development for Thermal Cycle tracking in the Manufacture of Welded and Repaired Joints

Filipe Porto Mendanha

Victor Eduardo Silva Alves

João Paulo Castro do Nascimento

Louriel Oliveira Vilarinho

Uberlândia Federal University, Laprosolda – Center of Research and Development of Welding Processes, EMBRAP II Unit, Uberlândia, MG, Brasil

filipe.mendanha@ufu.br, victoralvesmec@gmail.com, jpcn1994@gmail.com, vilarinho@ufu.br

Abstract

This work consists in the development of an algorithm for the temperature data processing of the union, removal and repair of welded joints, to determine the experimental thermal cycle. The experiments consist of the following steps: union of welded joints by the FCAW-G process (Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding), gouging (removal of weld) and repair by the FCAW-G processes, thus defining a thermal cycle. Thereby, the acquisition of instantaneous temperature data was obtained by the LabVIEW software, for 4 thermocouples positioned in the region of ZAC (zone affected by heat) along the length of the metal plates on which the tests were carried out. Therefore, the treatment performed is subdivided into two computer programs: The first, for data sorting at each stage (union/removal/repair) to determine the most critical temperature acquisition of one of the thermocouples; The second, for concatenate the temperature curves of each stage based on the thermocouples chosen, to build the thermal cycle of the tests performed. Hence, the information obtained allows a better understanding of peak temperatures, heating and cooling rates, and also the behavior of the material's microstructure when subjected to the tested thermal cycle. The computer programs responsible for data processing were written in MATLAB.

Keywords: Data Processing. Thermal Cycle. Welding. Gouging. Repair.