

Um Estudo de Produtividade na Soldagem, Aporte Térmico e Ensaio de Impacto Charpy, para Equipamentos de Transporte de Gases Pressurizados

Bianco Gallazzi da Silva Leite (UNIMEP) biancogallazzi@gmail.com

Carlos Roberto Camello de Lima (UNIMEP) crclima@unimep.br

Resumo:

O objetivo deste artigo é fazer uma comparação dos processos de soldagem manual, semi-automático e automatizado em um equipamento de transporte de gases pressurizados, para a verificação da eficiência, produtividade e a aprovação nas rigorosas inspeções sofridas pelo equipamento após o término da soldagem. Foram avaliados os processos de soldagem eletrodo revestido (SMAW), mig-mag (GMAW), arame tubular (FCAW) e arco submerso (SAW). Estes processos de soldagem foram utilizados em um equipamento dinâmico, construído com uma liga de aço carbono considerado como sendo um aço de alta resistência e baixa liga (H.S.L.A., *high strength and low alloy*). A metodologia utilizada foi um estudo de caso, onde foi avaliado a produtividade de cada processo, comparando-se as principais variáveis de soldagem utilizadas, os parâmetros utilizados e sua aplicabilidade. A preocupação também estende-se ao resultado dos ensaios não destrutivos (E.N.D.) aplicados na inspeção pós-soldagem. Foram utilizados ensaios destrutivos e não-destrutivos para a inspeção e aprovação do equipamento. O artigo é baseado em um estudo de caso que o objetivo é avaliar uma situação específica de soldagem em uma fábrica brasileira e avaliar o processo mais eficiente, não apenas enfatizando os custos referidos de soldagem e sim a sua conceituação técnica para aprovação nos testes submetidos, bem como o atendimento a normas internacionais utilizadas nos mesmos. Um dos fatores foram considerados como conclusivos para esta soldagem é o controle do aporte de calor (*Heat Input*), pois ao tratar-se de um material base tratado termicamente as variações mínimas nesses itens são fatores decisivos.

Palavras chave: Soldagem, Materiais HSLA, Produtividade, Vasos pressurizados.

A Study of Productivity in Welding, Thermal Supply and Charpy Impact Testing for Pressurized Gas Transport Equipment

Abstract

The aim of this article is to compare the processes of manual, semi-automatic and automated welding in a pressurized gas transport equipment, to verify the productivity efficiency and to approve the rigorous inspections of the equipment after the end of the welding. The welding process was carried out in the presence of a welded electrode (SMAW), mig-mag (GMAW), tubular wire (FCAW) and submerged arc (SAW), which welded a dynamic equipment, and low alloy). The evaluated points were the productivity of each process comparing with the main welding variables used in each of them, their parameters and their applicability, together with the results in the subsequent non-destructive inspection of industrial radiography or ultrasound, and the results in the destructive mechanical test of charpy and in some requests the mechanical test of traction. The article is based on a case study that the objective is to evaluate a specific welding situation in a Brazilian factory of construction of such equipment and to define the best process for each welding position used, not only emphasizing the referred costs of welding and yes their technical conceptualization for approval in the

non destructive and destructive tests, as well as the requirements of the international standards used in them. One of the factors considered as conclusive for this welding is the control of the Heat Input, because when it is a thermally treated base material the minimum variations in these items are disapproval factors.

Key-words: Welding, HSLA Materials, Productivity, Pressure vessel.

1. Introdução

Dentre as expectativas atuais do mercado, a concorrência tem sido um fator determinante na constante busca pela redução de custos em todos os setores produtivos brasileiros. Especificamente no setor de fabricação de equipamentos tem se observado a crescente preocupação com a produtividade nos processos de fabricação. Incluídos nessa sistemática os processos de soldagem, tratados pelas normas mundiais como processos especiais tem sido avaliados como itens determinantes no sucesso dos projetos de fabricação de equipamentos

Conforme Myres (2002), o aspecto produtividade dos processos de soldagem, os fundamentos que justificam a maior produtividade da soldagem realizada com arames contínuos em relação as varetas ou eletrodos revestidos, estão associados a uma melhor eficiência e taxa de deposição, somadas a um alto ciclo de trabalho.

Os aços estruturais (ARBL) de alta resistência e baixa liga, desenvolvidos a partir dos aços carbono manganês (C-Mn) com variadas espessuras, produzidos por laminadores a quente, considerados por sua característica de destaque com relação a resistência mecânica, quando submetidos a processos de soldagem e posterior tratamento térmico tem suas características alteradas, como são os que sofreram os tratamento de tempera e revenimento. Níveis satisfatórios de resistência mecânica, tenacidade, conformabilidade, soldabilidade e resistência a corrosão atmosférica, são obtidos através de uma ação conjunta de adequadas adições de elementos de liga e tratamentos térmicos convencionais, como por exemplo, normalização, ou ainda, tratamentos termo-mecânicos, como por exemplo, a laminação controlada (MODENESI,2012).

De acordo com Surian (2010), aços estruturais temperados e revenidos têm como principal propriedade a resistência ao desgaste por abrasão. Procedimentos de soldagem relativamente simples podem ser usados, sem pré-aquecimento ou com pré-aquecimento a temperaturas baixas. O teor de carbono nesses aços é normalmente mantido na faixa de 0,03 a 0,25%. Elementos de liga convencionais com Si, Cu, Mn, Ni e Cr, fundamentais no caso dos aços normalizados, são utilizados para fornecerem efeitos de endurecimento por solução sólida da ferrita, melhora na resistência a corrosão atmosférica e refinamento da microestrutura. Esse último, como um resultado do aumento da temperabilidade.

Por outro lado, a adição de elementos microligantes como Nb, V, Ti, Al, entre outros, em teores não muito superiores a 0,15%, combinada com o processo de laminação controlada, tem possibilitado aos modernos aços ARBL obterem uma estrutura ferrítica de tamanho de grão muito fino (entre 5 e 10 μm). O refinamento de grão é reconhecidamente o meio mais apropriado de se aumentar a resistência mecânica para esses aços, devido as considerações de tenacidade. Para a soldagem de aços temperados e revenidos da classe ASTM A514/A517, um baixo aporte térmico é utilizado para se conseguir uma resistência mecânica adequada da junta (MODENESI,2012).

A soldagem como processo de união entre metais, envolve aquecimento, fusão, solidificação e resfriamento de um material ou de diversos materiais, dependendo de sua aplicação. Assim, as transformações ocorrem de acordo com as temperaturas alcançadas no aquecimento, as

fases formadas durante a fusão, a solidificação e as transformações que ocorrem no resfriamento onde determinam o desempenho da junta soldada. Assim sendo, a metalurgia da soldagem é um item amplamente estudado e caracterizado para um bom resultado da junta soldada (BRANDI,2010).

Adicionando se a este estudo, outro fator muito importante a ser considerado é a Energia de soldagem (E) que por definição é considerada a energia introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda. A energia de soldagem é calculada por meio de uma equação na qual o produto Voltagem (V) com a Amperagem(I) tem unidade de potência e está relacionado com a energia elétrica produzida no arco elétrico pelo equipamento de soldagem. De acordo com a própria definição de energia de soldagem, a energia elétrica produzida pelo arco deve ser corrigida para a energia térmica que efetivamente foi introduzida na peça. A fração de energia térmica perdida é função das particularidades de cada processo de soldagem. Por isso, para corrigir a energia de soldagem é definido o adimensional η que é chamado eficiência térmica do processo de soldagem (BRANDI,2010)

De acordo com Zeemann (2003), a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama energia de soldagem, ou aporte de calor, ou aporte térmico, ou heat input, representada pelas letras E ou H, e cuja unidade usual é kJ/mm, sendo também apresentada em kJ/cm ou J/mm. Tem-se a equação:

$H_e = \eta \cdot U \cdot I \cdot (1/V_s)$ em que:

H_e = Aporte térmico (kJ/mm);

η = Eficiência térmica do processo de soldagem;

U= Tensão em Volts (V);

I = Corrente em Ampéres (A);

V_s = Velocidade linear de soldagem (mm/s).

Os processos de soldagem utilizados foram os processos convencionais sendo, eletrodo revestido (SMAW), arame tubular (FCAW), arame sólido (GMAW) e arco submerso (SAW), sendo que os consumíveis estão em atendimento com as especificações técnicas dos procedimentos de soldagem e também dos catálogos técnicos comerciais dos consumíveis.

2. Materiais e métodos

A metodologia utilizada foi o estudo de caso, com visitas técnicas autorizadas durante o processo de soldagem dos corpos de prova. O planejamento das etapas foram feitas de acordo com Miguel (2005), definidas da seguinte forma:

- Definir os processos a serem acompanhados
- Definir os corpos de prova a serem soldados
- Confeccionar relatório de aquisição de dados das soldagens realizadas
- Efetuar o acompanhamento da soldagem para a coleta de dados

Para representar a situação real de soldagem do equipamento em estudo, foram soldados 4

corpos de prova, sendo que cada um deles preenchido por um processo de soldagem diferente. Os materiais soldados apresentaram a especificação de acordo com a norma ASTM A517 Gr. B na espessura de 9,575mm ($\frac{3}{8}$ " pol.) por largura de 150mm e comprimento de 300mm.

O modelo de junta utilizada foi junta de topo e o chanfro em "V" preparada por esmerilhadeira manual. Os corpos de prova foram montado com ponteamento chapas apêndices nas extremidades para o início e final de cordão. No lado oposto a face de soldagem, onde o chanfro não foi preparado, apenas a face da raiz da solda foram soldados chapas reforço para diminuir o empenamento durante a soldagem. Os croquis estão representados na figura abaixo:

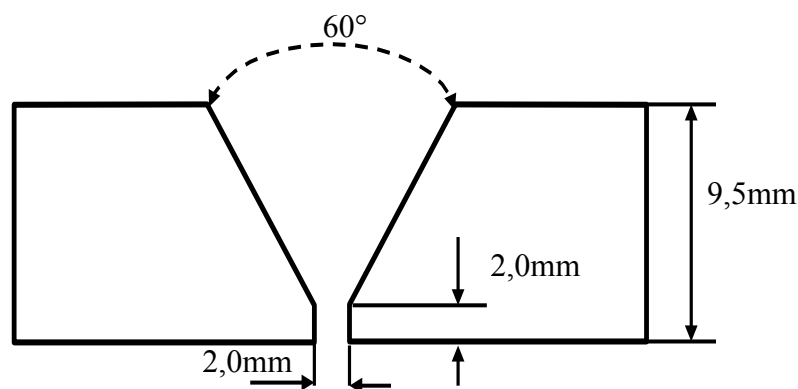


Figura 1. Preparação do chanfro dos corpos de prova[Próprio Autor]

Para as situações abaixo foram analisados e anotados os parâmetros apenas quando os processos estavam utilizando a posição plana (1G), em somatória a situação do processo arco submerso estar restrito apenas a posição plana devido a inserção de fluxo durante a soldagem.

O CP1 unido com o processo manual eletrodo revestido (SMAW), foi soldado de acordo com os parâmetros abaixo:

Diâmetro eletrodo (mm)	Corrente (A)	Voltagem(V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
2,50	90	22	8	14,8
3,25	110	23	8	18,9
4,00	130	24	10	18,7

Fonte: Próprio autor (2017)

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem CP1

Para o CP2 foi soldado com o processo semi-automatico de arame solido (GMAW) foi soldado de acordo com os parâmetros abaixo:

Diâmetro	Corrente (A)	Voltagem(V)	Velocidade de	Heat Input
----------	--------------	-------------	---------------	------------

eletrodo (mm)			soldagem (cm/min)	(kJ/cm)
1,2	150	27,4	30	9,16
1,2	150	25,9	30	11,43
1,2	150	25,8	30	8,74

Fonte: Próprio autor (2017)

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem CP2

Para o CP3 também soldado com o processo semi-automático, arame tubular (FCAW) e estabelecidos os parâmetros da tabela abaixo:

Diâmetro eletrodo (mm)	Corrente (A)	Voltagem(V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
1,2	117	20,2	16,6	8,5
1,2	165	26,7	42,8	6,2
1,2	168	26,5	44,5	6,0

Fonte: Próprio autor (2017)

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem CP3

Ja o CP4 foi soldado com o processo automatizado, arco submerso (SAW) de acordo com os parâmetros da tabela abaixo:

Diâmetro eletrodo (mm)	Corrente (A)	Voltagem(V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
3,2	253	25,7	60	6,5
3,2	307	27,8	60	8,5
3,2	325	27,8	55	9,9

Fonte: Próprio autor (2017)

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem CP4

Após a soldagem dos corpos os mesmos foram submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões baseados na a tabela abaixo e de acordo com o parâmetros da Norma ASME VIII.- Div. I

Espessura (mm)	Temperatura Início de controle (°C)	Velocidade Aquecimento (°C/h)	Temperatura de Patamar (°C/h)	Tempo de Patamar (°C/h)	Velocidade de resfriamento (°C/h)	Temperatura Fim de controle (°C/h)
9,5	300	222	590	0,5	222	300

Fonte: Código ASME Div. VIII(6)

Tabela 5 – Parâmetros de tratamento térmico – Alívio de tensões (ASME VIII – Div. I)

Após o término do tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem, os corpos de

prova foram submetidos aos ensaios não destrutivos de radiografia. Os testes não destrutivos são necessários para que não houvesse interferência nos resultados. Considerando-se a solda íntegra em toda a extensão do cordão, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios destrutivos de impacto charpy.

Os parâmetros seguidos para o ensaio de radiografia industrial foram baseados no Código ASME V, o qual especifica o tipo e fonte de exposição para o referido material.

Após a aprovação dos corpos de prova os mesmos foram submetidos a preparação dos corpos de prova de ensaio de charpy (Ensaio de Impacto), nos quais foram retirados corpos de prova em duas regiões distintas no sentido transversal do cordão de solda, e em duas regiões. Sendo que nessas regiões foi usinado o entalhe, item principal do corpo de prova de charpy. A primeira região ficou denominada como sendo centro solda (CS) e a outra região entalhada foi a zona termicamente afetada (ZTA).

A temperatura utilizada para o ensaio de charpy foi de -40°C para ambos as regiões entalhadas, o resfriamento foi feito em meio líquido e com adição de nitrogênio líquido. A preparação dos corpos de prova foi feita conforme a Norma ASTM E23(2016). O detalhamento da retirada dos corpos esta representado na figura 2 :

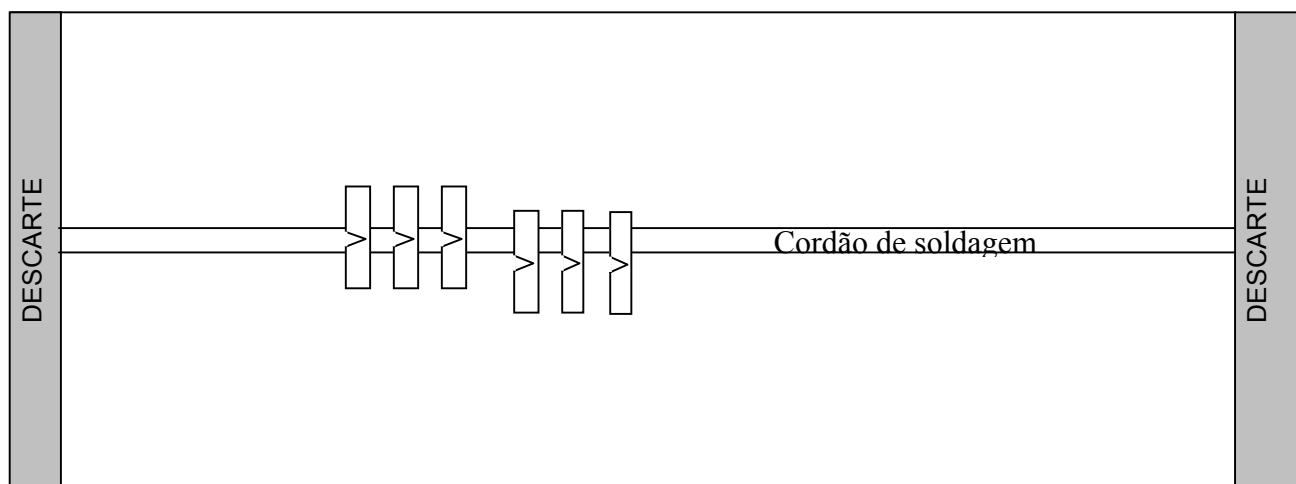


Figura 2. Localização para retirada dos corpos de prova do ensaio de charpy (Próprio Autor)

Para a retirada por corte a frio (serra fita), a preparação dos corpos de prova foram executadas de acordo com a norma ASTM E23. Devido a espessura do metal base ser inferior a medida padrão de retirada de corpos de prova de charpy nas dimensões $10 \times 10 \times 55\text{mm}$ da norma ASTM, os corpos de prova foram reduzidos para a medida subsequente ($7,5\text{mm}$), estando de acordo com a norma vigente.

Abaixo pela a figura 3 é representada graficamente dos corpos de prova de charpy usinados:

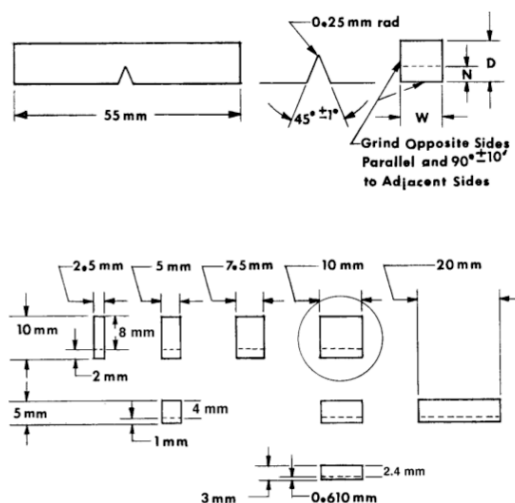


Figura 3. Padrão para usinagem do corpo de prova de charpy (ASTM E23-2016)

3. Resultados e discussões

Para atingir os objetivos do estudo de caso, a condução da presente investigação seguiu a sequencia proposta por Miguel (2007): definição da estrutura conceitual teórica; planejamento dos casos; condução do teste piloto; coleta de dados; análise dos dados; geração do relatório.

O estudo de caso foi único e realizado com uma pesquisa quantitativa de análise exploratória.(Freitas, Et.al,2010)

Após realizado o acompanhamento da soldagem, realizado o tratamento térmico e finalizado os testes não-destrutivos e posterior os destrutivos de charpy foram elaborados planilhas com os resultados obtidos os quais estão apresentados na sequencia.

Os dados verificados contemplaram considerável variação devido ao método de ensaio destrutivo (charpy) utilizar energia de impacto como resultado e também sofrer alterações metalúrgicas apos soldagens nas regiões a serem analisadas. Os valores apresentados não forma expressados calculados médios e sim puros encontrados.

Para os processos de soldagem apresentados, somados ao grande numero de variáveis dos processos de soldagem envolvidos, os corpos de prova foram soldados apenas na posição plana (1G), considerado que o processo arco submerso (SAW) deve ser executado na posição plana devido a inserção de fluxo ser feita por gravidade.

Abaixo estão representados graficamente os resultados dos ensaios de impacto (charpy), executados na temperatura de -40°C de acordo com projeto do equipamento e a norma do material ASTM A517 Gr. B. Separados em duas regiões, designadas como centro solda (CS) e zona afetada pelo calor (ZTA):

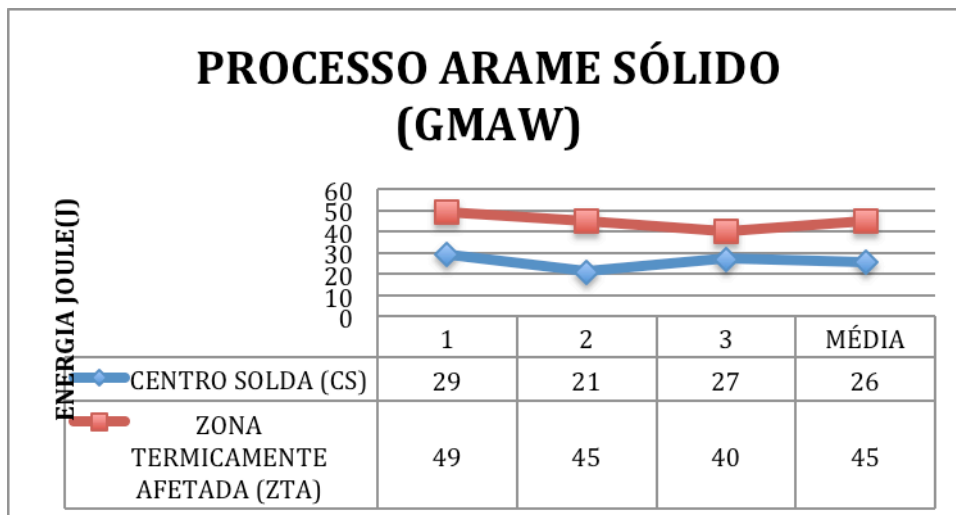


Figura 4. Resultados charpy – Processo GMAW

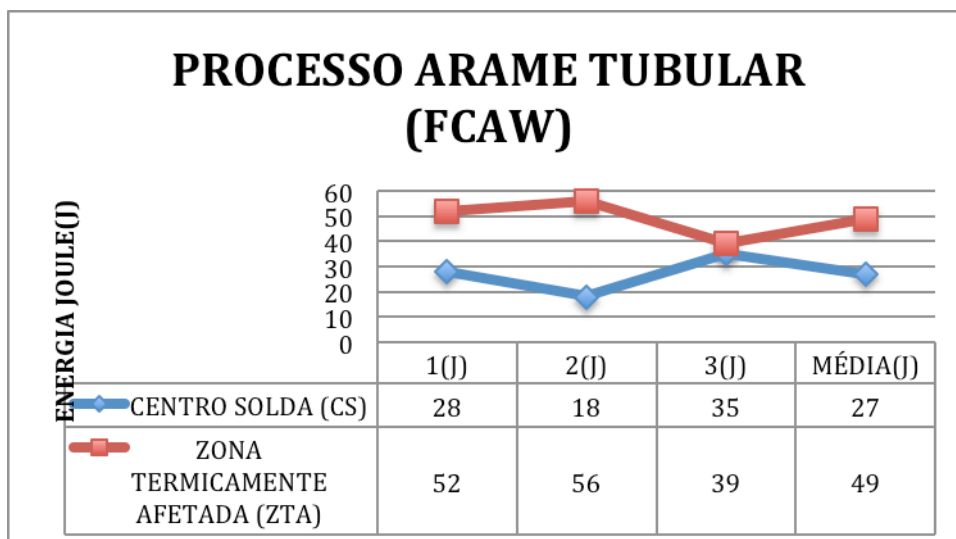


Figura 5. Resultados charpy – Processo FCAW

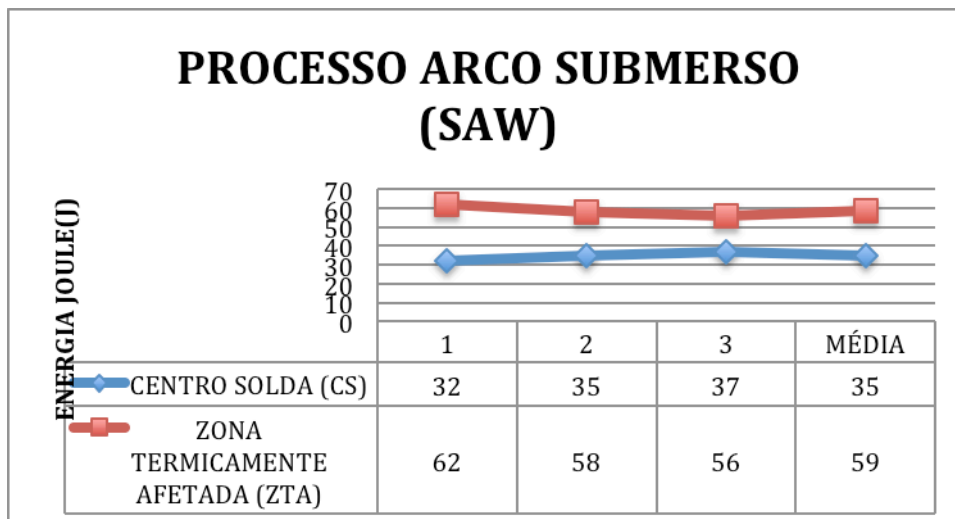


Figura 6. Resultados charpy – Processo SAW

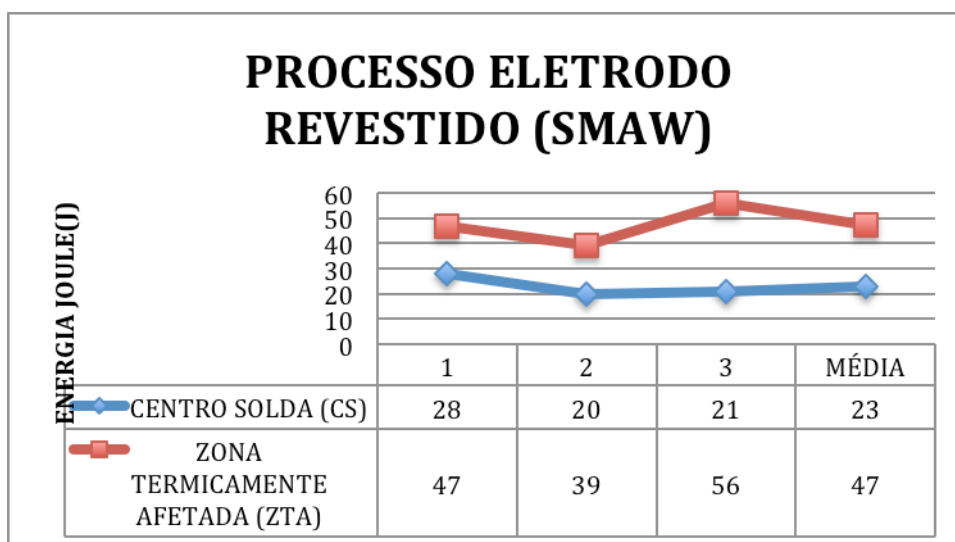


Figura 7. Resultados charpy – Processo SMAW

Os gráficos foram apresentados com valores individuais a fim de justificar a variação dos valores obtidos nos corpos de prova, em ambas as regiões de centro da solda(CS) e da zona termicamente afetada(ZAC), não sendo calculadas as médias dos resultados dos corpos de provas. Cada um dos valores apresentados podem ser considerados individualmente como a média de três (3) corpos de prova de charpy ensaiados, de acordo com a Norma ASTM E23(2016).

4 . Conclusões

Devido ao equipamento possuir geometrias complexas e posições diferentes para a soldagem o estudo ficou limitados em questão de definições do melhor processo de soldagem.

Atendendo ao objetivo proposto deste artigo pode-se avaliar o processo que terá melhor desempenho na soldagem do equipamento pressurizado, sendo que o processo de soldagem arco submerso (SAW) apresentou a melhor eficiência em termos de taxa de deposição, material depositado. O processo arco submerso (SAW) além de possuir grande desempenho,

também é responsável por uma maior homogeneidade no metal depositado, a combinação de fluxo e arame consumível.

Para valores apresentados de energia do ensaio de impacto (charpy) e apesar da variação individual entre os apresentados, visto que também é inerente ao ensaio e da temperatura executada (negativa), apresentou os melhores valores em termos de resistência mecânica somados as temperatura baixas.

Também deve ser levado em conta as espessuras finas dos corpos de prova soldadas, uma vez que a transformação metalúrgica ocorrida pela adição de energia durante a soldagem é um fator diferencial na solução dos resultados. Com isto o processo arco submerso, pela sua estabilidade na velocidade soldagem, por se tratar de um processo automatizado, garantiu uma transformação homogênea nas estruturas adjacentes.

Com o objetivo central deste artigo em limitar ou definir o melhor processo de soldagem para um determinado produto existem muitas variáveis a serem estudadas, sendo possível apenas indicar um processo automatizado como o de melhor desempenho porem com grandes limitações de posicionamento da tocha de soldagem, umas das principais limitações do processo.

De acordo WEI (2011) é importante avaliar as temperaturas utilizadas no tratamento térmico de alívio de tensões utilizados após a soldagem dos corpos de prova, pois a variação destes parâmetros produzem respostas diferentes nos ensaios destrutivos, principalmente ensaio de charpy. Também pode ser avaliado o detalhe fator preponderante dos termos de temperatura e tempo para os parâmetros de tratamento térmico dos materiais de baixa liga e alta resistência (PIRINEN, 2015).

Referências

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS. *Welding handbook*. 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS - ASTM E23(2016).

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME VIII (2015)

BRANDI, S.D. – *Processo MIG/MAG*. In: **WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.** *Soldagem: processos e metalurgia* (2010). São Paulo: Edgard Blücher,

BE. S. SURIAN. *SMAW, FCAW, and SAW High-Strength Ferritic Deposits: The Challenge Is Tensile Properties* – Welding Research, Março 2010.

FREITAS, W.R.S., JABBOUR, C.J.C. Estudo de caso(s) como estratégia de pesquisa qualitativa: fundamentos, roteiro de aplicação e pressupostos de excelência. XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. São Carlos, SP, Brasil, Out. 2010.

M. PIRINEN, Yu. MARTIKAINEN, S.YU IVANOV and V.A. KARKHIN , Comparative analysis of the microstructure of the heat-affected zone metal in welding of high-strength steels - Vol. 29, No. 4, 301–305 Welding International, 2015

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. Universidade de São Paulo. Produção, v. 17, n. 1, p. 216-229, Jan./Abr. 2007

MYRES, D. Metal Cored Wires: Advantages e Disadvantages, Welding Journal, v. 81, n. 9, pp.39 – 42, Sep. 2002.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B.; *Introdução a Metalurgia da Soldagem*, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, Jan. 2012.

ZEEMANN, A. *Energia de soldagem*. Infosolda, 2003.

WEI, YU; QIAN, YA-JUN; WU, HUI-BIN; YANG, YUE-HUI. *Effect of Heat Treatment Process on Properties of 1000 MPa Ultra High Strength Steel* – Science Direct, 2011.