

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AMANTEIGAMENTO E9018G EM AÇOS BAIXA LIGA CR-MO-V

Francisco Henrique Cappi de Freitas¹²

Resumo

O presente trabalho está relacionado a estudos de soldagem pelo processo “SMAW” de aços baixa liga Cr-Mo-V, este aço de alta resistência possui como principais elementos de liga o cromo, molibdênio e vanádio, que na forma de carbonetos proporcionam uma maior resistência mecânica a temperatura ambiente, resistência à fluência, e resistência ao ataque de hidrogênio. Com este perfil, estes aços são atualmente utilizados na fabricação de reatores de hidrotreatamento, cujos serviços estão ligados aos mais variados processos ligados principalmente a refinarias petroquímicas. O trabalho tomou-se como base um estudo de caso de um reator em fabricação, onde se visou eliminar uma etapa de tratamento térmico de alívio de tensões no componente suporte vertical (“saia”) para não degradar as propriedades mecânicas do material menos nobre em C-Mn. Para isto foi utilizado o processo “SMAW” para constituir um amanteigamento do metal base Cr-Mo-V. Este amanteigamento foi submetido ao tratamento térmico de alívio de tensões e então retirado corpos-de-prova de ensaio de tração para constatação das propriedades mecânicas, se mostrando satisfatória para uma das marcas de consumíveis utilizada.

Palavras-chave: : SMAW, Aço baixa liga Cr-Mo-V, amanteigamento.

Abstract

The present work relates the study by “SMAW” welding process of Cr-Mo-V low alloy steel, this high tensile steel has as main alloying elements chromium, molybdenum and vanadium as carbides which provide greater mechanical resistance at room temperature, creep resistance, and resistance to hydrogen attack. With this profile, these steels are currently used in the manufacture of hydrotreating reactors whose services are linked to a variety of processes, linked mainly to petrochemical refineries. The work has been taken based on a case of study of a reactor during the manufacturing, where the aim was to eliminate a step of post weld heat treatment on the vertical support component ("skirt"), in order to not degrade the mechanical properties of the nobless material C-Mn. For this purpose the “SMAW” process was used to provide a buttering in the Cr-Mo-V base metal. This buttering was subjected to post weld heat treatment and then removed tensile test specimens for determining the mechanical properties, which proved satisfactory for one of the brands of consumables used.

Keywords: SMAW, Cr-Mo-V low alloy steel, buttering.

Introdução

Reatores de hidrotreatamento são utilizados pelos mais variados processos nas plantas petroquímicas e refinarias e envolvem elevadas pressões e temperaturas (Figura 1). Por mais de 30 anos aços baixa liga Cr-Mo convencionais foram extensivamente

¹ Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho-UNESP, Campus de Guaratinguetá-SP; professor da Faculdade de Engenharia de Roseira-SP; Email: francapp@gmail.com.

²Agradecimentos a Confab Equipamentos pelo apoio a este trabalho.

utilizados. Porém agora com o crescimento da demanda para serviços que exigem temperatura e pressão maiores, e buscando uma maior eficiência do processo, foi desenvolvida uma nova geração de materiais para esta aplicação, materiais Cr-Mo modificados ao vanádio (Cr-Mo-V) (HUCIŃSKA J., 2003). As tensões admissíveis destes novos materiais são 25% mais elevadas que os aços Cr-Mo convencionais, onde para uma mesma pressão de projeto, proporciona uma redução significativa na parede do equipamento, e conseqüentemente, uma drástica redução no seu peso total.

Estes materiais tendem a exibir uma soldabilidade reduzida, alta dureza nos arredores da linha de solda e requerem maiores temperaturas no tratamento térmico de alívio de tensões. As ligas modificadas ao vanádio também são conhecidas pelos valores de tenacidade reduzidos em baixas temperaturas, particularmente na condição como soldada. Trincas de reaquecimento em soldas SAW (“Submerged Arc Welding” – Soldagem por Arco Submerso) também são observadas com frequência neste tipo de material. São por esses motivos e devido à elevada espessura e as severas condições de serviço destes tipos de equipamentos, faz com que certas precauções e cuidados sejam tomados durante a soldagem.

Este trabalho aborda alguns aspectos da soldagem por eletrodo revestido (SMAW) de materiais modificados ao vanádio, simulando a soldagem de um importante componente para a integridade dos reatores, o suporte vertical ou “saia”. A saia é um componente estrutural não pressurizado, cuja função é suportar o peso do equipamento durante sua operação. Além deste grau de responsabilidade, este componente é soldado diretamente ao costado pressurizado do equipamento, sendo esta mais uma motivação para os cuidados necessários durante a fabricação deste componente.

A fabricação da saia envolveu a união de duas seções de materiais dissimilares: seção superior fabricada em aço Cr-Mo-V (chapa SA-542 Tp.D Cl.4a) e seção inferior fabricada em aço C-Mn (chapa SA-516 Gr.70). A fim de eliminar o TTATPS (“Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Pós Soldagem”) da solda entre ambas as seções, decidiu-se optar por um processo de amanteigamento do material Cr-Mo-V com um material de propriedades mecânicas similares, anterior à soldagem final entre as seções. O material de adição escolhido para a deposição do amanteigamento foi o E9018G, conforme ASME II Part C SFA.5.5/SFA.5.5M:2005. Definiu-se então como o escopo deste trabalho a avaliação das propriedades mecânicas do amanteigamento por SMAW do E9018G de duas marcas de fabricantes distintas, após o TTATPS característico do equipamento. Estas propriedades foram então comparadas com as

propriedades dos materiais de base avaliando a viabilidade e a integridade do amanteigamento.

Figura 1-“Rigging” de reator de hidrotreatamento em refinaria petroquímica da Petrobras



Fonte: Replan, 2012.

1 Vasos de Pressão Cr-Mo-V

A utilização de vasos de pressão, fabricados em aços Cr-Mo temperados e revenidos, em serviços sujeitos a hidrogênio pode ser traçada em torno de 1920, na Alemanha, onde eles eram utilizados em reatores de alta pressão em plantas de hidrogenação. Estes vasos foram fabricados a um teor de Cr e Mo entre 2,25 a 3,8%, operando entre valores de pressão de 28 a 70 MPa (ERWIN W.T., KERR J.G., 1982). Estes aços são agora referenciados como a tecnologia “Primeira Geração” e foram utilizados até meados de 1960. Os aços tiveram um significativo aperfeiçoamento até então, e pode ser resumido da seguinte maneira:

- “Segunda Geração” – meados de 1960 a 1970 – O nascimento de reatores de hidroprocessamento de paredes espessas fabricados em ligas 2,25Cr-1Mo com melhoras significativas na tenacidade (54 J à 10°C), porém com ausência de requisitos de controle da fragilidade ao revenido;

- “Terceira Geração” – 1970 a 1980 – Afim de um melhor controle da fragilidade ao revenido, um valor limitante de 180 para o fator-J foi atingido, além de uma significativa melhora nos valores de tenacidade (54 J à -18°C). Também se iniciaram os ensaios de resfriamento escalonado (“step cooling test”) e precauções contra o descolamento (“disbonding”) do revestimento por soldagem;
- “Quarta Geração” – 1980 a 1990 – Significativa melhora no controle da fragilidade ao revenido, sendo possível a redução do fator-J para 100, e atingindo ótimos resultados após os ensaios de resfriamento escalonado. Esta geração também foi marcada pelo aperfeiçoamento da tenacidade (54J à -32°C);

Hoje a “Quinta Geração” (ANTALFFY, L.P., CHAKU P., 1994) relacionada aos graus dos aços convencionais 2,25Cr-1Mo têm tipicamente uma temperatura de transição à 54J menor que -40°C e ainda menor para aços 3Cr-1Mo. Aços 2,25Cr-1Mo modificados com vanádio foram introduzidos para serviços que exigem um alto nível de resistência mecânica e alto nível de resistência ao ataque do hidrogênio. Estes graus atingem uma temperatura de transição em torno de -29°C à 54J de energia e também oferecem uma maior resistência à fluência, menor susceptibilidade à fragilização ao revenido, menor susceptibilidade do descolamento do revestimento por soldagem ocasionado pelo hidrogênio, quando comparados aos aços Cr-Mo convencionais.

A eficiência dos reatores petroquímicos está intimamente ligada aos parâmetros temperatura e pressão de operação, que envolvem os mais diferentes processos, tais como a dessulfurização de hidrocarbonetos e crackeamento de frações de hidrocarbonetos pesados em moléculas mais leves. Estes processos requerem altas pressões e temperaturas na presença de catalisadores. O crescimento da demanda para serviços que exigem altas temperaturas e pressões e o aumento dos tamanhos dos reatores, resultaram em equipamentos mais pesados, encontrando-se então muitas dificuldades no seu transporte e construção. Tendo em vista a solução destas dificuldades, uma nova geração de aços Cr-Mo modificados ao vanádio foram desenvolvidos. Estes aços estão especificados de acordo com o código ASME Boiler and Pressure Vessels Code, Section VIII Division 2, 2010:

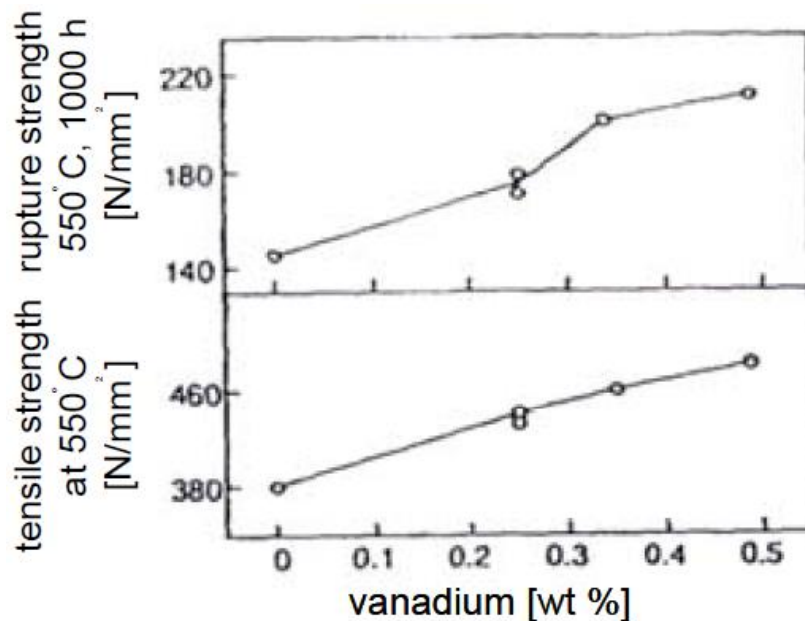
- 2,25Cr-1Mo-0,25V, aceito pelo “Code Case 2098-1” em 1991, permitindo os mais variados graus com a adição de nióbio, cálcio, titânio e boro;
- 3Cr-1Mo-0,25V-Ti-B, aceito pelo “Code Case 1961” em 1992;

- 3Cr-1Mo-0,25V-Nb-Ca, aceito pelo “Code Case 2153” em 1993.

Os requisitos do ASME VIII-2 “Code Cases” variam das mais diversas rotas e processos avançados de fabricação de aços, tal como produção de ferro gusa em alto forno seguido de refino do aço pelo conversor BOF, metalurgia de panela e tratamento a vácuo são necessários para a obtenção destas ligas. Com estes processos se tem uma diminuição significativa no teor de elementos residuais e indesejáveis, tais como estanho, arsênio, antimônio, fósforo, enxofre e oxigênio.

As três ligas modificadas utilizam o vanádio como elemento adicional com o intuito de realçar a resistência mecânica em elevadas temperaturas, resistência à fluência, aumentar a resistência à degradação em serviço do fenômeno da fragilização ao revenido, aumentar a resistência ao ataque do hidrogênio em elevadas temperaturas e aumentar a resistência à fragilização ao hidrogênio. O efeito do teor de vanádio nas propriedades mecânicas da liga 3Cr-1Mo está demonstrado na figura 2.

Figura 2 - Efeito do teor de vanádio nas propriedades mecânicas da liga 3Cr-1Mo



Fonte (Yamada, Sakai, Nose, 1996)

A resistência a tração em temperaturas elevadas e a resistência à fluência da liga 3Cr-1Mo-0,25V-Nb-Ca são melhoradas pela adição de nióbio. A adição de cálcio em aços Cr-Mo, ocasiona preferencialmente a formação de sulfetos de cálcio ao invés de sulfetos de manganês (YAMADA M., SAKAI T., NOSE S., 1996). Ao contrário dos sulfetos de manganês, sulfetos de cálcio não se dissolvem durante a soldagem e resulta na diminuição a susceptibilidade de trincas a quente, causadas pela segregação de enxofre nos contornos de grão durante o alívio de tensões. A adição intencional de boro na liga

3Cr-1Mo-0,25V-Ti-B a torna mais endurecível e garante a distribuição uniforme das propriedades mecânicas dentre as seções transversais mais espessas. A adição de titânio auxilia a maximizar os efeitos do boro.

Os aços modificados são fornecidos na condição temperada e revenida. Em geral o revenimento é realizado entre 690 e 710°C com o intuito de reduzir os níveis de resistência e melhorar as propriedades ao impacto de aços temperados. O processo de revenimento é realizado após o ciclo final de TTATPS do equipamento. Estes tipos de aços demonstram um decréscimo nos valores de tenacidade em baixas temperaturas quando comparados aos aços Cr-Mo convencionais, como já citado anteriormente.

Conforme API 941, 0,25% de vanádio em aços 2,25Cr-1Mo protegem o material dos ataques de hidrogênio em temperaturas elevadas em pressões parciais de hidrogênio $\leq 13,79$ MPa até 482°C, comparados a 454°C em ligas convencionais 2,25Cr-1Mo. Entretanto, mesmo com a adição de vanádio, a temperatura máxima de projeto permitida pelo ASME VIII-2, para aços 3Cr-1Mo modificados é de 454°C, o que não garante para estes aços os limites de ruptura à fluência em 482°C. A aplicação dos aços modificados ao vanádio resulta em uma redução de peso nos reatores, ocasionando uma considerável redução de custo.

Quadro 1 - Comparação dos aços convencionais e modificados ao vanádio na fabricação de reatores

Steel grade	Conventional 2.25Cr-1Mo	2.25Cr-1Mo-0.25V	Conventional 3Cr-1Mo	3Cr-1Mo-0.25V-Ti-B	3Cr-1Mo-0.25V-Nb-Ca
Max. allowed temperature ASME VIII-2	482°C	482°C	454°C	454°C	454°C
Max. allowed temperature API 941	454°C	510°C	510°C	510°C	510°C
Min. Tensile strength	517 MPa	586 MPa	517 MPa	586 MPa	586 MPa
Min. Yield strength	310 MPa	414 MPa	310 MPa	414 MPa	414 MPa
Design stress intensity value, ASME VIII-2	at 454°C 150 MPa	at 454°C 169 MPa	at 454°C 131 MPa	at 454°C 164 MPa	at 454°C 164 MPa
	at 482°C 117 MPa	at 482°C 163 MPa	-	-	-
Wall thickness	at 454°C 338 mm	at 454°C 298 mm	at 454°C 392 mm	at 454°C 307 mm	at 454°C 307 mm
	at 482°C 442 mm	at 482°C 310 mm	-	-	-
454°C design: reactor weight typical cost	1038 metric tons 5.65 $\times 10^6$	916 metric tons 5.5 $\times 10^6$	1203 metric tons 6.26 $\times 10^6$	944 metric tons 5.61 $\times 10^6$	944 metric tons 5.61 $\times 10^6$
482°C design: reactor weight typical cost	1359 metric tons 7.39 $\times 10^6$	953 metric tons 5.72 $\times 10^6$	-	-	-

Fonte: Antalffy; Chaku, 1996.

Devido à alta espessura de parede, a alta endurecibilidade e as condições severas de operação dos reatores fabricados em aços Cr-Mo modificados ao vanádio, torna-se necessário precauções e cuidados especiais nos processos de soldagem. As soldas devem ser sempre aliviadas termicamente antes da operação destes equipamentos.

A liga 2,25Cr-1Mo-0,25V tem sido amplamente utilizado na construção de reatores de parede espessas. Isto é devido às suas ótimas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e em altas pressões parciais de hidrogênio, resultando em boa resistência ao ataque de hidrogênio. Em contrapartida dos excelentes benefícios destes materiais, eles também mostram características de soldabilidade reduzidas, valores de dureza maiores no metal de base, metal de solda e zona termicamente afetada, além de necessitarem de um TTATPS em temperaturas maiores que os aços Cr-Mo convencionais. Adicionalmente, estes materiais têm uma tenacidade reduzida em temperaturas mais baixas, especialmente na condição como soldada, e requerem um TTATI (“Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Intermediário”) ao invés de TTD (“Tratamento Térmico de Desidrogenação”) em soldas de alta restrição e de altos concentradores de tensão, tais como soldas de bocais no costado e cabeceiras. Isto mostra que cuidados especiais devem ser tomados durante o manuseio deste material na fabricação destes equipamentos.

Desde a fabricação do primeiro reator de aços modificados ao vanádio, em operação no início da década de 1990, estes materiais ganharam a aceitação e hoje mais de 140 reatores e vasos de pressão deste tipo de material foram trocados em serviço e estão em operação em meios processuais dos mais severos.

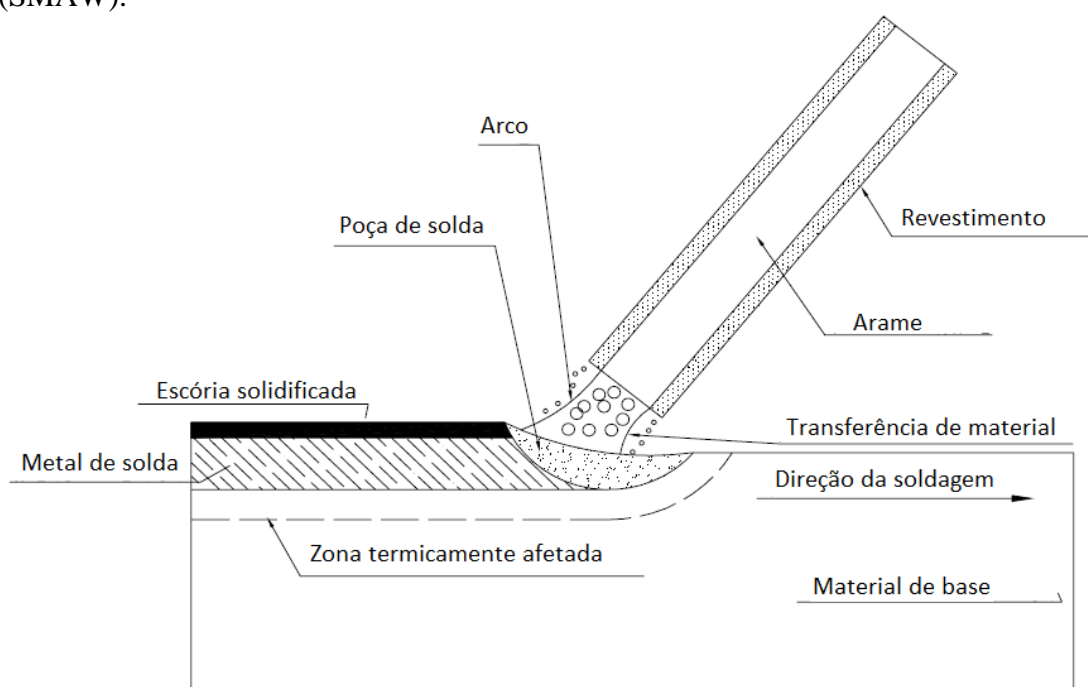
Até 2006, acima de 200 reatores foram fabricados a partir de aços modificados ao vanádio em todo o mundo.

2 Características de soldagem de aços Cr-Mo e Cr-Mo-V

Muitas técnicas foram desenvolvidas para manipular a descarga de um arco elétrico com o intuito de fornecer calor localizado e fusão de materiais para assim, formar uma união entre os componentes. As técnicas mais usuais utilizadas para a soldagem de materiais Cr-Mo e Cr-Mo-V serão discutidas a seguir.

A técnica de soldagem por eletrodo revestido (SMAW) ilustrada pela Figura 3, envolve um eletrodo de arame sustentando um arco com a peça de trabalho. O arco então funde o eletrodo e seu revestimento formando a poça de solda, a escória e os gases de proteção. Esta técnica é a mais utilizada na soldagem destes materiais e será o alvo de discussão deste trabalho.

Figura 3 - Representação esquemática da técnica de soldagem por eletrodo revestido (SMAW).



Fonte (ASM Handbook, Volume 6)

No processo TIG (também conhecido pela sigla GTAW), o arco é mantido entre a peça de trabalho e um eletrodo de tungstênio não consumível. O material de adição é fornecido por meio de varetas, adicionadas nas proximidades do arco. A proteção da poça de soldagem é realizada por meio de um gás inerte fornecido por um bocal que circunda o eletrodo. Este processo é muito utilizado para seções mais finas, e também para a soldagem de raiz anterior ao enchimento pelo processo SMAW.

O processo por arco submerso (SAW) utiliza um arco mantido entre a peça de trabalho e um eletrodo consumível de arame. A proteção para a poça de solda é fornecida por um fluxo granular, que é alimentado diretamente na poça de solda. Este processo é particularmente adequado para a mecanização, porém é limitado a aplicações exclusivamente horizontais de soldagem.

As diferenças entre as técnicas estão baseadas na origem da formação do arco elétrico e de como é realizada a proteção entre a poça de solda e a atmosfera, levando-se em consideração a influência da quantidade de calor aplicado à peça de trabalho e como efetivamente a poça de solda pode ser controlada. Estes parâmetros influenciam a taxa de resfriamento e a concentração das inclusões.

Em adição a estes efeitos metalúrgicos, as considerações práticas tais como a portabilidade, a facilidade da operação de soldagem e o nível das habilidades do soldador,

são fatores de grande importância para a escolha da técnica a ser utilizada para determinada aplicação.

A soldabilidade dos aços Cr-Mo e Cr-Mo-V são similares aos aços temperados e revenidos e aços baixa liga endurecíveis. A principal dificuldade na ZTA é o aparecimento de trincas na região endurecida de grãos grosseiros. Trincas de reaquecimento durante o TTATPS e em condições de serviço em altas temperaturas por longos períodos podem causar graves problemas. Temperaturas de pré-aquecimento e interpasse devem ser apropriadamente selecionadas, e práticas de redução de hidrogênio devem ser utilizados.

As temperaturas de pré-aquecimento e interpases são cruciais na soldabilidade de aços modificados ao vanádio, ainda mais do que para os aços Cr-Mo convencionais. O pré-aquecimento e a temperatura interpasse devem ser constantemente monitorados para garantir que o correto pré-aquecimento seja mantido. Um pré-aquecimento em temperaturas mais baixas ou a sua interrupção pode ocasionar trincamento, uma causa comum dos problemas encontrados durante a soldagem destes aços. O plano de fabricação deve incluir o pré-aquecimento, o seu método de aplicação e seu monitoramento.

A máxima temperatura de interpasse varia com o processo de soldagem e com a marca específica dos consumíveis. Os limites estão entre 200 e 300°C, e em casos de chapas finas torna-se necessário a interrupção da soldagem. Em chapas finas também é importante medir a temperatura de interpasse no chanfro com pirômetros digitais ao invés da utilização de lápis medidores na superfície. A utilização de temperaturas de interpasse além destes podem proporcionar valores reduzidos de tenacidade no procedimento de qualificação e nas juntas de produção.

Um mínimo pré-aquecimento recomendado para aços Cr-Mo convencionais é 150°C e 177°C para aços Cr-Mo-V anterior a qualquer processo de soldagem. O pré-aquecimento deve ser mantido até o TTATI ou TTD seja realizado.

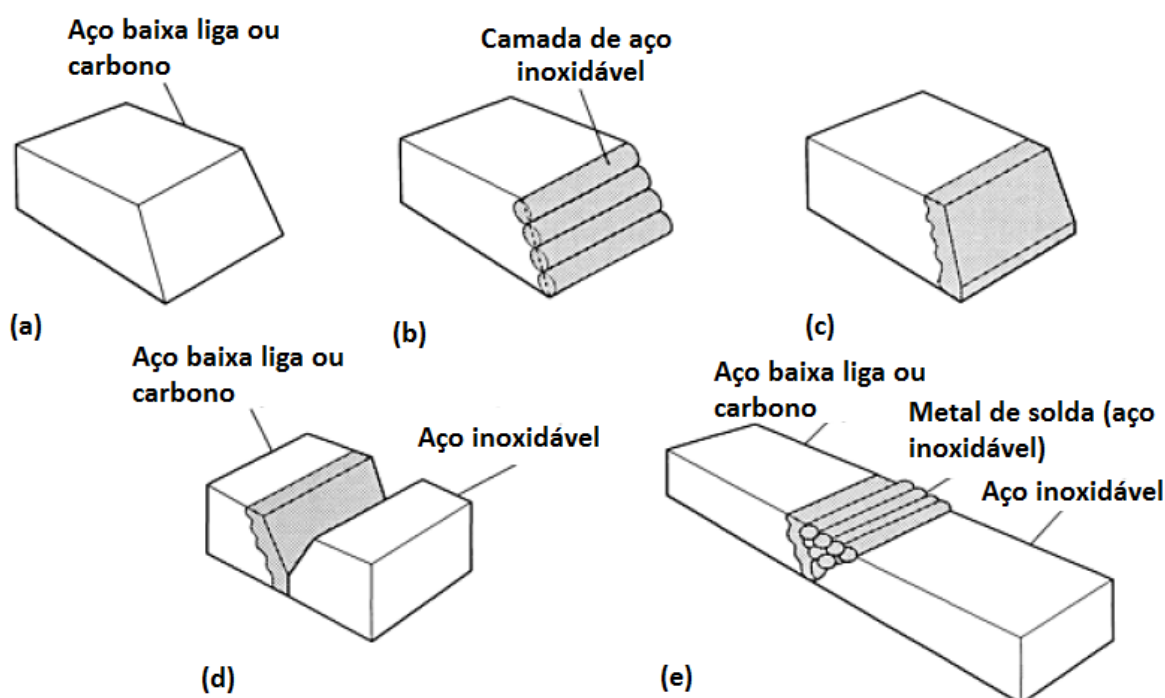
3 Processo de amanteigamento?

O processo de amanteigamento está dentro de uma classe da tecnologia da soldagem, chamada “surfacing” (Figura 4). Este termo se refere à deposição de um metal de adição a um metal base (substrato) para conceder as propriedades desejadas à superfície que não está intrinsecamente ligada ao material base revestido. O processo de amanteigamento envolve a adição de uma ou mais camadas de metal de solda na face da junta a ser soldada. Este processo é usualmente utilizado para união de metais de base

dissimilares. As camadas de amanteigamento tendem a reduzir o gradiente gerado pela temperatura de fusão do metal de base e também promovem uma transição entre os materiais com coeficientes de expansão térmico diferentes.

As camadas depositadas agem como barreira, diminuindo a cinética de migração de elementos indesejáveis do metal base para a solda durante o TTATPS ou em serviços em elevadas temperaturas.

Figura 4 - Exemplo de técnica de amanteigamento utilizada no auxílio de soldagem de aço inoxidável em aço carbono ou baixa liga. Preparação do chanfro (a). Amanteigamento com metal de adição (b). Preparação para soldagem (c). Alinhamento da junta par soldagem (d). Junta soldada com metal de adição em aço inoxidável



Fonte: Dissimilar metals, 1982.

4 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Pós-Soldagem (TTATPS)

Um TTATPS é geralmente considerado necessário para seções espessas de soldas de aço, com o intuito de reduzir os elevados níveis de tensões residuais da condição como soldada e melhorar a tenacidade e a tolerância de defeitos da junta. A causa das tensões residuais representada esquematicamente através da Figura 6, está associada com o elevado gradiente térmico da soldagem, que pode ocorrer em uma escala macro (longos comprimentos devido as tensões de reação), ou em uma escala micro (localizada). A soldagem usualmente resulta em tensões residuais localizadas que aproximam níveis iguais ou maiores que o limite de escoamento do material na temperatura ambiente.

O TTATPS é um aquecimento uniforme da estrutura a uma determinada temperatura abaixo do intervalo de transformação (A_{c1} para aços ferríticos), permanecendo a esta temperatura por um determinado período de tempo, seguido por um resfriamento uniforme. Alguns cuidados devem ser tomados para garantir este resfriamento uniforme, particularmente quando o componente a ser tratado possui seções e espessuras variáveis. Se a taxa de resfriamento não é constante e uniforme, o resultado poderá gerar novas tensões residuais que são iguais ou maiores daquelas que se pretendia aliviar.

Este tipo de tratamento térmico pode reduzir distorções e as altas tensões da soldagem que afetam o desempenho do componente em serviço. A presença de tensões residuais pode gerar trincas ocasionadas devido à corrosão sob tensão nas proximidades da solda e nas regiões deformadas a frio. As tensões residuais de um aço ferrítico causa significativa redução na resistência à fratura frágil.

Embora o TTATPS seja utilizado com frequência em soldas em aço Cr-Mo e Cr-Mo-V, este tipo de aço é susceptível às trincas de alívio de tensões durante o tratamento ou trincas de reaquecimento. O intervalo de temperatura para esta ocorrência está entre 500 e 700°C. Embora ainda não esteja claro este fenômeno, os mecanismos de trincamento deve estar relacionado ao endurecimento do interior do grão devido ao fenômeno de precipitação. Estas trincas ocorrem durante o reaquecimento quando os grãos mais macios, livres de precipitados, não acomodam a deformação plástica oriunda da relaxação das tensões.

As ligas modificadas ao vanádio são fornecidas na condição temperada e revenida, tipicamente com temperaturas de revenimento abaixo da temperatura de TTATPS e são usualmente especificadas com desgaseificação a vácuo com baixos níveis de enxofre e fósforo. Devido à soldabilidade reduzida e alta dureza nos arredores da solda (metal base, ZTA e solda), estes materiais requerem maiores temperaturas de TTATPS. Estas ligas também são conhecidas pela tenacidade reduzida a baixas temperaturas, particularmente na condição como soldada.

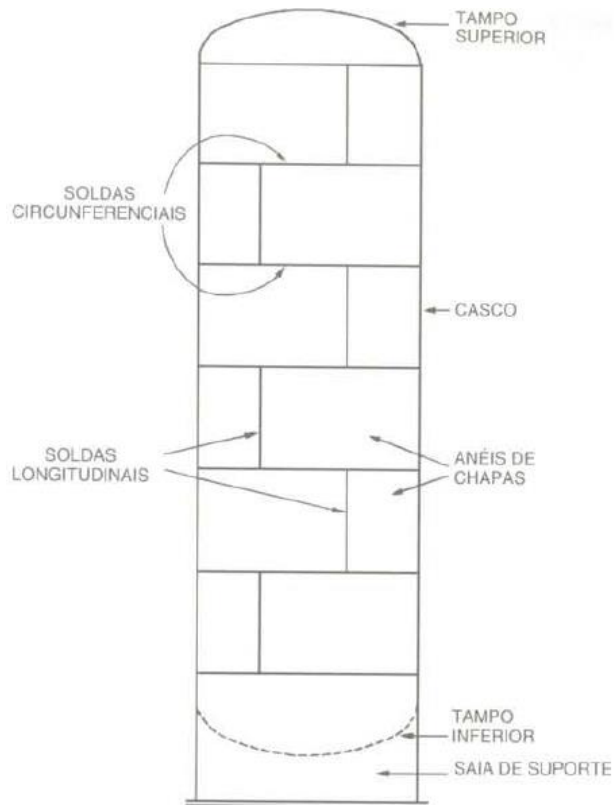
As temperaturas de TTATPS para os aços Cr-Mo-V são maiores que para os aços Cr-Mo convencionais. ($705^{\circ}\text{C}\pm 14^{\circ}\text{C}$ e $690^{\circ}\text{C}\pm 14^{\circ}\text{C}$ respectivamente) (API 934-A). Os consumíveis de solda para aços Cr-Mo-V têm sido formulados para atender as propriedades requeridas, tais como tenacidade e resistência, com base em espessuras mais elevadas, portanto requerem um mínimo de 8 horas de encharque para o TTATPS.

5 Materiais e Métodos

Devido a dificuldades apresentadas na fabricação do componente saia de reatores de hidrotreatamento, o presente trabalho buscou avaliar as propriedades mecânicas do amanteigamento depositado em aço baixa liga Cr-Mo-V pelo processo de soldagem SMAW. Para esta deposição utilizou-se o SFA 5.5 E9018G como metal de adição de duas marcas de fabricantes distintas.

A fabricação de reatores verticais e seus componentes envolvem os mais variados materiais e processos de soldagem. Dentre os seus componentes temos a cabeceira superior e inferior, bocais e o suporte vertical (usualmente chamado de “saia”). A união destes componentes pode envolver os processos SAW, SMAW e GTAW, formando soldas longitudinais e circunferenciais.

Figura 5 - Representação esquemática da montagem dos componentes de um reator vertical



Fonte: Telles, 1996.

O projeto de reatores em Cr-Mo-V é regido pelo código internacional de vasos de pressão – ASME BPVC. O código apresenta uma vasta opção de especificação de materiais, entre materiais forjados, laminados e fundidos. Dependendo da disponibilidade dos materiais e das soluções dadas é possível a fabricação de reatores, mesclando materiais forjados e laminados.

Quadro 2 - Propriedades mecânicas de materiais Cr-Mo-V

Material	LR (MPa)	LE (MPa)	Al (%)	Rota
SA-542 Tp.D Cl.4a	585 - 760	415	18	Laminado
SA-336 Gr.F22V				Forjado

Fonte: ASME Boiler and Pressure Vessels Code, 2010.

O projeto promoveu a fabricação das cabeceiras superior e inferior em material SA-542 Gr.4D Cl.4a, o costado como o SA-336 Gr.F22V e a saia como material convencional Cr-Mo SA-387 Gr.22 Cl.2.

Conforme o código ASME IX, tabela QW/QB-422, o material referente ao costado SA-336 Gr.F22V e cabeceira SA-542 Tp.D Cl.4a correspondem ao P-number 5C. O P-number destes materiais está relacionado diretamente com a composição química e ditam a temperatura mínima e tempo que o respectivo equipamento deve ser tratado para o alívio de tensões. Especificamente para este P-number, o TTATPS torna-se obrigatório para qualquer situação independente da espessura tratada.

Quadro 3 – Composição química típica de panela (%) do material SA-542 Tp.D Cl.4a

C	Mn	Cr	Mo	V	Nb
0,11-0,15	0,30-0,60	2,00-2,50	0,90-1,10	0,25-0,35	0,08 max

Fonte: ASME Boiler and Pressure Vessels Code, 2010.

Após a montagem e soldagem dos componentes, o tratamento é realizado submetendo o equipamento integralmente dentro do forno. De acordo com a norma API934, sabe-se que o TTATPS para aços Cr-Mo-V necessita ser realizado em temperatura superior aos aços convencionais Cr-Mo ($705^{\circ}\text{C}\pm 14^{\circ}\text{C}$ e $690^{\circ}\text{C}\pm 14^{\circ}\text{C}$ respectivamente) com um encharque de 8 horas. Esta diferença de temperatura entre o material modificado e o convencional pode ser suficiente para degradar as propriedades mecânicas, colocando em risco o suporte do equipamento em material Cr-Mo. Foram com base nestes incentivos que se buscaram alternativas para a solda de união entre a saia e o costado do equipamento.

Uma das alternativas encontradas foi através da divisão da saia em duas seções. A primeira seção, cuja união está ligada diretamente com o costado pressurizado do equipamento, foi alterada para o material de mesmo P-number, SA-542 Tp.D Cl.4a. A segunda seção optou-se por um aço C-Mn, de nobreza inferior ao Cr-Mo, o SA-516 Gr.70.

De maneira a evitar o tratamento térmico da seção inferior da saia (SA-516 Gr.70), e a degradação de suas propriedades mecânicas, optou-se pelo processo de amanteigamento em SMAW da seção superior (SA-542 Tp.D Cl.4a), anterior à união junto à seção inferior. Como qualquer solda de união com o material Cr-Mo-V requer um

TTATPS, após o amanteigamento deverá ser realizado na temperatura e tempo requeridos pelo SA-542 Tp.D Cl.4a.

A escolha do material de adição para o amanteigamento foi essencial para o processo, pois a sua composição química determina a necessidade de um novo TTATPS na união com a seção inferior. O material SFA 5.5 E9018G foi escolhido por ser um material intermediário entre o SA-542 Tp.D Cl.4a da seção superior e o SA-516 Gr.70 da seção inferior. Além do mais, com esta opção, não há a necessidade de TTATPS da união do amanteigamento e da seção inferior, eliminando assim a possibilidade da degradação das propriedades mecânicas do material SA-516 Gr.70 devido ao tratamento térmico.

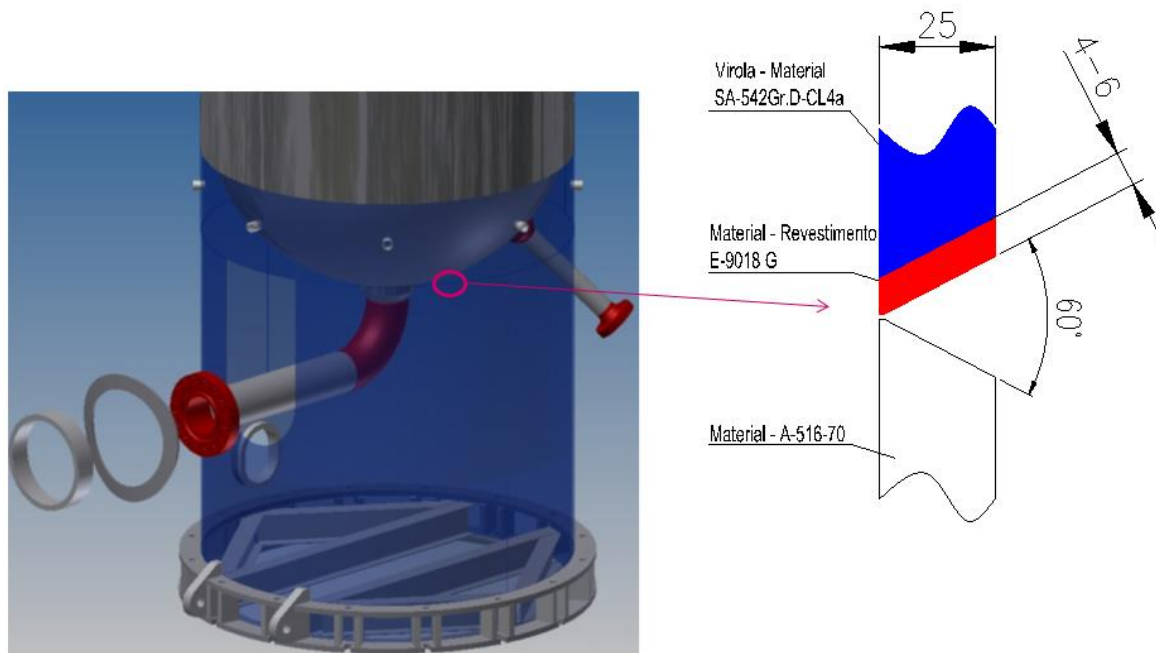
Quadro 4 - Composição química típica (%) do material de edição SFA 5.5 E9018G

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni
...	1,00 mín.	0,80 mín.	0,30 mín.	0,20 mín.	0,10 mín.	0,50 mín.

Fonte (ASME Boiler and Pressure Vessels Code, 2010).

O intuito deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas deste amanteigamento após o TTATPS a uma temperatura de $705^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ por 8 horas, anterior a união final com a seção inferior da saia.

Figura 6 - Croqui esquemático da solda do amanteigamento e solda de união entre as seções superior e inferior da saia.



Fonte: Confab Equipamentos, 2012.

A análise do amanteigamento se deu para duas marcas de metal de adição A e B, diâmetro de eletrodo de 3,2 mm. A composição química das duas marcas está detalhada na Tabela 5.

Quadro 5 - Composição química (%) dos materiais de adição utilizados, marca A e B.

MARCA	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni
A	0,071	1,57	0,40	0,37	0,54	0,13	0,95
B	0,070	0,71	0,33	2,27	1,09	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando-se uma chapa SA-542 Tp.D Cl.4a de 25 mm de espessura como material de base, a deposição se deu através do processo SMAW em chanfro V com abertura de 20°, com cordão filetado a uma polaridade CC+. A intensidade de corrente e tensão foram medidos no decorrer do processo e atingiram valores de 125A e 13V respectivamente. Anterior à soldagem foi mantido um pré-aquecimento de 200°C e uma temperatura de interpasse de 300°C, valores estes controlados por pirômetro óptico.

Figura 7 - Cupom de prova como soldado



Fonte: do próprio autor, 2012.

Após a soldagem completa conforme procedimento já mencionado, ambos os cupons A e B foram submetidos ao mesmo TTATPS que o equipamento seria submetido, porém em estufa aquecida por meio de resistências elétricas. As variáveis de tratamento seguiram os seguintes valores:

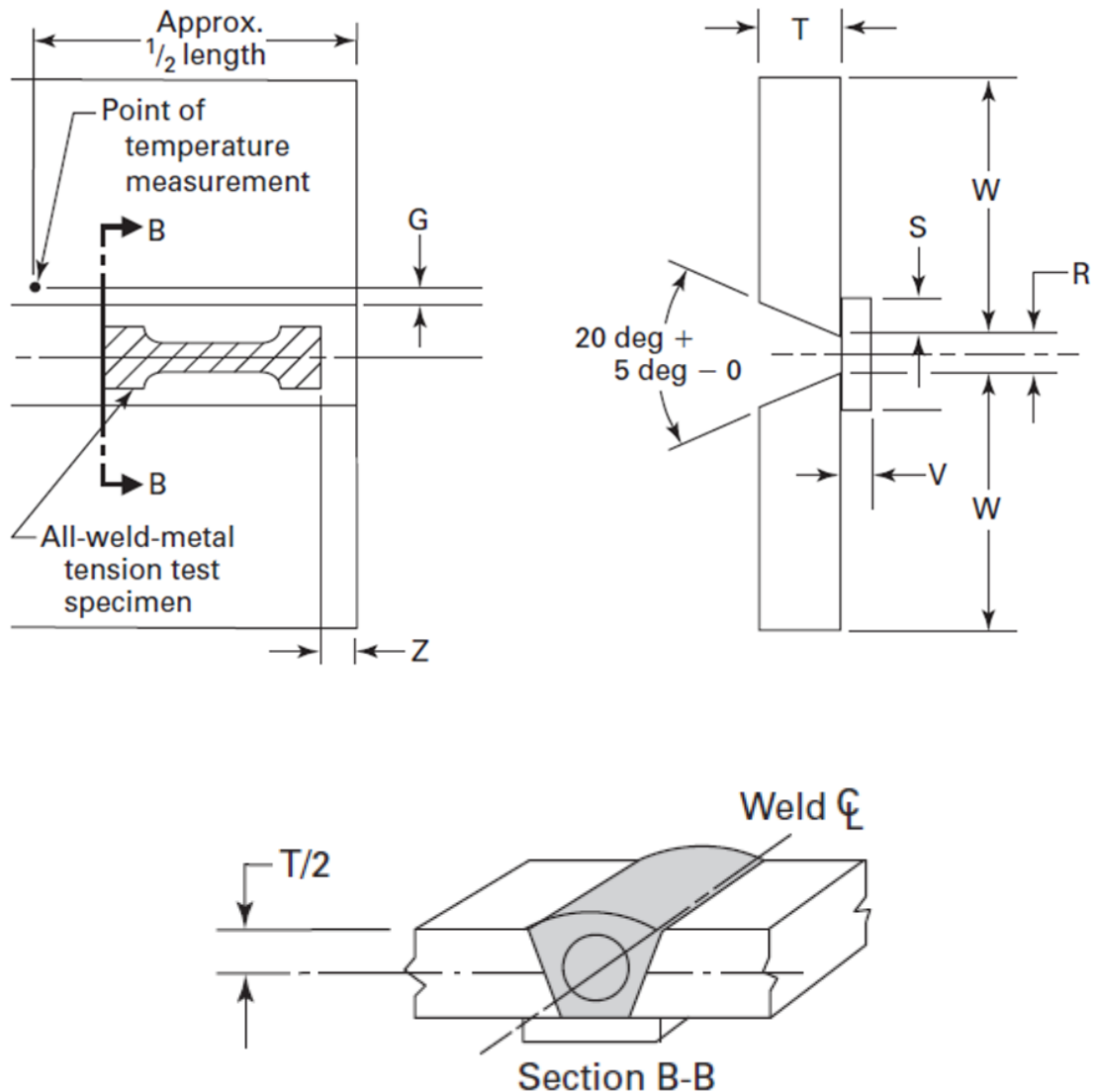
- Taxa de aquecimento máxima: 280°C/h
- Temperatura de patamar: 705±10°C
- Tempo de patamar: 8h
- Taxa de resfriamento máxima: 200°C

Após dado por completo seu resfriamento, o procedimento de avaliação do amantecimento se deu através da realização de ensaios de tração, seguindo a retirada de

corpos-de-prova diretamente do material depositado, conforme ASME II C SFA5.5. Para cada cupom foram retirados três corpos-de-prova cilíndricos que foram usinados conforme tolerâncias da norma ASTM A 370.

O ensaio foi realizado em máquina de tração WPM – HERCKERT modelo ZD 100.

Figura 8 - Procedimento de extração de corpos-de-prova



Fonte: ASME Boiler and Pressure Vessels Code, 2010.

6 Resultados e Discussão

Estando os processos de preparação dos corpos-de-prova finalizados, eles foram submetidos ao ensaio de tração com o intuito de mensurar as propriedades mecânicas do amantecimento após o TTATPS. Ao todo foram seis corpos-de-prova ensaiados, onde C1, C2 e C3 foram referenciados ao cupom A, soldado com a marca A de metal de adição,

e C4, C5 e C6 foram referenciados ao cupom B, que foi soldado com a marca B de metal de adição.

Quadro 6 - Propriedades mecânicas após TTATPS

MARCA	CP	ALONGAMENTO (mm)		RESULTADOS			
		L0	Lf	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	Z (%)
A	C1	25,4	32,1	403	746	26,4	58,5
	C2	25,4	32,9	442	766	29,5	57,6
	C3	25,4	31,4	459	688	23,6	64,0
	C4	35,0	40,3	472	752	15,1	27,4
B	C5	35,0	43,6	464	778	24,6	50,7
	C6	35,0	42,6	449	776	21,7	50,3

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao se compararem os resultados acima apresentados com as referências do material SA-542 Tp.D Cl.4a, onde se tem $LE = 415 \text{ MPa}$ e $585 \leq LR \leq 760 \text{ MPa}$, observa-se que para a marca A de metal depositado, em média, os valores de LE e LR se mostraram satisfatórios ($LE_{\text{médio}} = 435 \text{ MPa}$; $LR_{\text{médio}} = 733 \text{ MPa}$). Para valores individuais de LE, observou-se um decréscimo no valor de C1, não se enquadrando no valor referenciado de LE. No entanto este decréscimo representa apenas 3% do valor de referência. Notou-se também que para valores de LR, o C2 não representou o valor esperado, no entanto pode-se verificar que o valor se estabeleceu a um acréscimo de 0,8% do valor superior de referência. Todos os valores de alongamento para a marca A apresentados foram satisfatórios se estabelecendo acima do mínimo de 18%.

Ao se comparar a marca B com a referência do SA-542 Tp.D Cl.4a, os valores de LE se mostraram satisfatórios, enquanto que para LR, em média, tem-se 769 MPa, valor este que está a 1,2% do valor de referência. Um fato importante a se notar foi o valor do alongamento C4, este valor atingiu apenas 15,1%, não sendo satisfatório para a referência da chapa Cr-Mo-V.

Quando estes valores são comparados às referências do material SA-516 Gr.70, onde se tem $LE = 260 \text{ MPa}$ mínimo e $485 \leq LR \leq 620 \text{ MPa}$, todos os valores de LE obtidos nos 6 corpos-de-prova são dados como satisfatórios. No entanto, ao verificar os valores de LR nota-se que estão acima do limite superior de referência. Em média nota-se 18% de acréscimo do valor de referência para o material C-Mn. Com relação aos valores de alongamento, a referência para este material é de 21%, portanto nota-se também o mesmo desvio para o C4, o qual apontou um valor de 15,1%.

7 Conclusão

Através dos resultados demonstrados na seção anterior, nota-se claramente uma diferença significativa dos materiais de adição A e B após o TTATPS. Pode-se afirmar que o tratamento a $705\pm 10^{\circ}\text{C}$ por 8 horas não foi eficiente para aliviar as tensões residuais do cupom referente à marca B, principalmente devido aos elevados resultados de LR e também aos valores reduzidos de alongamento. Isto se deve ao elevado nível de elementos de liga identificados na marca B de material de adição.

Assim, a marca A demonstrou-se adequada para ser utilizada como material de adição no amanteigamento do Cr-MoV, atendendo a suas propriedades mecânicas na condição tratada.

Dessa forma o processo de amanteigamento foi adotado no plano de montagem da saia do equipamento, optando-se pela sua união com o material SA-516 Gr.70 sem a necessidade de alívio de tensões desta região

Referências

ANTALFFY, L.P., CHAKU P., **Metallurgical Design & Fabrication Aspects of Modern Hydroprocessing Reactors**, The Material Properties Council Second International Conference on the Interaction of Steels with Hydrogen in Petroleum Industry Pressure Vessel & Piping Service, Vienna, Austria, October 1994.

_____. **US perspective of modern hydroprocessing reactor metallurgy**. Hydrocarbon Technology Int. HTI Quaterly, Spring 1996, pp. 39-48

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, AN INTERNATIONAL CODE, 2010

ANTALFFY, L.P., FUSARI F., BERTONI A., MILLER G., KIRKPATRICK K., **The use of vanadium modified materials for reactor fabrication**, ASME 2005 Pressure vessels and Piping Conference, Volume 7, JULY 17-21, 2005.

Dissimilar Metals, Welding Handbook, 7th Ed., Vol 4, American Welding Society, 1982, P 514-547

ERWIN W.T., KERR J.G., **The Use of Quenched and Tempered $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ Steel for Thick Wall Reactor Vessels in Petroleum Refinery Processes**, Welding Research Council Bulletin 275, NY, February 1982.

HUCIŃSKA J., **Advanced Vanadium Modified Steels For High Pressure Hydrogen Reactors**, Advances in Materials Science, Vol. 4, No. 2 (4), December 2003.

BAILEY N., **The Metallurgical Effects of Residual Stresses, in Residual Stresses**, The Welding Institute, 1981, p 28-33.

Steels for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants. API 941. Fifth edition. American Petroleum Institute, Washington D.C., 1997.

TELLES, P.C.S., Vasos de Pressão, 2ª Edição atualizada, 1996.

VYROSTKOVA A., KROUPA A., JANOVEC J., SVOBODA M.: **Carbide reactions and phase equilibria in low alloy Cr-Mo-V steels tempered at 773-993 K. Part I: experimental measurements.** Acta mater. 40 (1997), pp. 31-38.

YAMADA M., SAKAI T., NOSE S., **Development of Cr-Mo-V-Cb-Ca steel for high pressure and high temperature hydrogenation reactors, in Application of 2.25Cr-1Mo-V modified steel to hydroprocessing pressure vessels.** Kobe Steel, Ltd., Tagasago, Japan, 1996.

WATANABE J., MURAKAMI Y., **API Publication 28.** American Petroleum Institute, Washington D.C., 1981.