ESTUDO DA FRAGILIDADE DO REVENIDO NO AÇO ASTM A148 Gr. 105-85

STUDY OF TEMPERING BRITTLENESS IN STEEL ASTM A148 Gr. 105-85

Otávio Contart Gamboni[I]
José Carlos Frazão[II]
Gabriel Zanqueta[III]
Maurício Angeloni[IV]
Gustavo Coser Monteiro Dias[V]

RESUMO

O tratamento térmico é uma maneira utilizada nas indústrias para modificações positivas dos componentes e equipamentos sem alterar a composição química do material, operação que pode levar a um aumento dos custos totais da produção de um componente. Com base nisso, é estipulado por meio de estudos, estimativas ciclos térmicos e ciclos de resfriamento para a obtenção de microestruturas e propriedades adequadas às suas aplicações, melhorando assim a resistência mecânica e a vida útil do componente. Neste trabalho, por meio de tratamentos térmicos, foram avaliadas condições de temperatura e resfriamento no aço ASTM A148 Gr. 105-85 (aço baixa-liga), visando detectar fragilidades na etapa de revenimento - que podem ocorrer devido a fenômenos que acontecem nas microestruturas dos aços, como a "Fragilidade do Revenido" ou a "Austenita Retida" utilizando de ensaios de tração e impacto, juntamente com análises metalográficas, após a execução de diversas condições de tratamentos térmicos. Foram verificados resultados coerentes com os esperados, onde os resfriamentos mais rápidos apresentaram resultados melhores do que os lentos, constatando que a faixa de fragilidade do revenido realmente causa diminuição da tenacidade no material estudado.

Palavras-chave: Tratamento térmico. ASTM A148 Gr. 105-85. Fragilidade.

ABSTRACT

Heat treatment is a way used in industries for positive modifications of components and equipment without changing the chemical composition of the material, an operation that can lead to an increase in the total cost of producing a component. Based on this, it is stipulated through studies, estimates of thermal cycles and cooling cycles to obtain microstructures and properties suitable for their applications, thus improving mechanical strength and component life. In this work, through thermal treatments, temperature and cooling conditions were evaluated in ASTM A148 Gr. 105-85 steel (low alloy steel), aiming to detect weaknesses in

[I] Prof. Dr. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. otavio.gamboni@fatec.sp.gov.br
[II] Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. zecarlos_frazao@yahoo.com.br
[III] Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. gabrielzanqueta97@gmail.com
[IV] Prof. Dr. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. mauricio.angeloni@fatec.sp.gov.br
[V] Prof. Me. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. gustavo.dias10@fatec.sp.gov.br

the tempering stage - which may occur due to phenomena that occur in microstructures. of steels, such as “Tempering Brittleness” or “Retained Austenite” using tensile and impact tests, together with metallographic analyzes, after the execution of various heat treatment conditions. Consistent with the expected results were verified, where the faster cooling presented better results than the slow ones, noting that the tempering frailty range actually causes decreased toughness in the studied material.

Keywords: Heat treatment. ASTM A148 Gr. 105-85. Embrittlement.

Data de submissão do artigo: 15/07/2019.
Data de aprovação do artigo: 01/10/2019.
DOI:

1 INTRODUÇÃO

Os tratamentos térmicos são aplicados nos aços visando uma melhoria em suas propriedades mecânicas, podendo ser na resistência mecânica, resistência ao impacto ou a dureza, por meio de uma mudança na microestrutura do material, adequando sua aplicação operacional. Tais mudanças ocorrem através de ciclos térmicos, que incluem aquecimento, tempo de permanência e resfriamento pré-determinados, os quais são dependentes da composição química e da massa do material. A microestrutura sofre os efeitos térmicos e adquire arranjos cristalinos diferentes, mudando assim suas propriedades mecânicas (MILAN *et al*., 2014). Cada ciclo térmico realizado possui uma finalidade e características próprias. Para este trabalho, foram realizados os tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento.

Já é de conhecimento público que o tratamento térmico de têmpera resulta em um endurecimento do material, por meio de transformação em uma matriz martensítica. Assim sendo, o material apresenta certa fragilidade e se torna praticamente obrigatória a realização de um tratamento de revenimento após a têmpera. No entanto, existem estudos nos quais se detectam certas fragilidades indesejadas após o revenimento, reduzindo a tenacidade do material. Este acontecimento é chamado de “Fragilidade do revenido” e se dá devido a faixas de temperatura nas quais algumas impurezas contidas nos materiais precipitam nos contornos de grãos, resultando em uma fratura intergranular. Este fenômeno é bastante comum em aços contendo elementos de liga – principalmente fósforo, estanho, antimônio e arsênio - já que a adição de elementos de liga aumento a temperatura de transição dúctil-frágil. Adicionalmente, o fenômeno de austenita retida também pode resultar em uma fragilidade após o revenido, já que nesta etapa, a austenita se transforma em martensita (MARCOMINI, 2008).

O aço analisado neste trabalho apresentou fragilidade após os ciclos térmicos previstos no seu processamento. A fim de identificar o motivo para esta queda na sua tenacidade, foram realizadas variações nos ciclos térmicos de revenido, além de alterações nos meios de resfriamento durante esta etapa. As propriedades mecânicas avaliadas foram a resistência à tração, o limite de escoamento, a redução de área, o alongamento e a tenacidade ao impacto. Este trabalho pretendeu avaliar Avaliou- se o comportamento do material ASTM A148 Gr. 105-85 com variáveis de temperatura e meios de resfriamento no revenimento e alívio de tensões, além de analises da influência destas variáveis nas propriedades mecânicas deste aço, em especial no ensaio de impacto Charpy, sob baixas temperaturas, a fim de estudar comportamentos de fragilidade do mesmo em situações severas de trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aço ASTM A148 Gr. 105-85 por ter composição química livre e boa resistência mecânica e ao impacto, se torna bem versátil e possível de ser utilizado nas indústrias de diversos segmentos como mineração, naval, açúcar e etanol, dentre outros. Uma das aplicações deste material é para a confecção da peça olhal torpedo. Este componente possui aplicação na indústria naval com a finalidade de içar plataformas de petróleo. Devido ao ambiente marinho, sua imersão em alto mar em temperaturas frias dos oceanos, lhe é exigido uma alta tenacidade em baixas temperaturas, combinada com boa resistência mecânica. Esta peça é fabricada através de um processo de fundição.

Figura 1 – peça denominada olhal torpedo



Fonte: (SANTOS FILHO *et al,* 2018)

Figura 2 - aplicação do olhal torpedo no içamento de uma plataforma de petróleo.



Fonte: (SANTOS FILHO *et al,* 2018)

Ainda sobre este material, alguns pesquisadores apontam que muitas das condições de composição química, processos e tratamentos térmicos disponíveis em normas internacionais são muito limitadas para materiais fundidos (SANTOS FILHO *et al*, 2018; BOLOURI; KIM; KANG, 2013)

Além do processo de fundição, esta peça passa por tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento. Durante a sua montagem, ainda é possível que esta peça passe por uma etapa de soldagem de recuperação. Após a solda neste material, é aconselhável que se faça o alívio de tensão.

A normalização consiste em austenitizar o material e seu resfriamento é feito ao ar calmo ou ar forçado. Por ser resfriado de forma relativamente lenta, a estrutura formada é bem homogênea de grão austeníticos refinados, com isso o resultado é uma estrutura de perlita fina. Suas propriedades são de boa resistência mecânica e ductilidade (MILAN *et al*., 2014)

Assim como a normalização, o aquecimento para a têmpera é realizado em temperatura completa de austenitização para aços hipoeutetóides e busca, através de resfriamentos rápidos, uma microestrutura de maior dureza e maior limite de resistência à tração, características presentes nos constituintes martensíticos (metaestáveis). Como o resfriamento realizado na têmpera é brusco, geram-se tensões residuais trativas no material e, para aliviar essas tensões - tornando o material menos propício à nucleação de trincas - o tratamento térmico de revenimento deve ser realizado logo após a têmpera. Tal tratamento

consiste em elevar a temperatura até um patamar abaixo do início da transformação austenítica (T < 723°C) e o resfriamento depende da microestrutura desejada, juntamente associada à composição química do material (MILAN *et al*., 2014)

O tratamento térmico de têmpera é um dos mais importantes, pois o resultado é uma estrutura de propriedades excelentes, que suportam grandes esforços em trabalho. A estrutura formada em todos os casos é predominantemente martensítica, a qual é obtida através de resfriamentos rápidos. Um dos principais pontos sobre a têmpera é a forma como o material é resfriado. Quanto mais rápido for este resfriamento, menor a chance de se formar constituintes difusionais (perlita, ferrita e cementita). Os meios de resfriamentos mais comuns são água, salmoura, óleo e, eventualmente, ar. A grande característica que a martensita proporciona ao material é sua elevada dureza – sendo muito dependente do teor de carbono. Em um aço eutetóide, por exemplo, a dureza pode atingir valores próximos a 65 HRC, o que torna o material útil para diversas aplicações de grande responsabilidade. Porém, sua tenacidade é bem baixa, o que leva o material a poucas aplicações práticas nas indústrias (CHIAVERINI, 2008)

O revenimento por sua vez, na maioria dos casos é aplicado em peças temperadas, já que com o resfriamento rápido da têmpera a estrutura adquire tensões devido ao choque térmico que recebe, cabendo ao revenimento o papel de aliviar essas tensões, deixando o material mais tenaz, reduzindo parcialmente sua dureza e a suscetibilidade às trincas. As temperaturas de revenimento variam de acordo com as propriedades desejadas, variando usualmente entre 200°C e 700°C. (SILVA; MEI, 2010). “Este tratamento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas (SILVA; MEI, 2010)

Na etapa de revenimento, alguns aços podem ter sua tenacidade reduzida medida através do ensaio de impacto (Charpy), devido a um fenômeno chamado “fragilidade do revenido”. Isso normalmente ocorre em uma determinada faixa de temperatura, entre 375°C e 575°C, onde a presença de elementos de liga como cromo, manganês ou níquel, e a presença de impurezas como fósforo, estanho, antimônio e arsênio segregam na região intergranular. “A presença desses elementos de liga e das impurezas desloca a transição dúctil-frágil, para temperaturas mais elevadas; a temperatura ambiente está, dessa forma, abaixo dessa transição, no regime de fragilidade”(CALLISTER, 2015)

Para se evitar esse fenômeno da fragilidade do revenido, deve-se procurar não entrar na faixa de temperatura prejudicial (375°C a 575°C), e caso seja atingido, deve-se aumentar a velocidade de resfriamento para encurtar a permanência do aço nesse intervalo de temperatura (CHIAVERINI, 2008).

Alguns elementos presentes nos aços promovem a fragilidade no revenido. No entanto, muitas vezes, a fragilidade pode não ser identificada apenas através dos ensaios mecânicos tradicionais de dureza e de tração, sendo necessário o ensaio de impacto – normalmente sob baixas temperaturas - ou ainda, pode ser necessária uma análise metalográfica bastante detalhada a fim de identificar a presença de uma microestrutura martensítica não revenida.

Outro fenômeno que pode ocorrer com o aço em estudo é a “Austenita retida”, que consiste na transformação incompleta da austenita em martensita. Quanto maior o teor de carbono, as temperaturas Mi e Mf diminuem, ou seja, necessita-se menores temperaturas para atingir a transformação martensítica completa. “Durante o revenimento pode ocorrer precipitação de carbonetos na austenita retida, reduzindo seu teor de carbono e,

consequentemente, aumentando o Mi e o Mf" (COLPAERT, 2008). A austenita retida pode ser vista por meio de difração de raios X ou análises metalográficas (COLPAERT, 2008). Como a austenita tem densidade diferente da martensita, há uma variação volumétrica do material (SILVA; MEI; 2010).

"A austenita 'retida' após a têmpera pode se transformar em martensita, causando variação dimensional, visto que os dois constituintes têm densidades diferentes" (SILVA, 2010). Por conta disso, é um fator muito importante a ser levado em conta quando trabalha-se com têmperas e revenimento em aços temperáveis. Por ser prejudicial e indesejada, deve-se tomar as devidas precauções para evitar a não transformação da austenita. As formas de se evitar são:

- Revenimentos múltiplos: consiste em retratar a peça a fim de completar a transformação da austenita. Durante o revenimento, pode ocorrer precipitação de carbonetos na austenita retida, reduzindo seu teor de carbono, aumentando as temperaturas inicial e final de formação da martensita (COLPAERT, 2008).
- Tratamento subzero: consiste em resfriar a peça em líquidos que se encontram em temperaturas abaixo de 0°C (Nitrogênio ou Hélio líquidos) transformando completamente austenita em martensita (SILVA; MEI; 2010).
- Encruamento: consiste em deformar o componente temperado a frio facilitando a transformação da austenita retida (SILVA; MEI; 2010).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Essa seção apresenta os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa.

3.1 Materiais

AÇO ASTM A148 Gr. 105-85

Para realização deste trabalho, utilizou-se o material cuja norma é a ASTM A148 Gr. 105-85, na condição fundido. A norma não determina a composição química a ser produzida, apenas limita os teores de enxofre (S) (0,06%) e fósforo (P) (0,05%). (ASTM, 2005). A composição utilizada segue os teores da tabela 1. O aço ASTM A148 Gr. 105-85 possui uma ótima resistência mecânica e resistência ao impacto, seguindo as especificações estabelecidas em norma e as exigências do cliente, a tabela 2 mostra os valores de referência. Quanto aos valores do ensaio de impacto *Charpy*, o cliente exige valor médio de 34 J numa temperatura de -30ºC, sendo que os valores individuais não podem ser inferiores a 2/3 do valor médio especificado.

Tabela 1 - Composição química do material

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Sn	W	Ceq
Min.	0,17	-	0,70	-	-	0,80	1,70	0,40	-	0,02	-	-	-	-
Máx.	0,21	0,60	0,90	0,05	0,06	1,00	1,90	0,50	-	0,06	-	-	-	-

Fonte: ASTM A148 (2005)

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas exigidas por norma e pelo cliente

Resistência à tração (mínimo)	Limite de escoamento (mínimo)	Alongamento (mínimo)	Redução de área (mínimo)	Impacto (-30ºC)	
				Valor Médio	Valor Mínimo
105 ksi 73,90 kgf/mm²	85 ksi 59,63 kgf/mm²	17 %	35 %	34 J	22,66 J

Fonte: ASTM A148 (2005)

3.2 Tratamentos Térmicos (temperaturas, faixas, resfriamentos)

Como o foco do trabalho é o tratamento térmico, utilizou-se várias condições de tratamentos térmicos, com diferentes temperaturas e formas de resfriamento, tudo para encontrar a melhor condição para obtenção de valores satisfatórios que atendam as normas e exigências do cliente.

Todos os corpos de prova foram primeiramente normalizados à 930ºC, com patamar de 1 hora e resfriado em ar calmo, seguido de uma têmpera à 940º, com patamar de 1 hora e resfriamento em água à temperatura ambiente. A taxa de aquecimento foi de 100ºC/h. A tabela 3 mostra os tratamentos térmicos seguintes à tempera de cada corpo de prova.

Tabela 3 – Condições de Tratamento Térmico

Identificação CP	Tratamento Térmico	Resfriamento
CP1-R630AG	Revenimento à 630ºC	Água
CP2-R.630AG.R630AR	Revenimento à 630ºC (Água) + Revenimento à 630ºC (Ar)	Água e Ar
CP3-R.630AG.R630AG	Revenimento à 630ºC + Revenimento à 630ºC	Água
CP4-R.630AG.AT600AR	Revenimento à 630ºC (Água) + Alívio de Tensões à 600ºC (Ar)	Água e Ar
CP5-R.630AG.AT600AR.R630AG	Revenimento à 630ºC (Água) + Alívio de Tensões à 600ºC (Ar) + Revenimento à 630ºC (Água)	Água e Ar
CP6-R.630AG.AT600AG	Revenimento à 630ºC + Alívio de Tensões à 600ºC	Água
CP7-R.630AG.AT250AR	Revenimento à 630ºC (Água) + Alívio de Tensões à 250ºC (Ar)	Água e Ar
CP8-R.630AG.AT250FO	Revenimento à 630ºC (Água) + Alívio de Tensões à 250ºC (Forno)	Água e Forno
CP9-R.630AG.AT250AG	Revenimento à 630ºC + Alívio de Tensões à 250ºC	Água

Fonte: os autores (2019)

3.2.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram fundidos apensos às peças que foram enviadas ao cliente, conforme Figura 3 e depois retirados da peça para realização dos tratamentos térmicos e ensaios. Seguem a norma de fabricação ASTM A781 (*Keel block*) e para preparação e usinagem, norma ASTM A370. Foi verificado o perfil do entalhe do corpo de prova para

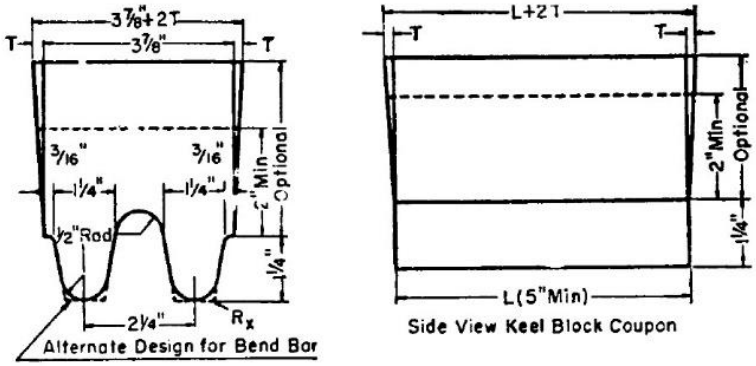
impacto em um projetor de perfil. Os corpos de prova de impacto e de tração foram usinados de acordo com as normas ASTM E23-07 e ASTM E8M, respectivamente. Foram utilizados um total de 3 corpos de prova por condição, para o ensaio de impacto e apenas 1 corpo de prova para cada condição no ensaio de tração.

Figura 3 – Peça com corpo de prova apenso



Fonte: os autores (2019)

Figura 4 – Dimensões do corpo de prova apenso.



Fonte: (ASTM A781, 2005)

3.2.2 Ensaios Mecânicos (condições de ensaio, temperaturas)

Após realizados todas as condições de tratamentos térmicos e preparação dos corpos de prova, foi realizado os ensaios mecânicos de tração e impacto *Charpy*, para verificar a influência das condições no material e concluir qual a melhor delas.

No ensaio de tração, foi utilizado a máquina Pantec Tipo 30 TUZ V, com capacidade de 30 tf, a velocidade de deslocamento foi de 10 mm/s, ensaio realizado em temperatura ambiente.

Para o ensaio de impacto *Charpy*, utilizou-se a máquina modelo PW 30/15K, sistema Wolpert/Amsler, capacidade de 300J e o corpos de prova foram submetidos à temperatura de -30ºC para realização do ensaio. Adicionalmente, foi realizado apenas um ensaio de impacto *Charpy* à temperatura ambiente para avaliar a severidade de baixas temperaturas e a influência no material, para esse caso, utilizou-se a pior condição dentre os ensaiados à -30ºC, que foi a condição: normalizado, temperado, revenido e aliviado ao ar.

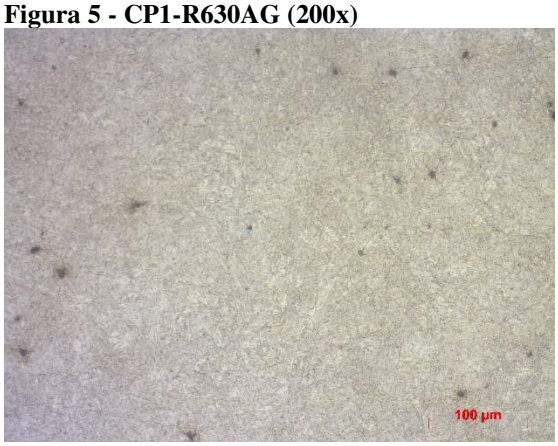
3.2.3 Metalografia

Além dos ensaios mecânicos, foi retirado uma amostra dos corpos de prova utilizados no ensaio de impacto *Charpy* para embutimento, lixamento, polimento e ataque químico para uma posterior análise metalográfica. A preparação das amostras seguiu a norma ASTM E3-2015.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

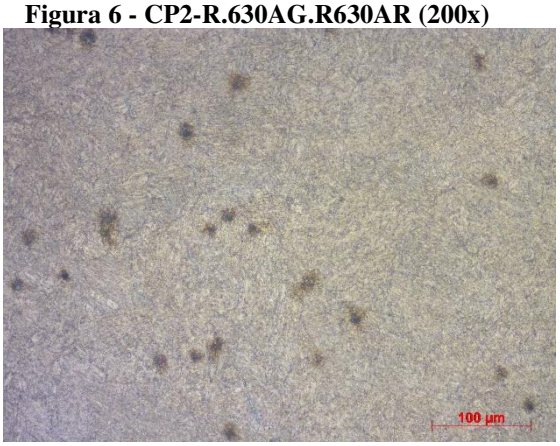
As Figuras de 5 a 13 apresentam as microestruturas obtidas após cada tratamento térmico apresentado anteriormente na Tabela 3.

Figura 5 - CP1-R630AG (200x)



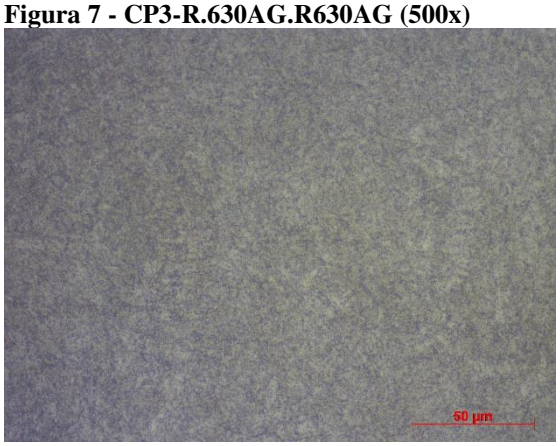
Fonte: os autores (2019)

Figura 6 - CP2-R.630AG.R630AR (200x)



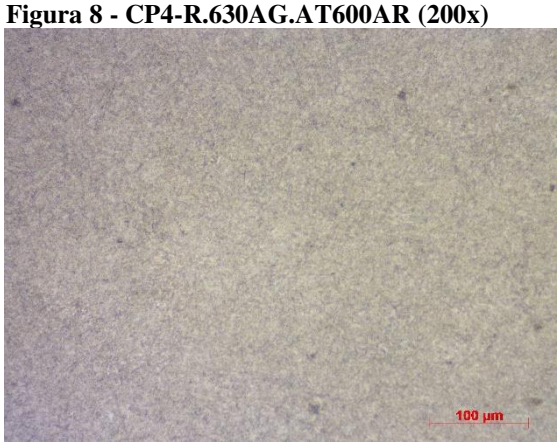
Fonte: os autores (2019)

Figura 7 - CP3-R.630AG.R630AG (500x)



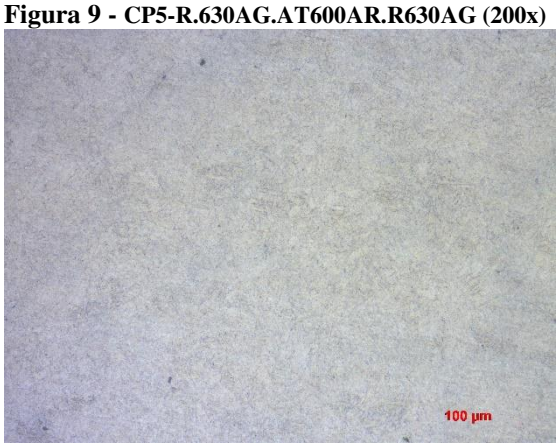
Fonte: os autores (2019)

Figura 8 - CP4-R.630AG.AT600AR (200x)



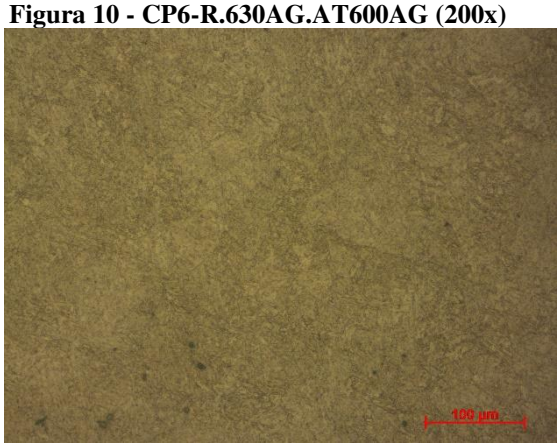
Fonte: os autores (2019)

Figura 9 - CP5-R.630AG.AT600AR.R630AG (200x)



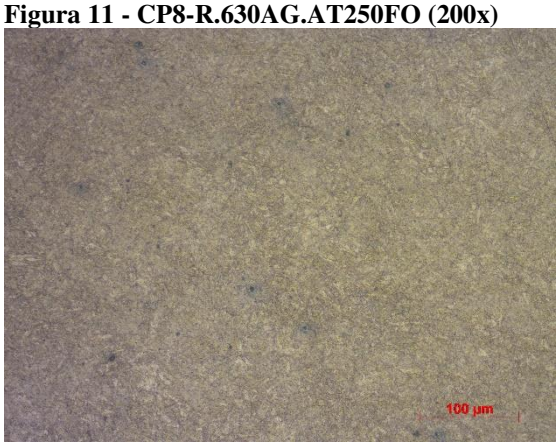
Fonte: os autores (2019)

Figura 10 - CP6-R.630AG.AT600AG (200x)



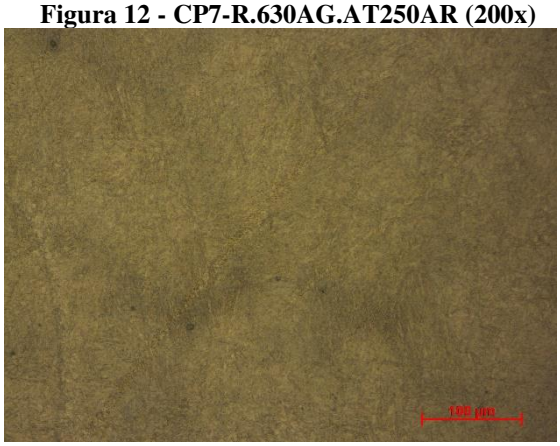
Fonte: os autores (2019)

Figura 11 - CP8-R.630AG.AT250FO (200x)



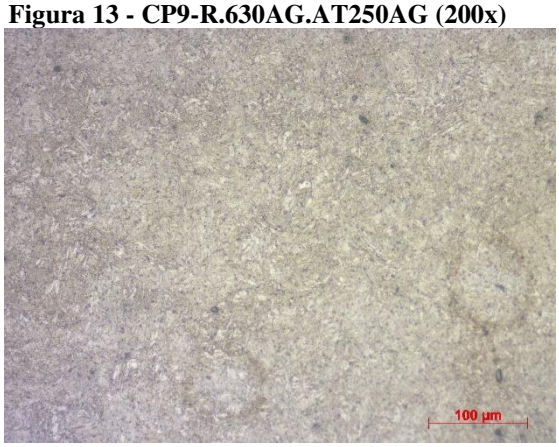
Fonte: os autores (2019)

Figura 12 - CP7-R.630AG.AT250AR (200x)



Fonte: os autores (2019)

Figura 13 - CP9-R.630AG.AT250AG (200x)



Fonte: os autores (2019)

Com base nas metalografias obtidas, não foi possível identificar diferenças nas microestruturas obtidas nas amostras que passaram por diferentes tipos de tratamentos térmicos. Aparentemente, a microestrutura presente em todas as amostras foi de carbonetos precipitados na qual – em alguns casos- pode-se notar a presença de uma matriz de martensita

em forma de placas, bastante característica de um aço que passou por revenimento em alta temperatura.

A Tabela 4, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de tração obtidos para cada condição de tratamento térmico apresentado anteriormente na Tabela 3.

Tabela 4 – Resultados Ensaio de Tração

Identificação CP	Resistência a tração (kgf/mm²)	Limite de Escoamento (kgf/mm²)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Resultado
CP1-R630AG	87	78,4	18,16	60,99	Aprovado
CP2-R.630AG.R630AR	95,9	87,3	14,4	41,8	Reprovado
CP3-R.630AG.R630AG	85,7	76,5	17	54,97	Aprovado
CP4-R.630AG.AT600AR	93,7	82,9	14,8	54,19	Reprovado
CP5-R.630AG.AT600AR.R630AG	84,7	74,6	19,26	59,27	Aprovado
CP6-R.630AG.AT600AG	90,1	76,3	17,36	56,88	Aprovado
CP7-R.630AG.AT250AR	87,2	76,5	17,95	56,94	Aprovado

Fonte: os autores (2019)

Os resultados do ensaio de tração estão descritos conforme tabela 4. Analisando os resultados é possível verificar que exceção dos corpos de prova CP2-R.630AG.R630AR e CP4-R.630AG.AT600AR, as amostras tratadas e estudadas neste trabalho foram aprovadas de acordo com a norma. Constatou-se que os melhores resultados de resistência à tração e limite de escoamento foram aqueles revenidos e aliviados ao ar, pelo fato de terem um resfriamento mais lento do que os demais, porém o alongamento foi prejudicado, provavelmente por uma precipitação de carbonetos, causando a reprovação do ensaio. Essas afirmações são comprovadas pela menor resistência ao impacto, constatada nos ensaios de *Charpy (ver Tabela 5).* Os demais corpos de prova mostraram valores satisfatórios e bastante próximos, apresentando uma boa estabilidade quanto a resistência mecânica. Vale ressaltar que antes de realizar o ensaio de impacto, sempre é realizado o ensaio de tração para verificar as propriedades mecânicas, caso reprovado, o corpo de prova recebe novos ciclos de tratamento térmico para correção das propriedades e somente quando aprovadas passa para o próximo ensaio, de impacto.

A Tabela 5, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de impacto, obtidos para cada condição de tratamento térmico apresentado na Tabela 3.

Tabela 5 – Resultados Ensaio Impacto Charpy

Identificação CP	Charpy 1	Charpy 2	Charpy 3	Média	Resultado
CP1-R630AG	60	47	50	52,3	Aprovado
CP2-R.630AG.R630AR	30	34	18	27,3	Reprovado
CP3-R.630AG.R630AG	68	57	48	57,7	Aprovado
CP4-R.630AG.AT600AR	32	43	37	37,3	Aprovado
CP4-R.630AG.AT600AR (AMBIENTE)	84	92	90	88,7	Aprovado

CP5-R.630AG.AT600AR.R630AG	83	83	60	75,3	Aprovado
CP6-R.630AG.AT600AG	66	70	67	67,7	Aprovado
CP8-R.630AG.AT250FO	82	75	92	83,0	Aprovado
CP7-R.630AG.AT250AR	64	78	86	76,0	Aprovado
CP9-R.630AG.AT250AG	80	90	88	86,0	Aprovado

Fonte: os autores (2019)

Os resultados do ensaio de impacto *Charpy* estão descritos conforme tabela 5. Analisando os resultados obtidos é possível verificar que os corpos de prova resfriados ao ar tiveram resultados baixos, enquanto os resfriados mais rapidamente ou aliviados em baixas temperaturas apresentaram resultados mais satisfatórios.

O corpo de prova CP2-R.630AG.R630AR foi o único reprovado de acordo com o especificado. Como a amostra foi resfriada em ar, seu resfriamento foi relativamente lento, fazendo com que o material passe pela faixa de fragilidade do revenido de uma maneira mais lenta, favorecendo a ocorrência de uma possível fragilização dele. O corpo de prova CP4-R.630AG.AT600AR também teve o seu resfriamento lento, o que favoreceu a fragilização, deixando os resultados baixos, embora aprovados. Vale ressaltar que com esses valores baixos seria arriscado manter essa condição como a ideal pois com as variáveis do processo e/ou do ensaio, poderia se chegar a resultados inferiores e possivelmente insatisfatórios.

O corpo de prova CP4-R.630AG.AT600AR (AMBIENTE) sofreu as mesmas condições de tratamento térmico do CP4-R.630AG.AT600AR, porém seu ensaio de impacto foi realizado em temperatura ambiente, para verificar o comportamento em temperaturas menos severas do que as analisadas. O resultado foi satisfatório, concluindo que esse material em baixas temperaturas possui maior fragilidade, assim como a grande maioria dos aços, com isso deve-se analisar a utilização do componente em campo, levando em conta a possível fragilização durante o processo de fabricação e durante o seu uso.

O corpo de prova CP5-R.630AG.AT600AR.R630AG sofreu a mesma rotina de tratamento térmico do corpo de prova CP2-R.630AG.R630AR, porém com um novo revenimento em água após o alívio ao ar, simulando uma tentativa de recuperar a tenacidade do material que se encontrava baixa, como resultado, obteve-se resultados superiores e satisfatórios, concluindo que mesmo após fragilização por resfriamento ao ar, pode-se optar por um revenimento em água para correção deste fenômeno.

Os corpos de prova CP1-R630AG, CP3-R.630AG.R630AG e CP6-R.630AG.AT600AG, com um revenimento, duplo revenimento e alívio, respectivamente, todos resfriados em água também comprovaram que o resfriamento rápido faz o material ter melhor tenacidade, pois permanece por menos tempo na temperatura de fragilidade do revenido, todos obtiveram resultados satisfatórios.

Os corpos de prova CP8-R.630AG.AT250FO, CP7-R.630AG.AT250AR, e CP9-R.630AG.AT250AG foram aliviados em menor temperatura, à 250º e resfriados em forno, ar e água respectivamente. Ficou evidente considerando um alívio de tensão em temperatura relativamente baixa, o resfriamento causa uma influência muito pequena na tenacidade do material, uma vez que a temperatura de alívio não alcança a faixa da fragilidade do revenido,

ou seja, não sofre com as precipitações de carbonetos, sendo assim sua tenacidade permanece e não compromete o material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a rota de tratamento térmico causa alguma influência nas propriedades mecânicas do aço ASTM A148 Gr. 105-85. Ficou constatado que um alívio realizado em alta temperatura e resfriado lentamente pode resultar em uma certa fragilidade, muito provavelmente em decorrência da precipitação de alguns carbonetos metálico, além da fragilidade, foi observado uma influência na resistência mecânica do material, que apresentou valores maiores, e em contrapartida o alongamento foi prejudicado. Outro ponto importante foi a dificuldade em identificar as fases presentes em cada microestrutura, uma vez que os patamares de temperatura foram muito próximos uns dos outros. Para uma análise mais detalhada seria necessário o uso de reagentes próprios para a identificação de cada fase em particular (o que não foi o foco deste trabalho, mas pode ser avaliado em trabalhos futuros).

Uma outra contribuição deste trabalho foi a conclusão de que quando se faz necessária a aplicação de um alívio de tensão após a solda, deve-se evitar um resfriamento lento, pois o resultado pode ser uma fragilidade. Porém, a tenacidade perdida por este resfriamento lento pode ser recuperada por um novo revenimento, desde que o resfriamento seja rápido.

É importante salientar que todos os testes realizados foram feitos nos corpos de prova apensos à peça fundida. Portanto, os resultados aqui obtidos poderiam ser um pouco diferentes se realizados na peça, até porque os corpos de prova não passam pelo processo de solda que a peça normalmente passa. Tal fato fica evidente quando analisamos os corpos de prova aliviados em baixa temperatura 250 ºC nos quais os resultados obtidos foram satisfatórios para os corpos de prova apensos. Estes resultados poderiam ser bastante diferentes caso fossem avaliados na peça, uma vez que o aporte térmico da soldagem realizada na mesma é bastante grande, necessitando de um alívio em temperaturas mais elevadas. No entanto, estes resultados apresentados no trabalho corroboram o fato de que uma vez que a temperatura de alívio não atinge a faixa de fragilidade do revenido, muito provavelmente, o material mantém a tenacidade obtida no primeiro revenido.

REFERÊNCIAS

ASTM A148/148M - Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes: In: **Annual book of ASTM**, 2005.

ASTM E3-2017. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. 2017.

BOLOURI, A.; KIM, T.W. KANG, C.G. Processing of low-carbon cast steels for offshore structural applications. **Materials and Manufacturing Processoses**. 2013; 28 (11).

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. LTC, 8. ed., Rio de Janeiro, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Blucher, 4. ed., São Paulo, 2008.

MARCOMINI, J.B. **Fragilização da martensita revenida no aço SAE 5160H**. Dissertação de Mestrado. 2008

MILAN, M.; MALUF, O.; SPINELLI, D; BOSE FILHO, W. W., **Metais**: uma visão objetiva. Colosio, M. A., 2. ed., São Carlos, 2014.

SANTOS, J. A; PARRA FILHO, D. **Metodologia Científica**. Cengage Learning, 2. ed., São Paulo, 2011.

SANTOS FILHO, O.R.; COUTINHO, J.L. COELHO, M.J.S. SOUZA, L.F.G.; JORGE, J.C.F.; MENDES, M.C. ARAÚJO, L.S. Avaliação de juntas soldadas de um aço fundido de alta resistência para indústria Offshore. **Soldagem & Inspeção**. 2018; 23 (2).

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. Blucher, 3. ed., São Paulo, 2010.