

ESTUDO E COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA JUNTA SOLDADA PELO PROCESSO PLASMA DO AÇO DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA 300M

Rafael Augusto Monteiro, monteiro-rafa@hotmail.com¹

Tarcísio Gonçalves de Brito, tgbrito@unifei.edu.br¹

Davi Neves, davis@ieav.cta.br²

Eduardo Miguel da Silva, eduardosilva@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II – CEP: 35903-087, Itabira – MG.

²Instituto de Estudos Avançados – IEAv, Trevo Cel Aviador José Alberto Albano do Amarante, 1 – Putim – CEP: 12228-001, São José dos Campos – SP.

Resumo: O aço 300M é um aço de ultra alta resistência, similar ao aço SAE 4340, desenvolvido pelo DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial) em conjunto com empresas brasileiras. Altamente utilizado na indústria aeronáutica para construção de envelopes de motores foguete e trens de pouso de aeronaves, em função da alta resistência mecânica. Alguns dos problemas enfrentados no uso deste aço está relacionado a usinabilidade, em função do elevado teor de silício e na soldabilidade em função da temperabilidade elevada. No tratamento térmico torna-se necessário o uso de fornos com atmosfera controlada ou banhos de sal para evitar a descarbonetação. Este trabalho realiza um estudo sobre o processo de soldagem a plasma do aço 300M, comparando-se o desempenho da junta soldada em cordões paralelos e perpendiculares ao sentido de laminação. Compara-se por metalografia, ensaios mecânicos, de tração e micro dureza o desempenho das juntas soldadas e a influência de um tratamento térmico de duplo revenimento. Para isso foi realizado ensaios mecânicos, como o ensaio de tração, de maneira a comparar a diferença entre a dureza do material antes e depois da realização do tratamento e preparação metalográfica para posteriormente uma análise micro estrutural do material e comparação entre ambos os processos. Foram utilizadas 8 chapas do aço sendo que 4 delas foram cortadas no sentido da laminação e as outras 4 no sentido transversal da laminação, de maneira que também fosse possível ser analisada e comparada a diferença entre os sentidos de laminação para a utilização do aço e o processo de descarbonetação.

Palavras-chave: aço de ultra alta resistência, indústria aeronáutica, soldabilidade, descarbonetação, soldagem a plasma.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade tem evoluído rapidamente, principalmente após o início da manipulação dos aços. Engenheiros utilizam o aço devido sua vasta gama de propriedades e características aliado com o baixo custo. Na década de 1960, com o acontecimento da Guerra Fria, os setores aeronáuticos e espaciais tiveram grande crescimento, aumentando a demanda por aços que tivessem boa relação peso/resistência. Com isso, os aços de ultra alta resistência ganharam notoriedade, como por exemplo o aço SAE 300M, pois possuem limite de escoamento superior a 1400 MPa, além de maior alongamento, tenacidade e resistência a fadiga. (Souza, 2008; Silva; Mei, 2006).

O Programa Espacial Brasileiro colabora no desenvolvimento de materiais e equipamentos para o parque industrial, o DCTA tem como carro chefe de suas pesquisas o VLS (Veículo Lançador de Satélites). Um dos estudos realizados foi com relação à substituição do aço SAE 4140, utilizado no envelope motor do primeiro estágio do foguete, pelo aço SAE 300M por possuir características semelhantes, variando na adição de novos elementos como silício e vanádio.

O aço 300M é amplamente utilizado na indústria aeronáutica por combinar resistência mecânica elevada e alta tenacidade, mesmo em baixas temperaturas, (Schuller, 2016). Por se tratar de um aço rico em carbono, o 300M pode sofrer descarbonetação, prejudicando os resultados obtidos em exame micro gráficos. (Lama, 2001; Tomita, 1995).

A soldagem de aços martensíticos é de difícil realização na indústria por serem suscetíveis à formação de descontinuidades, porosidades e trincas, sendo que a redução no teor de carbono tende a melhorar a soldagem, (Cardoso, 2010). Dessa maneira se faz necessário a utilização de um tratamento térmico no 300M após realização de trabalhos a quente. Na indústria ele é austenetizado a 930°C por 40 minutos e normalizados em 980°C por 60 minutos, quando recebe banho de sal, por fim recebe um duplo revenimento a 280°C para garantir alívio das tensões, (Oliveira, 2015).

Este artigo propõe um estudo sobre a soldagem a plasma no aço 300M para duas situações: primeiro, variou-se a orientação do sentido de laminação dos retalhos de chapa soldada e segundo, variou o sentido de laminação dos retalhos de chapas soldadas com posterior realização de tratamento térmico, ambas em longitudinal e transversal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Material

O material utilizado para a realização desse artigo foi o aço SAE 300M, fornecido pelo DCTA em forma de chapas com as seguintes dimensões: 150x 470x 3,7mm. O relatório de recebimento do material, realizado pela Divisão de Materiais (AMR, antiga PMR) do IAE/DCTA mostra os elementos químicos presentes na chapa. Os resultados estão apresentados na Tab (1):

Tabela 1. Análise química do aço 300M recebido pelo DCTA (RELATÓRIO PMR, 1986).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	V (%)
0,40	1,54	0,74	0,007	0,001	0,79	0,35	1,65	0,05

2.2. Soldagem

O processo de soldagem adotado foi o plasma, realizado no laboratório de mecânica do IAE utilizando o método “Keyhole”, com um único passe, dentro dos critérios utilizados na soldagem dos envelopes motores. A Tabela (2) especifica os parâmetros utilizados durante o processo de soldagem.

Tabela 2. Parâmetros utilizados durante o processo de soldagem.

Distância Tocha/ Peça (mm)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Corrente (A)	Gás Piloto (L/min)	Gás de Proteção (L/min)	Gás de Purga (L/min)	Velocidade do Arame (m/min)
4,0	200	133	2,3	10	15	0,5

O argônio foi utilizado como gás piloto, gás de proteção e gás de purga, o metal de adição utilizado foi o Turbaloy 17-22 AMS 6458H da MC-GRADE, disponibilizado pelo IAE, cuja composição está listada na Tab. (3):

Tabela 3. Composição química do metal de adição Turbaloy 17-22.

C (%)	Mg (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)	V (%)
0,28 – 0,33	0,45 – 0,65	0,55 – 0,75	1,15 – 1,35	0,25	0,40 – 0,60	0,35	0,20 – 0,40

2.3. Tratamento Térmico

O tratamento térmico realizado no laboratório de tratamentos térmicos do IAE/ DCTA, consistiu em uma normalização a 930°C durante 40 minutos, seguido de uma austenitização a 980°C por 60 minutos, uma têmpera em banho de sal a 200°C e por fim um duplo revenimento a 280°C por 2 horas e intervalo de 1h entre eles. Tais parâmetros utilizados são os mesmos na realização do tratamento térmico do envelope motor do VLS.

2.3. Ensaio de Tração

Os corpos de prova foram usinados por eletro erosão na Divisão de Suporte Tecnológico do IEAv de acordo com a norma ASTM E8 M. Foram fabricados 3 corpos de prova para cada situação analisada e 5 para o material conforme fornecido e após tratamento térmico, totalizando 28 corpos de prova. A Figura (1) ilustra os corpos de prova utilizados.

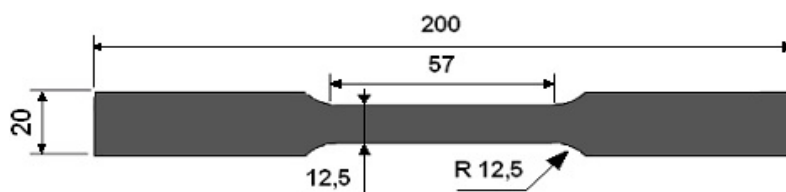


Figura 1. Representação do corpo de prova usinado, (unidades em mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o término da soldagem, foi possível analisar a qualidade do processo desenvolvido. A Figura (2) mostra os cordões de solda, onde a figura A representa a parte denominada topo da solda, a figura B representa a raiz do cordão de solda. É possível perceber que a soldagem ocorreu uniformemente e que nenhuma das partes apresenta falta de alimentação. A análise dos resultados obtidos nesse trabalho será dividida em duas partes: aço 300M soldado sem realização de tratamento térmico e 300M soldado com posterior tratamento térmico.

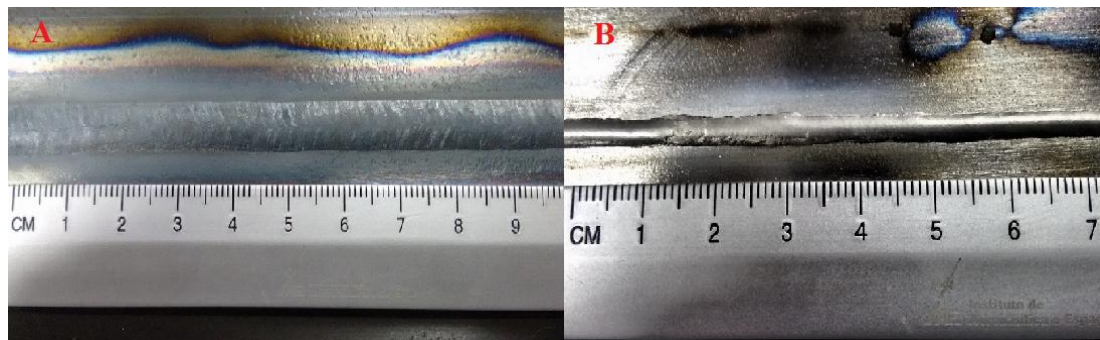


Figura 2. Cordão de solda realizado na chapa de 300M.

3.1. Amostra sem Tratamento Térmico

A análise microscópica do aço 300M sem tratamento térmico apresentou algumas diferentes fases e microconstituintes ao longo da amostra estudada. Utilizou-se o microscópio óptico marca Zeiss Axio Imager A2m, com auxílio da câmera AXIOCAM e software AXIOVISION da empresa ZEISS. A Figura (2) foi retirada com uma pequena ampliação para demonstrar as diversas microestruturas, partindo do material como fornecido até a zona fundida do material.

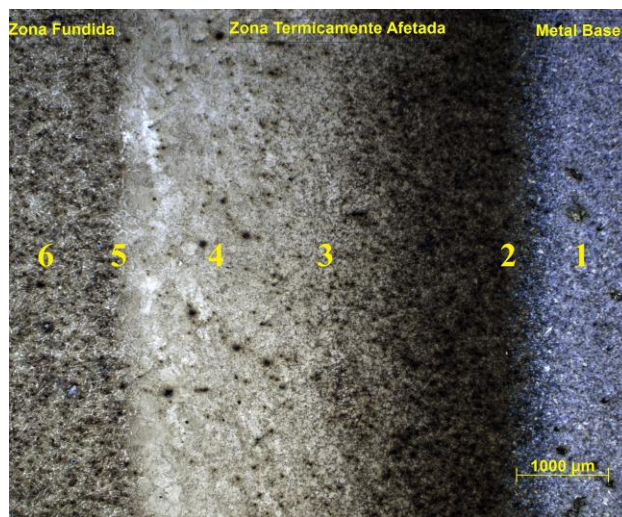


Figura 3. Regiões visíveis do 300M soldado sem tratamento.

A região identificada pelo número 1 na Fig. (3), localizada distantemente da zona fundida, é denominada metal base e apresenta uma estrutura composta de ferrita e perlita. A perlita é composta por uma mistura eutetóide de ferrita e cementita de lâminas alternadas, adquirindo características de ambas as estruturas. Já a área identificada pelo número 2, na região localizada entre o metal base e a ZTA caracteriza uma região onde há o início de uma mudança de fase, gerado pelo calor do processo de soldagem. A microestrutura formada apresenta ferrita e austenita retida na coloração mais clara, por sua vez, a fase mais escura, consequente da rápida transformação da austenita pode ser formada por bainita e martensita, no entanto, o nital não é o reagente mais adequado quando se deseja identificar várias fases presentes em um aço multifásico, conforme Fig. (4) que está com uma lente de ampliação de 50x.

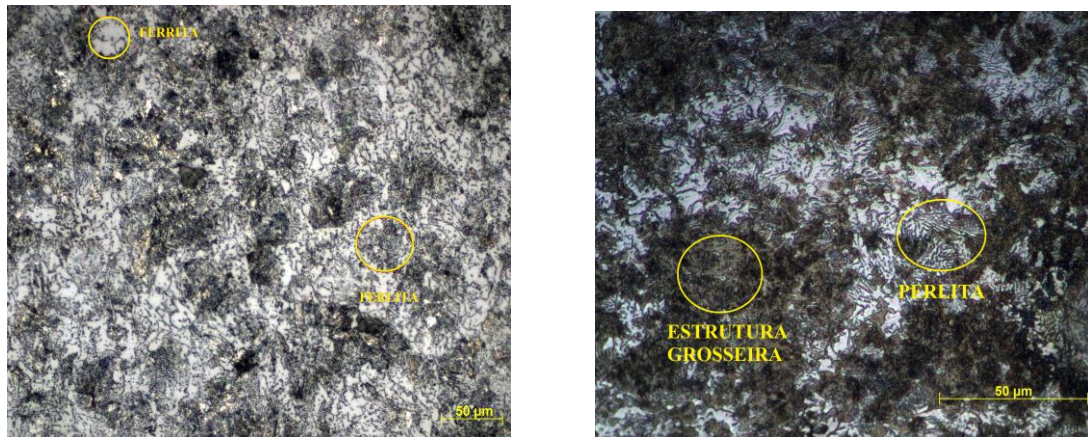


Figura 4. Microestrutura metal base 300M e região localizada entre o metal base e ZTA.

Torna-se possível afirmar que a região representada pelo número 3 apresenta uma estrutura martensítica, possuindo a aparência de agulhas finas e além de alta dureza, na faixa de 50 a 60 Rockwell C. Tais martensitas encontradas nas regiões 3 e 4 diferem com relação ao tamanho do grão, uma vez que quanto mais próximo do cordão de solda a amostra estiver mais calor ela recebe, o que não influenciou na dureza, que permaneceu constante, conforme Fig. (5).

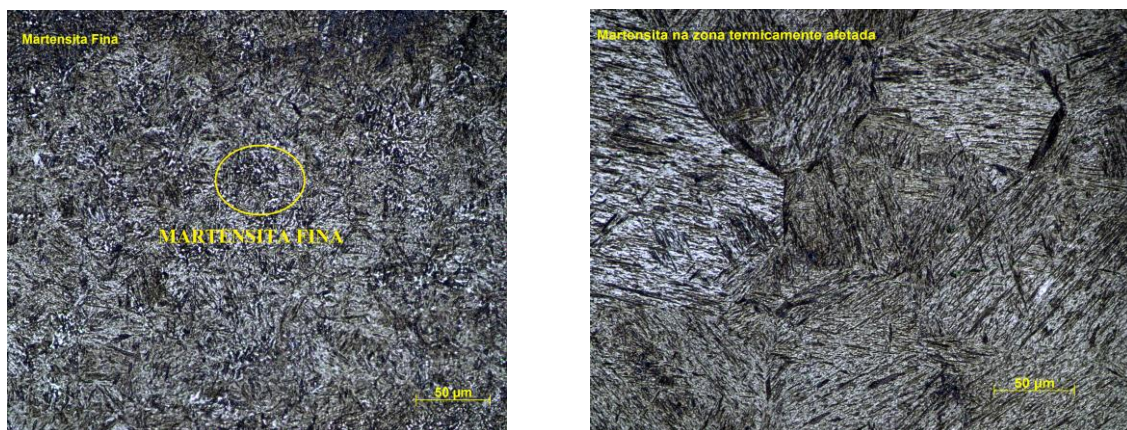


Figura 5. Martensitas encontradas ao longo da ZTA do 300M.

A região adjacente a Zona Fundida, indicada pelo número 5 também conhecida por zona parcialmente fundida esta detalhada na micrografia da Fig (6). Nota-se um aumento considerável do contorno de grão resultado de uma elevada temperatura submetida durante o processo, podendo ser possível inferir através da análise do diagrama ferro-carbono que as temperaturas envolvidas na zona parcialmente fundida estão no campo líquido mais sólido (L + γ), não suficiente para fundir totalmente o metal base.

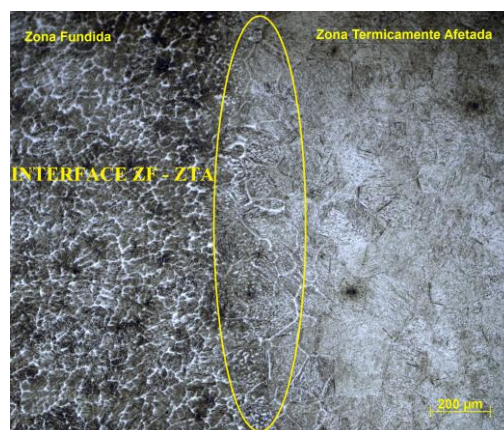


Figura 6. Zona Parcialmente Fundida do aço 300M.

Dentro da zona fundida, região indicada pelo número 6 forma-se uma estrutura típica de fusão. A estrutura dendritica formada nesta região apresenta uma composição química que é resultante da composição química da chapa com a composição química do metal de adição. Os grãos não se formam de maneira homogênea e instantânea, mas sim por algumas camadas, sendo que o líquido remanescente entre elas se solidifica mais tarde. O gradiente de composição entre o primeiro e o último material a solidificar é denominado segregação dendrítica e é facilmente revelado pelo nital, conforme Fig. (7).

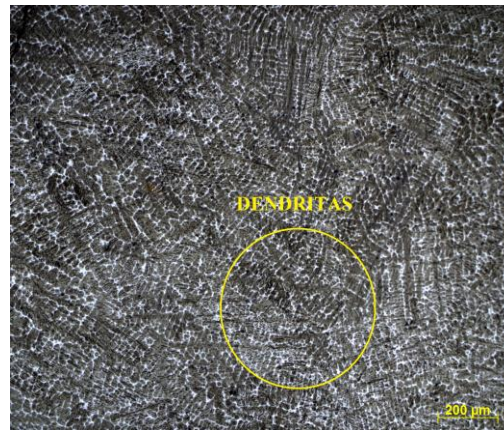


Figura 7. Dendritas encontradas na zona fundida do material sem Tratamento Térmico.

3.2. Amostra com Tratamento Térmico

O tratamento térmico é utilizado para aliviar as tensões geradas durante o processo de soldagem, porém, nesse caso, o tratamento térmico realizado tem como objetivo atender os requisitos de projeto. A micrografia da solda após este tratamento pode ser vista na Fig. (8).



Figura 8. Regiões visíveis no 300m após tratamento.

As variações de microestrutura do metal base e ZTA foram substituídas por uma microestrutura de martensita revenida, ampliada da região 1, conforme Fig. (9).

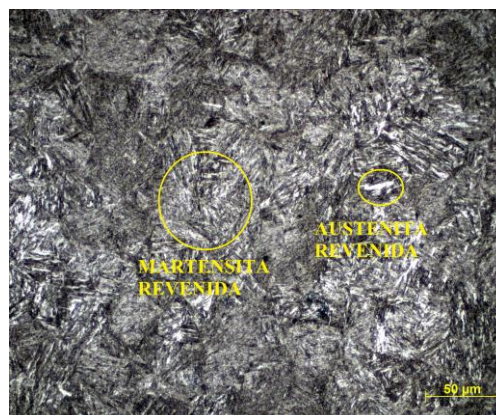


Figura 9. Martensita encontrada como resultado do Tratamento Térmico.

A região localizada na interface entre a zona fundida e o metal soldado, identificada pelo número 2 esta ampliada na Fig. (10). Percebe-se que o ciclo de tratamento térmico não foi capaz de eliminar os traços da região parcialmente fundida, também não foi capaz de refinar os grãos da zona termicamente afetada que cresceram em função das altas temperaturas desenvolvidas durante a soldagem. A região identificada com o número 3, deixando claro que o ciclo de tratamento térmico do aço 300M não elimina as dendritas formadas durante a solidificação da zona fundida. Algumas segregações são suavizadas, mesmo atacando com o nital ainda existe segregação de composição química.

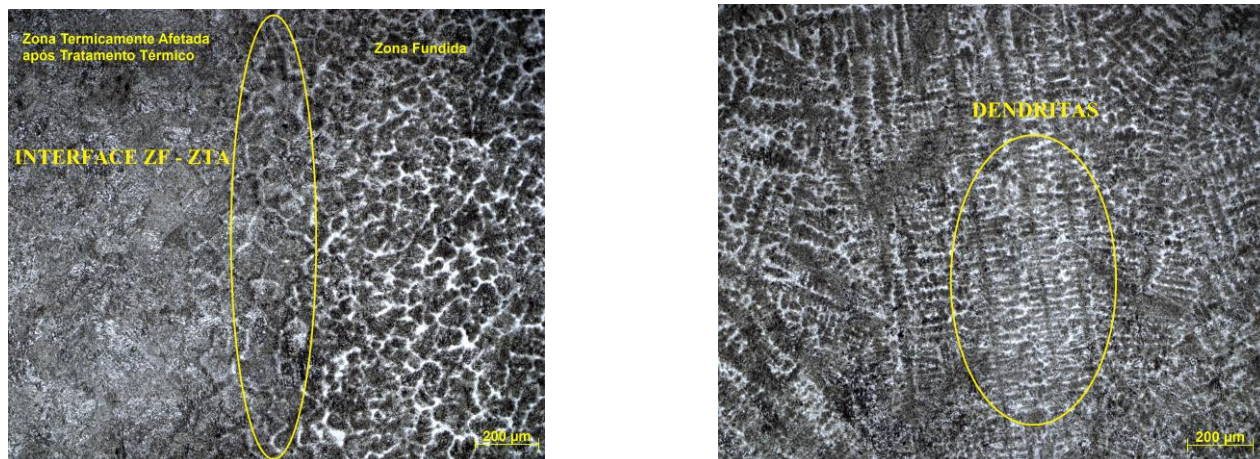


Figura 10. Zona Parcialmente Fundida e Zona Fundida do aço com tratamento térmico.

3.3. Análise de Dureza

Os dados coletados através da medição de microdureza das amostras foram agrupados em 4 gráficos distintos, aço 300M sem tratamento térmico no sentido longitudinal e no sentido transversal e 300M com tratamento térmico no sentido de laminação longitudinal e no sentido transversal. Os valores do aço 300M como fornecido e do 300M com realização de tratamento térmico foram utilizados como uma média para as outras medidas.

Nas Figuras (11) e (12) a origem do eixo das abcissas foi tomada como referência a partir do centro do cordão de solda, de maneira a tornar a leitura mais simples e facilitar a comparação entre os valores obtidos para o topo, raiz e transversal, além de ser possível caracterizar as durezas com as zonas presentes nas amostras.

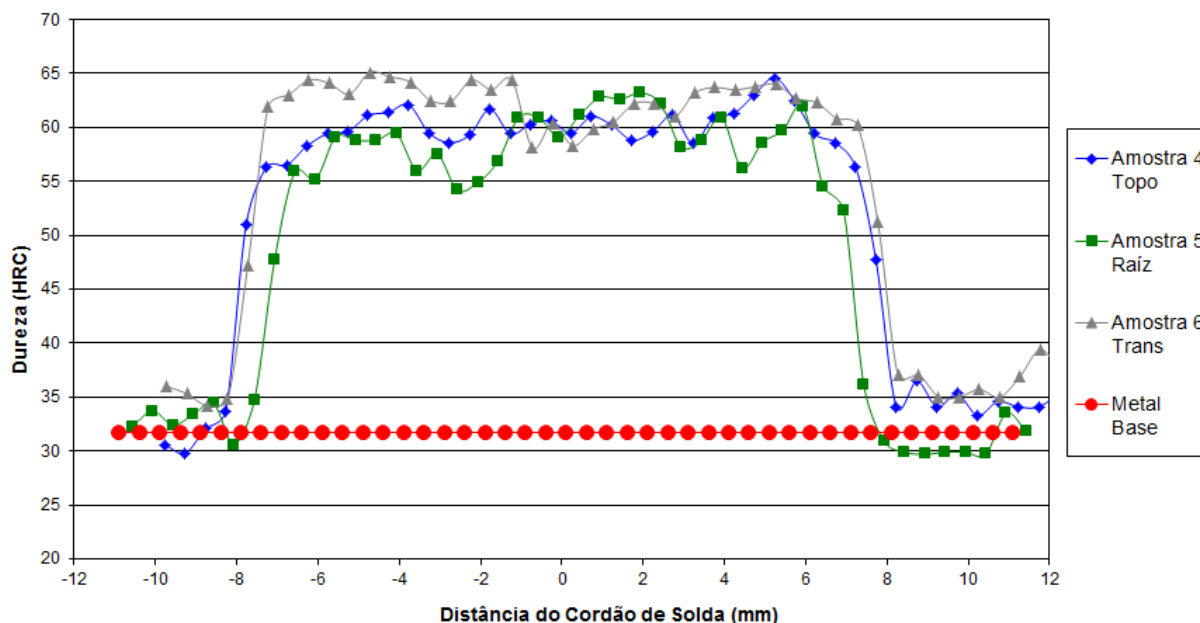


Figura 11. Curvas obtidas do 300M sem tratamento térmico no sentido longitudinal da laminação.

Os perfis de dureza mostrado no gráfico não permite diferenciar as dimensões da solda no topo e na raiz. A largura do cordão no topo mede aproximadamente 8 mm e a largura na raiz mede 4mm. É possível afirmar que a extensão da ZTA mede 16 mm e que o tamanho do cordão de solda no topo e na raiz praticamente não interfere na sua extensão, além disso, na região posterior a zona termicamente afetada (entre -11 e -8 e 8 e 11) é possível perceber que o aço não sofreu alterações em sua microestrutura durante o processo de soldagem. A raiz da amostra apresentou uma ZTA com tamanho ligeiramente inferior quando comparada com o topo, isso pode ser explicado devido ao fato da soldagem acontecer na face oposta ao da raiz, ou seja, a quantidade de calor na qual ela é submetida por transferência de calor foi menor.

Por fim, a dureza medida na ZTA diverge na ordem de 50% quando comparado com o metal base. Portanto, considerando que não haja problemas na solda, como falta de arame de adição, gás de proteção insuficiente durante o processo de soldagem ou até mesmo trincas, não se espera que ocorra falhas no ensaio de tração, ou seja, é esperado neste ensaio que todas as rupturas ocorram dentro da zona útil de ensaio, no metal base.

O tratamento térmico realizado neste trabalho se fez importante para satisfazer as condições de projeto, dureza por volta de 60 Rockwell C, além de uniformizar a faixa de dureza de maneira que a amostra possa ser submetida a maiores esforços, quando comparado com a mesma amostra sem realização de tratamento térmico. O resultado obtido através do mesmo ensaio de microdureza para o aço 300M com tratamento térmico é conforme Fig. (12).

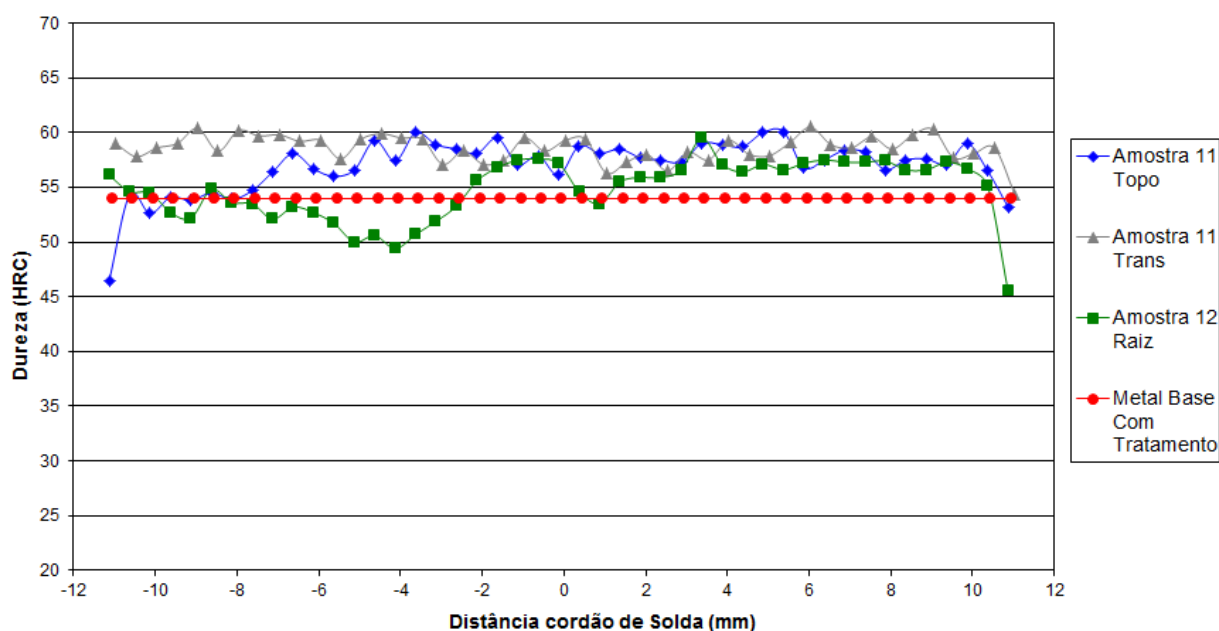


Figura 12. Curvas obtidas do 300M com tratamento térmico no sentido longitudinal da laminação.

Com a realização do tratamento térmico nas chapas, percebeu-se que a variação de dureza encontrada anteriormente não está mais presente, tornando o gráfico mais linear. A ZTA foi totalmente eliminada com a realização do tratamento térmico, pois a variação presente nas extremidades dos gráficos desapareceu modificando a estrutura perlitica presente no metal base para uma estrutura de martensítica revenida.

O tratamento térmico também mostrou que os valores encontrados estavam próximos do valor médio do metal base tratado e sem soldagem, principalmente com relação a zona fundida, uma vez que o valor médio encontrado nas medições para a amostra sem solda divergiam significativamente.

3.4. Ensaio de Tração

Com o ensaio de tração realizado foi possível coletar os seguintes dados, limite de resistência mecânica, limite de escoamento, tensão de ruptura e o alongamento dos corpos de prova. Através desse ensaio, foi realizado os gráficos para comparação entre as seguintes condições: metal base com metal base soldado sem tratamento e metal base tratado com metal base soldado com posterior tratamento térmico, conforme Fig. (13).

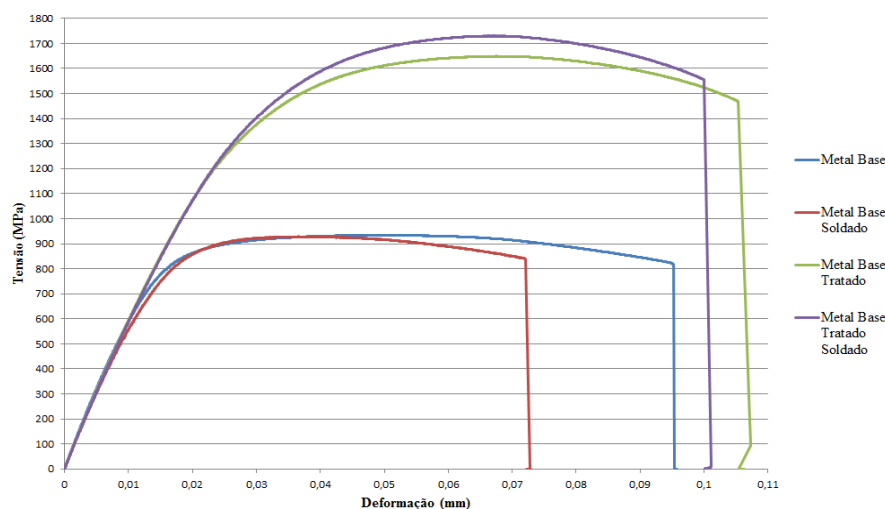


Figura 13. Dados obtidos após realização do ensaio de tração.

Analisando a Fig. (13) é possível perceber que a tensão máxima exercida para o metal base e o metal base soldado foi muito próxima, cerca de 920 MPa, ou seja, a realização da soldagem não afetou tal característica, a diferença entre eles surge com relação ao tamanho da deformação até a ruptura. O corpo de prova soldado sem tratamento térmico apresentou uma deformação ligeiramente menor, (0,07 mm do metal base soldado contra 0,095 mm do metal base) resultado das diferentes microestruturas e aumento do grão, tornando o material menos tenaz que o material como fornecido.

Com relação aos resultados do aço com tratamento térmico percebe-se que as tensões máximas estão próximas, no entanto é visível o crescimento significativo da tensão máxima quando comparamos as situações com e sem tratamento térmico, que passou de aproximadamente 920 MPa no primeiro caso, citado anteriormente para cerca de 1700 MPa mostrando a eficiência e a importância da realização do tratamento térmico para esse material.

Por fim, a deformação da chapa soldada e tratada foi menor, no entanto, essa diminuição é muito pequena quando comparada com a chapa somente tratada, na ordem de 0,01 mm, não afetando a sua aplicação. O ensaio de tração também mostrou que a realização do tratamento térmico melhorou algumas características do aço, como a tenacidade, uma vez que a área do gráfico para a situação soldada com posterior tratamento térmico foi maior.

4. CONCLUSÕES

O aço 300M na condição soldada e sem tratamento térmico apresentou nas micrografias uma série de microestruturas distintas, mostrando que a alta temperatura do processo de soldagem gera uma faixa de resistências mecânicas diferente do aço 300M fornecido. Por sua vez, a realização do tratamento térmico no 300M soldado apresentou uma microestrutura martensítica uniforme ao longo da amostra provocando elevação da dureza e eliminando a alta variação presente na amostra citada anteriormente.

O ensaio de tração comprovou a qualidade do processo de soldagem a plasma, uma vez que as amostras soldadas sem tratamento térmico foram rompidas na região do 300M como fornecido, região de menor dureza, além disso, também mostra a importância da realização de um tratamento térmico, que neste caso melhorou algumas propriedades do material como a tensão máxima antes da ruptura.

Foi possível realizar uma comparação das propriedades mecânicas entre o sentido longitudinal e transversal de laminação da chapa. Os resultados obtidos mostram que existe diferença na escolha do sentido de laminação com relação à tensão de ruptura, no entanto, essa divergência de valores é pequena, na ordem de 2%, tornando a escolha desnecessária.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Wanderlei Rodrigues Monteiro e Elenice Aparecida Monteiro por todos os ensinamentos durante a vida e principalmente por acreditarem no meu potencial, dedicando esforços e investimentos para que eu estivesse aqui;

Ao DCTA, em especial ao IAE que me forneceu os equipamentos necessários;

Ao IEAV, que me aceitou como colaborador técnico científico para realização deste trabalho, disponibilizando seus recursos;

6. REFERÊNCIAS

Anazawa, R. M. 2007. Caracterização Mecânica e Microestrutural de um Aço 300M com Microestrutura Multifásica. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 194f.

Cardoso A. S. M. 2010. Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Aços SAE 4340 e 300M Após Soldagem a Laser e Tratamento Superficial de Nitretação a Plasma. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 115f.

Lama, J.L.G. 2001. Estudo da Influência de Reparos na Resistência Mecânica de Juntas Soldadas de Chapas Finas de Aço 300 M. Guaratinguetá – São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. 132f.

Oliveira, R. C. de. 2015. Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Aços 300M e Maraging 300 após Soldagem a Plasma. Dissertação de Mestrado Materiais e Processos de Fabricação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 81f.

Silva, A.L.V.C.; Mei, P.R. 2006. Aços e Ligas Especiais: Classificação e seleção de aços - 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 646p.

Schuller, D. 2016. Determinação da Tenacidade à Fratura do Aço Aeronautico 300M, Submetido a Diferentes Parametros de Tratamentos Térmicos e Criogenia, Utilizando Técnica do Corpo Cilindrico com Entalhe. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo São Carlos. 147f.

Tomita, Y.; Okawa, T. 1993. Effect of Microstructure on Mechanical Properties of Isothermally Bainite-Transformed 300M Steel. Materials Science and Engineering A. p.145-151.

DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

STUDY AND COMPARISON OF THE MECHANICAL RESISTENCE OF THE JOINT WELDED BY THE ULTRA HIGH RESISTANCE STEEL PLASMA PROCESS 300M.

Rafael Augusto Monteiro, monteiro-rafa@hotmail.com¹

Tarcísio Gonçalves de Brito, brito.tarcisiog@gmail.com¹

Davi Neves, davis@ieav.cta.br²

Eduardo Miguel da Silva, eduardosilva@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II – CEP: 35903-087, Itabira – MG.

²Instituto de Estudos Avançados – IEAv, Trevo Cel Aviador José Alberto Albano do Amarante, 1 – Putim – CEP: 12228-001, São José dos Campos – SP.

Abstract: The 300M steel is a high strength steel, similar to SAE 4340 steel, developed by DCTA in conjunction with Brazilian companies. Highly used in the aeronautical industry for the construction of envelopes of rocket engines and aircraft landing gear, due to the high mechanical resistance. Some of the problems faced not using this steel is related to machinability, due to the high silicone content and a weldability due to the high temperature. In the heat treatment it is necessary to use controlled atmosphere ovens or salt baths to avoid decarbonization. This work investigates the process of welding a 300M steel plasma, comparing the performance of the welded joint in parallel and perpendicular cords to the rolling direction. Comparison of metallographic, mechanical, tensile and microhardness tests on the performance of the welded joints and influence of a double-residue thermal treatment. Mechanical tests, such as tensile testing, of the material before and after the treatment and metallographic preparation for later a microstructural analysis of the material and between both process. Eight steel plates were used where 4 were not cut without direction of the lamination and another 4 were not transverse direction of the lamination, so that a difference between the directions of lamination for the use of the steel and the process can also be analyzed and compared.

Keywords: ultra high strength steel, aeronautical industry, weldability, decarburization, plasma welding