# Tratamento térmico e de superfície dos aços 4340 e 300M após soldagem a laser

Surface heat treatment of steel 4340 and 300M steel after laser welding

Andréia de Sousa Martins Cardoso<sup>1</sup>, Antonio Jorge Abdalla<sup>1</sup>, Milton Sérgio Fernandes Lima<sup>1</sup>, Vladimir H. B. Scheid<sup>1</sup>, Carlos Antonio Reis Pereira Baptista<sup>2</sup>

#### RESUMO

O aço de médio carbono e baixa liga SAE 4340 vem passando por diversas modificações e neste processo de desenvolvimento surgiu o aço 300M. Estes aços são usados em condições severas onde são necessárias alta resistência e tenacidade. A compreensão da soldabilidade de aços alta resistência e baixa liga (ARBL) e acos de ultra-alta resistência tem sido objeto de especial interesse. O presente trabalho visa avaliar e comparar a microestrutura e a resistência mecânica em chapas de um aço 4340 e um aço de ultra-alta resistência 300M, após soldagem a laser e tratamentos: térmico de revenimento a 400°C durante 2 horas e de superfície a plasma (nitretação) a 500°C no período de 3 horas. Os resultados mostraram que o cordão de solda apresentou alta dureza e pequena zona termicamente afetada. Observou-se também que o aço 300M apresentou trincas na superfície após nitretação a plasma, levando à ruptura prematura dos corpos de prova, após este tratamento de superfície. Pôdese concluir que a solda a laser e os tratamentos propostos para os aços 300M e 4340 são viáveis, com a manutenção das propriedades de tração em níveis elevados.

**Palavras-chave:** Aço 4340; Aço 300M; Soldagem a laser; Nitretação a plasma.

#### ABSTRACT

The medium carbon-steel low-alloy SAE 4340 has undergone several modifications giving rise to the 300M steel. Both steels have been used in extreme conditions where high strength and toughness are needed. The understanding of the weldability of high-strength low-alloy steels and ultra-high strength steels has been the subject of particular interest. This study aims to evaluate and compare the microstructure and mechanical strength of class 4340 and 300M steel sheets after laser welding and heat treatment. Annealing was carried out at 400°C for 2 hours and surface plasma nitriding at 500°C during 3 hours. The results showed welds with high hardness and small heat affected zones. It was also observed that 300M steel presented cracks at the surface after plasma nitriding, leading to premature rupture of the specimens. It was concluded that the laser welding and the treatments for the 300M and 4340 steels are viable, with retention of high tensile strength.

**Keywords:** 4340 steel; 300M steel; Laser welding; Plasma nitriding.

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados - Sao José dos Campos (SP), Brasil.

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de Lorena – Lorena (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Andréia de Sousa Martins Cardoso – Rua Irmã Maria Demétria Kfuri, 560, apt 116 – CEP 12242-500 – São José dos Campos (SP), Brasil

E-mail: bra\_afs@hotmail.com

Recebido em: 11/11/2011 Aprovado em: 17/10/2014

5

## INTRODUÇÃO

Os aços SAE 4340 e 300M têm sido utilizados em trens de pouso de aeronaves, envelopes motores para foguetes, em junções de algumas partes de veículos lançadores de satélites e outros fins estruturais nas indústrias automotivas e de equipamentos. Os acos estruturais da série 43XX, entre eles o 4340, também vêm sendo empregados em aplicações que anteriormente eram restritas a aços mais nobres como os aços ferramentas<sup>(1,2)</sup>. O aço 300M foi desenvolvido como uma evolução tecnológica do aco 4340 e possui maior resistência à tração e excelente combinação entre resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga e ductilidade, mostrando potencial para substituição do aço 4340 em muitas aplicações<sup>(3,4)</sup>. O aço 300M é basicamente uma modificação do aço SAE 4340 pelo teor de silício (tipicamente: 300M - 1,60% Si; 4340 - 0,27% Si) e pela introdução de vanádio, com teores de carbono e molibdênio ligeiramente superiores<sup>(5)</sup>. Seu maior teor de silício aumenta a profundidade de têmpera, aumenta o endurecimento por solução sólida e diminui a tendência ao amolecimento em temperaturas elevadas<sup>(6)</sup>.

O estudo da soldabilidade desses aços tem sido objeto de especial interesse, visto que, ao ser soldado pelos processos convencionais, observa-se uma perda na resistência mecânica e na ductilidade<sup>(7)</sup>. A interação e entendimento da soldagem a laser em aços ARBL e ultra-alta resistência é de grande interesse nas indústrias automobilísticas e aeroespacial, principalmente visando a correlação das propriedades mecânicas, com processos de soldagem e tratamentos térmicos (recozimento, normalização, envelhecimento), assim como, termoquímicos (nitretação)<sup>(16,17)</sup>. O processo de solda com laser a fibra, que inevitavelmente envolve fusão e solidificação, tem intensidade e largura temporal de pulsos variando de 10<sup>4</sup> a 10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> e 10<sup>-4</sup> e 1s, respectivamente.

A soldagem é realizada sem metal de adição (autógena) e pode ocorrer por meio de dois diferentes mecanismos: condução ou penetração<sup>(8)</sup>. O material é fundido durante a operação de soldagem e se resfria rapidamente. Neste caso, o material ressolidificado não tem tempo suficiente para sofrer transformações de fases governadas por difusão e a sua estrutura torna-se praticamente martensítica, tanto na zona fundida (ZF) como na zona térmicamente afetada (ZTA)<sup>(7)</sup>. Embora seja bem conhecido o fato de que a adição de vanádio leva ao refino de grão e endurecimento por precipitação dos aços ARBL, seu efeito sobre as propriedades da ZTA ainda é pouco conhecido. Chen e colaboradores<sup>(9)</sup> verificaram que teores de vanádio até 0,047% resultaram em boa combinação de resistência e tenacidade ao impacto, enquanto que teores de 0,097% e 0,151% levaram ao aumento da resistência mecânica, bem como do tamanho do microconstituinte MA (martensita e austenita), além de redução da resistência ao impacto.

No estudo os aços soldados são submetidos aos tratamentos, térmico de revenimento e de superfície de nitretação a plasma, ambos pós-soldagem, visando melhorar as propriedades dos materiais. Conclui-se que é de grande interesse comparar os aços SAE 4340 e 300 M, soldados a laser e em seguida submetidos aos tratamentos de revenimento e de superfície pós-soldagem, tendo como objetivo caracterizar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos aços em suas diferentes condições.

#### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aços SAE 4340 e 300M com dimensões aproximadas de 1,15 x 0,5 metros e espessura de 3,75 milímetros para o aço 300M e 4,13 mm para o aço 4340, fornecidas pelo IEAv/DCTA e produzidos pela Eletrometal Aços Finos S.A. As chapas foram submetidas ao tratamento térmico de normalização a 950°C, durante 2 horas e resfriadas ao forno a vácuo com atmosfera controlada pertencente ao IEAv/ CTA até a temperatura ambiente, tendo como objetivo eliminar os efeitos da laminação.

A composição química dos aços, apresentada na Tabela 1, foi determinada na Gerdau S.A. empregando-se amostras retiradas das chapas tratadas e soldadas.

O laser à fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA). Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) dotado de uma fibra de saída com 50 µm de diâmetro e 5 metros de extensão. Foram utilizadas soldas por penetração autógenas nas chapas cortadas nas dimensões 280X180mm e retificadas em aproximadamente 3 mm para ambos os materiais. Os parâmetros de soldagem aplicados foram: potência de 1400 watts para o aço 300M e 1600 watts para o aço 4340, velocidade de soldagem de 50 mm/s e fluxo de Argônio de 30 l/min. O foco foi na superfície das chapas com inclinação da cabeça de 5º e distância focal de 160,5 mm com a lente em 160 mm. O nitrogênio foi utilizado como gás de proteção da cabeça do dispositivo.

Visando reduzir as tensões geradas na etapa de soldagem foi realizado o tratamento de revenimento, que ocorreu em um forno elétrico (mufla), a 400°C por 2 horas.

O tratamento de superfície de nitretação a plasma ocorreu em temperatura de 500°C durante 3 horas, em uma atmosfera com

V 0,006 0,004 V 0,08 0,08

4340	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Cu	AI	Ti
MB	0,39	0,3	0,69	0,016	0,007	1,8	0,81	0,22	0,12	0,023	0,001
CS	0,35	0,27	0,68	0,018	0,004	1,9	0,8	0,21	0,12	0,02	0,000
300M	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Cu	AI	Ti
MB	0,44	1,83	0,82	0,008	0,006	1,68	0,77	0,39	0,14	0,036	0,003
CS	0,43	1,83	0,83	0,008	0,007	1,69	0,78	0,39	0,13	0,035	0,004

Tabela 1: Composição química dos aços no Metal Base (MB) e Cordão de Solda (CS).

mistura de gases, num reator a plasma da empresa Metal Plasma. As amostras limpas e desengraxadas foram nitretadas em um reator que utiliza uma fonte de tensão/corrente dc-pulsada de 400 kV, a câmara é de alto vácuo, feita em aço inoxidável, com um volume útil de 120 l e utiliza um sistema de bombeamento "roots" com uma vazão de 150 m<sup>3</sup>/h. As amostras foram tratadas em uma atmosfera gasosa contendo, 75% N<sub>2</sub> – 25% H<sub>2</sub> – 1,5% CH<sub>4</sub> visando à formação de uma camada fina de nitretos e carbonetos, sendo que a pressão foi mantida a 370MPa.

Foram retiradas amostras para as análises microestruturais dos materiais conforme recebidos, após soldagem a laser, após soldagem e tratamentos térmicos de revenimento e de superfície por nitretação a plasma. Os cordões de solda foram analisados no sentido transversal. Foram caracterizadas as zonas fundidas (ZF), zonas termicamente afetadas (ZTA), metal de base (MB) e zonas nitretadas (ZN). As medidas de microdureza foram realizadas em um equipamento Future Tech mod. FM-700, com carga de 50 gf e tempo de 9 s.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM E8M-95a, que especifica as condições para ensaios de tração para chapas metálicas à temperatura ambiente. O equipamento utilizado foi uma máquina servo-hidráulica MTS 810.23M, com célula de carga com capacidade de 250 kN. A velocidade do deslocamento do atuador foi de 1 mm/min e a taxa de aquisição de dados foi de 2 pontos por segundo. Foram ensaiados 3 cdps de cada condição de tratamento para cada um dos tipos de aço.

As amostras foram preparadas metalograficamente e foram atacadas com nital 2%, metabissulfito de sódio 10% e Klenn. As análises microscópicas foram realizadas via microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises da fração volumétrica de austenita retida foram realizadas com a utilização do *software* Image J, para ambos os materiais.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados de dureza (HV) são mostrados para as condições: material soldado (S), material soldado e revenido (SR), material soldado revenido e nitretado (SRN) e material soldado e nitretado (SN - visando verificar a profundidade das camadas nitretada (CN) e difusa (CD)). Os perfis de dureza foram na direção longitudinal do cordão de solda. No eixo Y encontram-se os valores de dureza em HV e no eixo X verificam-se as endentações. Cada ponto (endentação) foi marcado com uma distância de 140µm um do outro, para o aço 4340 e 120µm para o aço 300M. Nestes resultados, verificam-se o aumento da dureza na ZF e ZTA promovido pela precipitação de fases endurecedoras. Pode-se relacionar a maior dureza do aço 300M com a adição de elementos liga que favorecem a precipitação de carbonetos no MB e o surgimento de fases mais resistentes no cordão de solda, conforme mostrado na Fig. 1. Na Fig. 2 observa-se o perfil de dureza nos aços 4340 e 300M após o revenimento realizado a 400°C no período de três horas. Nota-se uma redução da dureza na região soldada e na ZTA e observou-se a ocorrência da aproximação no valor da dureza na região fundida, para os dois aços estudados.

A Fig. 3 mostra as modificações ocorridas na dureza após o tratamento de superfície de nitretação a 500°C, nota-se que este tratamento produz um efeito de revenimento na microestrutura, com redução na dureza na ZF e ZTA. A Fig. 4 mostra o perfil de dureza nos aços 4340 e 300M após tratamento de revenimento e nitretação a plasma, observou-se a redução nos valores de dureza na ZTA e ZF, contudo os maiores valores de dureza do perfil foram encontrados na trasição ZTA/ZF, com uma redução deste valor no centro da ZF.

Os dois aços, nas condições SN e SRN, apresentaram um pico de dureza na transição ZF/ZTA quando comparados com a ZF e ZTA das condições S e SR. Isto pode ser proveniente de



Figura 1: Dureza HV no cordão.







Figura 3: Dureza no CS, após tratamento superficial de nitretação a plasma dos aços.

precipitação secundária ocorrida em função da temperatura de nitretação de 500°C, que favorece este fenômeno, ou ser proveniente das segregações (correntes convectivas) e microssegregações (processo de solidificação) provenientes da soldagem a laser. A Tabela 2 mostra as alterações nos valores de microdureza na microestrutura dos aços soldado a laser, após tratamentos térmicos e termoquímicos, aplicados nos aços 4340 e 300M.

Na ZF (zona fundida) ocorreu elevação da dureza devido a formação de microconstituintes mais resistentes tais como a martensita e bainita, provenientes do rápido processo de solidificação. Na região de transição (ZTA) ocorre alteração parcial das fases, devido a elevação da temperatura até a região de austenitização e rápido resfriamento. Percebeu-se uma dureza mais acentuada no aço 300M, devido à presença de elementos de liga em maior teor, tais como o de Si que estabiliza a austenita, Mn favorece na temperabilidade e o de V (vanádio) que forma carbonetos e também leva ao refinamento de grão. Após revenimento há uma redução na dureza na região da ZF e ZTA, pois, com o aquecimento, o processo difusional é favorecido, levando ao alívio da tensão e movimentação de carbono e elementos de liga. A nitretação a plasma pôde observar a pequena formação de camada branca ou camada nitretada (CN), com alta dureza. Após esta CN, pôde-se estudar a formação de uma camada superficial de alta dureza nas bordas (CD), devido a difusão do nitrogênio na superfície. O tratamento de revenimento e posterior nitretação a plasma agiu como um duplo revenimento no



Figura 4: Dureza após revenimento e nitretação a plasma dos aços.

substrato e aumentou a dureza superficial proveniente da difusão de nitrogênio.

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL AÇO SAE 4340

A microestrutura do MB pode ser observada na Fig. 5, sendo composto por uma matriz típica de aço médio carbono, com presença de perlita e ferrita.

Nas análises químicas via EDS foi possível observar a presença de microconstituintes tais como: carbonetos e α-ferrita, mostrando que o MB é composto por matriz perlítica em sua maioria, contudo apresenta a formação de outros microconstituintes.



(A) Escala 20  $\mu\text{m};$  (B) Escala 2  $\mu\text{m},$  Signal A=SE1, EHT=20.00kV, Mag=5.00KX, WD=15mm

Figura 5: Análise microestrutural via MO (A) e MEV (B), do MB do aço 4340 (CR).

Tabela 2: Resultados de dureza Vickers para os aços SAE 300M e 4340 (média de 3 pontos).

Dureza Vickers (HV)											
S (Soldado)											
	Borda	MB	ZTA	ZF	MB/ZTA	ZTA/ZF	CN				
300 M	295	327	638	719	456	709	0				
4340	218	224	496	621	387	625	0				
SR (Soldado e Revenido)											
300 M	296	331	471	544	407	506	0				
4340	231	241	472	452	389	483	0				
			SN (Soldado	e Nitretado)							
300 M	446	334	450	550	410	540	758				
4340	409	228	375	490	350	405	619				
SRN (Soldado, Revenido e Nitretado)											
300 M	582	286	350	457	360	475	553				
4340	336	218	386	442	275	425	577				

No cordão de solda dos aços 4340 apresentado na Fig. 6, observa-se a ZF, na qual encontramos uma microestrutura composta basicamente de martensita com presença de ferrita e austenita. A região fundida é aquela na qual a temperatura atingida pela exposição ao laser supera a temperatura liquidus do material e inicia-se fusão, com posterior solidificação na forma de austenita e resfriamento brusco levando às transformações, no qual teremos a matriz composta principalmente por martensita. Na ZTA encontramos duas regiões distintas: austenitizada e aquecida abaixo da temperatura de austenitização<sup>(11)</sup>. Na região onde ocorre a austenitização, após o resfriamento, observa-se a predominância de matriz bifásica (martensita e bainita). Na região de transição ZTA/MB encontra-se a decomposição parcial das fases presentes em subprodutos tais como carbonetos e ferrita. A presença de martensita, conforme visto também pelos autores Lee e Su<sup>(12)</sup> é responsável pela alta dureza e fragilidade oriundas do resfriamento rápido.

Na Figura 7 observa-se a microestrutura da ZF do cordão de solda, com predominância de martensita, verifica-se também a formação dendrítica que mostra o processo de transferência de calor e solidificação, após passagem do feixe de laser. No cordão de solda dos aços hipoeutetóides, pode-se encontrar também ferrita, provenientes do processo de fusão e solidificação rápida<sup>(13)</sup>. Após caracterização do material soldado, foi estudado o aço após tratamento térmico de revenimento, no qual em análise visual, pode-se observar o crescimento de grãos. Na ZF foram vistas as formações das dendrítas equiaxiais, saindo da transição ZTA/ZF e se direcionando até o meio do cordão, já as dendrítas colunares foram encontradas no topo do cordão de



(A) Escala 100 μm; (B) Escala 10 μm, Signal A=QBSD, EHT=20.00kV, Mag=2.00 K X, WD=15 mm

Figura 6: Microestrutura da ZTA do aço 4340 em MO (A) e MEV (B).

solda, mostrando o processo de solidificação e possível processo de segregação de elementos químicos.

A Fig. 8 mostra a camada nitretada (CN) ou camada branca, formada na superfície do aço 4340 após tratamento superficial de nitretação a plasma, a qual foi realizada a temperatura de 500°C por 3 horas.

Os ataques químicos, Klenn e Metabissulfito, são utilizados para revelar fases específicas, estes revelam a austenita retida presente no material e podem indicar a presença de bainita (coloração marrom), para a verificação do aço SAE 4340, foram realizados os dois ataques, sendo necessário um pré-ataque com nital 1%, A Fig. 9 mostra alguns pontos brancos na transição ZF/ZTA e na ZF com fração volumétrica de 2% em média na transição e 3% em média na ZF, revelando a pre-sença de austenita retida e/ou microconstituinte MA<sup>(13)</sup>.



(A) Escala 20  $\mu m;$  (B) Escala 10  $\mu m,$  Signal A=SE1, EHT=20.00kV, Mag=1.00 K X, WD=15 mm





Escala 100 µm, Signal A=QBSD, EHT=20.00kV, Mag=300X, WD=13 mm **Figura 8:** Análise MEV da borda do aço 4340, após nitretação a plasma.



(A) Escala 20 µm; (B) Escala 30 µm.

Figura 9: Ataques químicos Klenn da Transição ZF/ZTA (A) e Metabissulfito da ZF (B), do aço 4340.

#### AÇO 300M

O MB do aço 300M é composto por uma matriz típica de aço médio carbono, com presença de perlita e ferrita poligonal. As Figs. 10 e 11 mostram imagens do MB do aço 300M obtidas por meio de microscopia óptica (MO), MEV e EDS. A constituição é basicamente ferrítica-perlítica.

A Fig. 12 mostra a análise por EDS, de um glóbulo branco, presente na microestrutura do aço 300M, indicando que este é um composto rico em cromo e também mostra traços de vanádio, sendo provavelmente um carboneto.

A Fig. 13 revela a sessão transversal do cordão de solda das chapas de aço 300M. A soldagem a laser autógena levou a formação de uma ZTA pequena para ambos os materiais quando



Escala 30 µm. Figura 10: Análise microestrutural via MO do meio do MB do aço 300M.

comparadas com outros processos de soldagens convencionais<sup>(16)</sup>. Pode-se notar a ocorrência de gradiente térmico, do centro da solda até o metal base produzindo alterações microestruturais. Na região central da ZF ocorreu fusão e solidificação rápida, apresentando fases duras como a martensita, ferrita e austenita retida. Com a passagem do feixe, têm-se a ocorrência de austenitização na transição ZF/ZTA, nesta região encontramos fases como a martensita e bainita, juntamente com a segregação de elementos de ligas. Os processos de macro e segregação presentes no CS e ZTA estão relacionados com as correntes convectivas proveniente da fusão e solidificação rápida. Após análises de EDS, na horizontal (em x) e na vertical (em y), da ZF/ZTA, foi possível observar o aumento de elementos tais como o cromo, manganês, molibdênio e aparecimento de vanádio, conforme visto na Fig. 14. Com a aproximação da ZTA ao MB encontramos material composto por bainita, perlita e carbonetos, contudo na transição ZTA/ MB observa-se o aumento de fases duras como a cementita e redução da fase ferrítica.

O cordão de solda dos aços 300M, na região fundida, encontra-se martensítico com presença de microssegregação nas redes dendríticas. A região da ZF é caracterizada pela presença de dendritas equiaxiais (no centro do cordão de solda) ou colunares (no topo).

O aço 300M também foi revenido a 400°C durante 2 horas no qual observou-se visualmente o crescimento de grãos proveniente da temperatura de tratamento<sup>(14)</sup> e presença de ferrita em alguns contornos do MB.





Figura 11: Análise de EDS, referente ao meio do MB do aço 300M, condição CR.



B		(	Mn	Elem.	Weight%	Atomic%
		(	6	С	4.51	17.73
			1	Si	1.18	1.99
60				S	0.49	0.73
N)				V	0.21	0.20
Mo				Cr	2.84	2.58
9				Mn	2.21	1.90
19	æ		60	Fe	87.12	73.72
C)	<sup>a</sup> s	er er	NI N	Ni	1.44	1.16
l	<u>1</u>	iī	i.			
0	2	4 6	8	10	12	14 16

Figura 12: Análise EDS dos precipitados dispersos na matriz perlitica do aço 300M.



(A) Escala 30 µm; (B) Escala 20 µm.

Figura 13: Análise de MO das transições da ZF/ZTA/MB (A) e ZF (B), do aço 300M.

A Fig. 15 mostra a CN, formada na superfície do aço 300M, após tratamento superficial de nitretação a plasma, na qual foi utilizada a temperatura de 500°C por 3 horas. Observa-se o



B	Mn				Elem	W%	Spe	Ation 5
	Fé				С	1.47		6.42
	1				Si	1.34		2.51
					v	0.17		0.17
(Fe)					Cr	1.70		1.72
1					Mn	1.34		1.28
Mo					Fe	91.1	5	85.78
â					Ni	1.63		1.46
Ň.		Fe			Мо	1.21		0.66
C MO	8	10.00						
			40					T
0 2	4 6	0	10	12	14	16	18	20
Full Scale 15121	cts Cursor: 0	0.000 keV						keV

Figura 14: Análise composicional por EDS da transição ZF/ZTA, do aço 300M.



(A) Escala 2  $\mu$ m, Mag=5.00K, Signal A=QBSD, EHT=20.00kV, WD=11mm; (B) Escala 100  $\mu$ m. Figura 15: Análise em MEV e MO da CN do aço 300M, soldado e nitretado.

trincamento da superfície do material nitretado, evidenciando a ocorrência de baixa tenacidade. Durante as análises em MO, foi possível verificar a espessura da camada nitretada, que apresentou 3 a 5µm para ambos os materiais, na condição SN. A camada difusa apresentou profundidade de 100 a 126µm para o aço 300M e de 109 a 139µm para o aço 4340. Na condição SRN a espessura da camada nitretada foi de 5 a 8µm para ambos os materiais. A camada difusa apresentou profundidade de 86 a 111µm para o aço 300M e de 87 a 119µm para o aco 4340.

Nos estudos de Nicolett<sup>(15)</sup> observou-se a precipitação de nitretos e a difusão de nitrogênio na superfície do aço, no aço 300M a precipitação e difusão causaram trincas na superfície do material, esta fragilização pode ser proveniente da precipitação de segunda fase em função da temperatura de nitretação. Os ensaios de tração e análise microestrutural corroboram na observação de que este tratamento superficial, com a temperatura de 500°C, não é ideal para o aço 300M. Foram feitos ataques químicos, Klenn e Metabissulfito no aço 300M, com intuito de revelar a austenita no material. A Fig. 16 mostra alguns pontos brancos na transicão ZF/ZTA e na ZF, revelando a presenca de austenita retida e/ ou microconstituinte MA<sup>(13)</sup>. Ao compararmos os dois materiais observou-se, na transição ZF/ZTA do aço 300M, o aumento da fração volumétrica (5%) da fase austenítica em função da maior quantidade de silício presente nesta região. A ZF apresentou uma queda na fração volumétrica de austenita retida (1,6% em média).

# **ENSAIOS MECÂNICOS DE TRAÇÃO**

Por meio do ensaio de tração, foram avaliados: o limite de resistência ( $\sigma_{r}$ ), limite de escoamento ( $\sigma_{e}$ ), tensão de ruptura ( $\sigma_{r}$ ) e alongamento percentual ( $\Delta L/L$ ) de cdps dos aços estudados nas seguintes condições: conforme recebido (CR), material contendo cordão de solda (S), material soldado e revenido (SR), material soldado nitretado (SN) e material com cordão de solda submetido a tratamento térmico posterior de revenimento e nitretado a plasma (SRN). As curvas tensão-deformação tiveram comportamentos distintos para os aços estudados.

A Tabela 3 sintetiza os resultados dos ensaios de tração e mostra a ocorrência de ganhos de resistência mecânica do aço SAE 4340 nas condições S e SR em relação à condição CR, sem perda da ductilidade. Os resultados dos ensaios de tração estão relacionados com as características microestruturais apresentadas na ZF e





Figura 16: Ataque Klenn (A) da ZF e transição ZF/ZTA e ataque metabissulfito (B).

ZTA, que passaram por transformações com a nucleação de fases duras (bainita e martensita) e algum refino de grão. Essa sinergia microestrutural aumentou a resistência mecânica no cordão de solda e ZTA.

No aço 4340 SN, a nitretação manteve a resistência do material soldado com ou sem o tratamento de revenimento, observando apenas uma redução nos níveis de ductilidade com a queda dos valores de  $\Delta$ L/L. Já os aços 300M, após tratamento de nitretação a plasma (SN e SRN), apresentam queda em ot e oe e redução crítica nos níveis de  $\Delta$ L/L. A baixa ductilidade indica que ocorreu fragilização, sendo que as possíveis causas para esse fenômeno estão associadas a dois eventos<sup>(10)</sup>: a) Precipitação secundária em contornos de grãos, sendo proveniente da temperatura de nitretação (500°C) e b) Formações de microtrincas na superfície do aço. Esta última foi verificada experimentalmente.

Aço 4340											
Condições	CR	S	SR	SN	SRN						
σ,	687 ± 11	718 ± 9	736 ± 14	745 ± 20	714 ± 28						
σ <sub>e</sub>	σ <sub>e</sub> 405 ± 3		418 ± 2 419 ± 3		454 ± 15						
σ <sub>r</sub>	562 ± 11	593 ± 21	621 ± 14	$652 \pm 39$	$609 \pm 8$						
ΔL/L (%) 21 ± 2		21 ± 0,8 22 ± 0,5		17 ± 2	17 ± 1						
Aço 300M											
Condições	CR	S	SR	SN	SRN						
σ,	940 ± 26	974 ±53	974 ± 10	815 ± 29	839 ± 18						
σ <sub>e</sub>	752 ± 30	788 ± 40	765 ± 33	723 ± 23	$705 \pm 20$						
σ <sub>r</sub>	840 ± 28	945 ± 41	870 ± 3	815 ± 29	839 ± 18						
ΔL/L (%)	11 ± 1,1	8,4 ± 0	12 ± 1	2 ± 0,1	$3 \pm 0,4$						

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos de tração (média de 3 ensaios).

# CONCLUSÕES

Os aços SAE 4340 e 300M apresentam microestrutura típica dos acos com médio teor de carbono, sendo que no aco 300M verificou-se a presença de precipitados provenientes devido a adição de elementos químicos, conferindo a este aço maiores limites de escoamento e resistência à tração, maior dureza e menor ductilidade medida pelo alongamento, quando comparado ao aço 4340. A soldagem a laser autógena dos aços (condição S) leva à fusão (ZF) e ao tratamento térmico local (ZTA) do material. Na ZF, ocorreram fusão e solidificação rápida, apresentando fases duras como a martensita. Na ZTA ocorreu a austenitização e com a troca de calor, a matriz apresentou-se predominantemente multifásica. O ganho de dureza que apareceu no aço 300M, com relação ao aço 4340, pode ser justificado pela composição química, que favoreceu a formação de carbonetos e precipitados de Cromo, Vanádio e Molibdênio. Na condição SR observou-se queda de dureza na ZF, mostrando que ocorreu alívio de tensão local, sendo que a ZTA e ZF mostraram resultados com valores próximos. Nos ensaios de tração observou-se que os cdps romperam no MB e os resultados foram superiores à condição CR. As propriedades mecânicas em tração da condição SR foram próximas à condição S para o aço 300M; já o aço 4340 na condição SR apresentou melhoria das propriedades mecânicas, indicando que o revenimento melhorou a microestrutura do MB deste aço. Na condição SN os aços 4340 e 300M apresentaram aumento de dureza próximo às superfícies, onde foram observadas as camadas nitretada e difusa. Após a nitretação, o aço 4340 apresentou aumento na resistência mecânica sem perda significativa de ductilidade. Quando revenido e nitretado após a soldagem, o aço 4340 apresentou resistência mecânica ligeiramente inferior à do material apenas soldado e nitretado, mostrando ser desnecessário o tratamento de revenimento antes da nitretação. A nitretação do aço 300M, com a temperatura e tempo escolhidos, levou à fragilização do material em ambas as condições (SN e SRN), resultando em uma queda significativa das propriedades mecânicas, o que indica que os parâmetros de nitretação para este aço devem ser revistos. O trabalho mostrou que a solda a laser dos aços 300M e 4340 é viável, com a manutenção das propriedades de tração em níveis elevados. Com esta finalidade os parâmetros da aplicação da solda a laser e da aplicação de tratamentos térmicos ou termoquímicos é de fundamental importância.

# REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK. Properties and Selection: Irons, Steels, and High- Performance Alloys, v I, 10. ed. Ohio (EUA): Metals Handbook, 1990. 2521p.
- LEE, W.-S.; SU, T-T.; Mechanical properties and microstructural features of AISI4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. Journal of Materials Processing Technology, v. 87, 1997. p. 198-206.

- CHANG, L.C.; BHADESHIA H.K.D.H. Carbon content of austenite in isothermally transformed 300M steel. Materials Science and Engineering, v. A184, 1994, p. L14-L19.
- ANAZAWA, R. M. Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica. 2007, 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.
- GRAÇA, M.L.A.; HOO, C.Y.; SILVA, O.M.M.; LOURENCO, N.J. Failure analysis of a 300M steel pressure vessel, Engineering Failure Analysis, v. 16, 2009, 182–186.
- TOMITA, Y.; OKAWA, T. Effect of microstructure on mechanical properties of isothermally bainite-transformed 300M steel. Materials Science and Engineering A, v.172, p.145-151, 1993.
- CARVALHO, S. M. Soldagem com laser a fibra do aço 300M de alta resistência. Dissertação de mestrado – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Área de Mecânica dos Sólidos e Estruturas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009, 80f.
- LIMA, M. S. F; GOIA, F. A; RIVA, R; SANTO, A. M. E. Laser Surface Remelting and Hardening of an Automotive Shaft Sing a High-power Fiber Laser, Materials Research, v. 10, no. 4, 2007. p. 461-467.
- CHEN, Y.T.; GUO, A.M.; WU, L.X.; ZENG, J.; LI, P.H. Microstructure and mechanical property development in the simulated heat affected zone of V treated HSLA steels. Acta Metall. Sin., v. 19(1), 2006, p.57-67.
- CARDOSO, A. S. M. Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma. Dissertação (Mestrado), 2011, 112 f. – Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.
- LIMA, M.S.F. Lasers in Material Processing. In: LACKNER, Lasers in Chemistry: Influencing Matter, 2008, p.1195-1209.
- LEE, W.-S.; SU, T-T.; Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. Journal of Materials Processing Technology, v. 87, p. 198-206, 1997.
- BHADESHIA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R.W.K.; Steels Microstructure and properties. 3nd ed. Oxford, EUA: Elsevier Ltd, 2006, 344p.
- MUJICA L.; WEBER S.; PINTO H.; THOMY C.; VOLLERTSEN F. Microstricture and mechanical properties of laser-melded joints of TWIP and TRIP steels. Materials Science and Engineering A, v. 527, p. 2071-2078, 2010.
- NICOLETTI, J.C., Caracterização microestrutural e mecânica de aços bifásicos de ulta alta resistência com médio teor de carbono. 2004. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.
- MARQUES P V, MONDENESI P J. Soldagem: fundamentos e tecnologia., Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz Bracarense – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 363 p. II (Didática). ISBN: 85-7041-437-4.
- CARDOSO, A. S. M., ABDALLA, A. J., BAPTISTA, C. A. R.P., LIMA, M.S.F.; Comparison of High Cycle Fatigue in 4340 and 300M Steel Welded with Fiber Laser, Advanced Materials Research, Vols. 891-892 (2014) pp 1507-1512.
- CARDOSO A.S.M., ABDALLA A. J., LIMA M. S. F.; Comparative study of laser welding and heat treatments done in three types of high strength steel: 4340, 300M, Maraging 300; SAE International, 2013.