

EFEITO DE CICLOS CURTOS DE AQUECIMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS, MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE AÇOS PARA ESTAMPAGEM UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Jéssica Celestina Teixeira¹, Mara Cristina Lopes de Oliveira², Renato Altobelli Antunes¹

¹Universidade Federal do ABC (UFABC), Centro de Engenharia Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS) -Santo André – SP

² Electrocell Ind. Com. de Equipamentos Elétricos LTDA – CIETEC – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – 05508-000 –
mara.oliveira@usp.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência de tratamentos térmicos de curta duração sobre as propriedades mecânicas em tração e a resistência à corrosão de dois tipos de aços para estampagem utilizados pela indústria automobilística nacional, o LNE380 e o LNE500. A intenção dos tratamentos térmicos de curta duração foi simular os ciclos de aquecimento e resfriamento a que esses materiais podem ser submetidos durante operações de reparo por soldagem. Após os tratamentos térmicos, os resultados indicaram que não houve alterações microestruturais significativas em ambos os aços, sendo sua microestrutura composta por ferrita e perlita. As propriedades mecânicas em tração não sofreram também alterações significativas após os tratamentos térmicos. Do mesmo modo, o comportamento de corrosão de ambos os aços foi pouco afetado após os tratamentos térmicos. Os valores de microdureza Vickers, por outro lado, apresentaram uma tendência de redução com o aumento do tempo e temperatura de tratamento.

Palavras-chave: aços para estampagem, tratamentos térmicos, microestrutura, propriedades mecânicas, corrosão

INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda pela utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) no setor automotivo, se tornam importantes estudos sobre a relação entre parâmetros de seus processos de fabricação, suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão para definir condições ótimas de processamento desses materiais.

Para o setor de reparos de carrocerias utilizando estes aços especiais há um ponto crítico que deve ser analisado, em relação às temperaturas às quais os aços possam ser submetidos em um processo de reparo por soldagem da carroceria, pois os aços ARBL são geralmente produzidos em ciclos térmicos não tradicionais e contêm componentes microestruturais cujas propriedades mecânicas podem ser alteradas em caso de exposição a elevadas temperaturas⁽¹⁾.

Desta forma, a análise de ciclos de aquecimento nos aços ARBL permite avaliar as possíveis alterações microestruturais, de forma que se torna possível aprimorar seus processos de fabricação, permitindo que sejam mantidas propriedades mecânicas adequadas sob a ação de diferentes condições agressivas do meio em que o material será aplicado.

O presente trabalho teve como objetivo investigar o efeito de tratamentos térmicos de curta duração sobre a microestrutura, propriedades mecânicas em tração e resistência à corrosão dos aços LNE 380 e LNE 500. Essa abordagem visou simular operações de reparo por soldagem desse tipo de aço durante seu processo de fabricação na indústria automobilística.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços utilizados neste projeto foram os aços NBR6656 LNE380 e LNE500. A composição química (Tab. 1) foi analisada no laboratório químico da empresa Scania Latin America, realizando a análise de elementos químicos com auxílio de dois equipamentos, um de Emissão Óptica da marca LECO – modelo GDS500A e um Gasômetro da marca LECO – modelo CS844. As amostras foram gentilmente doadas pela empresa Bruning Tecnometal, na forma de chapas retangulares no estado laminado a quente.

Tabela 1. Composição Química (%p) das amostras de aço LNE380 e LNE500.

Material	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti
LNE380	0,11	0,98	0,05	0,03	0,01	0,04	0,01	0,02
LNE500	0,10	1,35	0,04	0,03	0,01	0,07	0,03	0,03

Os corpos-de-prova para os ensaios de tração foram usinados nas dimensões mostradas nas Figuras 1 e 2 para os aços LNE380 e LNE500, respectivamente.

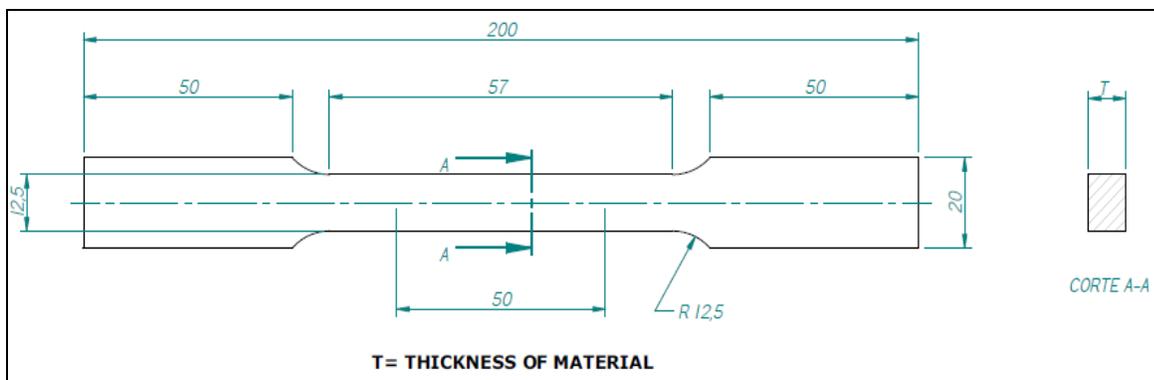


Figura 1. Dimensões dos corpos-de-prova para chapas do aço LNE380.

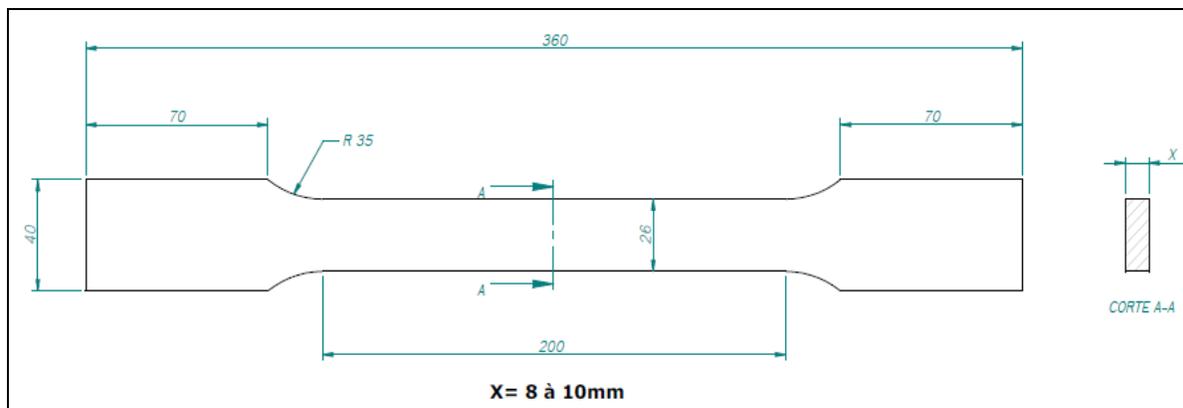


Figura 2. Dimensões dos corpos-de-prova para chapas do aço LNE500.

Foram realizados tratamentos térmicos de recozimento de curta duração das amostras para ensaios de corrosão e nos corpos-de-prova usinados para utilização nos ensaios mecânicos. As amostras foram submetidas às condições mostradas na Tabela

2. Os tratamentos foram realizados em forno tipo mufla. Após o tratamento, os corpos-de-prova foram resfriados ao ar. Essas condições foram definidas com base na literatura a fim de tentar simular as condições de reparo de soldagem dos aços de alta resistência⁽²⁾.

Tabela 2. Condições de recozimento.

Material	Temperatura (°C)	Tempo (min)
LNE380	650	1
		5
	850	1
		5
LNE500	650	1
		5
	850	1
		5

Após tratamento térmico, as amostras a serem submetidas aos ensaios de corrosão foram embutidas, utilizando resina epóxi de cura a frio (Epoxicure da marca Buehler). Antes de finalizar o embutimento, foi unido um fio de cobre à superfície da amostra, utilizando cola condutiva de prata para garantir contato elétrico e permitir a realização dos ensaios eletroquímicos. Em seguida, após a cura completa da resina, as amostras foram lixadas, utilizando-se a seguinte sequencia de lixas: #220, #400, #600 e #1200.

Os corpos-de-prova dos aços LNE380 e LNE500 foram submetidos ao ensaio mecânico de tração. O ensaio de tração foi realizado conforme a ABNT NBR 6673. Para os ensaios dos corpos de prova do aço LNE380 utilizou-se a máquina de ensaios da marca Time Group-modelo WDW100EB. Para os ensaios dos corpos-de-prova do aço LNE500 utilizou-se a máquina universal de ensaios modelo EU100. As propriedades mecânicas destes aços foram obtidas a partir de curvas tensão de engenharia x deformação de engenharia. Foram ensaiados cinco corpos-de-prova de cada aço para cada condição de tratamento térmico. Foi analisada também a dureza de núcleo das amostras com um durômetro Wolpert-DIA-TESTOR 7521, realizando as medidas em unidades de HV10. Para a dureza de superfície foi utilizado um

microdurômetro Mitutoyo-MVK-H11, realizando medidas em HV 0,5 e utilizando a norma standard da empresa Scania Latin América STD4126 baseada na norma ISO6507-1⁽³⁾, que define a medição da dureza a uma distância de 0,1 mm da superfície. Para a análise microestrutural destas amostras, foi utilizado um Microscópio Óptico Olympus CK40M.

O eletrólito utilizado nos ensaios eletroquímicos foi uma solução de NaCl 3,5%p a temperatura ambiente. Foi utilizado um eletrodo de referência de Ag/AgCl e um fio de platina pura com 0,5 mm de diâmetro como contra-eletrodo. Utilizou-se o equipamento Potenciostato/Galvanostato, de marca IVIUM e modelo n-STAT. Inicialmente o potencial de circuito aberto foi monitorado pelo tempo de imersão durante 1 hora. Após o monitoramento do potencial de circuito aberto, as amostras foram submetidas à polarização potenciodinâmica na faixa de potencias de -300 mV em relação ao potencial de circuito aberto até +0,5 V com taxa de varredura de 1 mV.s⁻¹. Para cada condição de tratamento foram testadas quatro amostras. Os resultados apresentados neste texto representam o comportamento médio observado para cada condição.

A análise microestrutural das foi feita por microscopia óptica, utilizando microscópio Olympus-modelo CK40M, após ataque em reagente Nital 2%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise microestrutural

Microestruturas representativas dos aços LNE380 e LNE500 são mostradas na Fig. 3 para condições selecionadas de tratamento térmico. Analisando as microestruturas, não pôde ser observada nenhuma mudança microestrutural significativa. Em geral, tanto o aço LNE380 quanto o aço LNE500 apresentam estrutura predominantemente ferrítica (parte clara) com uma pequena fração volumétrica de perlita (parte escura). As fases não foram quantificadas neste trabalho, sendo a avaliação apenas qualitativa. Essa característica microestrutural é típica dos aços LNE 380 e 500 no estado laminado a quente^(4,5). Os materiais utilizados neste trabalho foram recebidos e utilizados neste estado inicial.

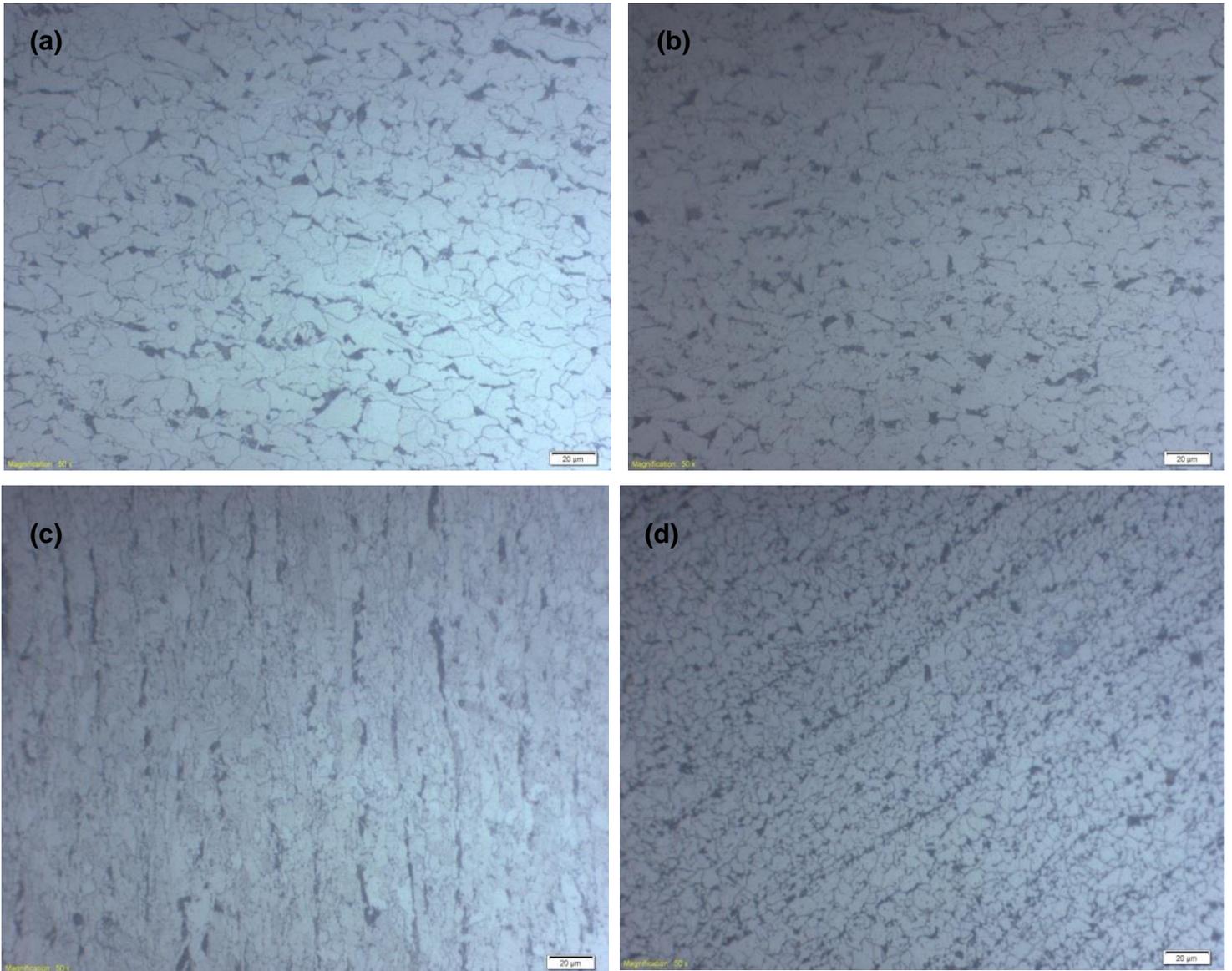


Figura 3. Micrografias dos aços LNE380 e LNE500: a) LNE380 como-recebido; b) LNE380 recozido a 650°C por 5 min; c) LNE500 como-recebido; d) LNE500 recozido a 850°C por 5 min.

Propriedades Mecânicas

Os valores de tensão de ruptura, limite de escoamento, alongamento total e estricção dos aços LNE380 e LNE500 obtidos a partir dos ensaios de tração são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3. Propriedades mecânicas em tração do aço LNE380 em diferentes condições de tratamento térmico.

LNE380	Como Recebido	1minuto 650°C	5 minutos 650°C	1 minuto 850°C	5 minutos 850°C
Tensão de Ruptura (MPa)	517,55 ± 4,50	518,70 ± 6,35	514,96 ± 38,77	518,61 ± 2,89	521,32 ± 3,99
Limite de Escoamento (MPa)	421,75 ± 8,40	418,20 ± 5,91	426,95 ± 7,55	423,80 ± 2,82	450,46 ± 7,79
Alongamento Total (%)	20,09 ± 6,28	27,54 ± 0,82	27,63 ± 0,88	28,06 ± 2,21	28,61 ± 0,90
Estricção (%)	63,01 ± 3,77	64,75 ± 2,91	65,06 ± 0,89	63,52 ± 3,65	65,85 ± 2,03

Tabela 4. Propriedades mecânicas em tração do aço LNE500 em diferentes condições de tratamento térmico.

LNE500	Como Recebido	1minuto 650°C	5 minutos 650°C	1 minuto 850°C	5 minutos 850°C
Tensão de Ruptura (MPa)	443,15 ± 18,32	438,53 ± 8,32	433,91 ± 2,31	438,53 ± 7,74	447,76 ± 10,83
Limite de Escoamento (MPa)	147,72 ± 32,76	115,40 ± 10,41	117,71 ± 6,81	112,63 ± 3,24	116,33 ± 0,69
Alongamento Total (%)	22,67 ± 0,88	22,67 ± 0,58	22,00 ± 1,49	22,67 ± 0,88	22,67 ± 0,58
Estricção (%)	25,00 ± 1,19	24,55 ± 2,34	25,23 ± 0,82	24,55 ± 0,71	24,32 ± 0,51

A partir dos resultados mostrados nas Tabela é possível observar que os tratamentos térmicos de curta duração não provocaram mudanças significativas nas propriedades mecânicas em tração de ambos os aços. Operações de soldagem podem provocar alterações microestruturais em aços de alta resistência e baixa liga, sendo tais alterações dependentes do ciclo térmico e também da composição química do aço^(4,5). De acordo com as micrografias mostradas na seção, não houve alterações microestruturais significativas após os tratamentos térmicos. Desse modo, as propriedades mecânicas em tração foram também pouco afetadas.

Os valores de microdureza Vickers obtidas para o núcleo e a superfície das amostras são mostrados na Tabela5. É possível observar que tanto para a dureza de núcleo quanto para a dureza de superfície, a dureza diminui conforme a temperatura de exposição do aço é aumentada, quando comparado o mesmo intervalo de tempo. Entretanto, essas tendências devem ser observadas com cautela, pois, ao deve-se em

conta o desvio-padrão dos resultados. Ainda assim, há uma tendência mais clara de redução da dureza para a temperatura de 850 °C por 5 minutos para ambos os aços (condição de tratamento mais longo e a temperatura mais alta), em relação às demais condições.

Tabela 5. Medidas da dureza de Núcleo e dureza de superfície para os aços LNE380 e LNE500.

Material	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Dureza Núcleo (HV10)	Dureza de Superfície (HV0,5)
LNE380	Como Recebido	Como Recebido	159,00 ± 1,73	186,50 ± 6,80
	650	1	165,00 ± 5,00	175,25 ± 6,98
		5	160,35 ± 5,56	184,25 ± 4,15
	850	1	155,85 ± 3,04	175,25 ± 3,19
		5	146,18 ± 3,43	158,75 ± 13,81
	LNE500	Como Recebido	Como Recebido	199,25 ± 4,60
650		1	224,75 ± 6,50	232,75 ± 11,34
		5	204,25 ± 3,03	217,00 ± 8,52
850		1	205,00 ± 13,86	214,25 ± 13,39
		5	168,75 ± 2,17	187,50 ± 8,02

Ensaio de Corrosão

Curvas de polarização potenciodinâmica dos aços LNE380 E LNE500 obtidas em solução de NaCl 3,5%p a temperatura ambiente são mostradas na Fig. 4. A partir das curvas de polarização obtidas para cada condição de tratamento, foi possível obter os valores do potencial de corrosão (E_{corr}) e da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), utilizado o método de extrapolação de Tafel para obtenção dos dados, conforme apresentados na Tab. 6. Os resultados indicam que o comportamento eletroquímico dos aços LN 380 e LN 500 foi pouco afetado pelas diferentes condições de tratamento térmico. A literatura sugere que operações de soldagem são capazes de provocar variações significativas no comportamento de corrosão de aços de alta resistência e baixa liga, especialmente devido à formação de pares galvânicos na zona termicamente afetada, os quais são decorrentes de alterações microestruturais nesta região durante a soldagem⁽⁶⁾. Deste modo, a ausência de alterações microestruturais significativas na zona termicamente afetada deveria levar a um comportamento de corrosão homogêneo ao longo do cordão de solda, sendo, assim, a resistência à corrosão do material pouco afetada após a soldagem. Do mesmo modo, mesmo que haja alterações de

microestrutura na zona termicamente afetada, a resistência à corrosão global do componente pode não ser influenciada de forma significativa. Este efeito foi verificado por Mohammadi et al. e Wang et al, para aços de alta resistência e baixa liga submetidos a ciclos de tratamento térmico para simular a zona termicamente afetada por meio de um simulador termomecânico Gleeble^(7,8). Esses trabalhos indicam que a diferença de potencial entre as fases formadas após o ciclo simulado de soldagem é essencial para que o comportamento de corrosão seja afetado. No trabalho aqui apresentado, a ausência de alterações microestruturais significativas seria, então, responsável pela homogeneidade do comportamento eletroquímico entre as diferentes condições testadas.

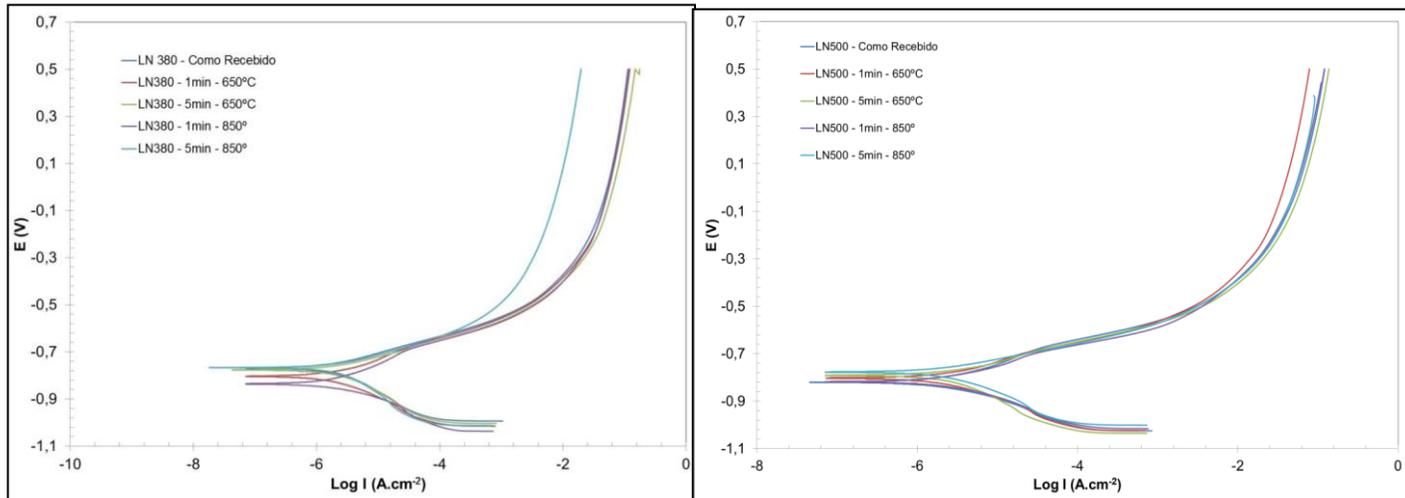


Figura 4. Curvas de polarização potenciodinâmica dos aços: a) LNE380 e b) LNE500 submetidos a diferentes condições de tratamento térmico.

Tabela 6. Parâmetros eletroquímicos dos aços LNE380 e LNE500 determinados a partir das curvas de polarização potenciodinâmica.

Condição de tratamento	LNE380		LNE500	
	E_{corr} (V _{Ag/AgCl})	i_{corr} (μ A.cm ⁻²)	E_{corr} (V _{Ag/AgCl})	i_{corr} (μ A.cm ⁻²)
Como recebido	-0,79 ± 0,03	2,14 ± 0,39	-0,76 ± 0,04	2,38 ± 1,04
1min 650°C	-0,76 ± 0,03	1,85 ± 0,99	-0,77 ± 0,04	2,60 ± 2,02
5min 650°C	-0,79 ± 0,01	1,81 ± 2,78	-0,78 ± 0,04	3,82 ± 1,81
1min 850°C	-0,78 ± 0,09	4,57 ± 2,81	-0,78 ± 0,03	3,22 ± 2,16
5min 850°C	-0,78 ± 0,02	1,77 ± 0,43	-0,71 ± 0,05	3,59 ± 1,87

CONCLUSÕES

Após a realização de ciclos curtos de aquecimento nos diferentes tipos de aço, LNE380 e LNE500, pôde ser verificado que não houve alterações microestruturais significativas. As propriedades mecânicas em tração foram pouco afetadas pelos ciclos de aquecimento. Em relação ao comportamento de corrosão dos aços, os parâmetros eletroquímicos apresentaram pouca variação com a condição de tratamento. As condições de aquecimento utilizadas neste trabalho buscaram reproduzir operações de reparo de soldagem destes aços quando usados em carrocerias de veículos. Em razão de limitações experimentais, o controle dos ciclos de aquecimento e resfriamento não é tão preciso quanto quando feito em um simulador termomecânico. Ainda assim, apesar de tais limitações, os resultados aqui obtidos sugerem que processos rápidos de reparos, nos quais o material não ficará muito tempo exposto à temperatura de soldagem, podem ser realizados sem trazer prejuízo ao comportamento mecânico e à resistência à corrosão dos aços de alta resistência e baixa liga para estampagem.

REFERÊNCIAS

- (1) BRIAN, D.; JIM, F.; DAVID, A.; DAVID, H.; STEVE, K.; NASSOS, L.; BLAKE, Z. Advanced High Strength Steel Repairability Study: Phase II Final Report. Disponível em: http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Research/Safety/ahss_repairability_phase2_study.pdf. Acesso em 28-08-2016.
- (2). BRIAN, D.; JIM, F.; DAVID, A.; DAVID, H.; STEVE, K.; NASSOS, L.; BLAKE, Z. Advanced High Strength Steel Repairability Study: Phase I Final Report. Disponível em: http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Research/Safety/ahss_repairability_phase1_study2.pdf. Acesso em 28-08-2016.
- (3) Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais Metálicos – Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de Ensaio (ISO 6507-1:2005, IDT)*. Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos. 2010.
- (4) DIAS, A. N. O.; BALDISSERA, M. R.; ROSSI, E. C.; COELHO, G. C.; PAULA, A. S.; RODRIGUES, G. Caracterização microestrutural e avaliação das propriedades mecânicas de um aço com diferentes microestruturas bifásicas obtidas a partir do aço

LNE 500. In: SEXTA CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO – TTT2012. Atibaia –SP, Junho de 2012, **Anais**. p. 337-341.

(5) DIAS, A. N. O.; GOMES, G. F.; BALDISSERA, M. R.; COELHO, A. Y.; RODRIGUES, C. A.; COELHO, G. C.; PAULA, A. S.; RODRIGUES, G. Caracterização Microestrutural de um aço com diferentes microestruturas bifásicas obtidas a partir do aço LNE 380 via simulação computacional e metalografias qualitativa e quantitativa. . In: SEXTA CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO – TTT2012. Atibaia –SP, Junho de 2012, **Anais**. p. 418-421.

(6) DU, C. W.; LI, X. G.; LIANG, P.; LIU, Z. Y.; JIA, G. F.; CHENG, Y. F. Effects of microstructure on corrosion of X70 pipe steel in an alkaline soil. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, p. 216-220, 2009.

(7) FARZAD, M.; FAYSAL, F. E.; AKRAM, A. Corrosion of Simulated Weld HAZ of API X-80 Pipeline Steel. **Corrosion Science**, v. 63, p. 323-333, 2012.

(8) WANG, L. W.; LIU, Z. Y.; CUI, Z. Y.; DU, C. W.; WANG, X. H., LI, X. G. In situ corrosion characterization of simulated weld heat affected zone on API X80 pipeline steel. **Corrosion Science**, v. 85, p. 401-410, 2014.

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the influence of short duration heat treatments on the mechanical properties and corrosion resistance of two types of stamping steels used by the Brazilian automotive industry, the LNE380 and LNE500 grades. The main goal was simulate heating and cooling cycles to which these materials can be subjected during repair operations of welding procedures. The results showed that the microstructures of the steels were little affected by the heat treatments, consisting of pearlite and ferrite. Mechanical properties and corrosion behavior were little affected as well. Vickers microhardness values, though, showed a decreasing trend as the time and temperature of heat treatments increased.

Keywords: stamping steels, heat treatments, microstructure, mechanical properties, corrosion