

## EFEITOS DO CICLO TÉRMICO DE UMA DETERMINADA ROTA DE MANUFATURA SOBRE COMPONENTES AUTOMOTIVOS FABRICADOS COM O MATERIAL DIN EN 10149 S700MC\*

Daniel Angelo Zattera Milesi<sup>1</sup>  
Alexandre da Silva Rocha<sup>2</sup>  
Victor Hugo Velazques Acosta<sup>3</sup>  
Vagner Machado Costa<sup>4</sup>

### Resumo

Em determinadas rotas de manufatura de componentes automotivos, principalmente de produtos do segmento rodoviário pesado, são muito comuns processos de desempenho a quente, assim como outros procedimentos como arqueamento e alinhamento de longarinas. O presente trabalho tem por objetivo traçar os principais impactos destes processos sobre o material de alta resistência e baixa liga norma DIN EN 10149 S700MC em uma rota de fabricação de produtos automotivos com interferência de um procedimento a quente. Esse material, quando submetido ao ciclo térmico para alinhamento a quente, através do aquecimento de algumas regiões pontuais e do posterior resfriamento ao ar calmo têm suas propriedades mecânicas alteradas. Para comprovar isso, foram reproduzidas as condições do processo atual para mapeamento de dados de temperatura para os subsequentes ensaios de laboratório. Comparando as amostras submetidas ao ciclo térmico, com as produzidas com a mesma matéria prima sem aquecimento, pode-se verificar o impacto causado pelo processo de alinhamento a quente utilizado sobre as propriedades mecânicas do material. Os resultados mostram que o aço DIN EN 10149 S700MC apresenta alterações expressivas em todos os ciclos realizados. Com isso, ocorrem modificações na microestrutura pelo ciclo térmico ocasionando a diminuição de algumas propriedades mecânicas importantes, como tensão de escoamento, dureza e a tensão limite de fadiga.

**Palavras-chave:** Ciclo térmico de aquecimento; Propriedades mecânicas dos aços; Fadiga; Aços de alta resistência e baixa liga.

### EFFECTS OF THERMAL CYCLE OF A PARTICULAR MANUFACTURING ROUTE ABOUT AUTOMOTIVE COMPONENTS PRODUCED WITH THE MATERIAL DIN EN 10149 S700MC

#### Abstract

In certain manufacturing routes of automotive components, especially of heavy road segment products, are very common straightening processes hot, as well as other procedures such as bending and alignment stringers. This paper aims to draw the main impacts of these processes on the material of high strength low alloy DIN EN 10149 S700MC on a route manufacturing of automotive products with interference from a hot procedure. This material, when subjected to thermal cycle for hot alignment by heating of certain individual regions and the subsequent still air cooling have changed their mechanical properties. To prove this, we reproduced the conditions of the current process for temperature mapping data for subsequent laboratory tests. Comparing the samples subjected to thermal cycling with produced with the same raw material unheated one can ascertain the impact caused by hot alignment process used on the mechanical properties of the material. The results show that the steel DIN EN 10149 S700MC shows remarkable changes in all of the cycles. Thus, the microstructural changes occur in the thermal cycle causing a decrease of some important mechanical properties such as yield strength, hardness and tension fatigue limit.

**Keywords:** Thermal cycle heat; Mechanical properties of steels; Fatigue; High strength low alloy steels.

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica, Analista de Engenharia do Produto, Engenharia do Produto, Randon S.A., Caxias do Sul, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Prof. Dr. Eng. Adjunto do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica, Analista de Engenharia de Processo, Engenharia de Processo, Randon S.A., Caxias do Sul, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro Metalúrgico, Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A fabricação de componentes como chassi e caixa de carga de implementos rodoviários é caracterizada por junções soldadas através de GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e por arco submerso, entre outros. Posterior a esses processos, é realizada uma etapa de desempenho a quente através do aquecimento de determinadas regiões da estrutura utilizando a chama de um maçarico de oxiacetileno [1]. O resfriamento é ao ar calmo. Essas operações são funcionais, mas devem ter seus parâmetros bem definidos, pois quanto menor o controle sobre o processo maior serão os danos causados ao material. Os efeitos do ciclo térmico diminuem substancialmente o valor da tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ), dureza Vickers e da tensão limite de fadiga ( $\sigma_f$ ) do material [1-4]. Esse artigo pesquisou os principais efeitos do processo de aquecimento para desempenho sobre um material de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) utilizado em implementos rodoviários para o transporte de carga pesada. O material pesquisado foi o aço avançado de alta resistência mecânica DIN EN 10149 S700MC. Esse material é amplamente utilizado na indústria de implementos rodoviários devido as suas excelentes propriedades mecânicas e a possibilidade de redução de tara do produto [5].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios mecânicos com o material DIN EN 10149 S700MC com o objetivo principal de comparar as propriedades mecânicas antes e após o ciclo de aquecimento. Todos os corpos de prova foram retirados de chapas de aço laminadas com espessura de 4,75mm. As Tabelas 1 e 2 mostram a composição química e as propriedades mecânicas desse material [5].

**Tabela 1.** Composição química do aço DIN EN 10149 S700MC.

AÇO	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Nb	V	Ti
CHAPA AÇO- DOMEX S700MC	0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	-	0,015	0,09	0,2	0,15

Valores em % máximas admissíveis. Fonte: SSAB TUNNPLAT (2004).

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do aço DIN EN 10149 S700MC.

AÇO	Resistência ao escoamento (N/mm <sup>2</sup> ) mín.	Resistência a tração mínimo (N/mm <sup>2</sup> ) mín.	Alongamento mínimo (%) Esp. > 3mm
CHAPA AÇO- DOMEX S700MC	700	750	12

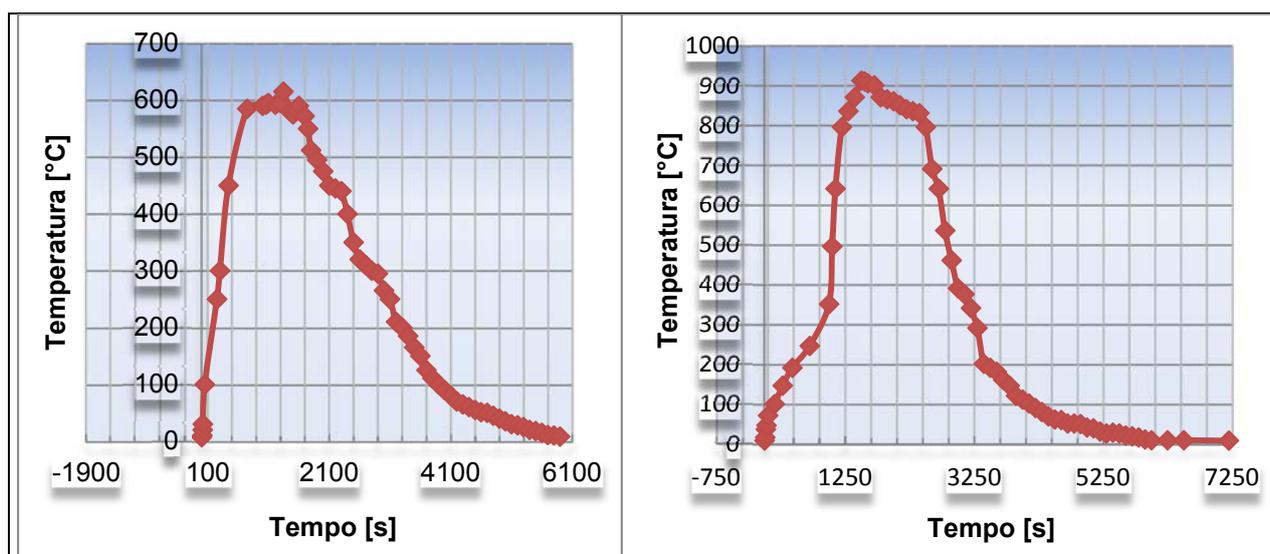
Fonte: SSAB TUNNPLAT (2004).

As amostras foram aquecidas e posteriormente resfriadas ao ar calmo. O método utilizado foi o de simular – em corpos de prova – o ciclo térmico utilizado no processo de desempenho aos quais os componentes, como por exemplo, as longarinas de um chassi, são submetidas (Figura 1). Neste aspecto, foram testados dois ciclos térmicos: uma curva de aquecimento ‘ideal’ e uma curva de aquecimento simulando um processo empírico ou sem controle (Figura 2.a e 2.b) [1].

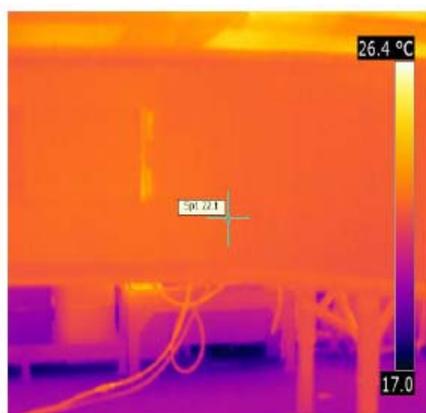


**Figura 1.** Região de aquecimento para alinhamento entre caixa de carga e chassi de um implemento rodoviário.

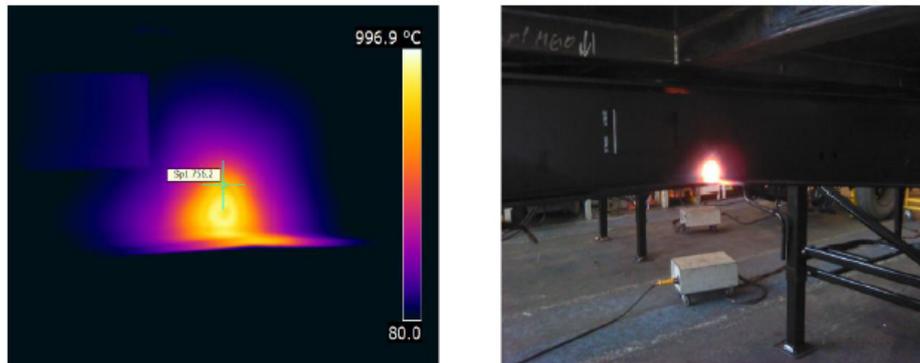
Nas Figuras 3 e 4 é possível verificar a região demarcada e as imagens da câmara termográfica com as temperaturas ambiente e máxima e o tempo de aplicação da chama do maçarico, obedecendo ao ciclo térmico da Figura 2. As temperaturas usadas para o aquecimento foram próximas às temperaturas de recristalização ( $600^{\circ}\text{C}$ ) e austenitização do material ( $900^{\circ}\text{C}$ ) [1, 7 e 8].



**Figura 2.** Ciclo térmico de aquecimento com temperatura de trabalho igual a  $600^{\circ}\text{C}$  (a) e  $910^{\circ}\text{C}$  (b).



**Figura 3.** Imagem termográfica da região do produto que será aquecida (na temperatura ambiente).

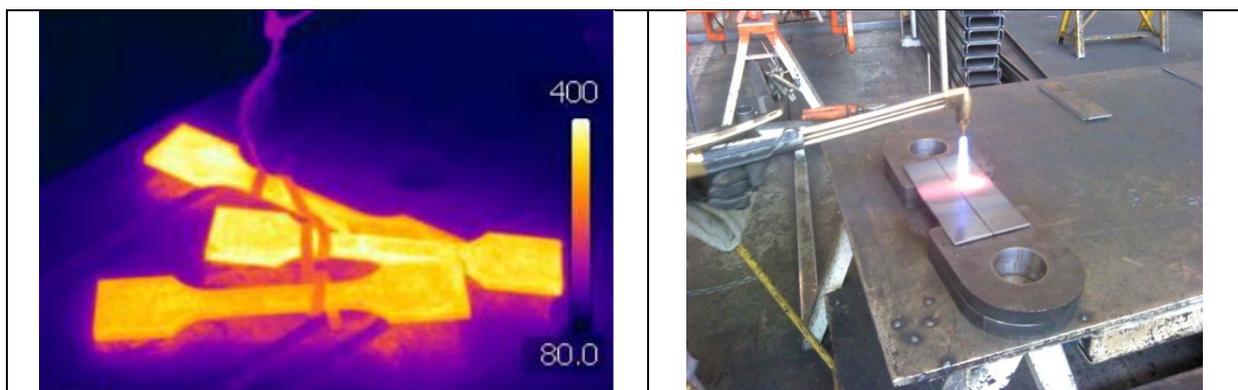


**Figura 4.** Imagem termográfica da região do produto que será aquecida (após aquecimento).

Os ciclos térmicos utilizados no processo acima foram replicados sobre os CPs. Em todas as etapas foi utilizada uma máquina termográfica (modelo FLIR T360) para registrar as temperaturas no decorrer dos processos (Fotos 4 e 5) [1]. Isso foi feito de maneira diferente para os corpos de prova para ensaio de tração/fadiga (totalmente aquecidos – homogêneos) e para o caso dos corpos de prova para microdureza (utilizado linha de aquecimento central – local [7]).



**Figura 5.** Simulação do aquecimento dos corpos de prova.



**Figura 6.** Imagem termográfica dos corpos de prova aquecidos e resfriando ao ar calmo (tração/fadiga e microdureza).

Após preparação dos corpos de prova, foram realizados ensaios mecânicos de tração, microdureza *Vickers* e fadiga (curvas S-N). A Tabela 3 mostra a convenção adotada para identificação de cada amostra e seu respectivo processo. Para identificar o material de alta resistência e baixa liga utilizado, foi usada a letra B.

**Tabela 3.** Convenções adotadas para nomenclatura das amostras

PROCESSO	Descrição
Aquecimento a 600°C	C
Aquecimento a 910°C	E
Resfriado ao ar calmo	G
Estado original	H

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resultados dos Ensaios de Tração

Os resultados dos ensaios de tração mostraram uma considerável diminuição no valor da tensão de escoamento  $\sigma_e$  do material (Tabela 4). Em relação ao valor da amostra original (BH) as amostras BCG apresentaram um decréscimo de 29,5%, enquanto que nas amostras BEG o decréscimo da tensão de escoamento foi de aproximadamente 41,5%. Isso significa que se a teoria de falha usada no cálculo da estrutura for o da Tensão Máxima de Cisalhamento, ou considerando um critério de escoamento, o método deverá prever a diminuição dos valores de algumas propriedades mecânicas [6, 8-10]. A norma utilizada para os ensaios de tração foi a NBR ISO 6892:2002.

**Tabela 4.** Resultado para os ensaios de tração para o material DIN EN 10149 S700MC

Processo	Amostra	Tensão de escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Tensão máxima (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)
Estado original	BH	726	756	31
Aquecido a 600 °C e resfriado ao ar	BCG	512	597	33
Aquecido a 910 °C e resfriado ao ar	BEG	425	554	37

#### 3.2 Resultados dos Ensaios de Microdureza

O material DIN EN 10149 S700MC apresentou dureza média de 166 HV em estado de recebimento (BH). O gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a variação do valor de microdureza dos pontos medidos em relação a média (escala HV-5, com penetração de 500g). Essa variação foi de -2,40% a 3,01% ao longo do comprimento do corpo de prova.

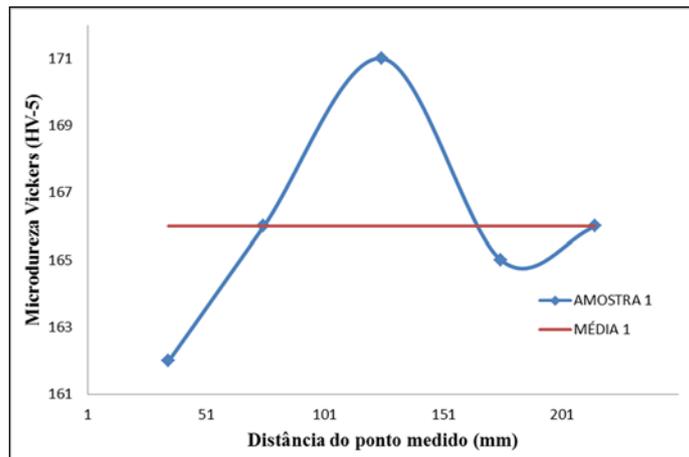


Figura 7. Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC no estado original.

Os perfis de microdureza deste material tenderam para níveis bastantes baixos mesmo com aquecimento dentro dos parâmetros definidos de processo (600°C, conforme ciclo térmico da Figura 2.a). Isso indica uma queda acentuada nas propriedades mecânicas do material (principalmente a  $\sigma_e$ ) na região A' (região de aquecimento total), como comprovado com os ensaios de tração [1, 3 e 4]. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível verificar que na região da ZAC (Zona Afetada pelo Calor) a queda na microdureza foi de 8,48% em relação a microdureza na região da ZN (Zona Neutra) e de 12% na região A'. Cabe salientar que a microdureza média destas amostras ficou em torno de 180 HV (valor este que será considerado), diferentemente dos 166 HV da Figura 7.

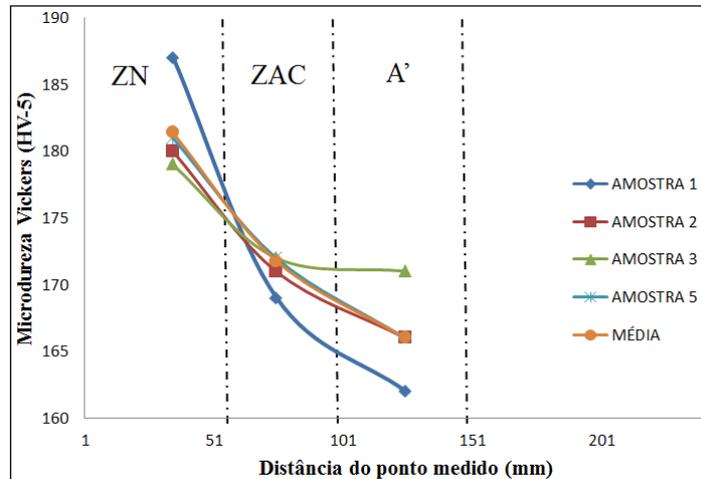
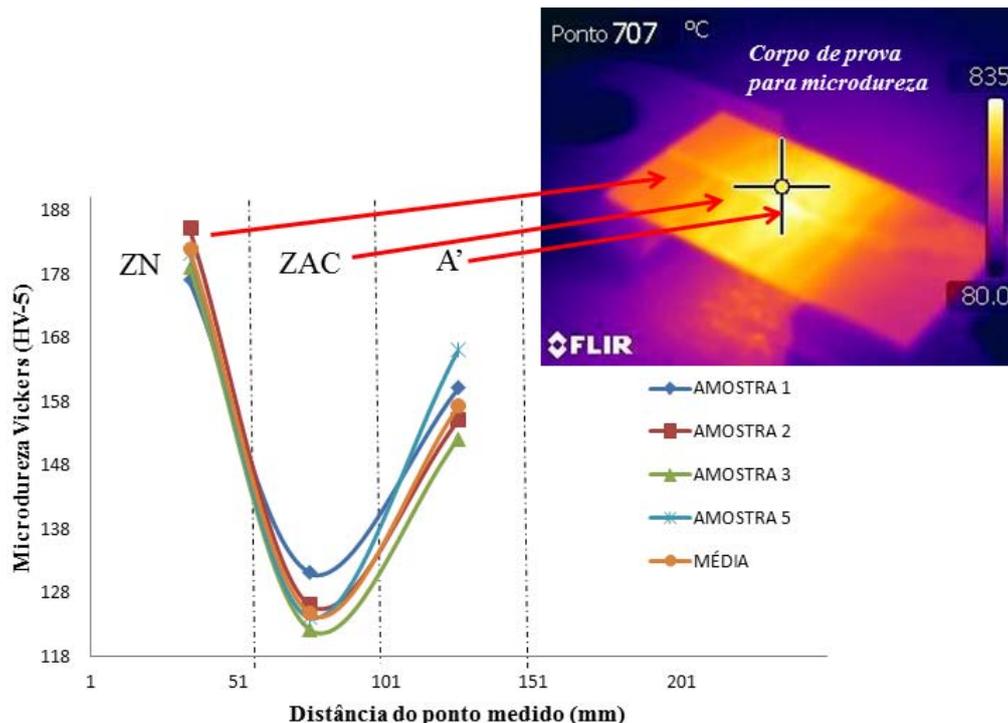


Figura 8. Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 600° e resfriado ao ar calmo. Cinco pontos em cada região do corpo de prova.

Quando aplicado o processo conforme Figura 2.b sobre o material de ARBL, a diminuição no valor da microdureza na região da ZAC chega a aproximadamente - 31,5% (Figura 9). Essa queda representa um ponto de atenção em relação ao uso de processos a quente sobre materiais de alta resistência mecânica, devido a deformação plástica quando usado linhas de aquecimento [7]. Diversas relações podem ser feitas entre a dureza do material e seu respectivo limite de ruptura, assim como correlacionar a dureza com o limite de fadiga [2, 9 e 10]. A norma utilizada nesta etapa foi a DIN 50133:1985-02.



**Figura 9.** Microdureza HV do material DIN EN 10149 S700MC aquecido a 910°C e resfriado ao ar calmo. Cinco pontos em cada região do corpo de prova.

### 3.3 Resultados dos Ensaios de Fadiga: Curvas S-N

Os ensaios de fadiga para geração da Curva S-N do material apresentaram decréscimo no valor da tensão limite de fadiga ( $\sigma_e$ ). Teoricamente, é possível traçar curvas S-N a partir de informações preliminares do material, como resistência a tração mínima ( $\sigma_{ut}$ ). Também é possível corrigir essas curvas através de fatores modificadores do limite de resistência a fadiga ( $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$ ,  $k_d$ ,  $k_e$  e  $k_f$ ). Isso foi feito, como pode ser verificado, na Figura 10. A curva real (ensaiada) foi plotada sobre as curvas teóricas para análise. Pode-se perceber que a curva S-N real teve uma tendência a acompanhar a curva teórica corrigida. Logo, a tensão limite de fadiga ( $\sigma_f$ ) do material ficou em torno de 250 MPa para  $10^6$  ciclos (vida infinita). Essa curva foi gerada através de ensaios em corpos de prova com ciclo de flexão alternada, com carregamento senoidal, com tensão média ( $\sigma_{méd}$ ) igual a zero e razão de carregamento ( $R$ ) igual a -1. Esse ensaio foi realizado apenas para a condição BCG. Para a condição BH, foi considerada a curva totalmente teórica, conforme já verificado em outros trabalhos [2]. A norma utilizada para os ensaios de fadiga foi a ASTM E 466-82.

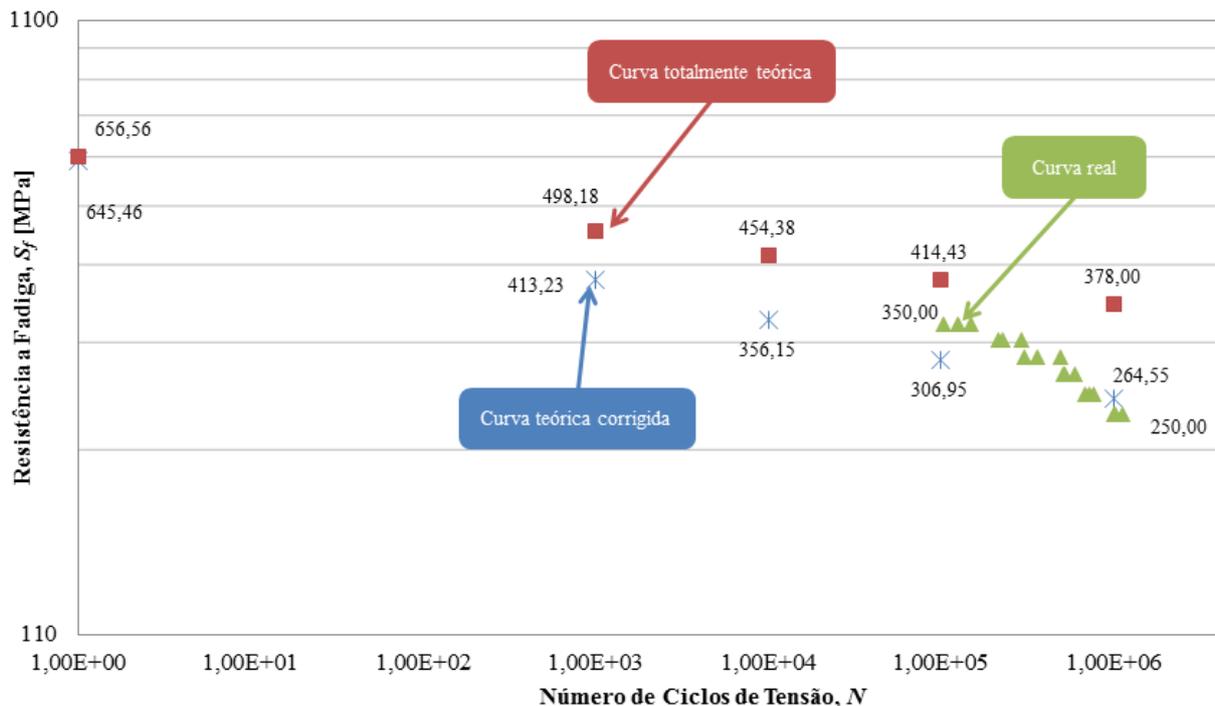


Figura 10. Curvas S-N do material: curva totalmente teórica, teórica corrigida e curva real.

#### 4 CONCLUSÃO

Os ensaios de tração demonstraram que a tensão de escoamento do material caiu em porcentagem bastante grande. Nas amostras aquecidas a  $600^{\circ}\text{C}$  (BCG) quando comparadas com o material em estado original (BH) a diminuição da tensão de escoamento chegou a 29,5%. Porém, quando o aquecimento aplicado foi próximo a  $900^{\circ}\text{C}$  (amostras BEG) a redução da  $\sigma_e$  chegou a 41,5%. Analisando este aspecto, é de fundamental importância considerar esta alteração nas propriedades mecânicas no material no cálculo do componente, através de fatores de segurança [6].

Nas análises da microdureza *Vickers* do material, verificou-se que na região de aquecimento total ( $A'$ ) para a amostra BCG a diminuição dos valores foi em torno de 12% acompanhando as quedas na tensão de escoamento, comprovando a relação entre essas duas propriedades. Para a amostra BEG a redução no valor da microdureza na região  $A'$  foi em torno de 15%. Porém, nestas mesmas amostras, a redução chegou a 32% na ZAC. Isso pode ser explicado pela deformação plástica nas peças [7]. A microdureza foi medida apenas em uma única camada (espessura). As curvas S-N das amostras aquecidas em comparação com a amostra sem interferência térmica demonstram um decréscimo no ângulo da curva. Em estado original (amostra BH) a curva de Wöhler apresentou um limite de resistência a fadiga para  $10^6$  ciclos igual a 378 MPa. Quando o aquecimento obedece ao ciclo térmico conforme Figura 2.b, a curva S-N do material apresenta um limite de resistência a fadiga para  $10^6$  ciclos igual a 250 MPa. Ou seja, o simples processo de aquecimento local na peça pode causar uma queda de 33% nesta variável. Isso deve ser considerado no cálculo de durabilidade, pois a vida em fadiga do componente será reduzida [2,10].

Conforme os resultados obtidos, o aço microligado, após a reprodução dos ciclos térmicos, tem suas propriedades alteradas em porcentagens abaixo da especificação permitida em projeto. Sendo assim, considerando essa redução no valor da tensão de escoamento no cálculo estrutural do produto, a rota analisada

não é indicada para este material. Evitar o processo térmico para correção de eventuais problemas de montagem ou para arqueamento de viga deve ser considerado para conservar a qualidade original da matéria prima utilizada. Como alternativa para este processo, é aconselhável investir no *design* da viga, através de arqueamento de projeto. Pode-se ainda fazer o alinhamento a frio da estrutura, verificar melhor parâmetros de processo, investir em gabaritos e dispositivos de montagem e/ou considerar outros tipos de materiais.

## Agradecimentos

O grupo gostaria de agradecer ao Laboratório de Qualidade e Metrologia da empresa Randon S.A. pelos ensaios realizados, e ao Engenheiro Mecânico Gabriel Andrezza pelo compartilhamento de dados de sua Tese de Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

## REFERÊNCIAS

- 1 Andrezza G. Efeito do aquecimento e do resfriamento nas propriedades dos aços ASTM A 570 GR36-C e DIN EN 10149 S700MC no processo de alinhamento a quente. Tese de graduação em Engenharia Mecânica, Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2012.
- 2 Rodrigues SM. Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência mecânica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2012.
- 3 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos. 7ª Ed, São Paulo, SP: ABM 2002.
- 4 Callister JW. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 7ª Ed, Editora Guanabara, 2008.
- 5 SSAB Tunnplat. Sheet steel joining handbook. Swueden. SSAB Tunnplat, 2004.
- 6 Milesi DAZ. Software para cálculo do ponto crítico de carregamento para vigas de semirreboques para transporte de cargas indivisíveis. Tese de Graduação em Engenharia Mecânica, Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2010.
- 7 Vaz MA, Silva RB. Estudo analítico e numérico do processo de curvatura de chapas através da aplicação de linhas de aquecimento. 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro. Sobena, 2010.
- 8 Lopes N, Vila Real PMM, Piloto P, Mesquita L, Simões da Silva L. Modelação Numérica da encurvadura lateral de vigas I em aço inoxidável sujeitas a temperaturas elevadas. Congresso de Métodos Numéricos em Ingeniería 2005. Granada, 2005.
- 9 Perini, FG. Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados. Tese de Mestrado e Materiais, Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2008.
- 10 Liu B, Qu JX, Sun WJ. Effects of termal cycle on mechanical properties and fractography in HAZ of HQ130 steel. Beijing: University of Mining and Technology; 2004.