



INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE *BAKE HARDENING* NA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM DOIS AÇOS BIFÁSICOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA¹

Warley da Silva Horta²
Leonardo Barbosa Godefroid³
Luiz Cláudio Cândido⁴
Margareth Spangler Andrade⁵

Resumo

O tratamento térmico de *Bake Hardening* (BH) é uma técnica utilizada para aumentar a resistência mecânica de componentes estruturais de automóveis. Esta etapa ocorre durante o processo de cura da pintura. O tratamento de BH promove alterações microestruturais em alguns tipos de aços, dentre eles, os aços bifásicos, e estes já apresentam várias publicações atestando seu bom desempenho em tenacidade à fratura e de resistência à fadiga. O efeito do BH é uma soma os mecanismos de endurecimento por solução sólida e por precipitação nas fases, ferrita e martensita. No presente trabalho, o ensaio de propagação de trinca por fadiga (curva $da/dN \times \Delta K$) foi realizado para verificar do efeito do tratamento térmico de BH em dois aços bifásicos, um dos aços tem adições de Cr enquanto o outro tem Si como elemento de liga, com fração volumétrica de martensita na faixa de 3% a 8%, além de outros constituintes microestruturais, tais como, perlita e/ou bainita. Corpos de prova do tipo C(T) foram empregados, com espessura de 3,8 mm e largura de 50 mm, na orientação T-L. Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 HZ e razão R entre tensões, de 0,1. Os resultados mostraram que a resistência à propagação de trinca por fadiga dos dois aços bifásicos avaliados sofre alteração com a aplicação do tratamento de BH, e quando se analisa a relação entre o valor ΔK_{th} e valor de limite de escoamento, é observado um comportamento intermediário entre os resultados dos aços sem nenhum tratamento e para os mesmos submetidos à pré-deformação seguido do tratamento de BH.

Palavras-chave: Aços bifásicos; Resistência à fadiga; Tratamento térmico; Aplicações automobilísticas.

EFFECT OF BAKE HARDENING HEAT TREATMENT ON FATIGUE CRACK PROPAGATION OF TWO DUAL-PHASE STEELS USED TO AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

Heat treatment of "Bake Hardening" (BH) is a technique used to increase the mechanical strength of structural components in automotive industry. This step occurs during the healing process of painting. The treatment of BH promotes microstructural changes in some grades, among them, the dual phase steels, and already has several publications attesting to their good performance in terms of fracture toughness and fatigue resistance. Treatment effect of BH is a sum of the mechanisms by solid solution hardening and precipitation hardening in the main phases, ferrite and martensite. In this work, fatigue crack propagation $da/dN \times \Delta K$ has been conducted to determine the effect of heat treatment of BH in two dual-phase steels, one of steels has Cr additions while the other has Si as an alloying element, with the martensite volume fraction in the range of 3% to 8%, and other microstructural constituents, such as perlite and bainite. C(T) specimens, with a thickness of 3.8 mm and a width of 50 mm in T-L orientation were used for the experiments. Fatigue tests were performed at a frequency of 30 Hz at 25 °C and R ratio of 0.1. The results showed that resistance to fatigue crack propagation of two dual phase steels evaluated altered with the application of the treatment of BH, and when analyzing the relationship between ΔK_{th} and yield stress is observed an intermediate behavior between the results of steels without treatment and steels subjected to the same pre-deformation followed by treatment of BH.

Key words: Dual-phase steels; Fatigue resistance; Heat treatment; Automotive industry.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, mestrando da REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

³ Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

⁴ Professora, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, CETEC, Belo Horizonte – MG.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação das características mecânicas de materiais que constituem componentes estruturais de automóveis, como colunas, soleiras, barra de proteção e rodas, é fundamental para se estimar a vida das mesmas e, assim, estabelecer critérios de manutenção e reposição das partes danificadas.

Várias pesquisas têm mostrado que os aços bifásicos comparado aos aços tradicionais da indústria automobilística apresentam uma maior combinação de resistência mecânica e tenacidade à fratura.⁽¹⁻³⁾ Além disso, não podemos nos esquecer da resistência à fadiga, que é um dos principais itens para a seleção de materiais de aplicação automotiva.

A redução de peso dos veículos, tendência mundial com o objetivo de diminuir o consumo de combustível e a emissão de poluentes é uma realizada utilizando-se aços de mais alta resistência mecânica, com espessuras menores.⁽⁴⁻⁷⁾

No Brasil, existe o desenvolvimento de aço que seguem esta tendência mundial, com a produção de aços com microestrutura do tipo bifásica.⁽¹⁻³⁾

O presente trabalho está inserido em um projeto de pesquisa que vem sendo executado desde 2002, e que tem por objetivo a caracterização do comportamento mecânico de aços bifásicos de aplicação automobilística. Diversas dissertações de mestrado, monografias de conclusão de curso e publicações já foram realizadas, atestando o bom desempenho desta classe de aços em termos de tenacidade à fratura e de resistência à fadiga, e o efeito de pré-deformação e de tratamento de *Bake Hardening* na diminuição da resistência à propagação de trinca de fadiga.⁽⁸⁻¹⁶⁾ A Figura 1 apresenta um resumo dos principais trabalhos dentro da linha de pesquisa.

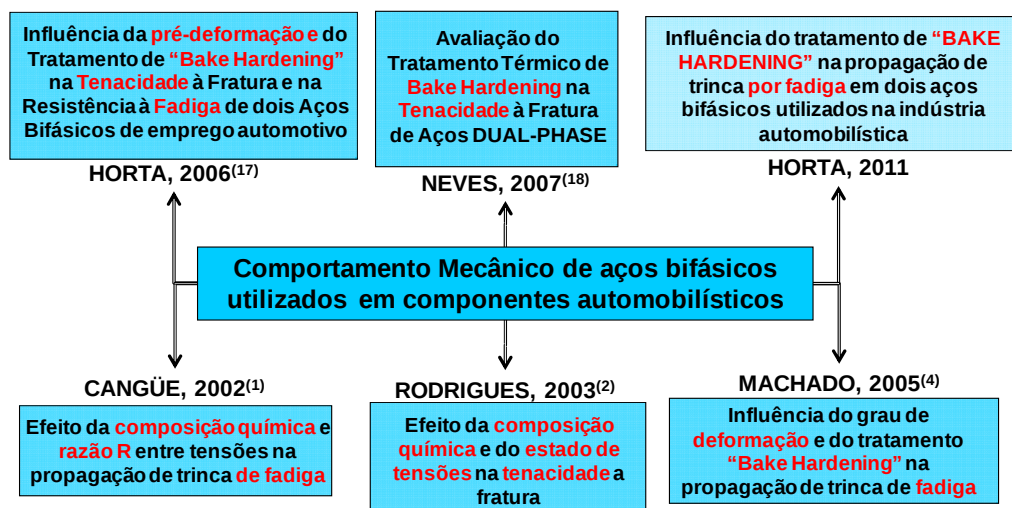


Figura 1. Trabalhos desenvolvidos para caracterizar o comportamento mecânico dos aços.

Segundo Palkowski e Brueck,⁽¹⁹⁾ *Bake Hardening* é a capacidade de o metal deformado, endurecer após tratamento de recozimento, por exemplo, durante a cura da pintura de componentes da indústria automobilística. Aços bifásicos são aços que apresentam aumento de resistência mecânica quando submetidos a este tratamento.

Em resumo, o efeito do *Bake Hardening* soma os mecanismos de endurecimento por solução sólida e por precipitação. A Figura 2 mostra curvas esquemáticas tensão *versus* deformação, associando o aumento da resistência mecânica ao processo de deformação e tratamento de *Bake Hardening*.

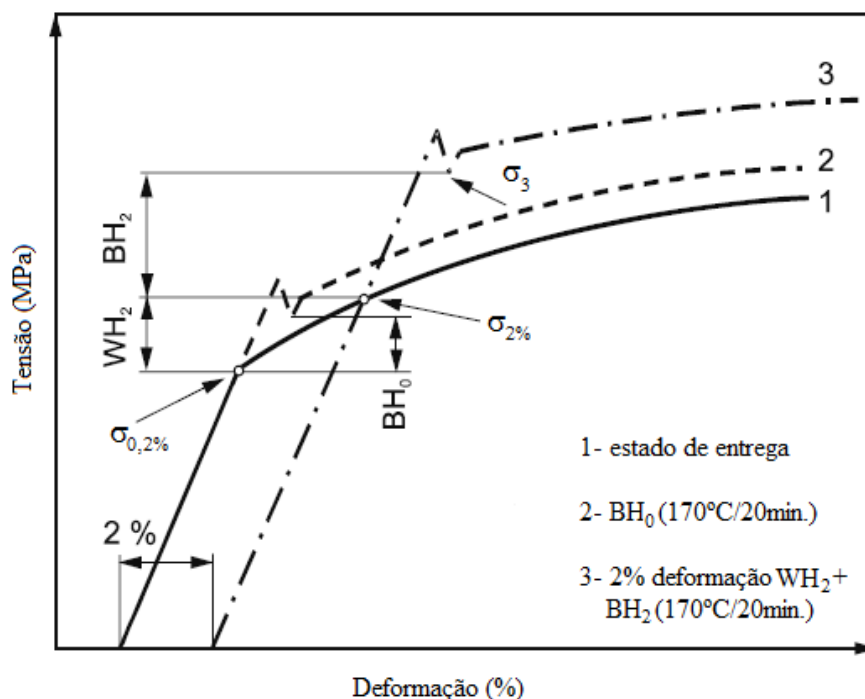


Figura 2. Curvas esquemáticas tensão versus deformação, associando o aumento da resistência mecânica ao processo de deformação e tratamento de BH .⁽²⁰⁾

Neste trabalho, a resistência à propagação de trinca por fadiga foi estudada em dois aços bifásicos de emprego em rodas de automóveis, com fração volumétrica de martensita na faixa de 3% a 8%. Um dos aços tem adições de Cr enquanto o outro tem Si como elemento de liga. Verificou-se a influência do tratamento térmico de *Bake Hardening* na resistência à fadiga. Este tratamento térmico simula a operação de cura da pintura das rodas. Corpos de prova foram confeccionados com a espessura de 3,8 mm, que corresponde à espessura real de aplicação dos aços em rodas de automóveis, e largura de 50 mm. Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 HZ e razão R entre tensões, de 0,1.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados dois aços bifásicos empregados na indústria automobilística com composições químicas distintas, um apresenta maior teor de cromo (bifásico-Cr) e o outro, maior teor de silício (bifásico-Si). Na Tabela 1 pode ser visto a composição química (% em massa) dos aços estudados.

Tabela 1. Composição química (% em massa) dos aços estudados⁽³⁾

Aço	Composição química (% em peso)					
	C	Mn	Si	P	S	Cr
Bifásico-Si	0,055	1,19	1,03	0,016	0,001	0,09
Bifásico-Cr	0,052	1,16	0,07	0,044	0,003	0,58

Os corpos de prova para o ensaio de propagação de trinca foram confeccionados segundo a norma ASTM E647-00.⁽²¹⁾ O tipo de corpo de prova a ser utilizado foi do tipo C(T) –*compact tension*. Na Figura 3 pode ser visto um desenho

esquemático com os dimensionais. É importante salientar que a espessura utilizada é a mesma usada na confecção das rodas.

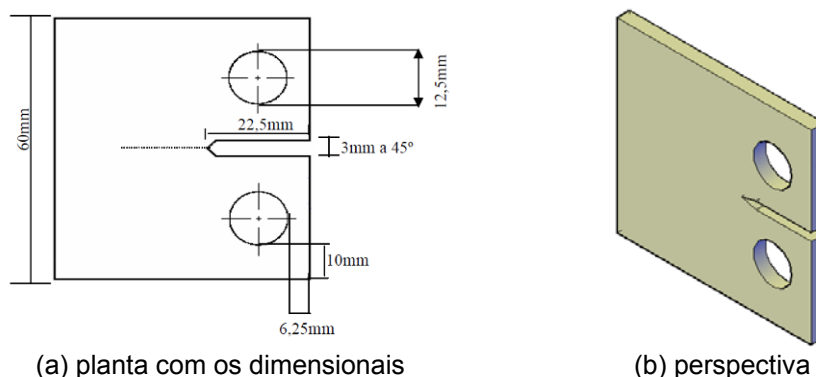


Figura 3. Desenhos esquemáticos do corpo de prova do tipo C(T) para o ensaio de propagação de trinca por fadiga.

A orientação dos corpos-de-prova utilizada foi a T–L, ou seja, carregamento na direção perpendicular ao sentido de laminação, e propagação da trinca na direção longitudinal. Foram utilizados quatro corpos de prova para cada grupo avaliado.

Alguns corpos de prova foram tratados termicamente, simulando o tratamento de *Bake Hardening*. O tratamento constituiu em um aquecimento até 170°C, mantendo os corpos de prova nesta temperatura durante 20 minutos, seguido de um resfriamento ao ar, simulando o processo industrial de cura da pintura dos componentes automobilísticos.

Os ensaios de propagação de trinca por fadiga foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Demet/EM/UFOP utilizando uma máquina servo-hidráulica MTS de 10 t, com aquisição de dados por computador. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 HZ e razão R entre tensões, de 0,1.

Para a caracterização da microestrutura foi utilizada microscopia ótica em um microscópio ótico ZEISS com analisador de imagem. As amostras foram preparadas em seção longitudinais ao sentido de laminação. A preparação seguiu a sequência padrão de lixamento e polimento.

Após a preparação mecânica, foram utilizados ataques químicos com o uso dos reativos químicos de Nital a 2% e de Le Pêra.⁽²²⁾ O ataque químico com dois reagentes foi necessário para uma análise quantitativa da microestrutura para a determinação da fração volumétrica de ferrita, de martensita e outras fases/constituintes (perlita, bainita e/ou constituinte MA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise metalográfica identificou a presença das fases ferrita e martensita, característica principal da microestrutura dos aços bifásicos, além disso, observou-se a presença de outros constituintes, tais como, perlita, bainita e constituinte MA.

O aspecto geral da microestrutura dos aços avaliados, em seção longitudinal, pode ser visto na Figura 4. Na Tabela 2 é apresentado o resultado da análise quantitativa das quatro microestruturas.

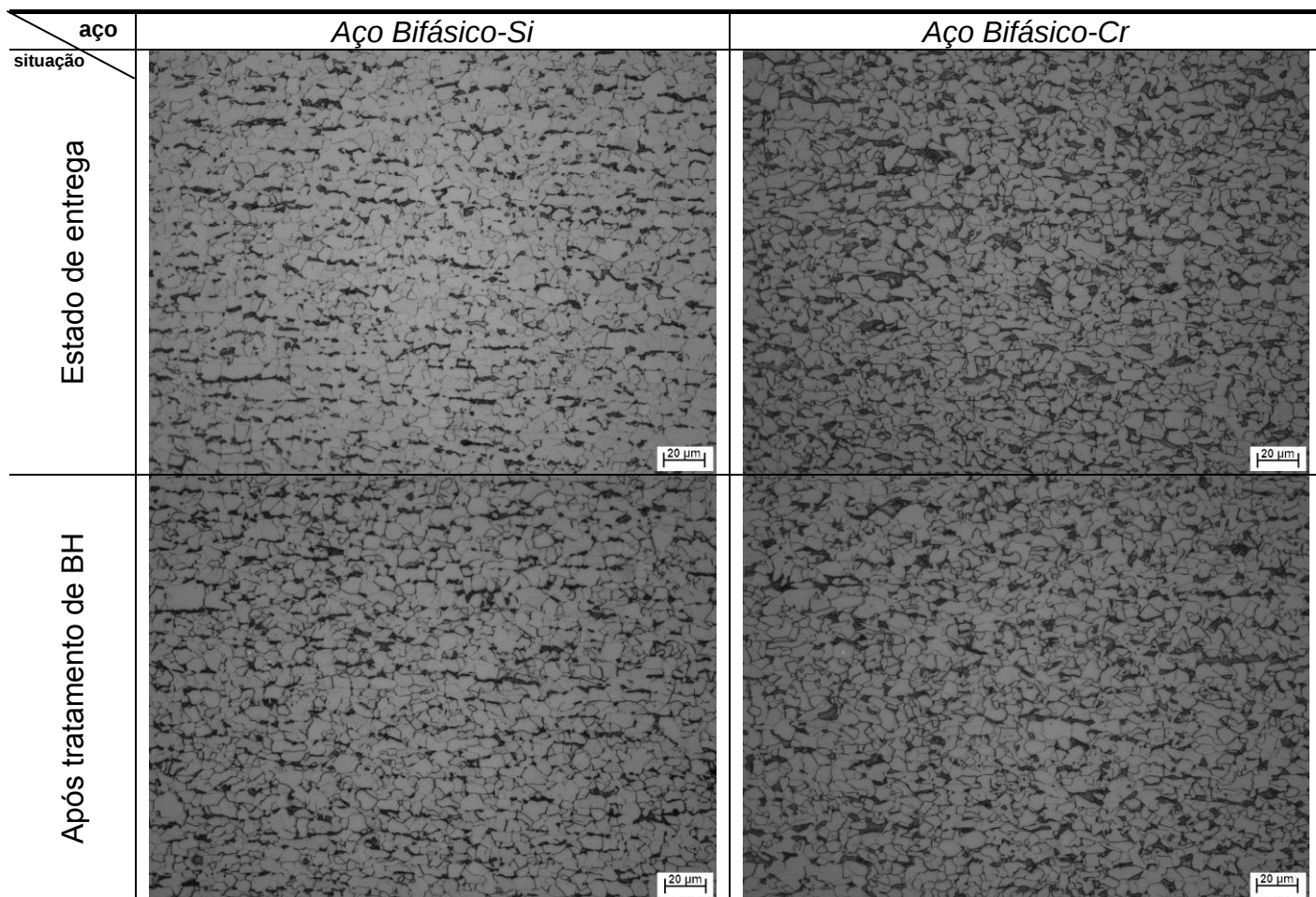


Figura 4. Aspecto geral da microestrutura dos aços bifásicos avaliados. Ataque químico: Nital 2%.

Tabela 2. Resultado da análise quantitativa, fração volumétrica (%)

Aço	Fração Volumétrica (%)		
	Ferrita	Martensita	Outros (B/P)
Bifásico-Si-EE	89,2±1,9	2,8±0,7	8,0±1,1
Bifásico-Si-BH	87,8±2,9	6,2±0,7	6,0±1,9
Bifásico-Cr-EE	82,6±2,0	7,4±1,2	10,0±1,5
Bifásico-Cr-BH	82,7±0,9	5,3±0,8	12,0±0,7

-EE: estado de entrega -BH: após tratamento térmico de "BAKE HARDENING" –
 B/P: bainita/perlita

Observa-se que a aplicação do tratamento térmico de *Bake Hardening* não provoca alteração na análise quantitativa da microestrutura. Este é um resultado esperado visto que a temperatura utilizada no tratamento não provoca nenhum tipo de transformação microestrutural (170°C durante 20 minutos).

A análise da fração volumétrica de ferrita está de acordo com a teoria, pois a adição de silício acelera a formação de ferrita poligonal, deslocando a curva de transformação austenita/ferrita para cima.^(3,23) Assim as amostras de aço bifásico-Si apresentam uma fração volumétrica de ferrita aproximadamente cinco pontos percentuais maior que o aço bifásico-Cr.

Os resultados do ensaio de propagação de trinca por fadiga em amostras de aço bifásico-Cr e aço bifásico-Si submetidos ao tratamento térmico de *Bake Hardening* podem ser vistos na Figura 5.

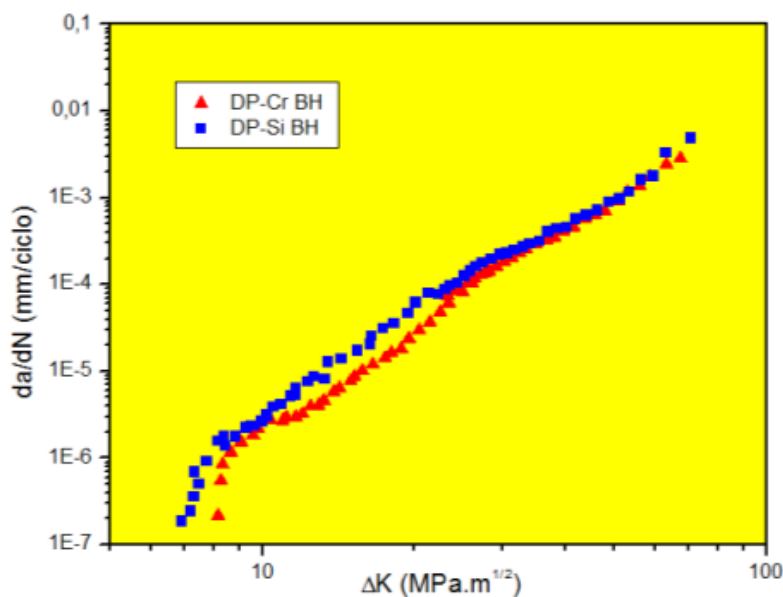


Figura 5. Curvas da/dN versus ΔK comparando o comportamento do aço bifásico-Cr e bifásico-Si após o tratamento de *bake hardening*.

Observa-se uma diferença de comportamento entre os dois aços na região I e início da região II. O aço bifásico-Cr apresenta um maior valor de ΔK_{th} .

O resultado consolidado para as amostras no estado de entrega, as submetidas ao tratamento de *Bake Hardening* e as onde o tratamento térmico ocorreu posterior a uma pré-deformação de 10% podem ser vistos na Figura 6. Alguns resultados foram encontrados por Machado.⁽³⁾ Observe que o aço bifásico-Cr apresenta um maior valor de ΔK_{th} dentre as seis curvas.

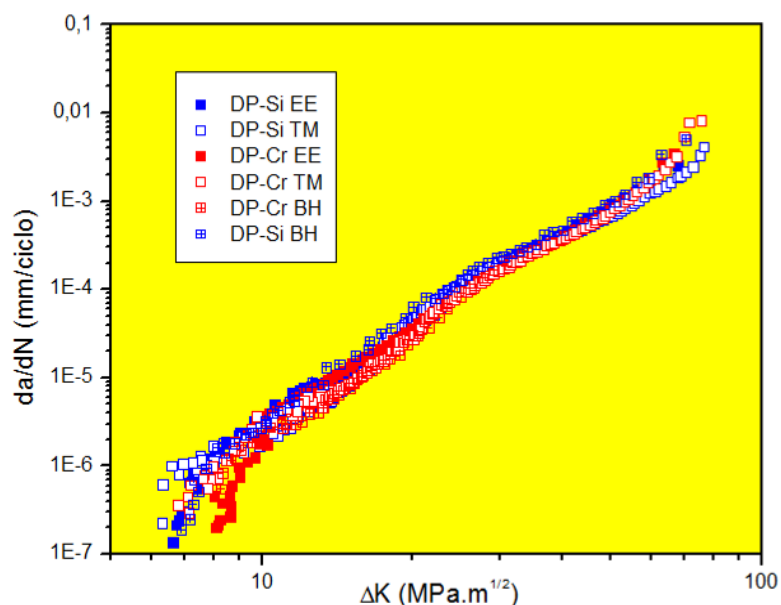


Figura 6. Curvas da/dN versus ΔK comparando o comportamento do aço bifásico-Cr e bifásico-Si em três situações: estado de entrega (EE); com tratamento de *Bake Hardening* (BH) e pré-deformação com tratamento térmico (TM).

A relação entre o limite de escoamento e o valor de ΔK_{th} , pode ser visto na Figura 7. Observam-se resultados do presente trabalho juntamente com dados de Machado⁽³⁾ dentro desta linha de pesquisa.

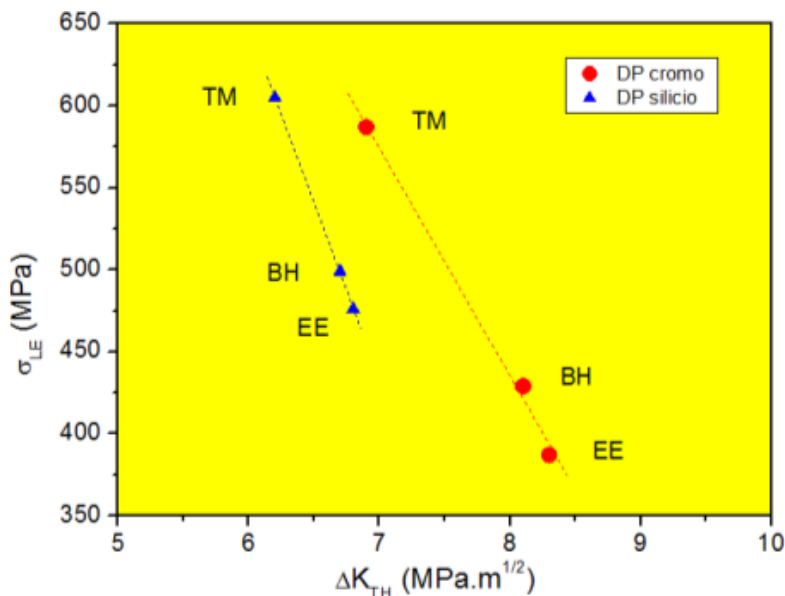


Figura 7. Relação inversamente proporcional entre ΔK_{th} e o limite de escoamento.

Pode-se ver claramente uma relação inversamente proporcional entre o valor ΔK_{th} e valor de limite de escoamento. Outra informação importante em relação à Figura 7 é o fato do valor para as amostras submetidas apenas ao tratamento de *Bake Hardening* ser um valor intermediário entre as demais situações, mostrando a contribuição individual do tratamento térmico.

Para a análise de fenômeno de fechamento de trinca por fadiga será considerado a variação do fator de intensidade de tensão no fechamento de trinca, K_{cl} , que utiliza a carga de fechamento P_{cl} , com a variação de ΔK . Os valores de K_{cl} foram normalizados por K_{max} . Na Figura 8 pode ser vista estas relações para os dois aços bifásicos em duas situações.

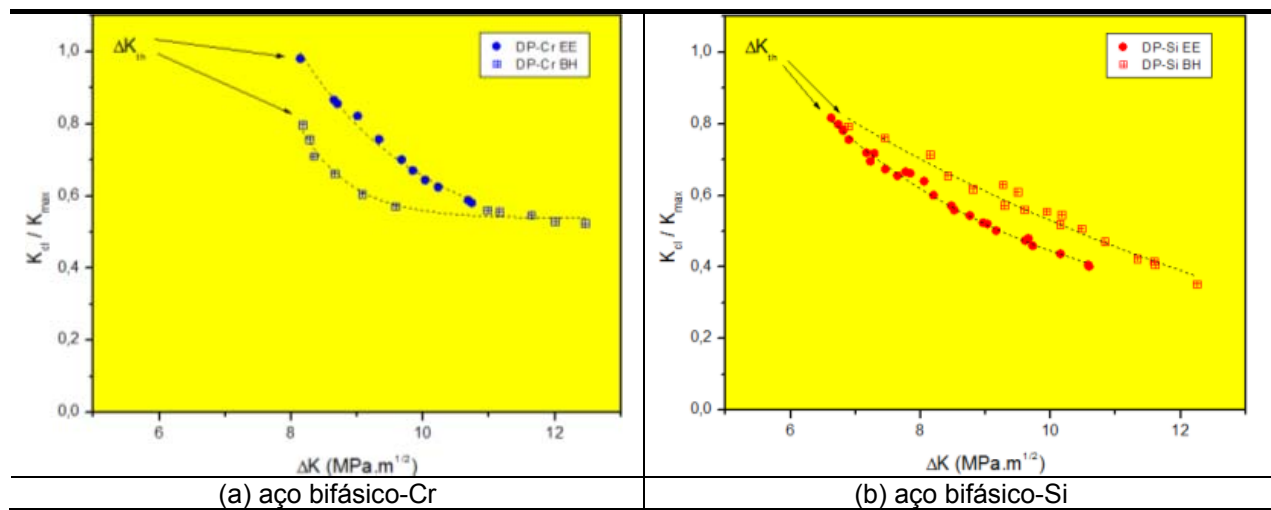


Figura 8. Variação do fechamento de trinca com a força motriz ΔK_{th} em duas situações.

Observam-se comportamentos distintos em relação aos dois aços. Para o aço bifásico-Cr, o tratamento de *Bake Hardening* provoca um menor fechamento de

trinca em comparação com o mesmo aço sem o tratamento térmico. Para a amostra de aço bifásico-Si o resultado é o inverso.

Outra observação importante é que o valor de K_{cl} cresce na medida em que ΔK se aproxima de ΔK_{th} . Este comportamento ocorre devido ao fechamento de trinca induzido por rugosidade e deflexão de trinca, e também foram encontrados por Cangüe⁽¹⁾ e Machado.⁽³⁾ Materiais que desenvolvem maior rugosidade apresentam maior fechamento de trinca. Podemos associar este resultado à fração volumétrica de martensita e as propriedades mecânicas de tração, principalmente alongamento total. Segundo Sodré,⁽²⁴⁾ o fenômeno de fechamento de trinca induzido por rugosidade é inversamente proporcional à resistência mecânica à tração do material.

A relação entre o valor de K_{cl} e o valor de ΔK_{th} pode ser visto na Figura 9. Observam-se resultados do presente trabalho juntamente com os resultados de Machado⁽³⁾ dentro desta linha de pesquisa sobre aços bifásicos.

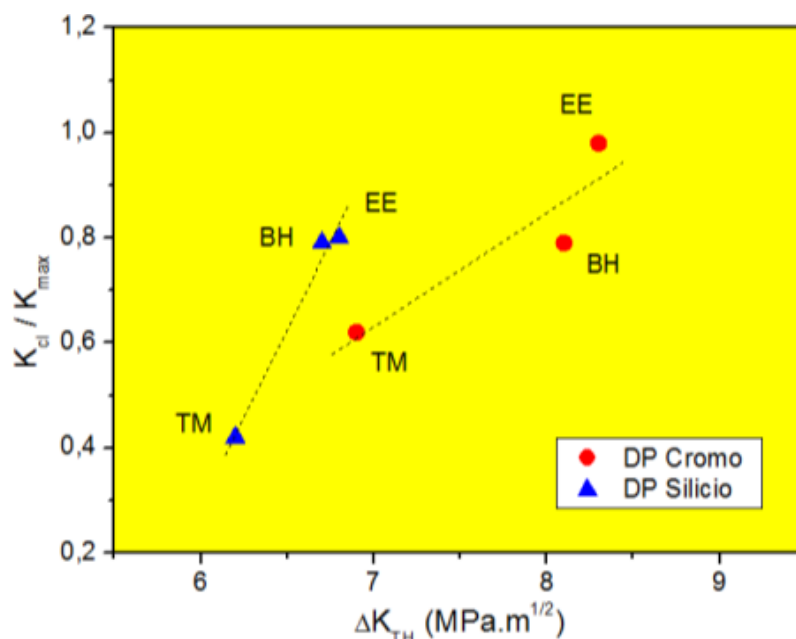


Figura 9. Relação diretamente proporcional entre ΔK_{th} e o valor de K_{cl} .

5 CONCLUSÃO

- 1) A microestrutura dos aços avaliados, bifásico-Cr e bifásico-Si, é formada por ferrita, martensita, além de bainita, perlita e constituintes MA.
- 2) A microestrutura do aço bifásico-Si apresentam uma fração volumétrica de ferrita aproximadamente 5 pontos percentuais maior que o aço bifásico-Cr.
- 3) A resistência à propagação de trinca por fadiga do aço bifásico-Cr é maior do que a do aço bifásico-Si após a aplicação do tratamento de BH.
- 4) Quando se avalia a resistência à propagação de trinca por fadiga dos dois aços em três distintas situações, observa-se que o aço bifásico-Cr sem nenhum tratamento, estado de entrega, apresenta o melhor valor de ΔK_{th} , portanto, uma maior resistência a fadiga.
- 5) Existe uma relação inversamente proporcional entre os valores de ΔK_{th} e os valores de limite de escoamento, e os valores para as amostras submetidas apenas ao tratamento de BH estão entre as demais situações, mostrando a contribuição individual do tratamento térmico. Resultados análogos foram encontrados na análise de dureza e nas propriedades mecânicas de tração.

- 6) Para o aço bifásico-Cr, o tratamento de BH provoca um menor fechamento de trinca em comparação com o mesmo aço sem o tratamento térmico. Para a amostra de aço bifásico-Si o resultado é o inverso.
- 7) Existe uma relação entre a fração volumétrica de martensita e o fechamento de trinca, pois esta interfere diretamente na maior rugosidade na ponta da trinca.

REFERÊNCIAS

- 1 CANGÜE, J.; R.; F.; Propagação de Trinca de Fadiga em Aços Bifásicos usados para Rodas Automobilísticas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, 2002. Ouro Preto, MG.
- 2 RODRIGUES, E., M.; Avaliação da Tenacidade à Fratura Através da Integral J de Dois Aços Bifásicos de Emprego Automobilístico, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais – REDEMAT/UFOP, 2003.
- 3 MACHADO, F., A.; Influência do Grau de Deformação e do Tratamento de “BAKE HARDENING” na Propagação de Trinca por Fadiga em dois Aços Bifásicos usados em Rodas Automobilísticas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, 2005. Ouro Preto, MG.
- 4 NAKAJIMA, K.; KAMIISHI, S.; YOKOE, M.; The Influence of Microstructural Morphology and Prestrain on Crack Propagation of Dual-phase Steels in the Near - Threshold Fatigue Region. ISIJ International, Vol. 39, No. 5, p. 486-492, 1999.
- 5 SARWAR, M.; MANZOOR, T.; AHMAD, E.; HUSSAIN, N.; The role of connectivity of martensite on the tensile properties of a low alloy steel. Materials and Design, Vol. 28, 1928-1933, 2007.
- 6 FOURLARIS, G.; ELLWOOD, R.; JONES, T., B.; The reliability of test results from simple test samples in predicting the fatigue performance of automotive components. Materials and Design, Vol. 28, p. 1198–1210, 2007.
- 7 MUŠÁLEK, R.; HAUSILD, P.; SIEGL, J.; BENSCH, J.; SLÁMA, J.; Mechanical Properties and Fracture Behavior of High-Strength Steels. Strength of Materials, Vol. 40, No. 1, p. 142-145 2008.
- 8 GODEFROID, L., B.; CÂNDIDO, L., C.; MORAIS, W., A.; GRITTI, J.; MELO, T., F.; CANGÜE, F.; Fatigue crack growth in two dual-phase steels used in automotive wheels discs. In: 8th International Fatigue Congress, 2002, Stockholm. Proceedings of the International Fatigue'2002 Conference. Londres: Elsevier Science, 2002.
- 9 GODEFROID, L., B.; GRITTI, J.; MELO, T., F.; CANGÜE, F.; MORAIS, W., A.; CÂNDIDO, L., C.; SILVA, B., V.; PEDRINI, R. H.; Crescimento de Trinca de Fadiga em dois Aços Dual-Phase usados em rodas automobilísticas. In: 57º Congresso Anual da ABM, 2002, São Paulo. CD-ROM do 57º Congresso Anual da ABM. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- 10 GODEFROID, L., B.; RODRIGUES, E.; PEDRINI, R., H.; CRUZ, J., R., B.; GRITTI, J.; CÂNDIDO, L., C.; Tenacidade à Fratura de dois Aços Bifásicos de Emprego Automobilístico. In: 58º Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. CD-ROM do 58º Congresso Anual da ABM. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- 11 GODEFROID, L., B.; GUIMARÃES, C., R.; SILVA, A., P., F., S.; Fatigue Crack Propagation and Closure Behaviour of a Dual-Phase Steel. In: 17th International Congress on Mechanical Engineering, 2003, São Paulo. CD-ROM do COBEM2003. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Mecânica, 2003.
- 12 GODEFROID, L., B.; CÂNDIDO, L., C.; CANGÜE, F.; RODRIGUES, E.; GRITTI, J.; MELO, T., F.; Tenacidade à Fratura e Crescimento de Trinca por Fadiga de dois Aços Bifásicos de Emprego Automotivo. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Vol. 58, No. 1, p. 45-50, 2005.
- 13 GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L., C.; SILVA, A., P., F., S.; MACHADO, F., A.; GRITTI, J.; MELO, T., F.; Efeito de Pré-deformação e de Tratamento Térmico de BAKE HARDENING na Propagação de Trinca de Fadiga de dois Aços Bifásicos de Emprego

- Automotivo. In: 42º Congresso de Laminação, 2005, Santos. CD-ROM do Congresso. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 14 GODEFROID, L., B.; CÂNDIDO, L., C.; GRITTI, J.; MELO, T., F.; MACHADO, F., A.; SILVA, A., P., F., S.; GUIMARÃES, C., R.; Propagação e Fechamento de Trinca de Fadiga em dois Aços Bifásicos Pré-deformados e com Tratamento de Bake Hardening. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Vol. 2, p. 71-75, 2006.
 - 15 GODEFROID, L., B.; HORTA, W., S.; MACHADO, F., A.; GRITTI, J.; CÂNDIDO, L., C.; Influência da Pré-deformação e do Tratamento de Bake Hardening na Tenacidade à Fratura e na Resistência à Fadiga de dois Aços Bifásicos. In: 61º Congresso Anual da ABM, 2006, Rio de Janeiro. CD-ROM do 61º Congresso Anual da ABM. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
 - 16 Godefroid, L., B., CÂNDIDO, L., C.; Application of Fracture Mechanics to Characterize the Mechanical Behavior of Ferrite-Martensite and Ferrite Bainite Steels for Automotive Industry. In: Jornada de Análisis de Falla y Prevención, 2010, Rosario. Jornada de Análisis de Falla y Prevención. Buenos Aires: Instituto Argentino de Siderurgia, 2010.
 - 17 HORTA, W., S.; Influência da pré-deformação e do Tratamento de "Bake Hardening" na Tenacidade à Fratura e na Resistência à Fadiga de dois Aços Bifásicos de emprego automotivo. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.
 - 18 NEVES, L., R., P.; Avaliação do Tratamento Térmico de Bake Hardening na Tenacidade à Fratura de Aços DUAL-PHASE. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.
 - 19 PALKOWSKI, H.; BRUECK, A.; Local use of Bake Hardening in Multiphase Steels for improved Properties in Structures and Joints. Journal of Advanced Manufacturing Systems, Vol.7, p. 283-285, 2008.
 - 20 KVAČKAJ, T.; MAMUZIĆ, I.; Development of Bake hardening Effect by Plastic Deformation and Annealing Conditions. METALURGIJA - JOURNAL OF METALLURGY, Vol. 45, p. 51-55, 2006.
 - 21 ASTM. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. E 647-00. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Philadelphia, 2000.
 - 22 VOORT, G. F. V.; Metallography – Principles e Practice. Edited by McGraw Hill-Book Company, 1984.
 - 23 GORNI, A., A.; Efeito da Temperatura de Acabamento e Velocidade de Resfriamento na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Bifásico. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1989. São Paulo, SP.
 - 24 SODRÉ, R., T., M.; Avaliação da Tenacidade à Fratura e da Resistência à Fadiga de Dois Aços Utilizados em Eixos de Carros Torpedo. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, 2008. Ouro Preto, MG.