

# ESTUDO DO EFEITO DE CONCENTRADOR DE TENSÕES EM AÇO BIFÁSICO SUJEITO À FADIGA<sup>1</sup>

*Juliano de Barros Veloso e Lima<sup>2</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>3</sup>  
Luiz Cláudio Cândido<sup>4</sup>  
Marcílio Sousa da Rocha Freitas<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho foi estudado o efeito de concentrador de tensões na resistência à fadiga em um aço Bifásico amplamente usado para fabricação de rodas na indústria automotiva, com 10% de fração volumétrica de martensita. O aço usado foi pré-deformado e tratado termicamente, para simular as operações industriais de estampagem e pintura das rodas. Os ensaios de fadiga (Curvas S-N) foram realizados com amplitude de carregamento axial constante em corpos-de-prova com 3,85 mm de espessura, com frequência de 30 Hz e razão R entre as tensões de 0,1. O efeito do concentrador de tensões foi avaliado introduzindo entalhes em alguns corpos-de-prova, simulando a geometria irregular das rodas. Corpos-de-prova entalhados mostraram significativa diminuição na vida à fadiga.

**Palavras-chave:** Concentrador de tensões; Resistência a fadiga; Aço bifásico.

## **STUDY OF THE EFFECT OF STRESS CONCENTRATION ON DUAL PHASE STEEL SUBJECTED TO FATIGUE**

### **Abstract**

In this research, the effect of stress concentration on fatigue crack resistance has been studied in a dual-phase steel broadly used in wheels for the automotive industry, with 10% of martensite volume fraction. The used steel was pre-strained and heat treated, to simulate the industrial operations of stamping and paint baking of the wheels. Load controlled constant amplitude axial fatigue tests (S-N curves) are conducted in specimens of 3.85 mm thickness, frequency of 30 Hz, at R stress ratio of 0.1. The effect of stress concentration was evaluated, by putting a sharp-notch in some specimens, to simulate the irregular geometry of the wheels. Notched specimens showed a significant decrease in the fatigue life.

**Key words:** Stress concentration; Fatigue resistance; Dual phase steels.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engº Mecânico; Universidade Federal de Ouro Preto; julianodib Barros@hotmail.com*

<sup>3</sup> *Engº Metal; M.C; D.C; Membro da ABM; Prof. Associado II; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas/UFOP; leonardo@em.ufop.br e candido@em.ufop.br*

<sup>4</sup> *Engº Civil; D.C; Prof. Associado II; Dep. Eng. Civil – Escola de Minas/UFOP; marcilio@em.ufop.br*

# 1 INTRODUÇÃO

A partir da crise mundial de petróleo iniciada na década de 70 do século passado, culminando nos dias de hoje com a crescente preocupação ambiental, se faz necessário um melhor entendimento e o desenvolvimento de ligas onde a razão resistência mecânica / peso seja otimizada.<sup>(1)</sup>

Desta necessidade, surgiram então os aços de alta resistência mecânica e baixa liga também conhecidos como ARBL, que possibilitou a utilização de chapas de menor espessura se comparada àquelas fabricadas em aço-carbono convencional. Na companhia Usiminas\* a evolução da produção de aços laminados a quente para emprego automotivo tem seguido esta tendência com o desenvolvimento de aços com estrutura bainítica e ferrítica-martensítica também conhecidos como bifásicos ou DP, numa referência a nomenclatura comumente encontrada *Dual Phase*.<sup>(2)</sup>

O desenvolvimento destas ligas teve grande repercussão, principalmente na indústria automotiva, uma vez que o menor peso das chapas utilizadas na fabricação dos automóveis propiciou o desenvolvimento de motores menores, mais econômicos e menos poluentes.<sup>(1)</sup>

O fato de grande parte dos componentes automotivos estar submetido em serviço a carregamentos cíclicos faz com que a conformabilidade e a resistência mecânica não sejam as únicas características desejadas em um aço, especialmente naqueles usados na fabricação de rodas. A resistência à fadiga torna-se uma importante característica exigida para estes materiais, especialmente para aqueles que têm sua vida diminuída por concentradores de tensões.

O uso do tratamento termo-mecânico de *Bake Hardening* se torna muito interessante já que possibilita a redução da espessura de chapas utilizadas nos automóveis, acarretando assim uma diminuição no peso da carroceria de até 10% e uma redução no consumo que pode chegar a 7%.<sup>(3,4)</sup>

A avaliação sistemática dos aspectos relativos ao fenômeno de fadiga, em especial o estudo da influência de concentradores de tensão é vital para buscar a redução da incidência da fadiga e aumentar a vida útil de componentes submetidos a esta patologia, reduzindo assim o número de falhas.

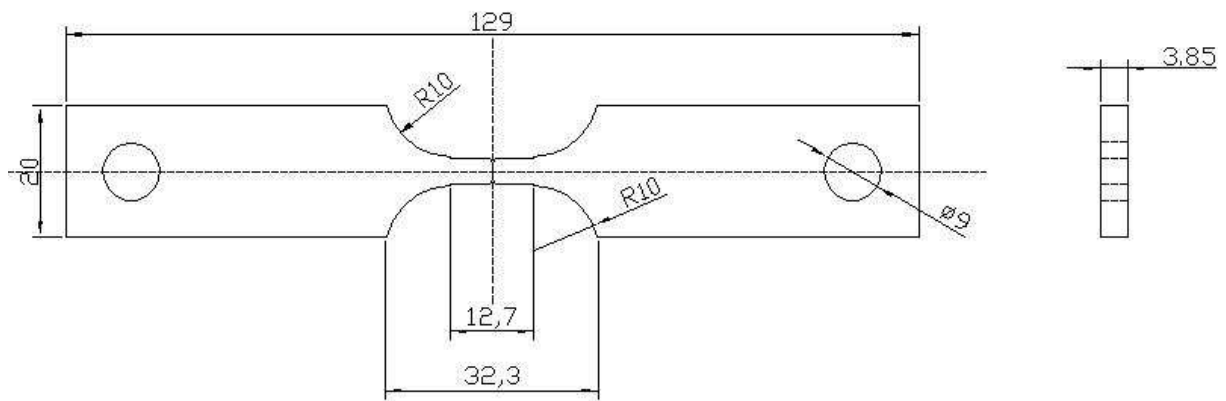
## 2 – MATERIAL E MÉTODOS

O aço, fabricado pela Usiminas, foi fornecido pela companhia fabricante de rodas ArvinMeritor,\*\* na forma de corpos-de-prova (CPs) para ensaio de tração e ensaio de fadiga conforme a Figura 1.

---

\* Usiminas – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.

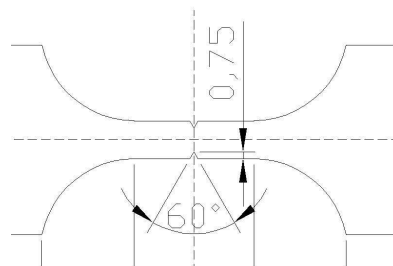
\*\* ArvinMeritor - ArvinMeritor do Brasil Sistemas Automotivos S.A.



**Figura 1 -**

Estes corpos-de-prova têm a espessura de 3,85 mm, que corresponde à espessura real de aplicação dos aços em rodas. Foram retirados no sentido transversal de laminação. O aço sofreu deformação por tração de 10% (máxima deformação que ocorre ao longo da espessura dos discos de rodas automobilísticas) e foi tratado por *Bake Hardening* com 170°C por 20 minutos para simular os processos de estampagem e pintura das rodas.

Em alguns CPs foram confeccionados entalhes com o objetivo de simular os concentradores de tensão encontrados nas rodas. Na Figura 2 está representado esquematicamente o entalhe criado nos CPs. Neste trabalho foi adotado a nomenclatura de aço DP-Cr-T(c/e), se referindo a estrutura bifásica do aço, ao cromo adicionado e ao tratamento de *Bake Hardening* e deformação de 10% sofrida e ao entalhe criado no corpo-de-prova.



**Figura 2 -** Representação esquemática dos entalhes dos CPs utilizados nos ensaios de tração e fadiga.

Foram feitas no material as caracterizações química, mecânica e metalográfica. Os ensaios de tração foram realizados em três corpos-de-prova com velocidade de carregamento de 0,05 mm/s para determinar o limite de escoamento, limite de resistência e alongamento percentual, segundo a Norma ASTM E 338(1981).<sup>(5)</sup>

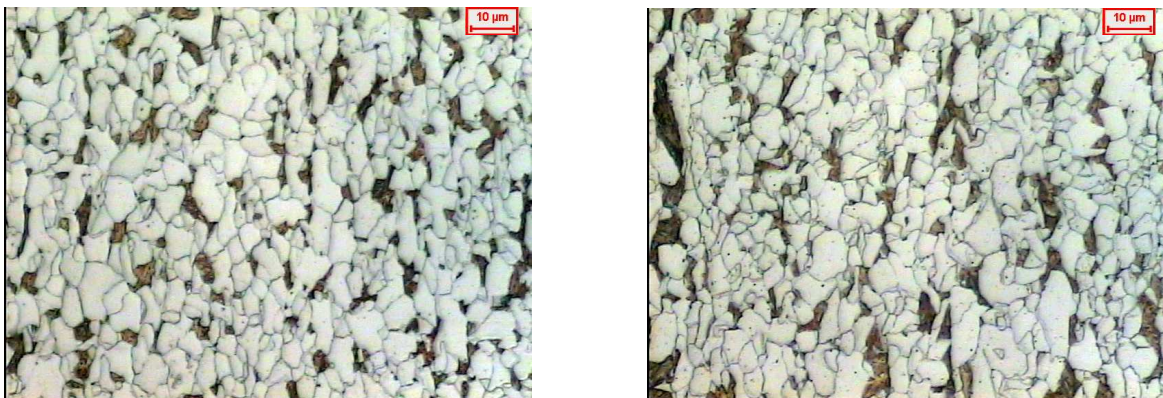
Depois foram ensaiados à fadiga pelo método de controle por tensão, caracterizando assim a tensão de vida à fadiga. Os resultados foram comparados com os obtidos no mesmo material sem concentradores de tensão. Os ensaios de

fadiga foram realizados em vinte e quatro corpos-de-prova confeccionados segundo a Norma ASTM E-466 (2001),<sup>(6)</sup> numa frequência de 30 Hz, com razão entre as tensões  $R = 0,1$ . Para cada amplitude de tensão usou-se três corpos-de-prova. Iniciou-se com uma tensão de 95% do limite de resistência decaindo em 5% a amplitude de tensão até encontrar tensão de vida à fadiga ( $10^7$  ciclos). Ambos os ensaios, fadiga e tração, foram realizados na temperatura ambiente numa máquina servo hidráulica do tipo MTS, modelo 810.

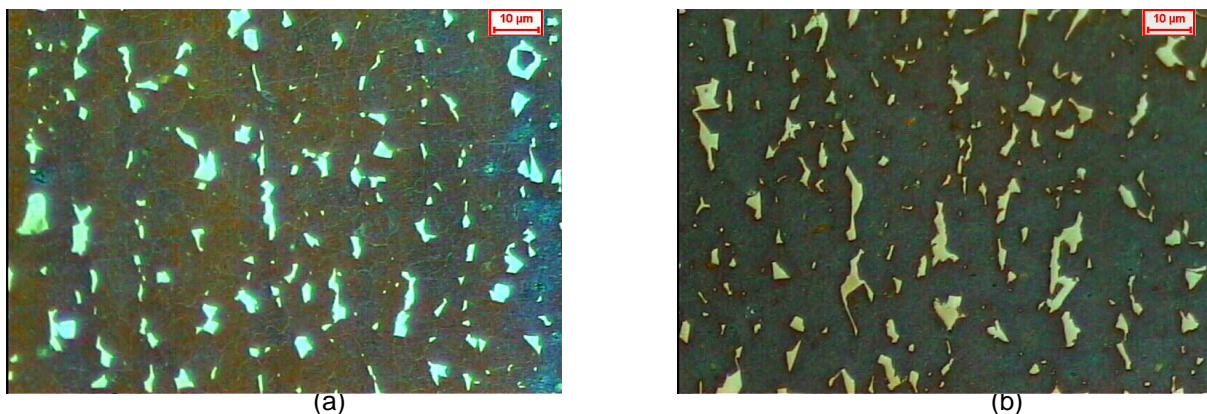
Amostras para metalografia foram preparadas em seções longitudinais e transversais à laminação, e observadas em um microscópio ótico LEICA, usando o reativos químicos LePêra e Nital<sup>(1,3)</sup>. Através de microscopia ótica, com auxílio de um banco metalográfico Neophot 30, foram realizadas as análises quantitativas e qualitativa dos aspectos microestruturais, tais como: fases presentes, fração volumétrica e tamanho de grãos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As microestruturas do aço bifásico na direção transversal e longitudinal são mostradas nas Figuras 3(a,b) e 4(a,b). Enquanto na Figura 3 o reativo é Nital, com ferrita clara e martensita escura, na Figura 4 o reativo é LePêra com a ferrita escura e a martensita clara. Observou-se que, usando qualquer dos dois reativos, a matriz ferrítica encapsulando as ilhas de martensita. Verifica-se que as microestruturas são similares na direção longitudinal e transversal, indicando que praticamente não houve fibramento mecânico na pré-deformação dos CPs.



**Figura 3** - Microestrutura do aço DP-Cr trabalhado; reativo: Nital (2%) 1000X (a) direção transversal e (b) direção longitudinal.



**Figura 4** – Microestrutura do aço DP-Cr trabalhado; reativo: LePêra 1000X.(a) direção transversal e (b) direção longitudinal.

A composição química junto com as propriedades mecânicas verificadas no ensaio de tração do aço utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1. Os valores apresentados mostram o efeito dos concentradores de tensão nas propriedades mecânicas observadas no ensaio de tração dos aços. Observa-se que o material entalhado apresentou um maior limite de resistência à tração quando comparado com o material sem concentradores de tensão. Nota-se ainda uma diminuição da deformação deste material. A literatura reporta que a presença do entalhe restringe a deformação plástica do material,<sup>(2,4,9)</sup> portanto a diminuição da deformação e o aumento da resistência mecânica eram esperados.

**Tabela 1** – Composição química do aço (% peso) e propriedades mecânicas<sup>(1)</sup>

Aço	C	Cr	Mn	Si	P	S	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)
<b>DP-Cr-T(s/e)</b>	0,052	0,58	1,16	0,07	0,044	0,003	644±5	28±2
<b>DP-Cr-T(c/e)</b>	0,052	0,58	1,16	0,07	0,044	0,003	893±6	22,7±3

$\sigma_r$  – Limite de resistência;  $\epsilon_t$  – Alongamento percentual; (s/e) – Sem entalhe; (c/e) – Com entalhe

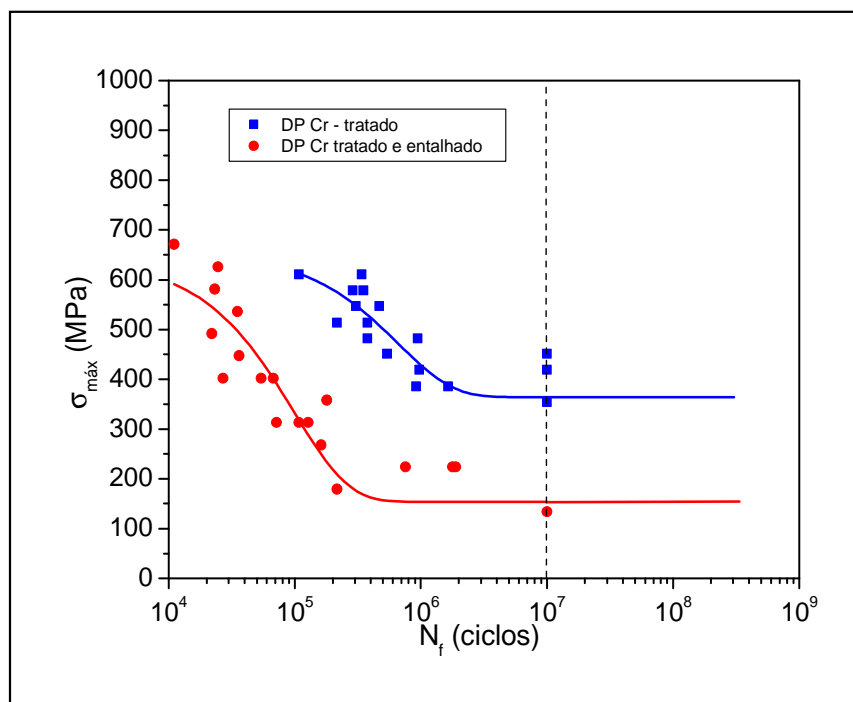
Resultados da metalografia quantitativa, obtidos com um analisador de imagens, são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Tamanho de grão, fração volumétrica e conectividade da martensita do aço

Aços	Tamanho de grão ferrítico ( $\mu\text{m}$ )	Fração volumétrica de martensita (%)	Conectividade da martensita (%)
<b>DPCr-L</b>	4,29±0,16	9,94±0,94	25,67±8,67
<b>DPCr-T</b>	4,43±0,39	11,69±0,59	25,91±9,13

Através dos dados quantitativos da Tabela 2 percebe-se que o tamanho do grão e a conectividade da martensita apresentam valores similares nas direções longitudinal e transversal. A fração volumétrica de martensita na direção longitudinal apresenta um valor inferior ao da direção transversal, porém sem indicar a tendência de anisotropia no material.

Após os ensaios de fadiga, foram levantadas as curvas relacionando a tensão e o número de ciclos até a ruptura, curva S-N, para o material entalhado. A Figura 6 ilustra o comportamento do aço entalhado e sem entalhe.



**Figura 6** - Curva S - N para aço bifásico (DP) com entalhe e sem entalhe.

O comportamento à fadiga, apresentado na Figura 6, mostra que o aço com concentradores de tensão apresenta diminuição no limite de fadiga, quando comparado com o material sem concentradores de tensão. Observa-se também que houve um decréscimo não somente no limite de fadiga, mas também na vida à fadiga para qualquer amplitude de tensão. Os resultados são coerentes com os reportados na literatura.<sup>(2-4,9)</sup>

#### 4 CONCLUSÕES

- O material entalhado apresentou um maior limite de resistência à tração quando comparado com o material sem concentradores de tensão.
- Houve uma diminuição no alongamento percentual do material com concentradores de tensão.
- Apesar do entalhe aumentar a resistência mecânica do aço, o limite à fadiga e a vida à fadiga diminuíram, quando comparado ao material sem entalhe.
- O processo de pré-deformação nos corpos-de-prova não levou ao desenvolvimento de anisotropia no material.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao DECIV/PROPEC/UFOP, a DEMET/REDEMAT/UFOP e ao CNPQ pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Magnabosco, R. Comparativo da vida em fadiga de dois aços ARBL para estampagem de rodas automotivas. In: 57° Congresso Internacional Anual da ABM – São Paulo – SP. CD-ROM do 57° Congresso Anual da ABM, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- 2 Godefroid, L. B.; Cândido, L. C.; Horta, W. S.; Machado, F. A.; Melo, T. M. F.; Gritti, J. A. Influência da Pré-deformação e do Tratamento de “*Bake Hardening*” na Tenacidade à Fratura e na Resistência à Fadiga de Dois Aços Bifásicos. In: Congresso Anual da ABM – Rio de Janeiro – RJ. CD-ROM do 61° Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- 3 Godefroid, L. B.; Cândido, L. C.; Morais, W. A.; Pedrini, R. H.; Silva, b. V.; Cangüe, F.; Melo, T. F.; Gritti, J. A. Crescimento de Trinca de Fadiga em Dois Aços Dual-Phase Usados em Rodas Automotivas. 57° Congresso Internacional Anual da ABM – São Paulo – SP. CD-ROM do 57° Congresso Anual da ABM, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- 4 Godefroid, L. B.; Cândido, L. C.; Gritti, J. A.; Cruz, J. R. B.; Pedrini, R. H.; Rodrigues, E. M.; Tenacidade à Fratura de Dois Aços Bifásicos de Emprego Automotivo. 58° Congresso Internacional Anual da ABM – Rio de Janeiro – RJ CD-ROM do 58° Congresso Anual da ABM, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- 5 ASTM E-388-91, 1996 Annual Book Of ASTM Standards.
- 6 ASTM E 466-01, Standard Practing for conducting force controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. 2001 Annual Book of ASTM Standards.
- 7 Schijve, J.; Fatigue of Structures and Materials, Holanda: Cap3. Kluwer Academic Publishers
- 8 Lee, Y.; Pan, J.; Hathaway, R.; Barkey, M.; Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice , EUA: Cap 6 . TLF e-Book.
- 9 Branco, C. M.; Fernandes, A. A.; Castro, P. M. S. T.; Fadiga de Estruturas Soldadas – Portugal – Fundação Calouste Gulbenkian