

AValiação DO DESENVOLVIMENTO DO Aço DUAL PHASE DA CLASSE 1000MPa COM REQUISITO DE EXPANSÃO DE FURO E PROCESSADO EM DIFERENTES CONDIÇÕES*

Rodrigo Cruz Oliveira¹
João Francisco Batista Pereira²
Paulo Roberto Cetlin³

Resumo

Nos últimos anos, a indústria automotiva tem evoluído de forma significativa em relação à preservação ambiental e com respeito à segurança veicular. A Usiminas, alinhada a esses avanços, tem realizado estudos visando obter novos produtos de alta resistência mecânica que possibilitem a redução do peso dos veículos e diminuição do consumo de combustível, além do aumento da segurança. Para novos projetos de veículos, como fator de melhoria do desempenho dos materiais de alta resistência, têm assumido destaque especial nos aços *Dual Phase*, principalmente naqueles do grau 1000MPa, as características de expansão de furo, em função da correlação com a vida em fadiga e o comportamento à fratura. Esse trabalho teve por objetivo avaliar uma das etapas do ciclo de desenvolvimento de um aço *Dual Phase* do grau 1000MPa com características de expansão de furo maior que 20%. O trabalho avaliou três conceitos diferentes de liga submetidos a tratamentos térmicos específicos. Os resultados obtidos permitiram retroalimentar o ciclo posterior do desenvolvimento, no qual resultados positivos foram alcançados.

Palavras-chave: Segurança; *Dual phase*; Expansão de furo; Propriedade mecânica.

EVALUATION OF DEVELOPMENT OF DUAL PHASE STEEL OF 1000 MPa WITH HOLE EXPANSION REQUIREMENT AND PROCESS IN DIFFERENT CONDITIONS

Abstract

In recent years, the automotive industry, has intensified concern for the environment and the vehicle safety due to automotive laws increasingly restrictive. Usiminas, in line with the new trends, has conducted several studies to obtain new high-strength steel products that enable the reduction of vehicle weight, decrease fuel consumption and increased security. For new vehicle projects, as improvement in the performance of high-strength materials, a property that has taken special emphasis on Dual Phase steels, especially the 1000MPa strength class, is the expansion hole characteristics due its correlation with the fatigue life and the fracture behavior. This study aimed to evaluate one of the stages of the development cycle of a Dual Phase steel grade 1000MPa with characteristics of hole expansion greater than 20%. The work assessed three different concepts of alloy subjected to specific heat treatments. The results obtained made it possible to provide feedback to the subsequent cycle of development where positive results were achieved.

Keywords: Safety; Dual phase; Hole expansion; Mechanical properties.

¹ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Assistência Técnica, Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, MSc, MBA, Especialista de Produto, Atendimento ao cliente, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, PhD, Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva tem buscado o aumento da segurança veicular e também a redução da emissão de CO₂ através de melhorias tais como: maior eficiência dos motores, melhor aerodinâmica e diminuição de peso do veículo. Em sintonia com as novas tendências, a Usiminas mantém um programa de desenvolvimento de aços de alta resistência mecânica que possibilitam a utilização de peças de menor espessura, contribuindo assim, para a redução de peso nos veículos. Dentre os produtos recentemente desenvolvidos constam o aço TRIP 800MPa, o aço Complex Phase 1000, o aço para conformação a quente com revestimento Zn-Fe e o aço *Dual Phase* (DP) do grau 1000MPa com diferentes conceitos de liga.

Os aços DP têm como principais características a alta resistência a tração, baixo limite de escoamento, boa plasticidade [1], elevado índice BH (Bake Hardening) e alta capacidade de estiramento, colocando-os como os principais aços avançados de alta resistência utilizados na fabricação de automóveis.

Uma propriedade que tem assumido destaque especial nos aços DP, inclusive para o de grau 1000MPa, é a capacidade de estiramento de flange/borda, tendo em vista a presença frequente deste modo de deformação na estampagem de peças estruturais e sua correlação com a propagação de trincas e o comportamento em fadiga. O ensaio de expansão de furo é o teste laboratorial que melhor expõe o material a este modo de deformação e, por isso, em conjunto com as propriedades mecânicas em tração, tem sido bastante utilizado para a previsão do comportamento durante estampagem desses aços.

O objetivo desse trabalho foi avaliar, como primeiro ciclo de desenvolvimento, a partir de três diferentes conceitos de liga, a influência de tratamentos térmicos específicos na obtenção de um aço DP do grau 1000 com capacidade de expansão de furo superior a 20%.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram analisados três conceitos de liga propostos para a fabricação de aços DP do grau 1000MPa com características de expansão de furo. Cada um foi processado com parâmetros específicos no processo de recozimento contínuo de forma a otimizar a característica de expansão de furo e atender às propriedades mecânicas requeridas para esse grau de aço.

Amostras de material de cada conceito de liga foram retiradas para análise das propriedades mecânicas, metalográficas e testes de expansão de furo.

Para a avaliação dos resultados obtidos neste estudo e retroalimentação de dados para os ciclos posteriores do desenvolvimento, foi utilizada a ferramenta de qualidade ciclo PDCA (figura 1). Foram definidas as metas e os processos a serem utilizados para a produção das bobinas a serem avaliadas, P (Plan), e a seguir, realizado o processo de fabricação das mesmas, D (Do). A partir de amostras dos produtos obtidos foram avaliados os resultados de expansão de furo e de propriedades mecânicas, C (Check). As análises realizadas na etapa anterior possibilitaram a atuação sobre as causas que impediram que o resultado proposto fosse atingido A (Action) [2].

Figura 1. Ciclo PDCA

Neste estudo será avaliado o ciclo 1 do desenvolvimento do aço DP1000 com característica de expansão de furo.

2.1 Composição Química

A composição química dos aços estudados pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em peso)

Bobina	C	Mn	B
1	0,15-0,20	2,10-2,20	sem boro
2	0,10-0,15	2,10-2,20	com boro
3	0,10-0,15	2,20-2,40	com boro

A variação do teor de carbono foi proposta como forma de variar a quantidade de ferrita e martensita na microestrutura do aço, modificando assim, suas propriedades mecânicas e de expansão de furo. Já a adição de boro teve por objetivo evitar a nucleação da ferrita através de sua segregação nos contornos de grãos da austenita, atrasando a transformação da austenita em ferrita ($\gamma \rightarrow \alpha$), permitindo assim, dependendo dos parâmetros de processo do recozimento contínuo, uma maior formação de bainita.

2.2 Processo de Produção das Bobinas

Com o objetivo de otimizar a característica de expansão de furo, foram modificados os parâmetros de processo no recozimento contínuo (temperatura de encharque e *over aging*) além do grau de encruamento. Na Tabela 2 estão mostrados os parâmetros visados no processo de recozimento contínuo.

Tabela 2. Parâmetros visados nos processos de laminação a frio (valores visados)

Bobina	Temperatura Encharque (°C)	Temperatura Over Aging (°C)	Encruamento (%)
1	780-820	240-280	0,3
2	760-800	300-340	0,3
3	820-860	310-350	0,4

2.3 Ensaios e Análises

Para a caracterização dos materiais foram realizadas análises químicas e ensaios de tração. A microestrutura foi avaliada por MEV (microscopia eletrônica de varredura) e por MO (microscopia ótica). O desempenho dos diferentes conceitos de liga foi verificado através do teste de expansão de furo e das propriedades mecânicas em tração.

2.3.1 Ensaio de tração

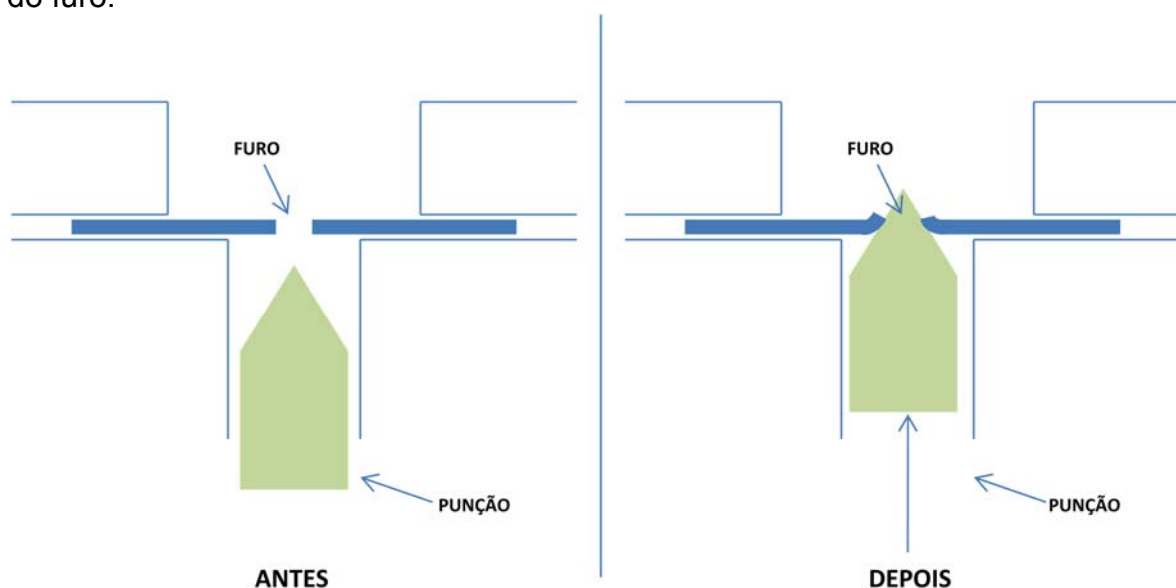
Ensaio realizado de acordo com a norma EN10002-1 [3].

2.3.2 Ensaio metalográfico

A determinação e a proporção das fases foram obtidas utilizando o método de contagem manual de pontos (conforma norma ASTM E562 [4]), a partir das imagens obtidas via MEV.

2.3.3 Expansão de furo

O teste de expansão de furo foi executado de acordo com a norma ISO/TS 16630:2003 [5] que consiste em forçar uma ferramenta cônica (Figura 2), através de um furo de 10 mm de diâmetro produzido no centro de uma amostra de dimensões 150mm x 150mm. O ensaio é parado manualmente ao se perceber a trinca na borda do furo.

**Figura 2.** Ensaio de expansão de furo.

O resultado do teste é calculado de acordo com a expressão (Equação 1). O ensaio é realizado numa máquina ERICHSEN.

$$\lambda = \frac{100 * (Df - Di)}{(Di)} \quad (1)$$

Sendo:

λ : razão de expansão de furo

Df: diâmetro final do furo

Di: diâmetro inicial do furo

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

3.1.1 Ensaio de tração

As propriedades mecânicas encontradas no ensaio de tração estão mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades mecânicas

Bobina	LE (MPa)	LR (MPa)	Alo (%) BM(50)
1	683	1076	18
2	515	869	21,5
3	722	936	16,5
Norma	550-730	>980	>8,0

3.1.2 Expansão de furo

Os resultados obtidos neste ensaio são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do ensaio de expansão de furo

Bobina	Valores de Expansão de Furo λ (%)					MÉDIA (%)	Valor λ visado (%)
1	12	10	7	10	9	9,6	≥ 20
2	28	30	24	30	31	28,6	
3	28	27	30	29	30	28,8	

3.1.3 Microestrutura

Foram analisadas amostras de cada conceito de liga. A caracterização da microestrutura foi feita com ataque de Nital (4%) para revelação da ferrita, seguido de nova preparação e ataque com metabissulfito para revelação da martensita (Figuras 3, 4 e 5).

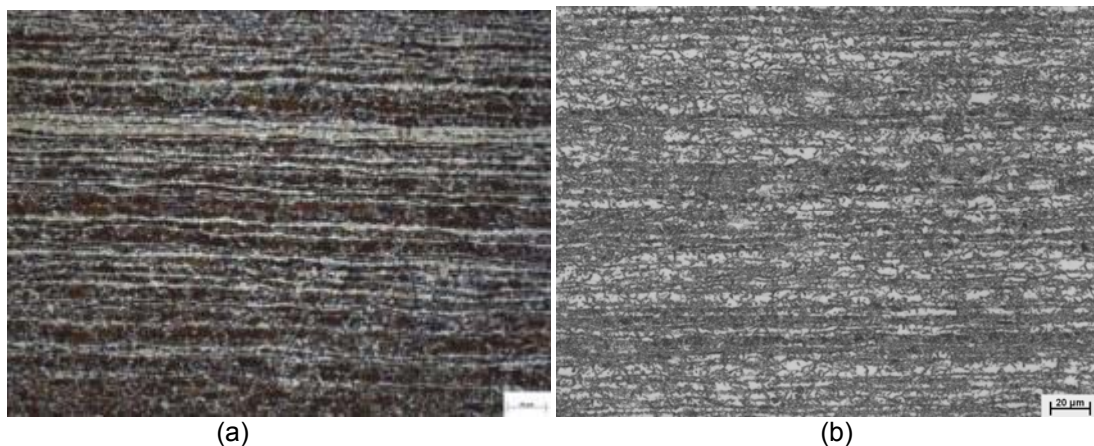


Figura 3. Microestrutura da bobina 1 (a) Metabisulfito 500X (b) Nital 500X.

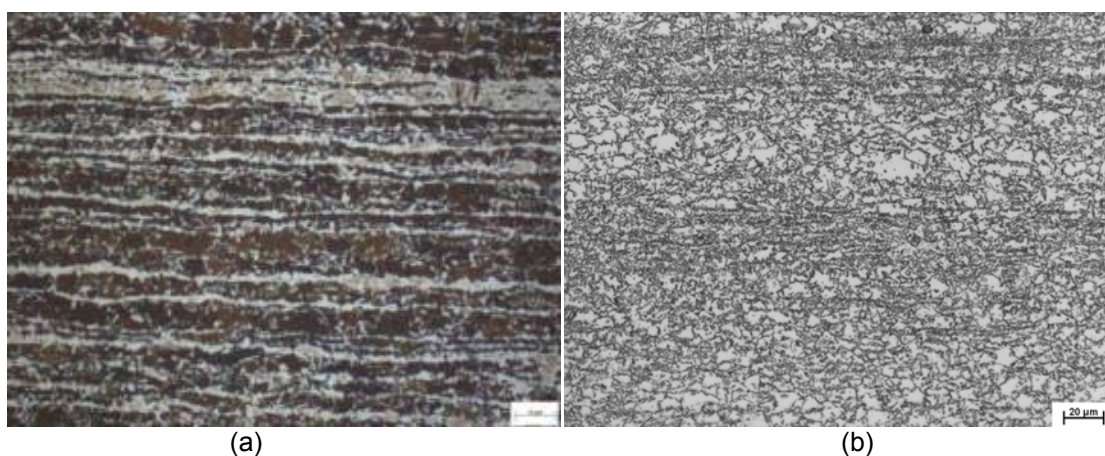


Figura 4. Microestrutura da bobina 2 (a) Metabisulfito 500X (b) Nital 500X.

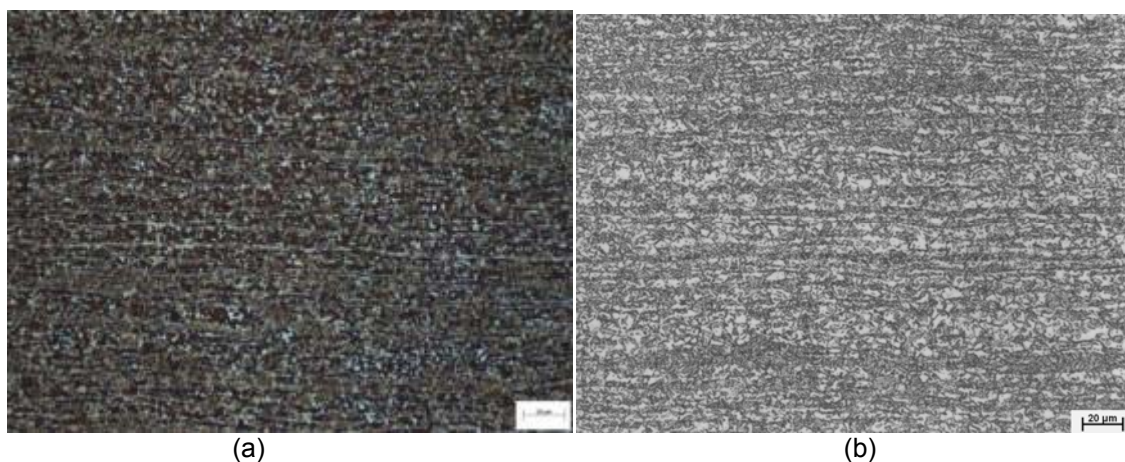


Figura 5. Microestrutura da bobina 3 (a) Metabisulfito 500X (b) Nital 500X.

A quantificação das fases está descrita na Tabela 5.

Tabela 5. Quantificação das fases

Bobina	Ferrita (%)	Martensita (%)	Bainita (%)
1	25	32	43
2	37	28	35
3	28	22	50

3.2 Discussão

Analisando os resultados de propriedades mecânicas a tração verifica-se que as bobinas 2 e 3 não atendem aos valores mínimos de resistência mecânica especificados pela norma da Usiminas.

O decréscimo dos valores de propriedades mecânicas da bobina 2, em comparação com a bobina 1, pode ter ocorrido devido a:

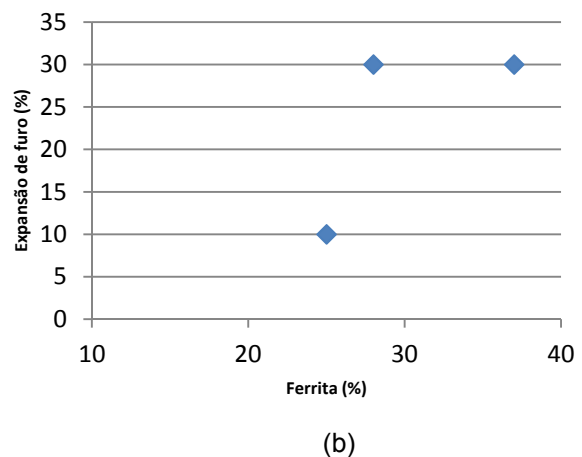
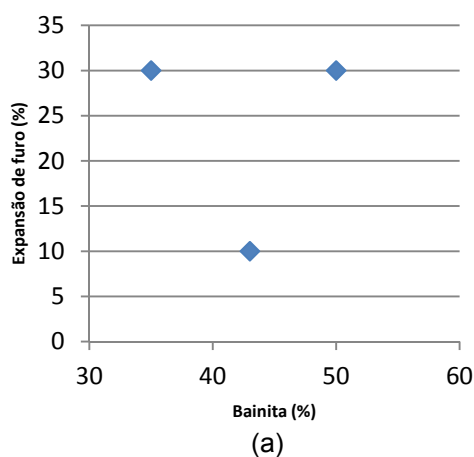
- A diminuição da quantidade de carbono, reduzindo assim a dureza da fase martensítica e promovendo a redução do limite de resistência;
- O aumento da temperatura do *over aging* no recozimento contínuo reduzindo a quantidade de martensita e diminuindo os valores de resistência mecânica.

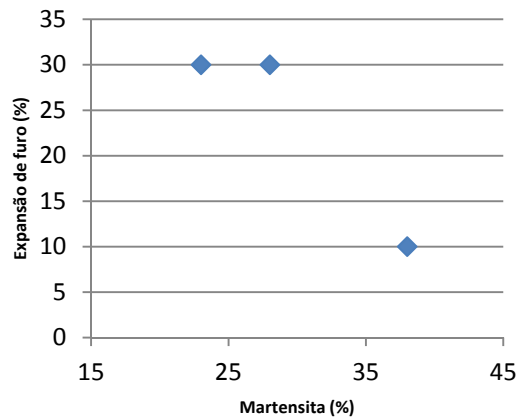
Analisando a bobina 3, em comparação com a bobina 2, as hipóteses para a variação de propriedades mecânicas são:

- Aumento da quantidade de boro, facilitando a formação de bainita no aço e diminuindo a quantidade da ferrita, aumentando assim os valores de resistência mecânica;
- A maior quantidade de bainita influenciou no decréscimo do alongamento. Este comportamento é similar ao obtido por Fujita et al [6];
- Aumento da porcentagem de redução durante o processo de encruamento.

Em relação à bobina 1, as propriedades mecânicas atenderam às faixas especificadas para o grau de aço, porém o valor médio obtido no ensaio de expansão de furo da bobina 1 foi baixo (9,6%), bastante inferior ao mínimo especificado (20%). Acredita-se que a menor quantidade de ferrita e a maior de martensita deste material tenham influenciado negativamente sua capacidade de expansão de furo. Outro aspecto microestrutural, que pode ter deteriorado a capacidade de expansão de furo, foi a formação mais intensa de bandejamento de martensita nesta bobina em relação às demais avaliadas. Segundo a literatura [7], durante o processo de corte por puncionamento para a confecção da borda do furo, pode ocorrer a formação de microtrincas preferencialmente em volta e ao longo dessas bandas, acelerando a propagação de trincas durante os esforços de estiramento da borda.

Na figura 6 são mostradas as correlações entre os resultados de expansão de furo e a fração volumétrica de bainita, ferrita e martensita.





(c)

Figura 6. Relação entre expansão de furo e as fases (a) Bainita, (b) Ferrita e (c) Martensita.

- 1- Não foi observada correlação entre quantidade de bainita e expansão de furo conforme descrito por Fujita et al [6].
- 2- Os resultados sugerem que a ausência de martensita e a presença de ferrita são fatores mais relevantes para a expansão de furo.

Não foi observada uma clara correlação entre a quantidade de bainita e a capacidade de expansão de furo (Figura 6a). De acordo com a literatura [8-10], é o gradiente de dureza entre os microconstituintes presentes nos aços DP que leva à concentração das deformações na ferrita e ao aparecimento de microtrincas na sua interface com a martensita, reduzindo a capacidade de expansão de furo do aço. Seria esperado, portanto, que a maior fração de bainita promovesse um menor contraste na dureza entre as fases, causando uma distribuição mais uniforme das deformações na região da borda do furo e, conseqüentemente, a uma maior capacidade de expansão de furo. Os resultados obtidos mostraram que, para as condições avaliadas, a ferrita (Figura 6b) e a martensita (Figura 6c) tiveram influência mais decisiva sobre a capacidade de expansão de furo dos aços avaliados do que a bainita.

Como discutido anteriormente, os resultados dessa etapa não permitiram atingir os objetivos finais almejados, ou seja, de conciliar elevada resistência mecânica com capacidade de expansão de furo superior a 20%. Contudo, mostraram-se de grande importância na proposição de novos ciclos térmicos e de ajustes na composição química de etapas posteriores do projeto, para conclusão do ciclo de desenvolvimento dessa classe de produto.

Após o ciclo 1 de desenvolvimento, avaliado neste estudo, foram realizados outros ciclos para se desenvolver aços DP1000 com expansão de furo e com isso a Usiminas incorporou ao seu portfólio esta qualidade em três níveis de expansão de furo. O produto tradicional com λ inferior a 20%, um produto com $20\% < \lambda < 50\%$ e um produto com $\lambda > 50\%$.

4 CONCLUSÃO

A partir da avaliação de três conceitos de liga de aços DP do grau 1000MPa processados no recozimento contínuo com parâmetros específicos, de forma a desenvolver um aço desse mesmo grau de resistência mecânica que apresentasse ainda, propriedade de expansão de furo superior a 20%, foram obtidas as seguintes conclusões.

A expansão de furo máxima obtida foi de aproximadamente 30% para os aços 2 e 3. Contudo, nesses aços, a resistência mecânica ficou abaixo do mínimo de norma. Os resultados foram atribuídos à redução da quantidade de carbono, aumento da quantidade de boro e aumento da temperatura de *over aging*.

Propriedades mecânicas em acordo com a norma foram obtidas somente para o aço 1. Contudo, nesse material os resultados de expansão de furo ficaram abaixo do valor mínimo visado. O resultado foi principalmente atribuído à maior quantidade de carbono e menor quantidade de boro, obtendo assim uma maior quantidade de martensita e menor quantidade de ferrita.

Os resultados obtidos nessa etapa permitiram retroalimentar o ciclo posterior do desenvolvimento do aço DP1000 no qual resultados positivos foram obtidos.

A Usiminas conta hoje no seu portfólio o aço DP1000 em três níveis de expansão de furo. O produto tradicional com λ inferior a 20%, um produto com $20\% < \lambda < 50\%$ e um produto com $\lambda > 50\%$.

Agradecimentos

A Universidade Federal de Minas Gerais e a CAPES-PROEX.

REFERÊNCIAS

- 1 Hutchinson, W. B., Dual phase sheet shapes up for the future, Iron and Steel International. April, pp. 55-60, 1984.
- 2 Oliveira, R.C., Lima, J.H.R. Utilização de Ferramentas da Qualidade. 2012. 13 f. Trabalho de Conclusão do Curso MBA em Planejamento e Gestão Estratégica, Uninter. Março de 2012.
- 3 EN 10002-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature. 2001. 54 f. Norma ISO. 2001.
- 4 ASTM E 562 – Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1995, pp. 500 – 505.
- 5 ISO/TS 16630. Metallic Materials – Method of Hole Expansion Test. 2003. 7f. Norma ISO. 2003.
- 6 Fujita, N., Nonaka. et al. Development of Ultra-High Strength Steel Sheets with Tensile Strength of 980 MPa. 2007. 5f. Artigo para SAE Internacional. Abril de 2007.
- 7 Tsiouridis P., Werner E., Kremaszky C., Tragi E. – “Formability of High Strength Dual Phase Steels”, Steel Research Int., 77, No. 9-10, pp. 654 – 666, 2006.
- 8 Uthaisangsuk, V., Prah, U., Bleck, W. Stretch-Flangeability Characterization of Multiphase Steel using a Microstructure based failure modeling. Computational Materials Science. 617p-623p. 2009.
- 9 Narayanasamy, R., et al. Effect of mechanical and fractographic properties on hole expandability of various automobile steels during hole expansion test. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol 47, 365p-380p. Julho 2009.
- 10 Hasegawa, K. et al. Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steel Sheets. 2003. The Iron and Steel Institute of Japan. Vol 44. 603p-609p. Outubro, 2003.