

# ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA ESTAMPAGEM DO AÇO DP600 E DP965<sup>1</sup>

Valmir Dias Luiz<sup>2</sup>  
Júlie Pinto Quintão<sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo comparar as propriedades mecânicas para estampagem de dois aços bifásicos (DP600 e DP965). Os aços DualPhase apresentam microestrutura constituída por uma matriz com 80% a 85% de ferrita poligonal macia e mais 15% a 20% de martensita dura. Para a realização deste estudo comparativo foram confeccionados corpos de prova padronizados a partir de chapas finas de aço com 1,60 mm de espessura para serem utilizados no ensaio de tração, sendo que a direção de extração dos corpos de prova foram a 0°, 45° e 90°, respectivamente. Após o ensaio de tração foi possível determinar todas as propriedades mecânicas necessárias ao estudo da estampabilidade destes aços, onde verificou-se que o aço DP600 possui maior coeficiente de encruamento ( $n$ ), possuindo assim maior estampabilidade, porém, apresentando maior susceptibilidade ao fenômeno do orelhamento.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas; Estampagem; DP600; DP965.

## COMPARATIVE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES FOR STAMPING STEEL DP600 AND DP950

### Abstract

This study aims to compare the mechanical properties for printing two dual phase steels (DP600 and DP965). DualPhase steels exhibit microstructure consisting of a matrix with 80% to 85% of soft polygonal ferrite and 15% to 20% hard martensite. To accomplish this comparative study were standardized specimens made from thin sheets of steel with 1.60 mm thick to be used in tensile testing, and the direction of pull of the specimens were 0°, 45° and 90°, respectively. After the tensile test was possible to determine all the required mechanical properties of drawability to study these steels, where it was found that the DP600 steel has a higher strain hardening coefficient ( $n$ ), thus having greater drawability, however, showing greater susceptibility to the phenomenon of earing.

**Key words:** Mechanical properties; Stamping; DP600; DP965.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc., Professor do Curso Técnico de Metalurgia, CEFET, Campus VII, Timóteo, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Aluna do Curso Técnico de Metalurgia, CEFET, Campus VII, Timóteo, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às pressões ambientais, econômicas e mercadológicas uma revolução está em curso no setor automobilístico em decorrência da crescente necessidade de se produzir automóveis mais leves, econômicos, seguros e menos poluentes.<sup>(1)</sup> Um material que apresente altíssimo desempenho é o único capaz de atender a todos os requisitos, mas este material não existe. O que se tem é um cenário de competição entre os materiais existentes ou um cenário de desenvolvimento contínuo dos materiais clássicos ou, ainda, um cenário de mudanças abruptas com a utilização de novos materiais.<sup>(2)</sup> A indústria automobilística é um dos setores da economia no qual a competição é mais acirrada e as mudanças na estrutura das empresas ocorrem com maior frequência. Os fornecedores da indústria automotiva são assim continuamente desafiados a suprir a demanda por melhor qualidade, menor custo e melhor eficiência para as linhas de montagem automotivas.<sup>(3)</sup>

Contudo, com a globalização, os fabricantes de produtos estampados estão se defrontando com um mercado consumidor cada vez mais exigente, buscando qualidade e preço. Mais do que nunca, as indústrias de matéria-prima para estampagem e as indústrias de fabricação de produtos estampados estão se preocupando em investir e reduzir o custo de produção e de melhorar a qualidade dos produtos. O processo de fabricação depende de um profundo conhecimento da qualidade de sua matéria-prima. A qualidade da matéria-prima é a primeira condição de otimização para os processos de fabricação. As indústrias de produtos estampados, no momento atual, devem investir em tecnologia, para melhorar os processos de fabricação para a obtenção de produtos de qualidade.<sup>(4)</sup>

Os aços Dual Phase foi uma das soluções encontradas para atender este grande mercado consumidor, estes aços tiveram seus primeiros desenvolvimentos em 1937. A obtenção de microestrutura ferrítica-martensítica, desde o aquecimento de aços na região intercrítica e o posterior resfriamento, conferem elevada resistência mecânica, boa tenacidade a estes aços. No início da década de 70, devido às necessidades da indústria automobilística relacionadas ao desempenho mecânico e baixa densidade das ligas, os aços Dual Phase tiveram investimento consideráveis em pesquisas e desenvolvimentos.<sup>(5)</sup>

Por isso é importante conhecer as propriedades mecânicas deste tipo de aço, e um dos meios de se conhecer são os ensaios de conformação para que se obtenha as propriedades e características de acordo com a preferência do cliente. Dentre os vários tipos de ensaios mecânicos, o ensaio de tração uniaxial é o mais universal. Neste tipo de ensaio diversas propriedades podem ser obtidas e utilizadas na avaliação da formabilidade, entre elas:

- limite e patamar de escoamento, associado aos defeitos de metal frouxo e bandas de Lüders;
- módulo de Young, associado aos efeitos de recuperação elástica e distorção de formato da peça;
- expoente de encruamento,  $n$ , associado ao aumento na tensão de fluxo em uma região e à distribuição da deformação para regiões vizinhas menos solicitadas. É um dos parâmetros de processo que mais influenciam a formabilidade de chapas;<sup>(6)</sup>
- expoente de sensibilidade à taxa temporal de deformação,  $m$ , associado às operações onde ocorrem gradientes de taxa de deformação gerados pelo atrito ou por restrições impostas pela geometria;<sup>(7)</sup>

- anisotropia normal,  $R$ , associada a grande resistência à deformação no sentido da espessura da chapa, aspecto desejável em operações de embutimento;
- deformação total associada à possibilidade de grande deformação pelo material, aspecto desejável e muito utilizado como indicativo da formabilidade;
- deformação uniforme,  $\varepsilon_U$ , associada à instabilidade plástica;
- curva tensão-deformação efetiva;
- curva de escoamento; e
- módulo tangente e secante.

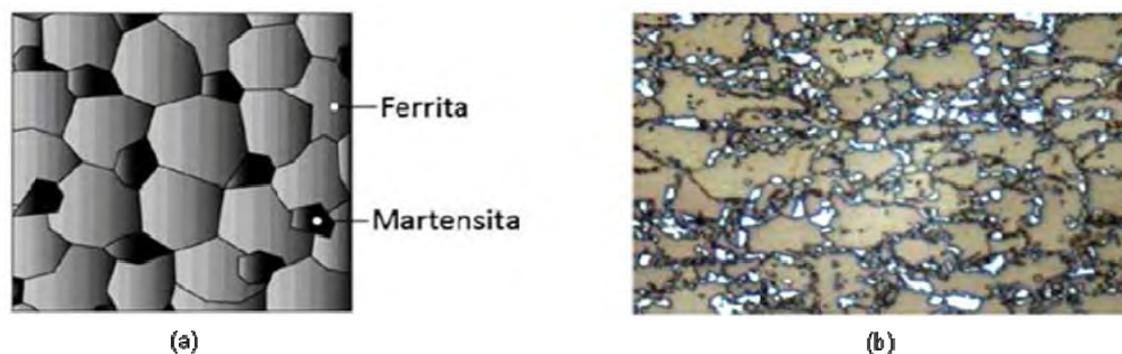
Portanto, o ensaio de tração uniaxial é o ensaio adotado para o desenvolvimento do presente trabalho, onde as diferentes propriedades mecânicas necessárias ao estudo da estampabilidade foram determinadas e comparadas para duas categorias de aços Dual Phase, o aço DP600 e o aço DP965.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Aços Utilizados no Estudo

Os materiais utilizados no presente estudo foram o aço DP600 e o aço DP965, ambos contendo ferrita mais ilhas de martensita (Figura 1). A fase macia ferrítica é geralmente contínua, dando a estes aços uma excelente ductilidade.

Entretanto, quando esses aços são conformados a deformação é concentrada na fase de menor resistência (ferrita) em torno das ilhas de martensita, propiciando assim uma alta taxa de encruamento para esses aços, e conseqüentemente, maior estampabilidade.



**Figura 1.** Micrografia do aço DP com ilhas de martensita em uma matriz ferrítica, em (a) esquemática, em (b) real de um aço DP600.<sup>(8)</sup>

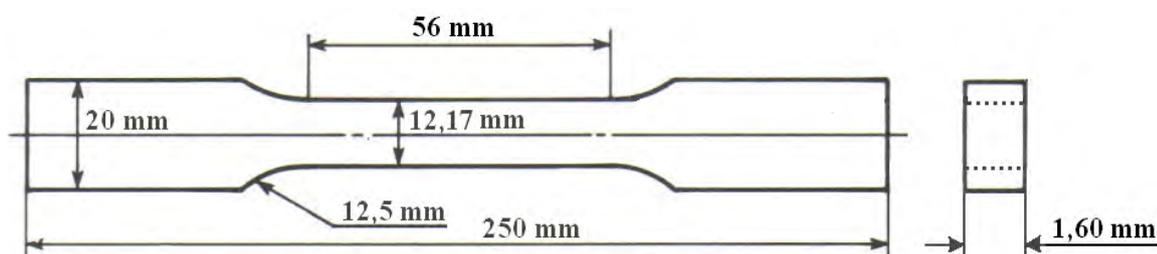
Estes aços possuem alguns elementos de liga que lhes conferem melhores propriedades conforme pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais elementos de liga presentes nos aços DP<sup>(9)</sup>

Elemento	% em peso	Razão / influência da adição
Carbono	0,06% à 0,15%	Estabilizador da austenita Endurecedor da martensita Determina a distribuição da fases
Manganês	1,5% à 2,5%	Estabilizador da austenita Endurecedor da ferrita Retarda a formação da ferrita
Cromo e Molibdênio	até 0,40%	Estabilizador da ferrita Retarda a formação da perlita e da bainita
Vanádio	até 0,06%	Estabilizador da ferrita Endurecedor por precipitação Refina a microestrutura
Nióbio	até 0,04%	Estabilizador da ferrita Reduz a temperatura Ms Refina a microestrutura
Silício	até 1,0%	Abaixa a solubilidade do carbono na ferrita Piora a molhabilidade

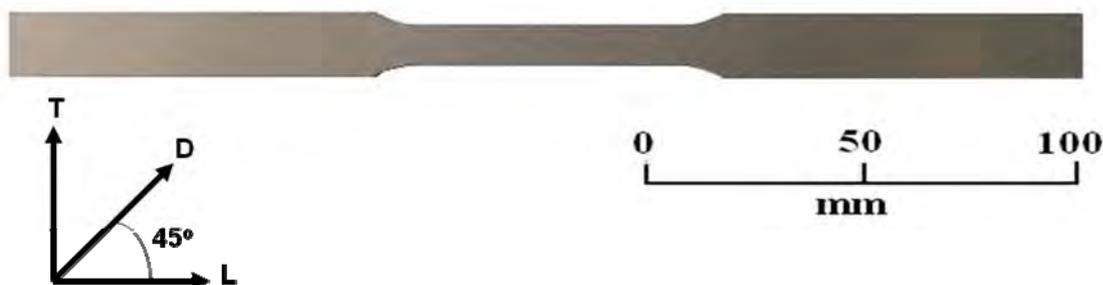
## 2.2 Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas de aço adquiridas inicialmente com as dimensões de 200x200 mm (comprimento x largura) e espessura de 1,60 mm. A geometria e dimensões dos corpos de prova estavam em consonância à norma ASTM E8<sup>(10)</sup> (Figura 2).



**Figura 2.** Dimensões do corpo de prova utilizado para ensaio de tração conforme a norma ASTM E8.<sup>(11)</sup>

Utilizou-se uma fresa para a confecção de todos os corpos de prova a serem utilizados no presente trabalho. Ao todo foram confeccionados “nove” corpos de prova, sendo “três” para cada direção de extração do corpo de prova. As direções de extração dos corpos de prova são mostradas na Figura 3: a 0° (L: direção paralela à direção de laminação); a 45° (D: direção oblíqua à direção de laminação); a 90° (T: direção perpendicular à direção de laminação).



**Figura 3.** Direção de extração dos corpos de prova.

## 2.3 Ensaio de Tração

Foi utilizada uma máquina universal de ensaios de materiais da fabricante Instron para realização de todos os ensaios de tração. Entretanto, como foram utilizados corpos de prova com pequenas dimensões no presente estudo, os mesmos foram ensaiados numa máquina do modelo 5882 da série 5880, com capacidade de 100 kN. Essa máquina utiliza sistemas eletrônicos para controle e aquisição de dados com alto desempenho, além do *software Bluehill® 2*. Todos os ensaios foram realizados com a velocidade de 10 mm/min em temperatura ambiente, para se pudesse garantir a repetibilidade dos ensaios.

## 3 RESULTADOS

A Tabela 2 mostra a comparação dos resultados referentes às propriedades mecânicas dos aços DP600 e DP965 obtidas através dos ensaios de tração.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do aço DP600 e DP965 determinadas em ensaio de tração\*

Aço	Direção do Teste	Hollomon: $\sigma = K\varepsilon^n$		$L_E$ MPa	$L_R$ MPa	% Alongamento		R	$\bar{R}$	$\overline{\Delta R}$
		n	K, MPa			Uniforme	Total			
DP600	0°	0,162	1038,83	393,0	648,0	14,5	23,2	0,738	0,864	0,0665
	45°	0,158	1031,27	404,7	650,3	14,3	24,4	0,897		
	90°	0,157	1051,03	413,7	664,3	14,0	23,7	0,923		
	Média**	0,159	1038,100	404,025	653,225	14,275	23,925	0,864		
	Desvio***	0,00266	10,35294	10,38296	8,90258	0,25187	0,59591	0,10107		
DP965	0°	0,114	1472,99	651,1	994,1	8,1	13,1	0,726	0,739	0,0060
	45°	0,116	1489,72	654,7	1003,0	7,8	12,5	0,742		
	90°	0,120	1491,43	643,0	995,2	8,3	12,9	0,746		
	Média**	0,117	1485,965	650,875	998,825	8,000	12,750	0,739		
	Desvio***	0,00306	10,30332	6,19261	5,14280	0,26458	0,32210	0,01065		

\*Os valores computados referem-se à média para três corpos de prova em três direções distintas (0°, 45° e 90°);

\*\*Média =  $(X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4$ , onde X é o valor de  $L_E$ ,  $L_R$ ,  $Al$ ,  $R$ ,  $n$  ou  $K$ ; \*\*\*Desvio padrão ( $\sigma$ ).

São apresentadas na Tabela 2 as seguintes propriedades mecânicas: o limite de escoamento ( $L_E$ ); o limite de resistência ( $L_R$ ); o alongamento uniforme e total ( $Al$ ); o coeficiente de anisotropia normal ( $R$ ); o valor médio do coeficiente de anisotropia ( $\bar{R}$ ); o coeficiente de anisotropia planar ( $\overline{\Delta R}$ ); o expoente de encruamento ( $n$ ) e o coeficiente de resistência ( $K$ ).

## 4 DISCUSSÃO

O coeficiente de anisotropia normal ( $R$ ) e coeficiente de encruamento ( $n$ ) do material caracterizam o material quanto a sua estampabilidade. Os resultados da Tabela 2 reforçam que o aço DP600 é um material destinado a operações que exigem um certo nível de estampagem, uma vez que o fator  $R$  e especialmente o coeficiente  $n$  apresentaram valores suficientemente elevados, próximos de 1,0 para o  $R$  e próximos a 0,2 para o  $n$ , a ponto de garantir esta característica do material. Entretanto, os valores de  $R$  e  $n$  para o aço DP965 são menores quando comparados

ao aço DP600, com isso conclui-se que o aço DP600 é mais recomendado para operações de estampagem. De acordo com Kumar,<sup>(12)</sup> um aço que apresenta valores para  $\bar{R}$  maior que 1,6 e  $n$  maior que 0,2 e  $\Delta\bar{R}$  próximo a zero, é considerado um material de alta conformabilidade.

Um fator importante a ser observado é a variação dos resultados do fator  $R$  para cada uma das três direções ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) dos dois aços. Para o aço DP600, o maior valor de  $R$  foi atingido para a direção de  $90^\circ$ , em torno de 0,923, o que implica dizer que o material apresenta melhor estampabilidade nesta direção, ou seja, apresenta uma tendência de se deformar mais eficientemente aos esforços a  $90^\circ$  em relação a direção de laminação da chapa, atingindo um nível de conformação maior e sem ruptura nesta direção.

Para as direções de  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , os valores de  $R$  apresentaram-se na faixa de 0,738 e 0,897, respectivamente. Estes valores se encontram dentro de uma faixa típica para materiais com boa conformabilidade, apesar de serem inferiores aos valores atingidos para a direção de  $90^\circ$ . Para o aço DP965, o maior valor de  $R$  também foi atingido para a direção de  $90^\circ$ , em torno de 0,746, porém, menor que o valor do aço DP600, o que implica dizer que este aço apresenta melhor estampabilidade nesta direção e também nas outras direções do que o aço DP965.

Desta forma pode-se classificar que os materiais ensaiados como sendo aço anisotrópico planar, uma vez que apresentaram valores diferentes para  $R_{0^\circ}$ ,  $R_{45^\circ}$  e  $R_{90^\circ}$  ( $R_{0^\circ} \neq R_{45^\circ} \neq R_{90^\circ}$ ). Esta variação do valor de  $R$  indica que os materiais apresentam diferentes propriedades mecânicas no plano da chapa, ou seja, a reação do material é diferente conforme a direção de aplicação dos esforços no plano do material. Todavia, o aço DP965 apresentou pouca variação do valor de  $R$  frente ao aço DP600, ou seja, o aço DP965 é menos anisotrópico, apresenta pouca variação no plano da chapa.

Os diferentes valores para cada uma das direções consideradas nos ensaios implica dizer que o aço DP600 apresenta uma maior tendência a sofrer um fenômeno conhecido como orelhamento. A tendência do material sofrer o orelhamento é quantificado pelo  $\Delta\bar{R}$ , apresentado na Tabela 2 com valor de 0,0665 para o aço DP600, e 0,0060 para o aço DP965. Valor considerado baixo, todavia, quanto maior o valor do  $\Delta\bar{R}$ , segundo Schaeffer<sup>(13)</sup> e Keeler,<sup>(14)</sup> maior a tendência do material sofrer orelhamento, ao passo que, se este valor fosse nulo ( $\Delta\bar{R} = 0$ ), este fenômeno não aconteceria com o material.

O coeficiente de encruamento ( $n$ ) do aço DP600 resultante dos ensaios foi de aproximadamente 0,159 para uma média das três direções, e 0,117 para o aço DP965. A partir destes valores pode-se dizer que o DP600 apresenta uma boa estampabilidade. Assim como o valor do fator  $R$ , quanto maior o valor do coeficiente de encruamento  $n$ , melhor será a estampabilidade do material.

Desta forma, o resultados obtidos para o expoente  $n$  nos ensaios mostra que o materiais em estudo tendem a apresentar um elevado limite de instabilidade plástica, o que lhes conferem boa estampabilidade por estiramento, uma vez que, quanto maior o limite de instabilidade do material, o material quando submetido a estampagem, tende a distribuir a deformação para as regiões vizinhas ao local mais deformado, resultando em um afinamento (redução de espessura) mais homogêneo da chapa. Isso evita que ocorra uma redução da espessura localizada numa porção do material, onde fatalmente ocorreria a ruptura da chapa.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram a comparação dos gráficos tensão x deformação de engenharia dos aços DP600 e DP965 obtidas através do ensaio de tração.

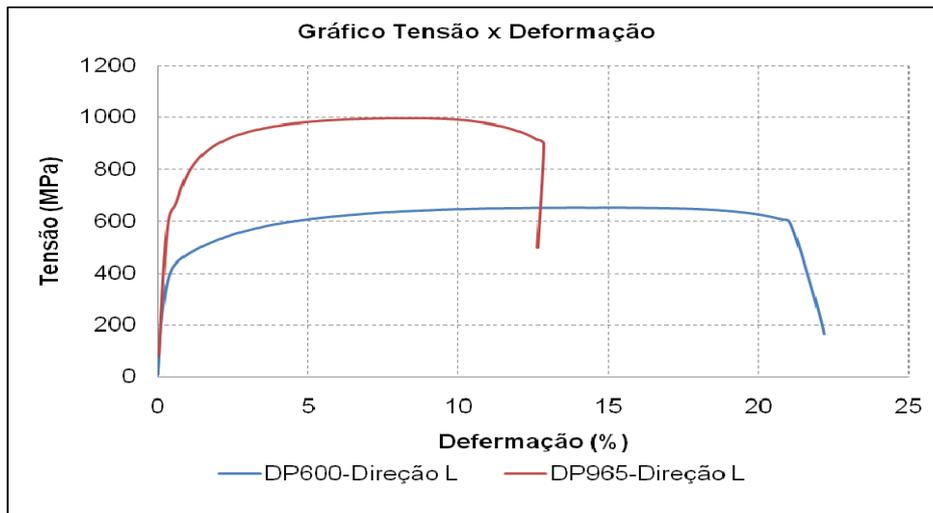


Figura 4. Gráfico tensão x deformação de engenharia dos aços DP600 e DP965 na direção L.

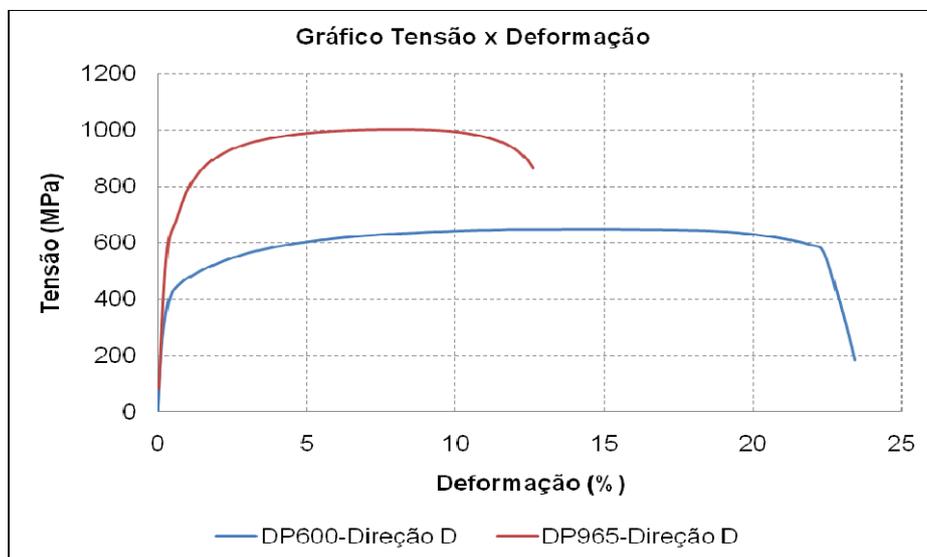


Figura 5. Gráfico tensão x deformação de engenharia dos aços DP600 e DP965 na direção D.

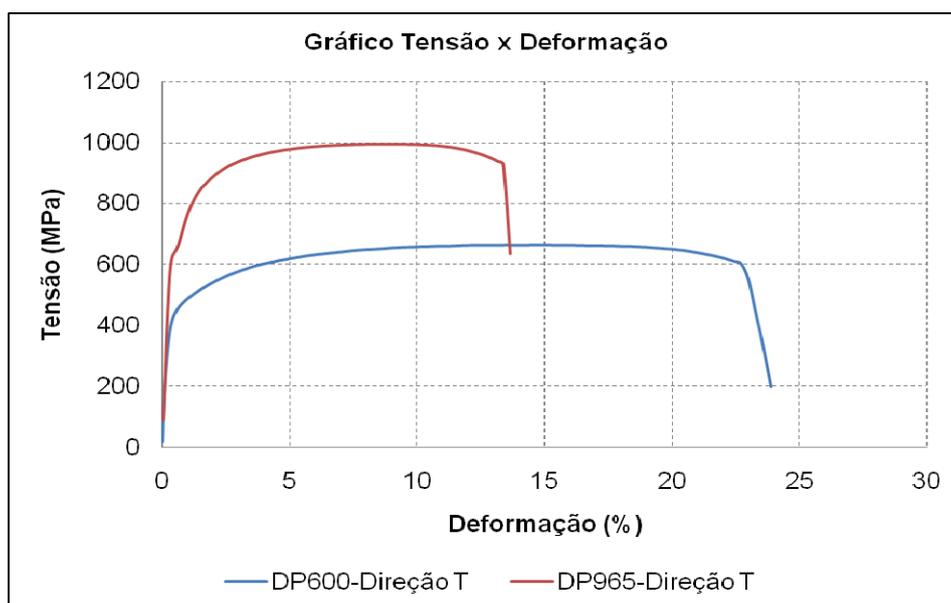


Figura 6. Gráfico tensão x deformação de engenharia dos aços DP600 e DP965 na direção T.

Analisando as Figuras 4, 5 e 6, respectivamente, pode-se afirmar que as curvas demonstraram características de materiais que apresentam fratura dúctil, devido ao ponto mais alto das curvas, Limite de Resistência- $L_R$ , não ser coincidente com a tensão de ruptura. Anderson<sup>(15)</sup> classificou a fratura dúctil como estável, que ocorre sob tensões crescentes, ao contrário de uma fratura frágil (trinca instável), que se propaga sob tensões constantes ou mesmo decrescentes.

Fazendo ainda uma análise comparativa entre as Figuras 4, 5 e 6, é perceptível que o aço DP600 possui menor resistência mecânica, porém, apresenta um maior alongamento total quando comparado com o aço DP965, aproximadamente o dobro. Contudo, pode-se afirmar que o aço DP600 pode sofrer maiores deformações, e conseqüentemente, peças com geometria mais complexa pode ser fabricada com este tipo de aço.

## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios de tração apresentaram valores altos para o coeficiente de encruamento e moderado para o coeficiente de anisotropia, características típicas de chapas de aço avançado de alta resistência utilizadas na indústria automotiva, como é o caso do DP600 e DP965.

Pode-se dizer que o aço DP600, devido a uma maior variação do coeficiente de anisotropia normal ( $R$ ), apresenta uma maior resistência à diminuição na espessura do que o aço DP965, principalmente na direção a  $90^\circ$ , deformando-se mais no plano da chapa e menos na direção da espessura, o que traz uma nítida vantagem quanto à conformabilidade, porém, de um outro lado, o aço DP965 apresentou coeficiente de anisotropia planar ( $\overline{\Delta R}$ ) menor do que o aço DP600, ou seja, o aço DP965 é menos susceptível ao fenômeno do orelhamento, um dos principais defeitos inerentes aos processos de estampagem.

O coeficiente de encruamento ( $n$ ) dos aços estudados apresentaram resultados bem diferentes, aproximadamente 36% de diferença. Quanto maior este valor melhor a estampabilidade do material, como o aço DP600 apresentou um maior encruamento, com isso constata-se que este aço possui maior estampabilidade do que o aço DP965. Vale ressaltar que, quanto maior o valor de  $n$  maior o limite de instabilidade plástica, isto é, o material tem maior capacidade de diminuir a espessura sem que ocorra a instabilidade plástica, que se traduz no aumento da altura da peça conformada sem ocasionar fratura.

## Agradecimentos

Ao CEFET-MG pelo incondicional apoio durante toda a pesquisa.  
 À FAPEMIG pela bolsa de iniciação científica (BIC-Jr) que fomentou a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 1 GRITTI, J. A.; CANGUE, F. J. R.; GODEFROID, L. B.; et al. Fatigue crack growth in two dual-phase steels used in automotive wheels discs. In: Fatigue 2002; INTERNATIONAL FATIGUE CONFERENCE 2002; june 2-7, 22002; Stockholm, Sweden, 2002, v.1, p.1-20.
- 2 CREDIE, C. A. A. Aço plano na indústria automobilística brasileira. Revista Metalurgia-ABM, v. 41, n. 335, p 539-542, out. 1985.

- 3 CANGUE, F. J. R. Propagação de trinca de fadiga em aços bifásicos para rodas automobilísticas. Ouro Preto: UFOP; Dissertação de Mestrado UFOP, Rede Temática em Engenharia de Materiais, 177 p. 2002.
- 4 FERRARINI, J.L. Caracterização de materiais para o processo de estampagem. 2004, 116 f. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Porto Alegre.
- 5 BRAZ, J.L.; REGULY, A.;STROHAECKER, T.R.; PINHEIRO, F.; CRAIDY, P. Desenvolvimento a aplicações dos aços Dual Phase. 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ
- 6 DIETER, G.E. Overview of Workability. In: Workability Testing Techniques, DIETER, G. E. (editor) Metals Park, American Society for Metal, p. 1-19. 1984.
- 7 Duarte, J.M.F. Conformação Plástica de Chapas Metálica: Simulação Numérica e Caracterização Mecânica. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 1997.
- 8 WorldAutoSteel. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Versão 4.1, 2009. Disponível em: [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org).
- 9 MARRA, K. M. Aços dual phase da Usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores. 2º Workshop sobre inovações para o desenvolvimento de aços de elevado valor agregado - Foco indústria automotiva, 2008
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: ASTM E8 - Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, 1998.
- 11 SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 304 p.
- 12 KUMAR, D. R. Formability analysis of extra-deep drawing steel. Journal of Materials Processing Technology, 130-131., p. 31-41, 2002.
- 13 SHAEFFER, L. Conformação Mecânica. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre. 1999.
- 14 KEELER, S. P. Understanding Sheet Metal Formability. Machinery, 1968.
- 15 ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications – 2nd Edition, CRC Press, 1995.