

COMPORTAMENTO MECÂNICO E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO DP LAMINADO A FRIO COM REVESTIMENTO DE Zn PARA ESTAMPAGEM

C. H. F. da Silva¹; A. A. Couto^{2,3}; N. B. de Lima²; A. Augusto⁴ e L. S. Gomes⁵

¹Cummins Inc., Guarulhos, SP, Brasil

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, SP, Brasil

³Universidade Presbiteriana Mackenzie, UPM, SP, Brasil

⁴Rojek, Cajamar, SP, Brasil

⁵Aspool, Itaquaquecetuba, SP, Brasil.

engineer.carloshenrique@gmail.com

RESUMO

Duas chapas de aços Dual Phase, com composição química e resistência mecânica semelhantes, foram utilizados no processo de estampagem a frio. Uma das chapas apresentou problemas de trincamento durante o processo de estampagem a frio e a outra não. O objetivo deste trabalho é comparar a microestrutura e as propriedades mecânicas em tração visando compreender o que causou a falha em uma das chapas. Diante disto, foram realizadas análise da composição química, caracterização por microscopia óptica e determinação da textura cristalográfica por difração de raios x. Ensaios de tração nas direções de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação foram também realizados. O principal aspecto de diferenciação entre os aços foi a maior intensidade da fibra α no material que trincou. Este fato justifica os resultados de estampagem a frio, pois a presença da fibra α é prejudicial para materiais em processo de estampagem.

Palavras-chave: Aços Dual Phase, estampagem a frio, textura.

INTRODUÇÃO

Os aços DP (*Dual Phase*) são utilizados no processo de estampagem a frio e são compostos por uma estrutura primária ferrítica e uma estrutura secundária, predominantemente martensítica, onde cada uma das fases é composta por fragmentos de materiais homogêneos que fazem parte de um mesmo material

heterogêneo. Estes aços possuem uma combinação de alta resistência à tração, boa ductilidade e alta taxa de endurecimento nos estágios iniciais de deformação plástica, proveniente de uma microestrutura complexa, constituída por ilhas martensíticas duras em uma matriz ferrítica [1,2]. Os aços *Dual Phase* (DP), os aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP) e os aços de fase complexa (CP) possuem larga aplicação na indústria automobilística, visando obter resistência mecânica superior de componentes estruturais de veículos automotivos e reduzir o seu peso [3].

A capacidade de deformação dos metais na tecnologia moderna possui grande importância nos processos de fabricação, em particular dos aços, alcançando formas desejadas e alterações nas características e propriedades mecânicas do material. O processo de estamparia é um dos vários processos de fabricação onde a deformação plástica é utilizada para alterar a forma de peças metálicas. A conformação é o resultado da aplicação de tensões que excedem o limite de elasticidade do metal, assumindo a forma da matriz. Os problemas de produção e de qualidade do produto na área de estampagem de peças metálicas são comuns, mesmo adotando-se os mais rigorosos métodos de preparação do processo. Diante de tais problemas, muitas vezes por causas desconhecidas, as suspeitas sobre a matéria prima são usuais.

Adotando como referência os problemas apresentados por um tipo específico de matéria prima, um aço DP laminado a frio com revestimento de Zn, sobre uma amostragem que representa os dois extremos do material citado (material conforme e material não conforme). Os dois materiais estudados possuem composição química e resistência mecânica semelhantes e são produzidos por duas usinas siderúrgicas distintas, onde um desses materiais apresenta uma perda de produção entre 10% a 30% em cada lote, proveniente do surgimento de trincas durante o processo de estampagem, e o material produzido pelo outro fornecedor apresenta zero rejeito. A inspiração deste estudo é analisar e entender a diferença entre os dois materiais.

Diante disto, o objetivo deste trabalho é caracterizar a microestrutura e as propriedades mecânicas de um aço DP (*Dual Phase*) laminado a frio com revestimento de Zn, com alto grau de dificuldade de conformação, utilizado no processo de estampagem de componentes e conjuntos para a indústria automotiva. Em vários momentos deste artigo serão utilizados o termo 'material considerado OK'

e a sigla “OK” para identificar o material que não apresenta defeitos no processo produtivo e o termo ‘material considerado NOK’ e a sigla “NOK” para identificar o material que apresenta defeitos no processo produtivo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas duas corridas de produção de chapas de aço *Dual Phase* produzidas por duas usinas siderúrgicas distintas, ambas com espessura de 2,0 mm, onde uma apresenta problemas de trinca durante o processo de estampagem a frio e a outra não apresenta problemas. A análise da composição química foi realizada por um espectrômetro de fluorescência de raios x, marca Oxford e modelo X-Supreme 8000. As amostras foram coletadas em forma de *blanks* a partir de bobinas metálicas, a forma mais comum de fornecimento no Brasil e em muitos países, com peso entre 10 e 15 t, conforme fornecido pelo produtor e que representam as duas condições extremas, material que não apresenta trincamento na estampagem (OK) e material com 15 a 30% de trincamento durante a estampagem (NOK). As amostras foram fracionadas e trabalhadas de acordo com a necessidade de cada ensaio. As duas corridas foram analisadas e comparadas.

As amostras foram decapadas (retirada da camada superficial de zinco) com solução de ácido sulfúrico a 3% em volume – H_2SO_4 (70% H_2O) e neutralizada com álcool isopropílico (96% P.A.). Este procedimento foi realizado nas amostras de análise da composição química, microscopia óptica e textura cristalográfica, com o objetivo de evitar a interferência da camada de zinco no resultado dos ensaios. Para a caracterização por microscopia óptica, as amostras foram embutidas em resina sintética e passaram pelo processo de lixamento com lixas de carvão de silício (granulometria 100, 320, 400, 600 e 1200#) e polimento com Al_2O_3 (com granulação de 0,3 μm). O ataque químico para revelação da microestrutura foi realizado com Nital 2%, por imersão à temperatura ambiente por 30 segundos. As observações por microscopia óptica foram realizadas em um microscópio óptico Zeiss, modelo Axio M2m. Foi realizada a análise quantitativa de fases com o auxílio do software AxioVision SE64.

Para a análise da textura cristalográfica foi utilizada a técnica de difração de raios x. As figuras de polo da fase ferrítica foram determinadas por uma radiação $MoK\alpha$ ($\lambda=0,7093 \text{ \AA}$), com um goniômetro de textura horizontal, marca Rigaku e modelo RINT 2000. As análises foram realizadas na superfície da chapa laminada

na direção normal (DN). Os ensaios de dureza Rockwell B (HRB) foram realizados num durômetro de bancada, marca Wolpert e modelo HT-1A, com um penetrador esférico de 1/16", ajustado com uma carga de 100 kgf. Os ensaios de dureza Vickers (HV 0,2) foram realizados num durômetro de bancada, marca Shimadzu e modelo HMV-G20-ST, com um penetrador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, ajustado com uma carga de 1,961 N. As medições foram realizadas em 5 pontos equidistantes em cada corpo de prova, obedecendo a regra de distância mínima da borda da chapa de 2,5 vezes o diâmetro do penetrador.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração, marca ZWICK / ROELL, modelo Z100, equipada com um extensômetro óptico. Nos ensaios de tração foram determinados o limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LR), o alongamento total (AL). O coeficiente de encruamento (n), o índice de anisotropia normal (r_m) e o índice de anisotropia planar (Δ_r) foram determinados por meio de cálculos a partir dos dados obtidos nos gráficos tensão-deformação e nos corpos de prova ensaiados.

O coeficiente de encruamento n é obtido a partir da região da deformação plástica por meio da Equação de Hollomon, $\sigma = k \cdot \epsilon^n$. O coeficiente de anisotropia plástica (r) é calculado a partir da deformação real na largura pela deformação real no comprimento do corpo de prova, por meio da equação $r = \ln(l_i / l_f) / \ln(c_f l_f / c_i l_i)$, onde l_i e l_f são as larguras inicial e final e c_i e c_f são os comprimentos inicial e final do corpo de prova ensaiado, respectivamente.

Um parâmetro importante para determinar a estampabilidade do material é a anisotropia normal (r_m), que indica a resistência ao afinamento da espessura da chapa após o estiramento, obtida por meio da expressão $r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$, onde r_0 , r_{45} e r_{90} são subíndices obtidos por meio de ensaios de tração realizados em corpos de prova retirados a 0°, 45° e 90° com relação à direção de laminação da chapa, utilizando-se a equação $r = \ln(l_i / l_f) / \ln(c_f l_f / c_i l_i)$. O coeficiente de anisotropia planar (Δ_r) indica a direção de possível orelhamento quando a chapa é submetida a um processo de embutimento e o valor é obtido por meio da expressão $\Delta_r = \frac{1}{2}(r_0 - 2r_{45} + r_{90})$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dois aços estudados possuem composições químicas semelhantes, tanto em elementos como em quantidades, com exceção do alumínio que apresentou uma divergência considerável, como apresentado na tabela 1. Uma das funções do alumínio presente no de aço carbono para estampagem seria retardar a recristalização e provocar o surgimento de grãos alongados na direção de laminação (DL), com a textura {111} almejada e contribuir para o surgimento de grãos finos após o recozimento. Segundo Ferreira Filho e outros [4,5], as variáveis que possuem maior influência sobre os comportamentos mecânicos do material são o grau de redução a frio e a composição química, onde os elementos de liga mais influentes na estampabilidade de aços baixo carbono são o carbono, manganês, alumínio, titânio e nióbio. Isto já é um primeiro indício da causa de trincamento nos aços *Dual Phase* com menor teor de alumínio, designado na tabela 1 com NOK.

Tabela 1: Composição química dos aços *Dual Phase* investigados neste trabalho.

Elemento (Wt %)	C	Al	Si	S	Cr+Mo	Mn	Co	Pb
"OK"	0,144	1,920	0,184	0,051	0,351	1,746	0,289	0,023
"NOK"	0,131	0,742	0,158	0,023	0,235	1,740	0,694	0,039

Na tabela 2 são apresentados os valores obtidos a partir dos ensaios de dureza HRB e HV 0,2 realizados nos dois aços estudados. De acordo com os dados apresentados na tabela 2 conclui-se que os dois aços possuem durezas muito próximas, ressaltando que o material considerado OK apresenta valores ligeiramente superiores ao material considerado NOK. Num aço estudado por Das & Chattopadhyay [6], similar ao deste trabalho, foi obtida uma dureza de 253 ± 6 HV 0,2. Correlacionando os dados da tabela 2 com as observações de Movahed e outros [7], que a dureza do material é dependente do teor de carbono da fase martensítica, é possível afirmar que os valores de dureza ligeiramente superiores do aço OK são provenientes da quantidade maior de carbono levemente superior do que o aço NOK, como mostrado na tabela 1.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de dureza HRB e HV 0,2

Amostra	HRB						HV 0,2					
	1	2	3	4	5	\bar{x}	1	2	3	4	5	\bar{x}
"OK"	98	98	97	98	98	97,8	235	233	239	237	235	235,8

“NOK”	96	96	96	97	96	96,2	233	229	227	230	228	229,4
-------	----	----	----	----	----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-------

A figura 1 apresenta a micrografia por microscopia óptica dos dois aços analisados. Ambos possuem microestruturas similares com grãos martensíticos (cor mais escura) sobre a matriz ferrítica (cor mais clara) e tamanhos de grão semelhantes. Segundo Ferreira Filho e outros [4], o tamanho final do grão possui uma dependência maior do grau de deformação e uma dependência menor da temperatura de recozimento, isto é, quanto maior o grau de deformação e/ou menor a temperatura de recozimento mais favorável será para a formação de grãos menores. A partir da figura 1 é possível concluir que os dois aços analisados possuem tamanhos de grão semelhantes (de 1 μm a 5 μm) e adequados para o processo de estampagem a frio. Segundo Fallahi [8] um aço *Dual Phase* que possui tamanho de grão de 4 μm e 35% a 40% de fibra martensítica terá ótimas propriedades de tração e impacto. Analisando a figura 1 conclui-se que, por comparação entre os aços, a maior porcentagem em peso de alumínio presente no material considerado ‘OK’ não influenciou significativamente no tamanho dos grãos.

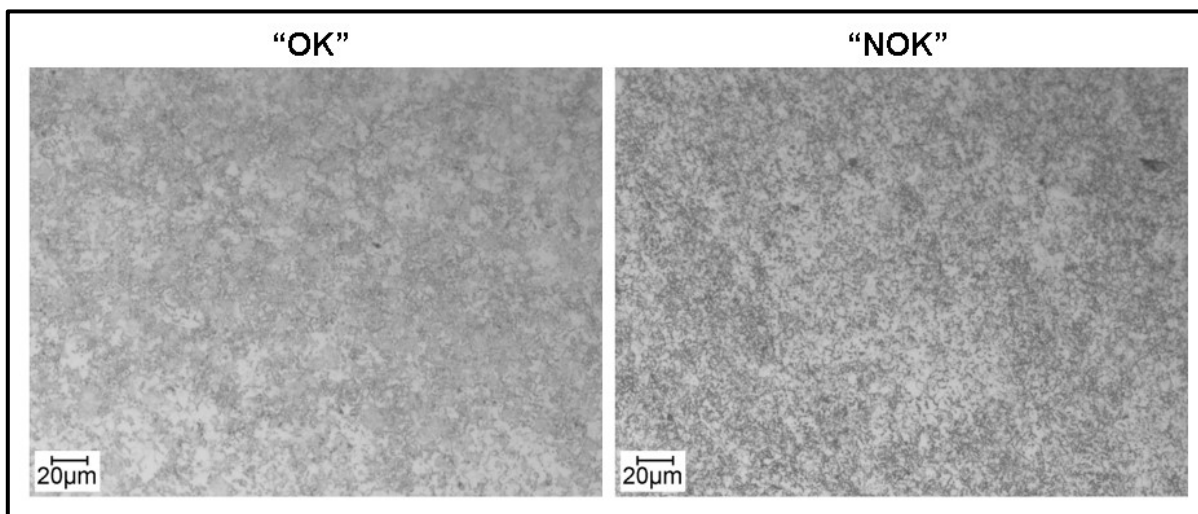


Figura 1: Micrografias observadas por microscopia óptica dos aços *Dual Phase* considerados ‘OK’ e ‘NOK’.

Por meio de programa de análise quantitativa de fases foi evidenciado que a amostra considerada ‘OK’ possui 47,23% de fase martensítica e a amostra considerada ‘NOK’ possui 38,55% de fase martensítica. Esta informação está coerente com os ensaios de dureza realizados e apresentados na tabela 2, partindo do princípio de que a fase martensítica possui maior resistência e dureza do que a

fase ferrítica [9]. Também foi observado que o material considerado 'NOK' possui grãos mais finos e uma distribuição da fase martensítica mais uniforme comparado ao material considerado 'OK', que possui grãos e ilhas martensíticas um pouco maiores.

Os resultados dos ensaios de tração em corpos de prova a 0, 45 e 90° em relação à direção de laminação são apresentados na tabela 3. Os ensaios de tração mostraram que o aço considerado OK possui valores superiores de resistência mecânica e de ductilidade. Koyama e outros [10] estudaram um aço DP com 0,147 wt% de carbono, 0,4 mm de espessura e com uma microestrutura formada por ferrita e martensita e encontraram um limite de escoamento de 789 MPa, uma resistência a tração de 1168 MPa e um alongamento total de 13%. Estes valores de resistência mecânica superiores e de ductilidade inferior quando comparado com o presente trabalho parece estar relacionado a um maior grau de encruamento da chapa mais fina estudada por Koyama.

Tabela 3: Resultados obtidos nos ensaios de tração dos aços *Dual Phase* considerados OK e NOK.

Direção Laminação (DL)	Corpo de Prova	"OK"			"NOK"		
		LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
0°	1	427	769	39	403	741	36
	2	415	768	38	401	748	36
	3	421	770	38	416	748	37
45°	1	429	755	40	378	739	38
	2	430	755	40	380	747	38
	3	432	756	40	388	743	39
90°	1	389	802	36	392	778	37
	2	434	779	37	386	776	35
	3	383	801	36	383	772	35

LE: Limite de escoamento (0,2%); LR: Limite de resistência; AL: Alongamento total

Complementando a análise com os ensaios de tração, foram estimados o coeficiente de encruamento e os coeficientes de anisotropia normal e planar, apresentados na tabela 4. O coeficiente de encruamento é um valor que representa a capacidade do material de distribuir uniformemente as deformações durante a conformação mecânica, valor este que quanto maior mais elevada será a capacidade de distribuição dessas deformações [4]. Os dois aços analisados possuem valores de n semelhantes (0,17 e 0,18) e estão de acordo com a literatura.

Os aços baixo-carbono utilizados em processos de estampagem possuem valores característicos de n que variam entre 0,16 e 0,26 [4]. Firat e outros [11] analisou um aço DP600 de 1 mm de espessura e obteve valores médios de resistência à tração de 380 MPa e coeficiente de encruamento (n) de 0,18, similares aos obtidos neste trabalho.

Tabela 4: Valores obtidos dos coeficientes de encruamento (n), anisotropia normal (r_m) e planar (Δ_r) dos aços *Dual Phase* considerados OK e NOK.

DL	CP	"OK"					"NOK"					
		n	\bar{n}	r	r_m	Δ_r	n	\bar{n}	r	r_m	Δ_r	
0°	1	0,18	0,17	0,83	1,00	-0,29	0,19	0,18	0,71	0,93	-0,24	
	2	0,17		0,80			0,19		0,74			
	3	0,17		0,78			0,19		0,54			
45°	1	0,17	0,17	1,08	1,00	-0,29	0,18	0,18	1,07	0,93	-0,24	
	2	0,16		1,23					0,19			1,08
	3	0,16		1,14					0,19			0,99
90°	1	0,21	0,17	0,86	1,00	-0,29	0,18	0,18	0,80	0,93	-0,24	
	2	0,15		0,88					0,18			1,15
	3	0,21		0,99					0,12			0,90

DL: Direção de laminação; **CP:** Corpo de prova; **n:** Coeficiente de encruamento; **\bar{n} :** Coeficiente de encruamento médio; **r:** Coeficiente de Anisotropia; **r_m :** Coeficiente de Anisotropia normal; **Δ_r :** Coeficiente de Anisotropia Planar

Os resultados de anisotropia normal (r_m) dos dois materiais são semelhantes, onde os dois possuem menor resistência ao afinamento nas direções 0° e 90° e maior resistência ao afinamento na direção de 45°. A anisotropia normal (r_m), quando apresenta um valor acima de uma unidade (pode atingir até 2,2), indica grande resistência ao afinamento da espessura da chapa após o estiramento [12]. Neste trabalho a anisotropia normal (r_m) foi igual a 1 no material OK e 0,93 no material NOK. Comparando esses valores nota-se que a chapa OK deve ser mais bem estampada. Entretanto, ambos os materiais tem anisotropia normal (r_m) menor que os valores desejados para uma estampagem profunda. Como a espessura da chapa a ser estampada neste trabalho tem espessura relativamente maior (2 mm), não devem ocorrer problemas devido ao afinamento.

A anisotropia planar (Δ_r) indica a variação das propriedades mecânicas do material conforme se altera a direção em que se executa o ensaio. Ambos os materiais também possuem valores de Δ_r negativos, que indica que ambos possuem um comportamento de possível orelhamento à 0° e 90° da direção de laminação

quando submetidos a um processo de embutimento [12]. Valores positivos indicam um possível orelhamento à 45° da direção de laminação e valores negativos indicam um possível orelhamento à 0° e 90° da direção de laminação quando submetido a um processo de embutimento [12].

Na figura 2 são apresentadas as funções distribuição de orientações (FDO's) das chapas "OK" e "NOK" para $\theta_2=0^\circ$ e $\theta_2=45^\circ$. Nota-se na FDO para $\theta_2=45^\circ$ da chapa "OK" (figura 2A) uma textura com menor intensidade da fibra α e uma maior intensidade da fibra γ (*Times Random* - TR=8,8). Já na FDO para $\theta_2=45^\circ$ da chapa "NOK" (figura 2B) textura com menor intensidade é a fibra γ , enquanto a fibra α apresenta a maior intensidade (*Times Random* - TR=8,8). Uma forte intensidade de textura de fibra γ é uma situação benéfica para materiais em processo de estampagem, enquanto que uma forte intensidade de fibra α é prejudicial para a estampagem. Segundo Ferreira Filho e outros [4,5] a ausência da fibra α e o fortalecimento da fibra γ é a textura adequada para a estampagem. Portanto, levando-se em consideração a textura cristalográfica, a chapa "OK" é mais adequada para a estampagem.

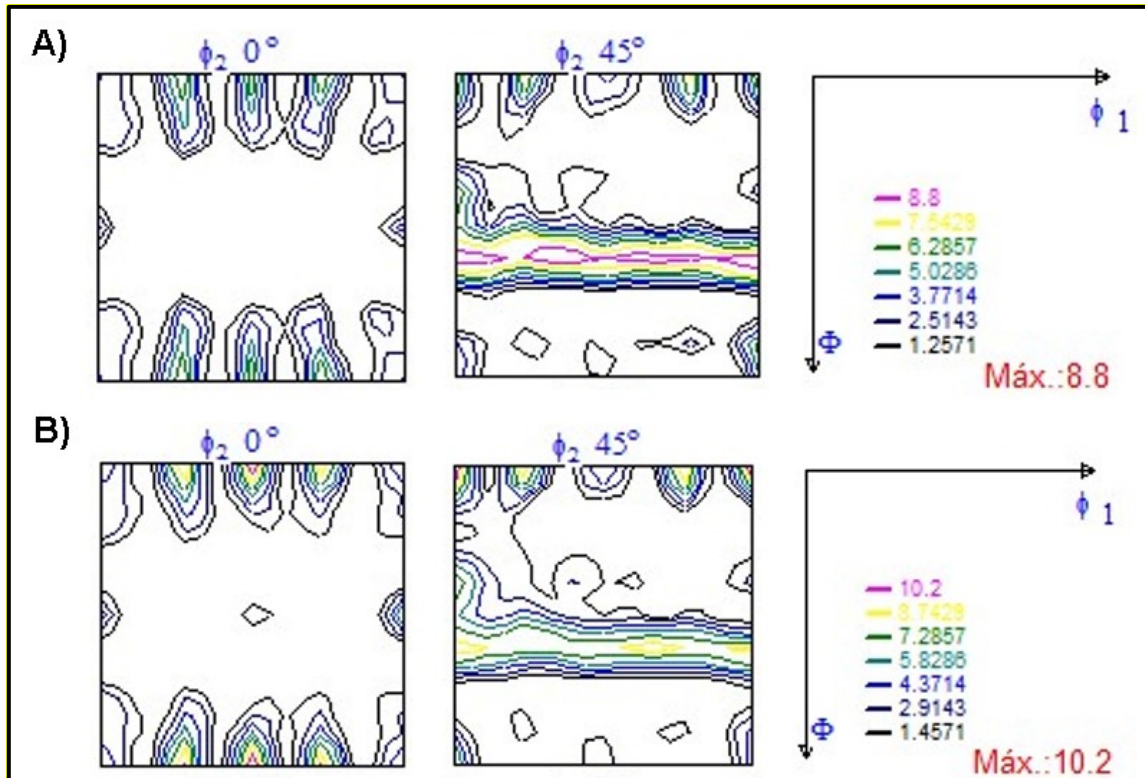


Figura 1: Funções distribuição de orientações (FDO's) do material considerado (A) 'OK' e do material considerado (B) 'NOK'.

CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos sobre os dois aços DP de baixo carbono, com composição química e resistência mecânica semelhante e produzidos por duas usinas siderúrgicas distintas leva às seguintes conclusões:

- O material considerado 'OK' apresentou em sua composição uma porcentagem em peso (wt%) de alumínio superior a composição do material considerado 'NOK'. Porém, diante da análise dos demais ensaios, percebeu-se que o mesmo não exerceu grande influência nas propriedades mecânicas.

- A ligeira diferença de valores entre a dureza dos materiais “OK” e “NOK” está coerente com os resultados de composição química relacionada à porcentagem em peso de carbono e com a quantidade de fase martensítica presente em cada material.

- Os dois materiais analisados possuem coeficientes de encruamento semelhantes e estão de acordo com a literatura. Os dois materiais possuem uma anisotropia normal que indica que ambos possuem menor resistência ao afinamento nas direções 0° e 90° e maior resistência ao afinamento na direção de 45°. Ambos também possuem um valor negativo de anisotropia planar, o que indica um comportamento de possível orelhamento à 0° e 90° da direção de laminação quando submetidos a um processo de estampagem profunda.

- As funções distribuição de orientações evidenciam que o material considerado 'OK' possui menor intensidade da fibra α e maior da fibra γ , favorecendo a estampagem. O material considerado 'NOK' possui comportamento contrário.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela bolsa concedida a Carlos Henrique F. da Silva. Aos amigos Leandro Barros, Régis Gabriel e Michelle Cipriano.

REFERÊNCIAS

1. CHOI, S. H.; *et al.* ***The effect of crystallographic orientation on the micromechanical deformation and failure behaviors of DP980 steel during uniaxial tension.*** Republic of Korea: *International Journal of Plasticity*, 2013.

2. SONG, G. M.; *et al.* **Relation between microstructure and adhesion of hot dip galvanized zinc coatings on dual phase steel.** Groningen: Acta Materialia, 2012.
3. WOO, W.; *et al.* **Stress-strain relationship between ferrite and martensite in a dual-phase steel studied by in situ neutron diffraction and crystal plasticity theories.** Republic of Korea: Acta Materialia. 2012.
4. FERREIRA FILHO, A; *et al.* **Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo-carbono para estampagem.** II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação. 2003. [online]. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/wtro/2001/CD/palestras/Palestra%20Antenor%20-%20final.doc>>. Acesso em 24.08.2018.
5. FERREIRA FILHO, A; *et al.* **Evolução da textura cristalográfica de chapas de aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 430 durante laminação a frio, recozimento e estampagem.** Ouro Preto: Metalurgia & Materiais, 2008. p 151-158.
6. DAS, D.; CHATTOPADHYAY, P. P. **Influence of martensite morphology on the work-hardening behavior of high strength ferrite-martensite dual-phase steel.** Howrah: Journal of Materials Science, 2009.
7. MOVAHED, P., *et al.* **The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets.** Dezful: Materials Science and Engineering A, 2009.
8. FALLAHI, A. **Microstructure-properties correlation of dual phase steels produced by controlled rolling process.** Iran: J. Mater. Sci., 2002. Vol.18. No.5.
9. ROA, J. J.; *et al.* **Dependence of nanoindentation hardness with crystallographic orientation of austenite grains in metastable stainless steels.** Barcelona: Materials Science & Engineering, 2015.
10. KOYAMA, M. *et al.* **Hydrogen-assisted decohesion and localized plasticity in dual-phase steel.** Japan: Acta Materialia, 2014. 174-187
11. FIRAT, M. **A finite element modeling and prediction of stamping formability of a dual-phase steel in cup drawing.** Turkey: Materials and Design, 2011. p.32-39.
12. ALMEIDA, L. O. **Influência da redução a frio sobre a estampabilidade de chapas de aço inoxidável ABNT 430 laminadas a frio.** 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1987.

MECHANICAL BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF COLD ROLLED STEEL WITH Zn COATING FOR DRAWING

ABSTRACT

Two Dual Phase steels with similar chemical composition and strength were used in the cold drawing process. One of the sheets had cracking problems during the cold drawing process and the other did not. The objective of this work is to compare the microstructure and the mechanical properties in tensile process in order to understand what caused the failure in one of the sheets. In view of this, the chemical composition, characterization by optical microscopy and determination of crystallographic texture by x-ray diffraction were performed. Tensile tests in the 0 °, 45 ° and 90 ° directions with respect to the rolling direction were also performed. The main distinguishing feature among steels was the higher fiber intensity in the material that cracked. This fact justifies the results of cold drawing, since the presence of α -fiber is detrimental to materials in the process of drawing.

Keywords: *Dual Phase steel, cold drawing, texture.*