

# VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE AÇOS IF (*INTERSTITIAL FREE*) EM PROCESSOS DE ESTAMPAGEM PROFUNDA, EM COMPARAÇÃO COM AÇOS BAIXO CARBONO COMUNS<sup>1</sup>

Renato Collanier<sup>2</sup>  
Ricardo Strangis Cumino<sup>3</sup>  
Antenor Ferreira Filho<sup>4</sup>  
Daniel Ferro<sup>5</sup>  
Rodrigo Magnabosco<sup>6</sup>

## Resumo

Segundo a literatura, os aços IF apresentam alta estampabilidade quando comparados aos aços baixo carbono comuns utilizados na indústria. Aços IF apresentam altos níveis de estampabilidade em função dos baixos teores de átomos intersticiais como C e N e esta condição proporcionam baixo limite de escoamento e alta resistência a redução de espessura durante a deformação a frio.

**Palavras-chave:** Aços IF (*Interstitial Free*); Estampabilidade; Propriedades mecânicas.

## ADVANTAGES OF THE USE OF STEEL IF (INTERSTITIAL FREE) IN CASES OF DEEP DRAWING IN COMPARISON WITH LOW CARBON STEEL

## Abstract

According to the literature, IF steels are in high state when compared to low-carbon steels used in common industry. IF steels show high levels of printed according to the low levels of interstitial atoms such as C and N and this condition provides low limit of flow and high resistance to reduction of thickness during the cold deformation.

**Key words:** IF steels (*Interstitial Free*); Drawing; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

<sup>2</sup> Técnico em Soldagem, Técnico de Qualidade da Schaeffler Brasil Ltda.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc., Chefe da Engenharia de Materiais da Schaeffler Brasil Ltda.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista e de Produção, MSc., Dr., Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind. e Com.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, Assistente Técnico da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind. e Com.

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc., Dr., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da FEI.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Aços IF (*Interstitial Free*)

Os aços IF (*Interstitial Free*) têm sido utilizados com muito sucesso pela indústria automobilística nos últimos anos. Devido ao seu baixo conteúdo intersticial, esses aços apresentam como principais características uma excelente estampabilidade profunda, baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio.

Muitas vezes o seu uso torna-se mais viável onde os aços baixo carbono comuns ou mesmo ligados, apresentam limitações quanto à estampabilidade. No início da década de 1970 foram realizadas as primeiras pesquisas e desenvolvimento destes aços e em meados de 1979 sua fabricação com características comerciais foi lançada, como sendo um aço com extra-baixo teor de carbono estabilizado ao titânio que começou a substituir os aços com baixo carbono acalmados ao alumínio. Seu uso não só reduziu o custo de produção das peças estampadas como também lhe proporcionou maiores níveis de qualidade.<sup>(1)</sup>

Como exemplo de aços para estampagem com elevado grau de deformação, existe uma faixa de materiais denominados aços de estampagem extra-profunda (grau 1, 2, 3 e 4), conforme norma ABNT NBR-5915.<sup>(2)</sup>

Estas ligas são particularmente utilizadas em processos de estampagem com elevados graus de deformação.<sup>(3)</sup>

Entre as típicas ligas de aço utilizadas em estampagem profunda o mercado brasileiro dispõe das seguintes denominações:<sup>(2,4)</sup>

- a) EM: aços para estampagem média;
- b) EP: aços para estampagem profunda; e
- c) EEP - grau 1, 2, 3 e 4: aços para estampagem extra profunda.

Os aços *interstitial free* recebem este nome pois em sua composição apresentam conteúdo intersticial muito baixo, ou seja, teor de carbono inferior a 0,008%C (80 ppm). Normalmente estes aços são produzidos através da adição de nióbio, sozinho ou em conjunto com titânio, que favorecem a diminuição do carbono em solução sólida intersticial, através da precipitação de carbonetos específicos. Naturalmente, o próprio teor de carbono deve ser mantido tão baixo quanto possível, que, em conjunto com os teores de nitrogênio (outro elemento tipicamente intersticial) é normalmente mantido abaixo de 50 ppm.<sup>(3)</sup>

Além de favorecer a diminuição do carbono como elemento intersticial, o nióbio promove ainda uma melhora na anisotropia planar, reduzindo o efeito característico de processos de conformação de chapas, denominado de "orelhamento". O titânio potencializa este efeito do nióbio.<sup>(4)</sup>

Devido às particulares propriedades dos aços IF, o custo de produção deste tipo de aço pode resultar numa importante limitação de sua utilização na fabricação de determinados componentes onde o requisito de estampabilidade seja menos severo. Dentro do contexto de desenvolvimento de novos tipos de aços, visando um maior controle de propriedades relacionadas com a estampagem, estão associados os seguintes aspectos:<sup>(4)</sup>

- a constante diminuição da variação da composição química e dos teores máximos de inclusões, através do emprego de modernas instalações de tratamento a vácuo (na fase de refino do aço);
- introdução dos sistemas de refrigeração acelerada na saída do laminador de tiras a quente;

- emprego de fornos de recozimento de alta convecção, usando hidrogênio; e
- emprego de fornos de recozimento contínuo mais versáteis com velocidade de resfriamento controlado.

Neste sentido, e dependendo da aplicação, utilizam-se outros aços com baixo teor de carbono para a fabricação de componentes metálicos conformados por estampagem.

Neste trabalho, serão utilizados os aços DC04 (DIN EN 10139)<sup>(5)</sup> e C10 (DIN EN 10277-2)<sup>(6)</sup> que são compatíveis com os aços classe G4 e G2, respectivamente, segundo a norma ABNT NBR-5007,<sup>(7)</sup> representando a classe alternativa de aços baixo carbono comum relaminados e o aço IF, compatível ao aço DC06 (DIN EN 10139).<sup>(5)</sup> Em comparação ao IF, os aços C10 e DC 04 têm como principais vantagens um custo menor de produção e uma maior disponibilidade no mercado por se tratarem de aços relativamente comuns.

Este trabalho tem por objetivo apresentar as vantagens da utilização de aços IF nos processos de estampagem de peças seriadas através da avaliação de propriedades mecânicas e ensaios experimentais em comparação com os aços de baixo carbono normalmente empregados nestes processos de conformação. Como exemplos dos aços baixo carbono para os efeitos desta comparação, serão utilizados os aços DC 04 e C10.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para a execução deste trabalho foram utilizadas amostras dos aços IF e aços de baixo carbono comuns (C10 e DC04). As composições químicas dos materiais foram obtidas por ensaio de espectrometria óptica, realizado em espectrômetro de emissão ótica, modelo ARL 3460. Os valores obtidos do ensaio encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1-** Composição química dos aços utilizados no trabalho

<i>Material</i>	<i>Elementos (% em peso)</i>								
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
Aço C10 e= 1,21 mm	0,100	0,29	0,52	0,012	0,008	0,025	0,008	0,002	0,0027
Aço DC04 e= 1,13 mm	0,092	0,04	0,63	0,019	0,012	0,017	0,012	0,001	0,1748
Aço IF e= 1,20 mm	0,001	0,06	0,17	0,012	0,006	0,012	0,003	0,044	0,0410

### 2.2 Métodos

Para a caracterização e comparação das propriedades mecânicas dos aços, foram executados ensaios de embutimento Erichsen e ensaio de tração, de onde foram determinados os valores de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento nas bases A5 e A10, anisotropia plástica normal (r), planar ( $\Delta r$ ) e coeficiente de encruamento (n).

Foi executada ainda a caracterização metalográfica dos materiais, através de análise em microscópio óptico onde também foi verificado o tamanho de grão.

Para os ensaios de embutimento Erichsen realizados conforme norma ABNT NBR 5902,<sup>(8)</sup> foram utilizados cinco corpos de prova de largura de 90 mm, uma matriz de Ø 27 mm e um punção de Ø 20 mm.

Para a determinação de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento nas bases A5 e A10, foi utilizada uma máquina de tração de marca MTS modelo Sintech com capacidade de 5t. Neste mesmo equipamento foram realizados os ensaios de anisotropia ( $r$ ,  $\Delta r$ ) e  $n$ .

Para os ensaios de anisotropia foram confeccionados e preparados 9 corpos-de-prova do tipo “gravata”, “H” – 12,5 x 50, conforme norma DIN 50125, a partir de chapas de cada material, para cada uma das orientações de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação previamente conhecida.

As propriedades de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento nas bases A5 e A10, módulo de elasticidade, anisotropia ( $r$ ,  $\Delta r$ ) e coeficiente de encruamento ( $n$ ), de cada uma das orientações foram obtidas pelo ensaio de tração, realizado segundo a norma DIN EN10002-1.<sup>(9)</sup>

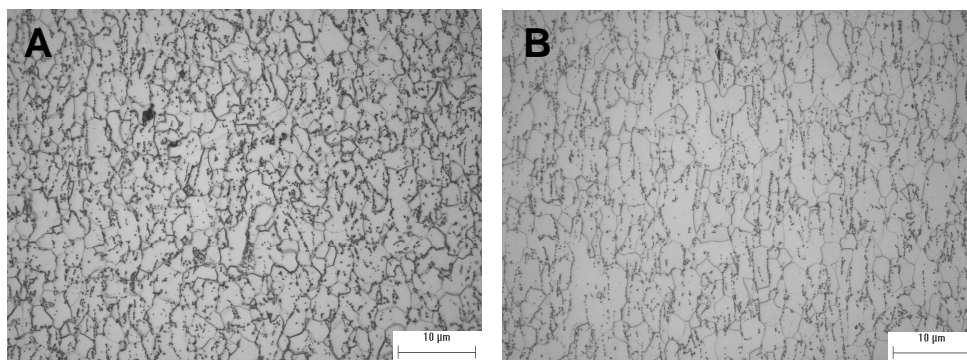
As análises metalográficas foram realizadas com amostras de cada material, seccionadas e embutidas a quente em baquelite, sendo posteriormente preparadas com lixamento, polimento e ataque químico (Nital a 3% por 8 segundos). As análises foram realizadas na secção longitudinal e transversal ao sentido de laminação.

O tamanho de grão foi verificado pelo método da ASTM E112-96<sup>(10)</sup> por comparação visual.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

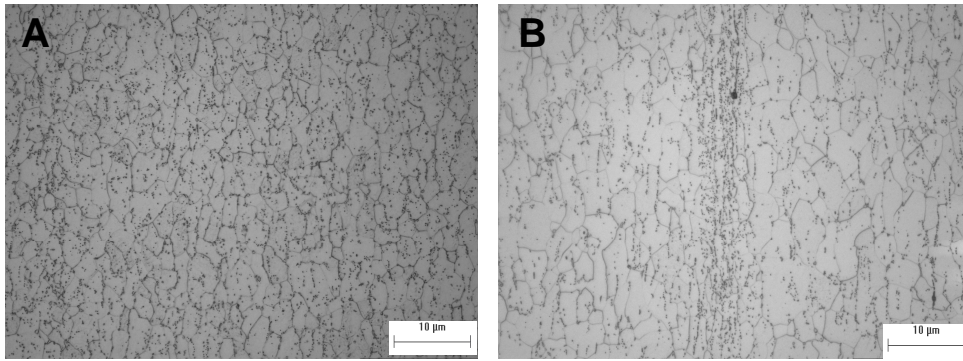
#### 3.1 Microestrutura e Tamanho de Grão

As Figuras 1 a 3 caracterizam as micrografias efetuadas com amostras dos materiais estudados nas seções transversais e longitudinais das chapas. São ainda apresentados os tamanhos de grão, avaliados na seção transversal, por comparação, conforme norma ASTM E112-96.<sup>(10)</sup>

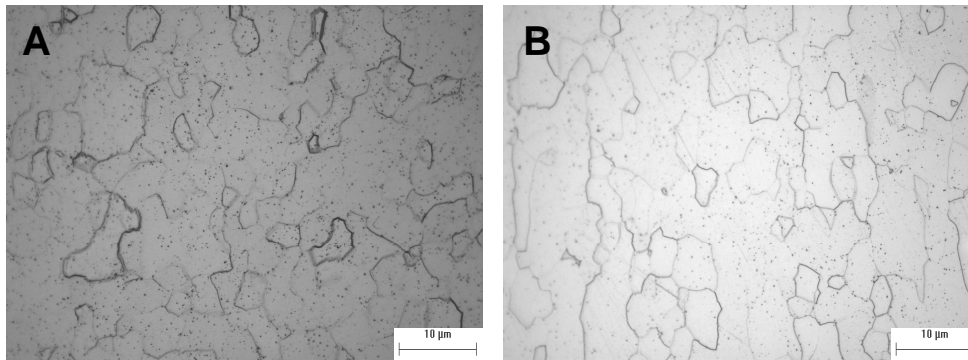


**Figura 1** - Aspecto metalográfico do aço C10. (A) seção transversal, TG = 8; (B) seção longitudinal, estrutura tipo *pancake*.





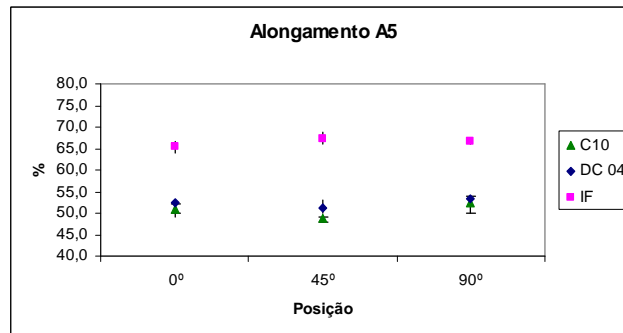
**Figura 2** - Aspecto metalográfico do aço DC04. (A) seção transversal, TG = 8; (B) seção longitudinal, estrutura tipo *pancake*.



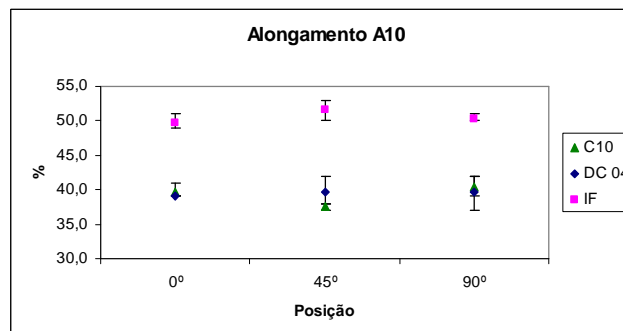
**Figura 3** - Aspecto metalográfico do aço IF. (A) seção transversal, TG = 6; (B) seção longitudinal, estrutura tipo *pancake*.

### 3.2 Ensaio de Tração Convencional

Foram realizados ensaios de tração convencional onde foram verificados os resultados de alongamento A5 e A10 realizados com amostras dos materiais estudados nas posições 0°, 45° e 90° (Figuras 4 e 5), limite de escoamento (Figura 6) e limite de resistência (Figura 7).



**Figura 4** – Alongamento A5.



**Figura 5** – Alongamento A10.

Nota-se que nas Figuras 4 e 5, o aço IF apresenta alongamento superior quando comparado com os aços C10 e DC04; e este comportamento repete-se nas três direções em que os respectivos ensaios de tração foram realizados. Ou seja, independentemente da direção de solicitação, o aço IF tem sempre um comportamento superior quanto ao alongamento. Isto se deve, provavelmente ao reduzido teor de carbono dos aços IF por sua característica de ser “livre” de elementos intersticiais, menor é a possibilidade de interação das discordâncias durante a evolução da deformação plástica, com o que seriam os elementos intersticiais. Assim sendo, conforme esperado, observa-se maior alongamento justamente neste tipo de aço.

Ainda que com muito menos intensidade, este efeito também é notado quando se compara os aços C10 e DC04, já que este último apresenta teores de carbono inferiores ao aço C10 e, a exemplo dos aços IF, também tem um alongamento ligeiramente superior ao C10. De qualquer forma, os aços C10 e DC 04 têm um comportamento muito próximo entre si, quando se comparam seus resultados com o aço IF.

### 3.3 Limite de Escoamento e Resistência

O gráfico da Figura 6 mostra que os aços C10 e DC04 apresentam um maior LE em relação ao aço IF. A variação entre os regimes elástico e plástico menor nos aços IF se confirmou nos ensaios de LE e LR. Essa condição é bem mais favorável, em relação aos outros aços, para se obter alta estampabilidade.

Assim como o LE, o LR dos aços C10 e DC04 (Figura 7) apresentam uma maior resistência em relação aos aços IF. Entre os mesmos aços, não foram observadas variações significativas entre as direções de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação.

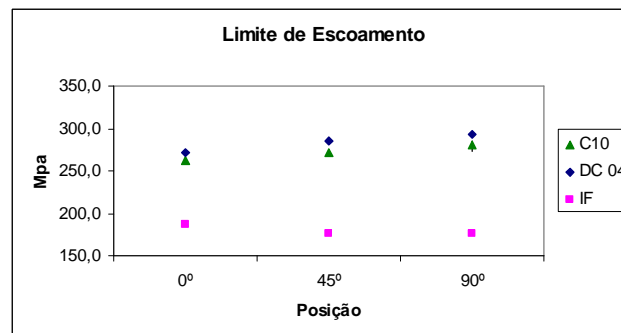


Figura 6 – Limite de Escoamento encontrado nas análises.

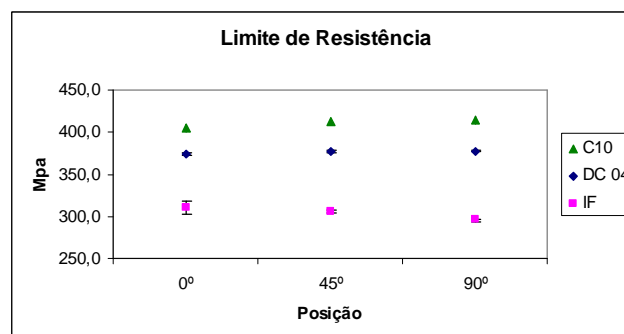


Figura 7 – Limite de Resistência encontrado nas análises.

Além dos valores de carbono dos aços C10 e DC04 serem maiores, conforme apresentado na Tabela 1, o tamanho de grão, tem influência no LR dos aços. Quanto menor o tamanho de grão maior a resistência para um determinado material. Nas Figuras 1 a 3, observa-se o tamanho de grão dos materiais estudados.

O aço IF apresentou tamanho de grão maior, tamanho de grão 6, em relação a C10 e DC04, que apresentam tamanho de grão 8, conforme ASTM E112.<sup>(6)</sup>

### 3.4 Ensaio de Tração (Curva Tensão Deformação Verdadeira)

#### 3.4.1 Valores de K e n

No gráfico da Figura 8 nota-se que os valores de K para os aços C10 e DC04 não apresentam variações entre as posições ensaiadas. Para o aço IF além de apresentar os menores valores nota-se que existe uma variação na posição 90° indicando que o material tem menor resistência nesta direção.

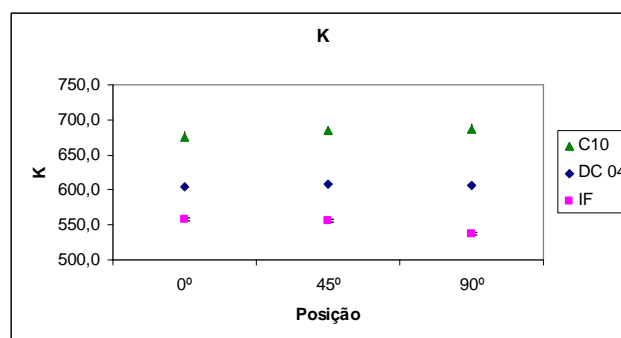


Figura 8 – Valores de K encontrado nas análises.

Na Figura 9 os resultados do coeficiente de encruamento (n), realizados com amostras dos materiais estudados indicam que a capacidade com que o material distribui a deformação frente a um gradiente de deformação é maior nos aços IF em relação aos outros aços avaliados.

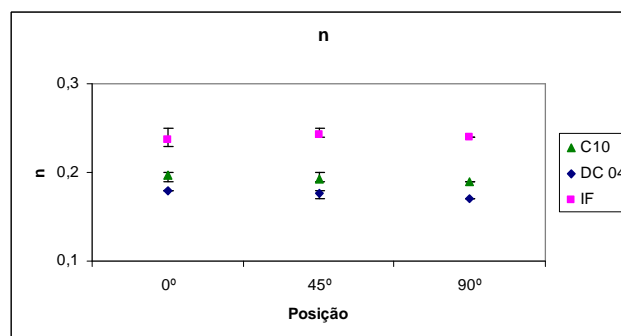
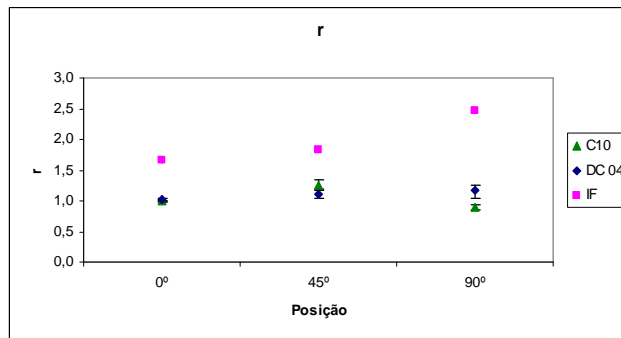


Figura 9 – Valores de n encontrado nas análises.

### 3.5 Anisotropia

#### 3.5.1 Valores individuais de anisotropia plástica normal (r)

A relação entre as deformações na espessura e na largura, denominada de anisotropia normal r, é apresentada na Figura 10. Entre os aços C10 e DC04 é verificada uma pequena variação na posição a 90°. Por outro lado ao aço IF apresenta valores distintos quando comparado aos demais aços, o que indica que o material apresenta melhores propriedades de estampabilidade, principalmente a 90°, indicando que o coeficiente de anisotropia r é mais favorável nesta posição.



**Figura 10** – Valores de coeficiente de anisotropia r encontrados nas análises.

A variação no valor de r indica também outra característica importante observada em chapas laminadas, que é o aparecimento de “orelhas” nas bordas de copos embutidos. Esse fenômeno se deve à diferença do valor de r para cada direção da chapa que originou o copo. Nas direções que apresentam um valor de r menor ocorrerá um maior engrossamento da chapa durante o embutimento. Assim, a altura do copo para aquela região será menor.

Os tamanhos das orelhas apresentadas e a direção em que elas se formam estão relacionados com o coeficiente de anisotropia planar,  $\Delta R$ .

### 3.5.2 Valores de anisotropia plástica norma ( $\bar{r}$ )

Os valores de  $\bar{r}$  verificados na Tabela 2 indicam uma maior capacidade de estampabilidade do aço IF em relação aos aços C10 e DC04, que não apresentam diferença significativa de valores, indicando uma maior resistência a deformação na espessura da chapa. Um coeficiente  $\bar{r}$  igual a 1 indica que existe igualdade entre a resistência a deformação na largura e na espessura, sendo o material isotrópico. O valor  $\bar{r}$  maior que 1, indica que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura.

O que se deseja para um aço de boa embutibilidade é que se tenha um elevado r (alta preferência de deformar-se no plano da chapa e pouco na espessura) e um  $\Delta r$  próximo do zero (mínimo de variação planar).

Tabela 2 - Valores de  $\bar{r}$  os materiais analisados

Material	$\bar{r}$
C10	1,09
DC 04	1,10
IF	1,94

### 3.5.3 Valores de anisotropia plástica planar ( $\Delta r$ )

A Tabela 3 mostra os valores de anisotropia planar,  $\Delta r$ , indicando as variações de r entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Sendo que entre os três, o aço DC 04 foi o que apresentou o menor valor de  $\Delta R$ .

Chapas com valores de  $\Delta r$  positivos, formam orelhas a 0° e a 90° em relação à direção de laminação, e chapas com valores negativos de  $\Delta R$  formam orelhas a aproximadamente 45°.

Quanto maior for o módulo de  $\Delta R$ , maior será o tamanho das orelhas. Esse orelhamento é causado pelas diferenças durante o escoamento do material em função do ângulo da direção de laminação.

Tabela 3 - Valores de  $\Delta r$  dos materiais analisados

Material	
C10	-0,3
DC 04	0,0
IF	0,2

### 3.6 Ensaios de Estampabilidade

#### 3.6.1 Embutimento Erichsen

Na Figura 11 verificam-se os resultados das análises do índice de Embutimento Erichsen efetuadas nas amostras dos materiais analisados.

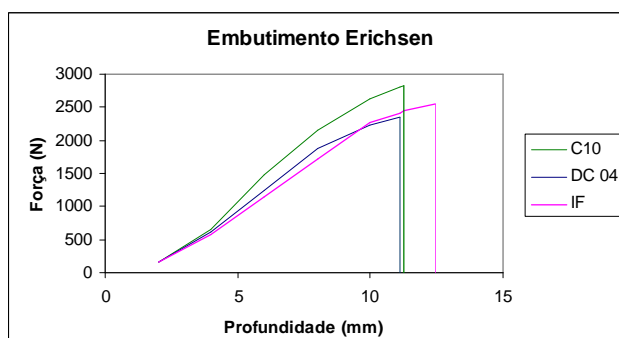


Figura 11 – Gráfico de força X Profundidade em ensaio de Embutimento Erichsen.

Assim como os valores apresentados de  $r$ , verificados no item 3.5.1, gráfico da Figura 11 demonstra que o aço IF obteve o maior valor de profundidade no embutimento Erichsen em comparação aos outros aços. O aço IF alcançou 12,4 mm de profundidade, contra 11,1 mm do DC 04 e 11,2 mm do C10, indicando ser este o aço que apresenta a melhor estampabilidade.

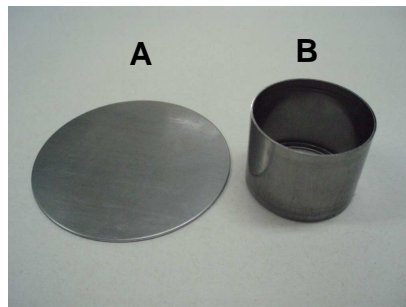
As forças obtidas nos ensaios demonstram que o aço DC04 obteve um menor valor de força em relação aos demais aços, entretanto isso se dá ao fato do material empregado neste ensaio ter espessura menor que dos demais aços conforme demonstrado na Tabela 2. Pois neste ensaio a espessura do material tem influência na força necessária para uma mesma deformação.

Apesar do aço IF não apresentar a menor força de estampagem no ensaio de embutimento erichsen, os resultados dos ensaios de LR e LE, demonstram que são necessárias menores tensões para deformar o aço IF em relação aos aços aqui analisados.

As vantagens de se ter um maior embutimento podem ser avaliadas na Figura 12 onde se tem como exemplo uma peça de geometria complexa (dobra a 180°) e na Figura 13, que demonstram exemplos de aplicações típicas do aço IF.



**Figura 12** - Flange com duas dobras a 180°. Peça produzida com o aço IF.



**Figura 13** – 13A: *Blank* e 13B: Bucha após repuxo profundo. Peça produzida com aço IF.

## 4 CONCLUSÕES

A caracterização dos materiais analisados, seus resultados e sua discussão permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- Os aços IF com seu baixíssimo teor de carbono e tamanho de grão adequado permitem um menor LR, LE e um excelente alongamento do material, sendo assim, muito utilizado para estampagem profunda. Analisando os gráficos de LR, LE e K pode-se verificar que o aço IF foi o que apresentou os menores valores em todos estes ensaios.
- Os valores de anisotropia normal ( $r$ ) do aço IF indicam que o material apresenta melhores propriedades de estampabilidade, principalmente a 90°, indicando que o coeficiente de anisotropia normal  $r$  é mais favorável nesta direção.
- O aço IF apresentou o maior valor de profundidade de embutimento entre os aços analisados.
- Entre os materiais analisados, o aço IF foi o que mostrou os melhores resultados quanto à estampabilidade quando comparado com os aços DC04 e C10. Esta característica pode ser verificada pelos resultados do alongamento, coeficiente de anisotropia normal, índice de embutimento erichsen e coeficiente de encruamento  $n$ , para os quais este aço se destacou em relação aos demais aços analisados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Rolamentos Schaeffler do Brasil pelo patrocínio deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, M.R.S. et al. Evolução da laminação de aços IF no laminador de tiras a quente da COSIPA. In: 43º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos - Curitiba - PR - ABM, 2006, p. 324.
- 2 Norma ABNT NBR 5915: Bobinas e chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem - Especificação, SP, ABNT, 2008.
- 3 RIZZO, E.M.S. Introdução aos processos siderúrgicos, São Paulo, ABM, 2005.
- 4 TSCHIPTSCHIN, A.P. Textura e relações de orientação, São Paulo, ABM, 2003.
- 5 Norma DIN EN10139: Cold rolled uncoated mild steel narrow strip for cold forming, Technical delivery conditions, Alemanha, 1997.
- 6 Norma DIN EN10277-2: Bright steel products - Technical delivery conditions- Part 2: Steels for general engineering purposes, Alemanha, 1999.
- 7 Norma ABNT NBR 5007: Tiras relaminadas de aço baixo carbono – Especificação, São Paulo, 1982.
- 8 Norma ABNT NBR 5902: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método erichsen modificado, São Paulo, 1980.
- 9 Norma DIN EN10002-1: Metallic Materials - Tensile Testing - Part 1: Method of test at ambient temperature, Alemanha, 2001.
- 10 Norma ASTM E112-96: Standard test methods for determine average grain size, USA, 2004.