

# COMPARAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO ESTABILIZADO AO NIÓBIO OBTIDAS ATRAVÉS DE DUAS ROTAS DE FABRICAÇÃO <sup>1</sup>

Roberto Bamenga Guida <sup>2</sup>  
Paulo Roberto Cetlin <sup>3</sup>

## Resumo

Visando melhorar a estampabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos, a Acesita desenvolveu na década de 90 um novo aço inoxidável ferrítico denominado ACE P430E. A adição de nióbio, associada a um rigoroso balanceamento químico e a processamentos a quente e a frio controlados, tornou possível a produção de um material com estampabilidade superior aos ferríticos convencionais não estabilizados. No final de 2002 foi implantada uma 2ª rota de laminação a frio, já que até então o material sofria apenas uma etapa de laminação a frio (redução direta). Na ocasião adotaram-se duas etapas de laminação, com um recozimento entre elas (redução via recozimento intermediário), visando eliminar alguns problemas característicos do material produzido via redução direta, como também, melhorar a estampabilidade deste material. Como resultado desta dissertação de mestrado, pode-se concluir que o comportamento em estampagem do aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio produzido via recozimento intermediário se mostrou superior ao mesmo aço produzido via redução direta.

**Palavras-chave:** Estampagem; Inoxidável; Ferrítico.

## COMPARISON OF THE DRAWING OF FERRITIC STAINLESS STEEL STABILIZED WITH NIOBIUM OBTAINED THROUGH TWO MANUFACTURE ROUTES

### Abstract

In order to improve the ferritic stainless steels sheet formability Acesita developed in the nineties a new ferritic steel called internally ACE P430E. The niobium addition, along with a rigorous chemical balance and controlled hot and cold processes have enabled the production of a material with better formability than the conventional non stabilized ferritic grades. In the end of 2002 a different processing route for this material was initiated. Whereas until then the material was produced with only one cold rolling step (direct reduction), two cold rolling steps were adopted, with an intermediate annealing (reduction with an intermediate annealing), aiming at the elimination of some typical problems present in the material produced by direct reduction, and the improvement of the material formability. The forming behaviour of the niobium stabilized ferritic stainless steel produced with intermediate annealing is superior to the same steel produced by direct reduction.

**Key words:** Drawing; Stainless steel; Ferritic.

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 43º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 17 a 20 de outubro de 2006, Curitiba – PR.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista da ACESITA.

<sup>3</sup> Membro da ABM, Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG..

## 1 INTRODUÇÃO

A importância dos aços inoxidáveis é inquestionável devido à sinergia entre suas diferentes propriedades. Pode-se citar dentre elas uma excelente resistência à ação de vários meios agressivos e propriedades mecânicas que permitem sua utilização em um grande número de aplicações. Basicamente a metade da produção dos aços inoxidáveis é laminada a frio em bobinas. Uma parte importante desses materiais é utilizada nos processos de conformação por estampagem.

Dentre as famílias de aços inoxidáveis existentes, os aços inoxidáveis ferríticos constituem um grupo de materiais empregados em aplicações que exigem alta resistência à corrosão e bom acabamento superficial, bem como boa conformabilidade no caso de chapas para estampagem.

Através de modificações na composição química e de alteração no processamento dos aços inoxidáveis ferríticos é possível melhorar a conformabilidade destes materiais. As alterações implicam, neste caso, no aparecimento de componentes de texturas mais favoráveis, que por sua vez determinam um coeficiente de anisotropia normal médio,  $\bar{r}$ , mais elevado. Quanto maior o valor de  $\bar{r}$  melhor será o desempenho do material no embutimento.

Visando melhorar a estampabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos, a Acesita desenvolveu na década de 90 um novo aço inoxidável ferrítico denominado ACE P430E. Segundo a literatura a adição de nióbio inibe a recristalização do material durante a fase de laminação a quente através da precipitação de carbonetos de nióbio, fato que gerará uma bobina laminada a quente de alta de energia, que após o recozimento na fase de laminação a frio apresentará uma estrutura mais refinada e homogênea, melhorando suas propriedades de estampagem. A adição de nióbio, associada a um rigoroso balanceamento químico e a processamentos a quente e a frio controlados, tornou possível a produção de um material com estampabilidade superior aos ferríticos convencionais não estabilizados.

No final de 2002 foi implantada uma 2ª rota de laminação a frio, já que até então o material sofria apenas uma etapa de laminação a frio (redução direta). Na ocasião adotavam-se duas etapas de laminação, com um recozimento entre elas (redução via recozimento intermediário), visando eliminar e/ou minimizar o nível estriamento do aço 430E produzida via redução direta, como também, melhorar a estampabilidade deste material.

Ainda segundo a literatura a inclusão de uma etapa de laminação e recozimento intermediário na fase de laminação a frio poderiam melhorar a estampabilidade do aço 430E através da intensificação da textura tipo fibra  $\gamma$ . Esta maior fração volumétrica de textura tipo fibra  $\gamma$  propiciará um coeficiente de anisotropia normal mais elevado, melhorando suas características de estampagem.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar o comportamento em prensa do aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio, produzido via redução direta e via recozimento intermediário.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo do efeito da rota de fabricação do aço 430E produzido via redução direta e via recozimento intermediário foi realizado em amostras com espessura final de 0,60 mm. Estas amostras foram retiradas das corridas descritas na Tabela 1 na fase de bobina laminada a frio, decapada e recozida, ou seja, acabamento I2 ou 2B.

**Tabela 1.** Composição química das corridas de aço ABNT 430E.

Corrida	C(%)	Cr(%)	Nb(%)	N2 (ppm)	C+N (ppm)	Rota de Fabricação
305335B	0,009	16,06	0,43	30,5	395	Redução Direta
307267E	0,016	16,07	0,35	197	357	
308590I	0,019	16,22	0,38	184	374	
306119I	0,014	16,23	0,33	210	350	Recozimento Intermediário
306130F	0,012	16,19	0,31	194	314	
308160A	0,006	16,35	0,33	190	250	

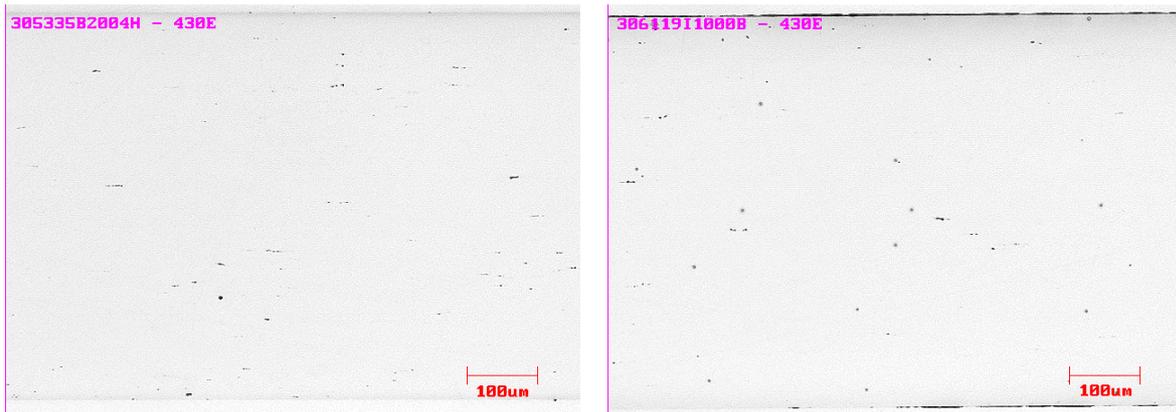
Foram realizados os seguintes ensaios:

- caracterização microestrutural através de um microscópio ótico LEITZ DMRXE,
- caracterização mecânica através em uma máquina de tração, marca INSTRON, modelo 5583, com capacidade de 15 toneladas. Foram obtidos valores de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento, limite de ruptura nas três direções, ou seja, direção de laminação, 45° com a direção de laminação e 90° com a direção de laminação,
- ensaios simulados de estampagem : de Swift fundo plano e Swift fundo semi-esférico. Os ensaios Swift com fundo plano foram realizados com o punção de 33 mm, enquanto que para a realização do Ensaio Swift com fundo semi-esférico foi utilizado um punção de 32 mm. Ambos os ensaios foram realizados com uma velocidade de deslocamento de 600 mm/min e a temperatura constante. Utilizou-se lubrificação de graxa de bissulfeto de molibdênio (Molikote), com cargas de prensa chapas constantes, variando entre 5 e 6 KN. Os ensaios simulados foram realizados em uma máquina de fabricação Erichsen, modelo 142/40.
- caracterização da textura cristalográfica, tanto na superfície como no centro da amostras. As análises foram realizadas em um difratômetro X'Pert PRO MPD da marca Philips, equipado com um goniômetro Theta-Theta de alta performance e berço de textura ATC-3 Prefix, instalado no Laboratório de Métodos Físicos do Centro de Pesquisas da Acesita, como radiação de Co K $\alpha$ 1 ( $\lambda=1,79021$ ),
- teste de campo. Para realização dos testes de estampagem foi utilizado uma prensa-hidráulica de duplo efeito com capacidade de 600 toneladas da empresa FORMINOX , sendo obtidos cubas de 110 mm de profundidade.

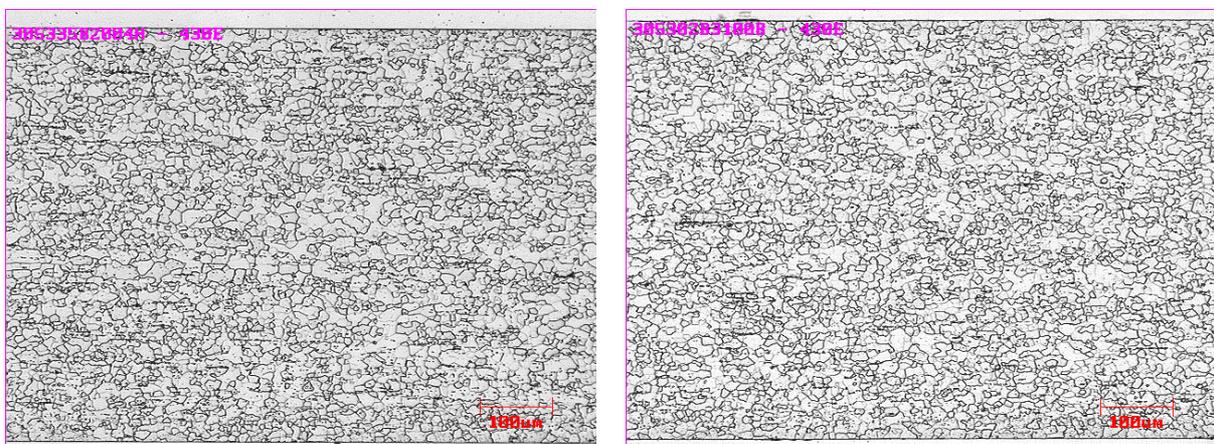
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Micro-Estrutural

O tamanho de grão e a quantidade de impurezas contidas no material possuem grande influência sobre suas propriedades mecânicas, que por sua vez, influenciam nas condições de estampagem. Torna-se importante então, conhecer esta propriedade. As análises de micropureza podem ser vistas nas Figuras 1 e 2. Já nas Figuras 3 e 4 podem ser vistas as microestruturas dos aços produzidos tanto via redução direta como via recozimento intermediário. Na Figura 5 estão apresentados através de gráficos de tendência os valores médios de tamanho de grão e seu respectivos desvios padrão.



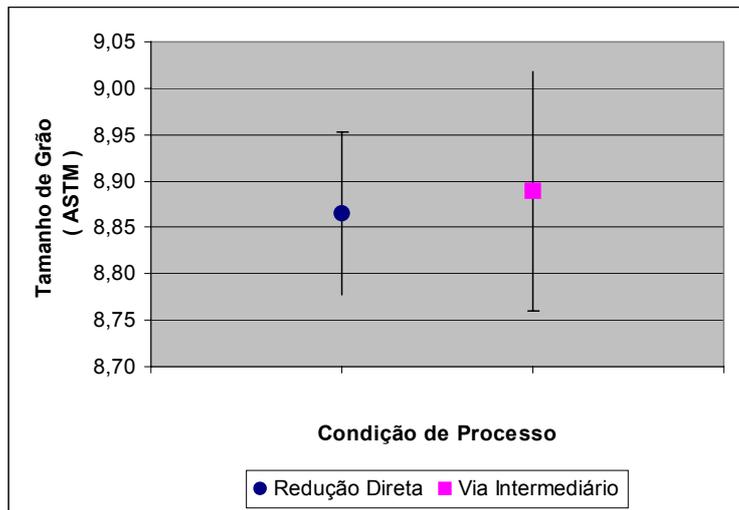
**Figura 1.** Micropureza do inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio. À esquerda do aço produzido via redução direta, e à direita do produzido via recozimento Intermediário.



**Figura 2.** Microestrutura do inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio. À esquerda do aço produzido via redução direta, e à direita do produzido via recozimento intermediário.

Analisando as Figuras 1 e 2 nota-se que a rota de fabricação não afetou a estrutura metalográfica dos materiais.

Vale ressaltar que para análise do tamanho de grão o ataque não permitiu visualizar a estrutura de grãos desejável, prejudicando o funcionamento do software IA3001, sendo necessário utilizar outro método para determinação do tamanho de grão. O método escolhido e utilizado foi o de interceptos, sendo realizadas 3 medições por amostragem.

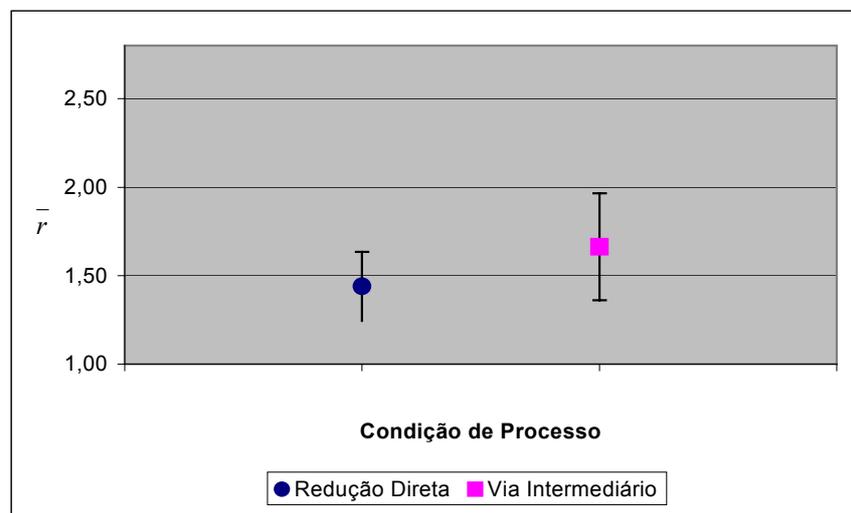


**Figura 3.** Tamanho de Grão ASTM-E112-96

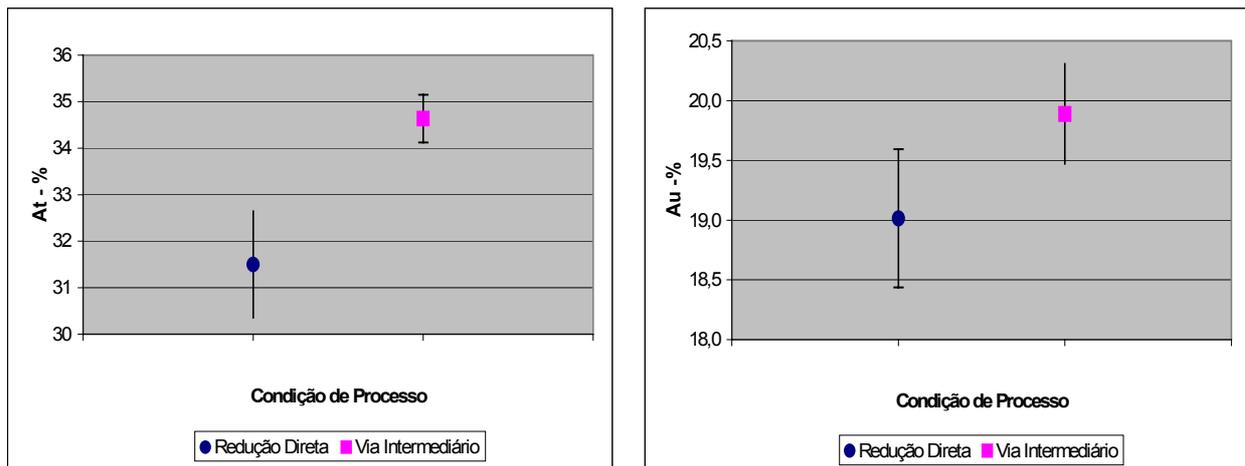
Analisando a Figura 3 nota-se que a rota de fabricação não afetou o tamanho de grão final dos materiais.

### 3.2 Caracterização Mecânica

Quando um material é conformado em prensa, a influência de suas propriedades mecânicas nos parâmetros e variáveis do próprio processo depende do tipo de conformação. Assim, algumas propriedades tem um comportamento mais pronunciado, em um determinado tipo de conformação e um efeito menor ou mesmo nulo, em outro. Por exemplo, o valor de coeficiente de encruamento, tem uma nítida influência no estiramento, sendo menos pronunciado na estampagem profunda, onde o coeficiente de anisotropia normal tem grande efeito. A Figura 4 e 5 mostra os principais resultados obtidos.



**Figura 4.** Coeficiente de Anisotropia Normal ( $\bar{r}$ )



**Figura 5.** Alongamento do inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio. À esquerda é apresentado o valor de alongamento total e à direita o alongamento uniforme.

Analisando a Figura 4 nota-se que o aço produzido via recozimento intermediário possui uma maior tendência de alcançar valores de  $\bar{r}$  mais elevados quando comparado com aço produzido via redução direta, fato que o caracteriza para melhores resultados de estampagem. Esta maior tendência de atingir valores superior de  $\bar{r}$  se deve principalmente aos valores de  $r_0$  e  $r_{90}$  que são superiores nos materiais produzidos via recozimento intermediário.

Em relação ao alongamento total e alongamento uniforme pode ser visto nas Figura 5 que os materiais apresentaram comportamento totalmente diferentes, sendo que os processados via recozimento intermediário possuem valores mais propícios para processos de estampagem. Este maior alongamento supõem-se à sua melhor recristalização que é proveniente de duas etapas de recozimento. Além disso, o recozimento intermediário melhora a distribuição e dissolução do nióbio encontrado em solução sólida e na forma de Nb (C,N), o que implicará em uma estrutura mais homogênea e refinada.

### 3.3 Textura Cristalográfica

Avaliando a Figura 6 nota-se que a rota de fabricação do aço 430E via recozimento intermediário possui uma textura mais favorável para processo de estampagem, tendo a fibra  $\gamma$  (componentes  $\{111\}\langle 112\rangle$  e  $\{111\}\langle 110\rangle$  principalmente) em maior fração volumétrica. Nota-se também que estas componentes nos materiais processados via redução direta possuem maior fração volumétrica na superfície, enquanto que nos materiais processados via recozimento intermediário esta maior fração volumétrica se encontra no centro da espessura, sendo normalmente este local o de maior representatividade para definir o comportamento do material.

É importante também salientar que as medidas de textura foram feitas apenas no centro e na superfície das amostras, o que pode ser pouco devido ao gradiente de textura ao longo da espessura típico em aços inoxidáveis ferríticos.

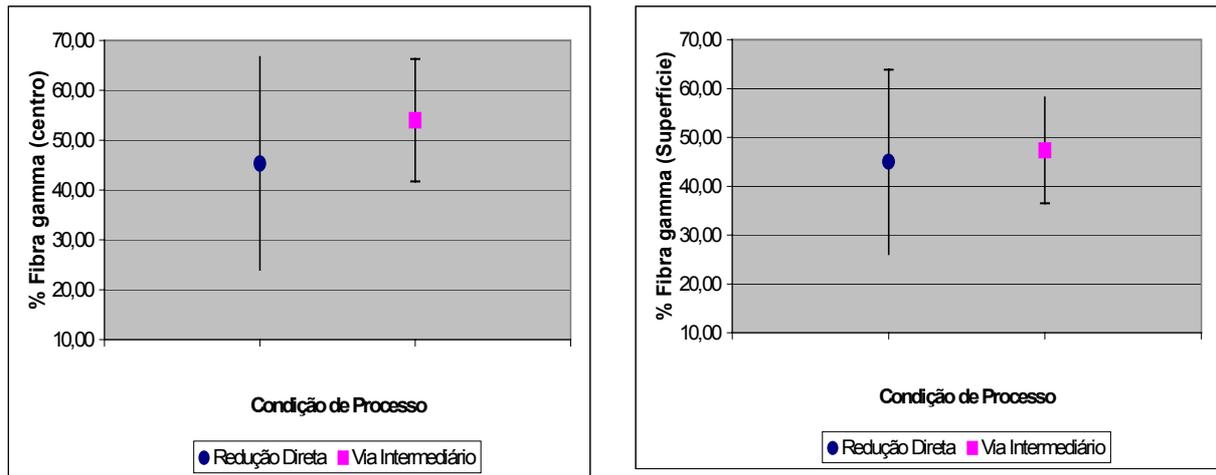


Figura 6. Fração Volumétrica de Fibra  $\gamma$  ( $\langle 111 \rangle // DN$ ).

### 3.4 Ensaios Swift com fundo plano e semi-esférico

Com base no diâmetro do último esboço estampado sem fratura e no diâmetro no punção utilizado, calculou-se a relação LDRn. Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 7.

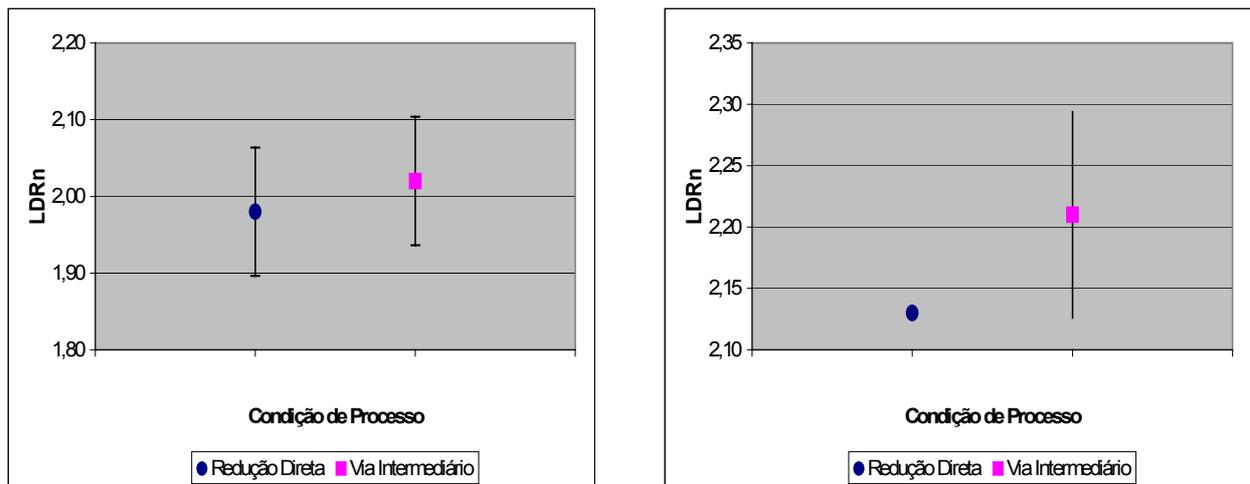


Figura 7. Resultados do ensaios Swift. À esquerda o Swift com fundo plano e a direita o Swift com semi-esférico.

Através dos dados contidos da Figura 7 nota-se que os materiais processados via recozimento intermediário possuem uma tendência de atingir valores mais elevados de LDR. Porém analisando separadamente cada ensaio percebe-se um melhor desempenho do material quando há associação de embutimento e estiramento, ou seja, o Ensaio Swift com fundo Semi-Esférico. Já no ensaio Swift com fundo plano temos predominância do embutimento, ou seja, influência do coeficiente de anisotropia normal. Já no Ensaio Swift com fundo semi-esférico temos a combinação do coeficiente de anisotropia e alongamento uniforme. Extrapolando as análise dos dados contidos na Figura 7 percebe-se que os materiais processados via recozimento intermediário possuem um acréscimo em profundidade do copo estampado em torno de 9,4% em relação aos materiais processados via redução direta. O cálculo de profundidade seguiu a equação abaixo apresentada:

$$H_{\text{máx}} = (D_{n2} - D_{p2}) / 4 D_p$$

Sendo:  $D_p$  = diâmetro do punção ;  $D_n$  = diâmetro do esboço estampado sem fratura ;  $H_{\text{máx}}$  expresso em mm.

### 3.5 Teste de Campo

Visando comprovar os resultados obtidos durante a caracterização laboratorial foi realizado testes de estampagem em um cliente da ACESITA, FORMINOX - Pias e Cubas, com o aço 430E produzido via redução direta e via recozimento intermediário.

Na realização dos testes foi utilizada uma prensa-hidráulica de duplo efeito com capacidade de 600 toneladas, ferramentais Ampco (Ligas Bronze-Alumínio), sendo os demais parâmetros de processos mantidos em sigilo por solicitação da FORMINOX. Também foi utilizada o lubrificante FRIMOSTAMP 180 B500 S.

Visando caracterizar o comportamento dos aços envolvidos a força de prensa-chapas foi utilizada como fator de diferenciação, sendo iniciado o processo de conformação para ambos com uma pressão de 35 bar e levados até a máxima pressão antes da ruptura. Este procedimento de atuação na força do prensa-chapas foi utilizado, pois quanto maior a pressão de prensa-chapas utilizada maiores serão as dificuldades de conformação, ou seja, o aço que suportar maiores pressões sem a presença de trincas terá caracterizado seu melhor comportamento em conformação. Na Tabela 2 pode-se verificar todas as cargas utilizadas e seus respectivos resultados.

**Tabela 2.** Resultados teste de campo

	Redução Direta	Recozimento Intermediário
Carga do Prensa-Chapas (bar)	Resultado Obtido	
35	Ok	Ok
46	Ok	Ok
50	Estricção / Ruptura	Ok
52	Ruptura	Ok
Obs.: A carga de prensa-chapas para o material produzido via recozimento intermediário não foi elevada para valores superiores a 52 bar em função da quantidade de amostras disponíveis.		

Analisando os dados da Tabela 2 conclui-se que o aço 430E produzido via recozimento intermediário apresenta uma melhor capacidade de estampagem em relação ao mesmo aço produzido via redução direta, pois suportou pressões de prensa-chapas da ordem de 52 bar, enquanto que o aço produzido via redução direta tem como limite máximo 46 bar de pressão.

## 4 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos foram atendidos, de forma que esta pesquisa permitiu evidenciar o melhor comportamento em estampagem do aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio produzido via recozimento intermediário, como se descreve:

Nota-se que o aço produzido via recozimento intermediário apresentou uma maior fração volumétrica de textura tipo fibra gamma. Esta maior fração volumétrica encontrada no aço produzido via recozimento intermediário propiciou um valor de  $\bar{r}$  mais elevado quando comparado com aço produzido via redução direta, fato acarretou em resultados superiores no Ensaio Swift de punção reto.

Em relação as propriedades mecânicas convencionais verificou-se que o alongamento total e uniforme dos materiais processados via recozimento intermediário foram superiores quando comparado com os materiais processados via redução direta. Supõem-se que este melhor alongamento dos materiais processados via recozimento intermediário deve-se a sua melhor recristalização, que é proveniente de duas etapas de recozimento. Este melhor alongamento dos materiais processados via recozimento intermediário pode explicar o seu melhor desempenho no Ensaio Swift punção semi-esférico e no Ensaio Erichsen, sendo o primeiro uma combinação de embutimento e estiramento e o segundo somente estiramento. Vale ressaltar que para explicar este melhor desempenho dos aço produzido via recozimento intermediário deve-se levar em consideração a combinação de melhor coeficiente de anisotropia normal e alongamento destes materiais quando comparado com os produzidos via redução direta.

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1 COMPANHIA AÇOS ESPECIAIS ACESITA. Divisão de Metalurgia. Desenvolvimento de um novo aço inoxidável ferrítico; relatório interno, 1990.
- 2 SILVA, Ronaldo Claret Ribeiro, Metalurgia dos aços inoxidáveis ferríticos - ACESITA, relatório interno, 2003.
- 3 SILVA, José Nicácio da. Análise da conformação a frio do aço ABNT 430 modificado por Nb, Al, Al-Nb e Al-Ti. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG, 1990. p.05-12; 25-50; 59; (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)
- 4 SWIFT, H.W.. Cup drawing from a flat blank, p. 199-221.
- 5 COELHO, Emerson Nunes. Avaliação da anisotropia em chapas de aços ABNT 430 e ABNT 430 estabilizado ao nióbio e nióbio-titânio. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2000. p.20; 37-48.(Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)