

# UM ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA ANISOTROPIA PLÁSTICA E A ESTAMPABILIDADE NO FORNECIMENTO DE AÇO BAIXO CARBONO PARA ESTAMPAGEM EXTRA-PROFUNDA<sup>1</sup>

Reinaldo de Oliveira Silva<sup>2</sup>  
Marcos Flavio de Campos<sup>3</sup>

## Resumo

Um processo de fabricação em destaque nos dias atuais é a conformação de chapas metálicas. Verifica-se um aumento na aplicação de novos materiais como aços de alta resistência, e metais não-ferrosos. A viabilidade do uso desses materiais depende do conhecimento de suas características e dos parâmetros dos processos de conformação. É conhecida uma forte correlação entre a anisotropia normal ( $r$ ) as orientações de textura e a estampabilidade dos aços ao carbono. Uma ferramenta importante na análise de correlação, ou seja, investigação de dependência entre duas variáveis é a investigação pela determinação do coeficiente do produto do momento de Pearson. Este trabalho explora esta forte dependência entre a anisotropia plástica e a estampabilidade, tratando da obtenção dos coeficientes de correlação entre informações do processo de fabricação e valores da anisotropia plástica do material, com discussão dos resultados através da análise da orientação de textura cristalográfica do material e metalográfica. Observou-se que entre os três modelos de painéis laterais em estudo foi comprovada uma forte correlação para dois destes modelos analisados, no caso do ( $r$ ).

**Palavras-chave:** Estampabilidade; Anisotropia; Aços baixo carbono.

## A STUDY OF CASE: EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN PLASTIC ANISOTROPY AND DRAWING FOR A LOW CARBON STEEL FOR DEEP DRAWING

### Abstract

An important process nowadays is the sheet metal forming. We have observed an increase of new raw materials applications like higher strength steel and non ferrous alloys. The viability of these new materials depends on the knowledge of their characteristics and parameters of the forming process. It is known a strong correlation between the normal anisotropy ( $r$ ), the texture and formability of the carbon steels. One important tool for analysis of correlation is investigation of dependence between two variables using Pearson coefficient. This work explore this high dependence between plastic anisotropy and formability, and deals with correlation coefficients between manufacturing process and plastic anisotropy values of the material. Results of the crystallographic texture and orientation were also checked. It was observed that for two on the three models of panel body side analyzed there is strong correlation with ( $r$ ).

**Key words:** Drawing; Anisotropy; Low carbon steels.

<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> Engenheiro Metalurgista e Mestrando em Engenharia Metalúrgica, EEIMVR-Universidade Federal Fluminense. Magnosto Automotivo do Brasil.

<sup>3</sup> Professor Adjunto. EEIMVR-Universidade Federal Fluminense Volta Redonda RJ.  
mfdcampo@uol.com.br, mcampos@metal.eeimvr.uff.br

# 1 INTRODUÇÃO

Conforme Dieter,<sup>(1)</sup> a estampagem profunda ou embutimento, corresponde ao processo de fabricação utilizado para modelar chapas planas em artigos com forma de copo. A estampagem é realizada colocando-se uma amostra de tamanho adequado sobre uma matriz de forma definida e comprimindo o metal com um punção para o interior desta matriz. Ainda de acordo com Dieter,<sup>(1)</sup> a maior parte dos estudos experimentais e teóricos têm sido realizados na estampagem profunda de um copo cilíndrico de fundo plano (teste de *Swift*), a partir de um disco plano (*blank*). A estampagem pode ser também definida como um conjunto de operações com as quais, sem produzir cavacos, submete-se uma chapa plana a uma ou mais transformações, para obter uma peça com forma geométrica própria, plana ou não, usando-se um punção, uma matriz e um prensa-chapas. Entre os vários processos de estampagem destacam-se o dobramento, a estampagem profunda e o estiramento. Nos processos de estampagem dois tipos de deformação são predominantes, em uma primeira avaliação quando uma variação pronunciada de espessura é presente, denomina-se estiramento, e no segundo caso, quando as variações de espessura são mínimas, é comum designá-lo como embutimento. A estampagem por estiramento é caracterizada por um estado biaxial de deformação. O *blank* é fixado pelo prensa-chapas com pressão suficiente para impedir o seu arraste, garantindo que a chapa seja submetida somente ao esforço de tração. O processo de embutimento implica simultaneamente em deformações de tração e compressão. Neste processo, a pressão do prensa-chapas ou anti-rugas é regulada de maneira a permitir a alimentação constante do material para dentro da matriz. Porém a pressão ajustada deve ser suficiente para impedir o enrugamento do flange. A embutibilidade é melhorada reduzindo a deformação na espessura e, portanto aumentando a deformação lateral. O caso real no processo de estampagem a chapa é submetida a uma combinação de esforços de embutimento e estiramento.

## 1.1 Estado de Deformação

Segundo Bresciani et al.,<sup>(2)</sup> o processo de embutimento submete a chapa plana a um estado de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que esteja sendo conformada. Para peças cilíndricas, existem três diferentes estados de tensão: um na flange, um na parede lateral e um no fundo do copo, como podem ser visto na Figura 1.

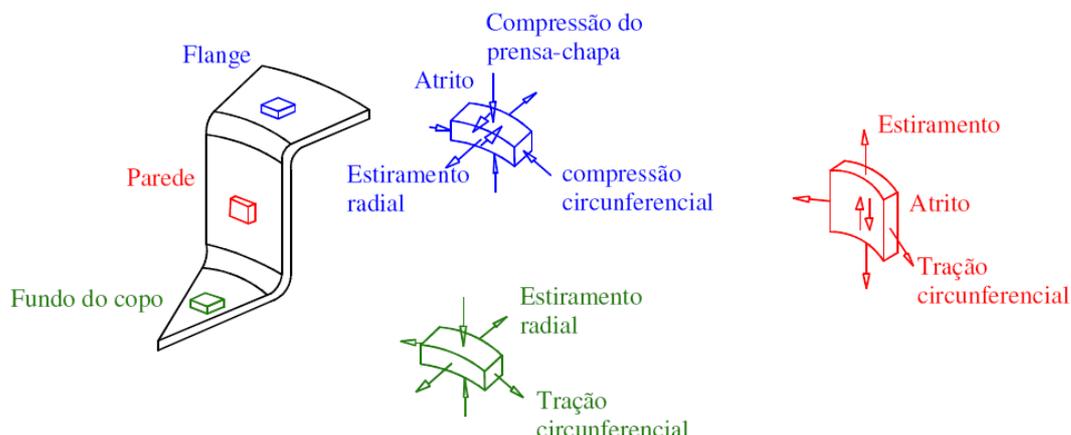


Figura 1. Estado de tensões atuantes no copo de embutimento.<sup>(2)</sup>

## 1.2 Plasticidade Aplicada a Conformação

A estampabilidade pode ser melhorada por baixos valores de tensão de escoamento e altos valores de alongação, de coeficiente de anisotropia normal e de expoente de encruamento. Tendências na indústria automotiva como redução de massa e economia de energia leva ao uso de aços de alta resistência com novo conceito: aços baixa liga, sendo *bake hardening* (BH), *interstitial free* (IF), *dual phase* (DP), *transformation induced plasticity* (TRIP) entre outros. Também para esses aços se busca uma melhor utilização das propriedades de conformação dos materiais nos processos industriais. Para verificação das propriedades dos materiais relacionadas à deformação, muitos métodos experimentais são usados (ensaio de tração, ensaio de Erichsen, entre outros). Segundo Keeler<sup>(3)</sup> e Kuzman,<sup>(4)</sup> a avaliação de uma chapa de metal pode ou não ser conformada sem falha, dependendo das propriedades do material, condições superficiais, tamanho e forma do *blank*, lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa chapas, projeto do punção e da matriz, e de muitos outros fatores. Na otimização da produção, pode ser usado o método de simulação numérica por elementos finitos (MEF), que possibilita perceber a influência dos parâmetros do processo e características dos materiais numa etapa anterior a fabricação.

## 1.3 Anisotropia

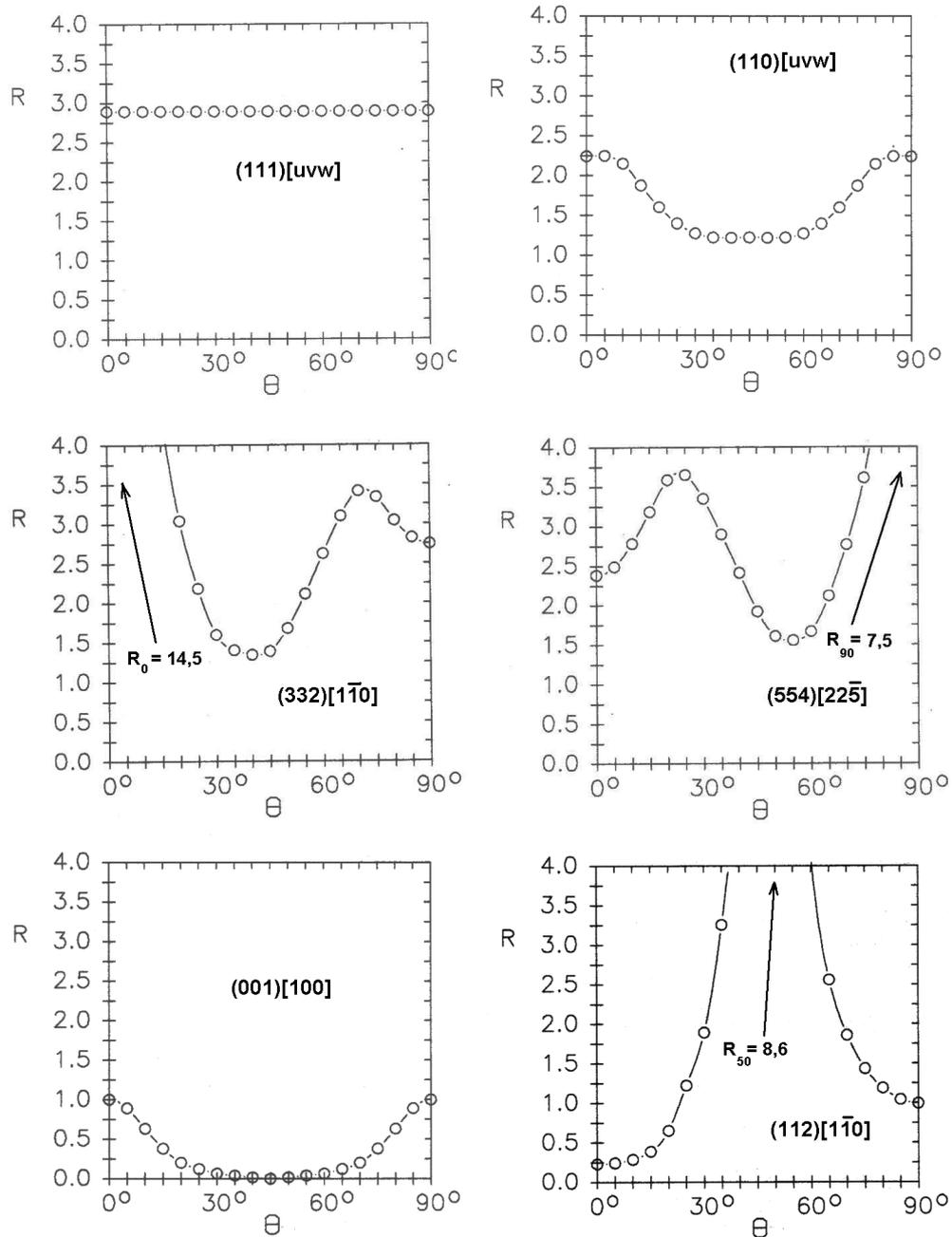
A anisotropia pode ser avaliada com o auxílio de ensaio de tração. O índice de anisotropia plástica,  $r$ , está relacionado com o quociente da deformação real na largura pela deformação real na espessura através da seguinte relação:

$$r = \ln(l_i/l_f) / \ln(e_i/e_f) \quad (A)$$

onde  $l_i$  e  $e_i$  são respectivamente, a largura e a espessura iniciais da amostra e  $l_f$  e  $e_f$  são, respectivamente, a largura e a espessuras finais após determinada deformação. Um elevado valor de  $r$  indica que o material tem boas propriedades de estampagem. O parâmetro de anisotropia  $r$  pode ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a 0 graus, 45 graus e 90 graus da direção de laminação. Testando-se chapas perfeitamente isotrópicas ou não direcionais, todos os valores de  $r$  seriam iguais a uma unidade. Para a maioria dos aços e outros materiais, entretanto, há variações dos valores de  $r$  com a direção (Figura 2). Por causa disso usa-se como parâmetro o  $r$  médio dentro do plano da chapa, o qual é chamado de anisotropia normal.<sup>(5)</sup> Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento cristalino durante a deformação. Nos materiais policristalinos, os grãos tendem a girar para alguma orientação preferencial, devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura (orientação) preferencial. O grau de anisotropia é estreitamente relacionado à estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia desenvolve-se mais fortemente em metais com estrutura hexagonal (berílio, titânio, zircônio) do que em metais com estrutura cúbica de corpo centrado ou face centrada (aço, cobre, alumínio, bronze). O tipo e quantidade de elementos de liga também influenciam a natureza da anisotropia. Para um dado metal e composição, a anisotropia plástica é uma consequência de toda sua história de

processamento. Especialmente importante para o aço são a temperatura final, temperatura de resfriamento, percentual de redução a frio e ciclo de recozimento.

#### 1.4 Valores de “r” para Algumas Orientações Cristalográficas



**Figura 2.** Figuras mostrando correlação entre fator de anisotropia  $r$  e textura, para ferro CCC. Cortesia do Prof. Carlos Sérgio da Costa Viana.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material em Análise

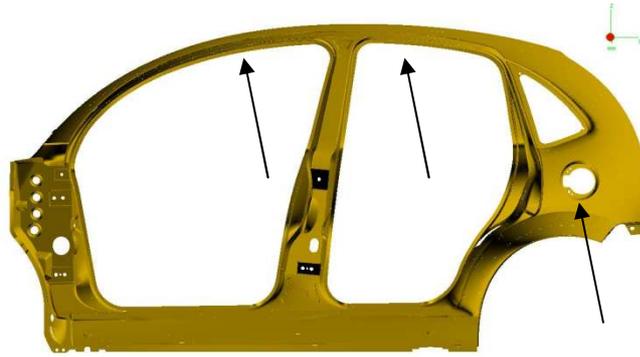
Os materiais em análise são os aços DC 06 e B53 fornecidos para estampagem de painéis laterais automotivos, seguindo respectivamente as normas DIN 10152 e B533106, as propriedades mecânicas e composição química podem ser visualizadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características químicas e mecânicas dos aços DC 06 e B53

	DC 06	B53
Re (Mpa) Limite de escoamento em tração	120 a 190	160 a 200
Rm (Mpa) Limite de Resistência a tração	270 a 350	280 a 340
A (min%) alongamento	37	37
r <sub>0,2</sub> (min) anisotropia normal	1,8	1,8
n <sub>0,2</sub> (min) coeficiente de encruamento	0,200	0,190
C (max)	0,020	0,080
P (max)	0,020	0,025
S (max)	0,020	0,025
Mn (max)	0,250	0,400
Ti (max)	0,300	Não Especificado
Al (mín)	Não Especificado	0,020
Si (max)	Não Especificado	0,010

#### 2.1.1 Produtos em análise

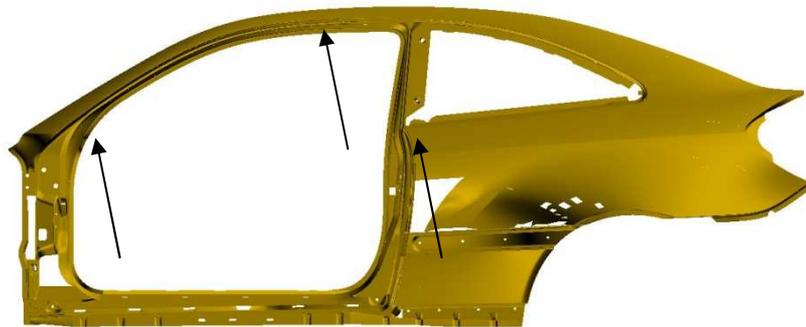
Após um levantamento inicial constatou-se que os produtos que mais impactavam em termos de incidência de fraturas após processamento em estampagem eram três painéis laterais, foram considerados os custos de refugo associados a descarte por fratura após processamento, estes painéis laterais serão denominados neste trabalho de A1 , A2 e A3 , como apresentados na Figura 3.



(a) representação do painel lateral A1, as setas indicam as regiões com maior incidência de fraturas e estirções.



(b) representação do painel lateral A2, as setas indicam as regiões com maior incidência de fratura e estirções.



(c) representação do painel lateral A3, as setas indicam as regiões com maior incidência de fratura e estirções.

*Nota: A1 e A2 são estampados com a utilização de aços B53 enquanto A3 emprega DC06.*

**Figura 3.** Painéis laterais estampados, indicando regiões com maior incidência de defeitos.

## 2.2 Metodologia Estatística Empregada

### 2.2.1 Determinação do coeficiente de correlação

O Microsoft Excel fornece um conjunto importante de ferramentas para análise de dados, denominado ferramentas de análise, que pode ser utilizado para otimizar o desenvolvimento de análises estatísticas ou de engenharia complexas. Para avaliar o nível de correlação entre anisotropia normal média e a incidência de fraturas e estirções localizadas, valeu-se da estimativa do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson,  $k$ , que fornece um índice adimensional situado entre -1,0 e 1,0 inclusive, em que valores negativos implicam em uma correlação

inversa e valores positivos em correlação direta, o nível de correlação é dado pela avaliação de quanto,  $k$  se aproxima da unidade tanto para valores negativos quanto para valores positivos, um valor de  $k$  igual a 1,0 ou -1,0 indica uma perfeita correlação das variáveis em estudo, valores de  $k$  entre 0 e 0,5 (como também para os simétricos negativos), traduzem uma correlação inexpressiva, valores de  $k$  entre 0 e 0,7 um nível de correlação médio, para valores acima de 0,7 é pode ser considerada uma forte correlação entre as variáveis em estudo. A fórmula do momento de Pearson que fornece o coeficiente do momento,  $k$ , é dada por:

$$k = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Onde  $x$ , é valor correspondente da variável 1 ao valor que assume a variável 2,  $y$ , no mesmo intervalo, e  $\bar{y}$  e  $\bar{x}$ , são os valores das médias aritméticas destas variáveis. Neste trabalho assumiram os valores de  $x$ , os índices de anisotropia normal e valores de  $y$  os índices de incidência de fraturas e estricções.

### 2.2.2 Análises metalográficas

Foram realizados ensaios micrográficos e de textura para os materiais que apresentaram correlação significativa (coeficiente do momento do produto de Pearson maior que 0,7 em módulo, painéis laterais A1 e A2) a fim de suportar os resultados da análise estatística. Os ensaios micrográficos foram realizados nos laboratórios da Vega do Sul empresa do Grupo Arcelor, segundo as exigências das normas B53 do Grupo PSA destinadas a ensaios óticos que atendem as exigências ABNT. Para realização dos ensaios micrográficos foram tomadas seis amostras aleatórias dos materiais de A1 e A2, por apresentarem significativa correlação.

### 2.2.3 Levantamento de dados

Dos registros de monitoramento da produção de estampados da MA Automotivo do Brasil foram retirados os dados com respeito ao número de fraturas e estricções detectáveis visualmente com origem na operação de repuxo (operação com predominância do processo de embutimento com mínimo estiramento de chapa), os dados referentes as propriedades mecânicas em análise foram extraídos dos certificados de matéria-prima verificados no setor de recebimento de produtos. Foi considerado um intervalo de 25 produções entre março e outubro de 2008. Para a análise inicial de investigação de correlação entre as incidências de fratura e estricção localizada com o expoente de Hollomon foi considerado um intervalo de 10 produções entre março e julho de 2008.

A metodologia empregada incluiu: Análise de Correlação através de gráficos de dispersão pela análise das variáveis tomadas aos pares, em estudo as variáveis "r" frente à incidência de falhas e "n" frente à incidência de falhas, com cálculo do coeficiente de correlação  $k$ , dado pelo produto de correlação de Pea. Parâmetros considerados para  $R^2$ : abaixo de 0,45 correlação fraca, entre 0,45 e 0,75 correlação relevante, acima de 0,75 forte correlação. Levantando os valores de  $r$  através dos dados disponíveis nos certificados de material, foram plotados os dados em um gráfico de dispersão realizando uma regressão linear para cálculo de  $R^2$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Tratamento dos Dados e Análise Inicial

Para uma análise inicial a fim de constatar o caráter de predominância do embutimento na operação de repuxo em análise foram tomados de forma aleatória valores de  $n$ , expoente de Hollomon e os índices de fratura e estrição detectados nos modelos em análise, A1, A2 e A3, os dados foram agrupados em na tabela 1, a seguir, e os resultados para o produto do momento de Pearson,  $k$ , também está indicado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Investigação inicial de correlação, expoente de Hollomon,  $n$

Dados de A1		Dados de A2		Dados de A3	
$n_{0,2}$	Incidência	$n_{0,2}$	Incidência	$n_{0,2}$	Incidência
0,2210	0	0,2210	1	0,2100	0
0,2160	0	0,2220	0	0,2120	1
0,2250	0	0,2220	0	0,2310	0
0,2260	5	0,2260	0	0,2150	1
0,2210	0	0,2118	4	0,2190	0
0,2190	0	0,2190	0	0,2270	2
0,2220	0	0,2320	1	0,2140	0
0,2190	0	0,2290	0	0,2180	0
0,2330	0	0,2300	1	0,2220	0
0,2220	3	0,2120	0	0,2115	1
k= 0,225894617		k= 0,3445331		k= 0,062211264	

A partir desta análise inicial considerou-se que não seriam necessárias outras avaliações com respeito ao correlação de  $n$ , com a incidência de ocorrências uma vez que para as três situações avaliadas inicialmente não houve observância de uma correlação nítida.

Após esta constatação inicial, foram agrupados em tabelas os dados referentes a incidência de fraturas e estrições locais em comparação com a variação da anisotropia normal média, estes resultados, que serão discutidos nas seções seguintes, foram obtidos a partir dos relatórios de ocorrências em produção e dos certificados de matéria-prima verificados no setor de recebimento.

#### 3.2 Análise de Correlação

Os resultados da análise de correlação entre a anisotropia normal,  $r$ , e a incidência de fraturas e estrições localizadas para os três modelos em estudo A1, A2 e A3 podem ser visualizados na Tabela 3.

**Tabela 3** Avaliação da correlação entre r e incidências, cálculo do produto do momento de Pearson.

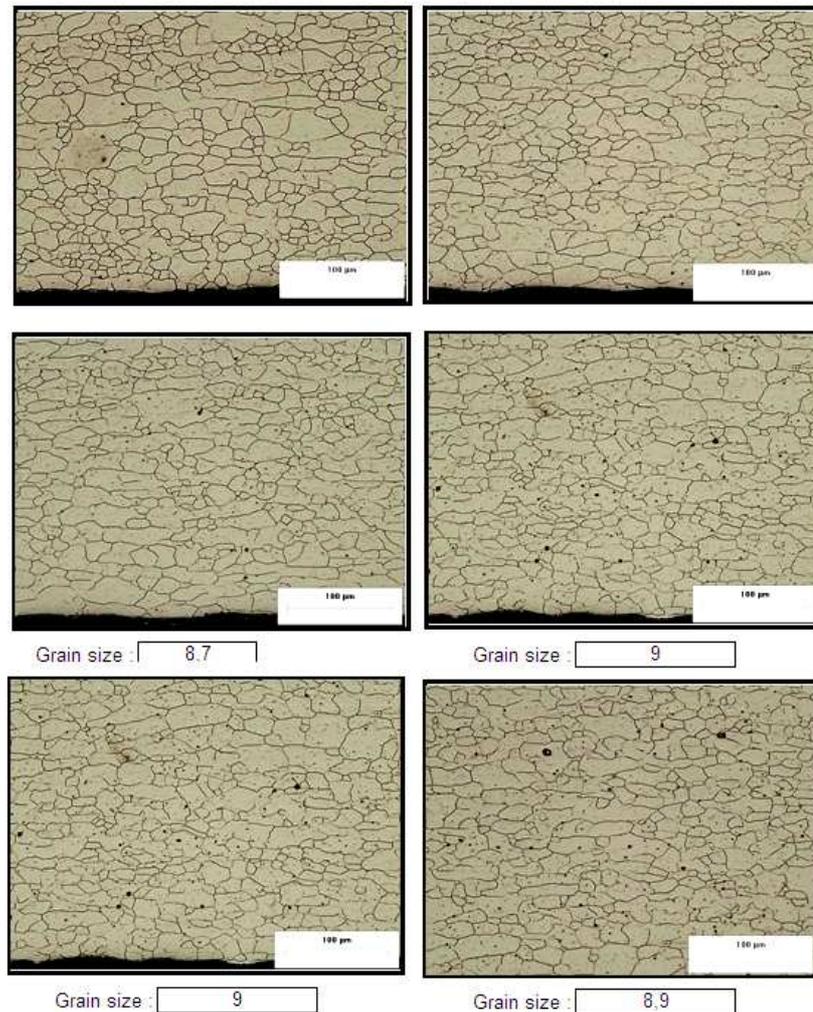
Dados de A1		Dados de A2		Dados de A3	
r 0,2	Incidência	r 0,2	Incidência	r 0,2	Incidência
2,226	0	2,465	0	2,221	4
2,439	1	2,509	0	2,134	3
2,713	0	2,551	0	2,340	6
1,960	2	2,615	0	2,648	11
2,383	0	2,646	0	2,359	0
2,671	0	2,260	4	2,090	5
1,778	5	2,614	0	2,628	0
2,757	1	2,787	0	2,710	7
2,398	0	2,572	0	2,340	9
2,161	1	2,455	1	2,347	4
2,456	0	2,482	0	2,554	3
1,980	3	2,572	0	2,347	2
2,160	0	2,436	0	2,554	54
2,324	0	2,314	3	2,220	6
1,989	3	2,154	6	2,267	3
2,156	2	2,412	4	2,217	2
2,248	0	2,163	1	2,787	5
2,747	0	2,415	3	2,090	0
1,760	3	2,310	5	2,450	0
1,740	2	2,550	0	2,641	0
k= -0,74062087		k= -0,7348055		k= 0,20837207	

A partir desta avaliação observa-se uma forte correlação negativa para A1 e A2, ou seja, a medida que os valores de anisotropia normal aumentam decresce a incidência de fraturas e estrições localizadas, sugerindo que estas variáveis tem uma ligação de ocorrência, já para o modelo A3 não foi identificada uma correlação nítida entre a anisotropia normal e as incidências em detectadas durante a produção do produto.

### 3.3 Análise Micrográfica

A análise metalográfica foi realizada com o objetivo principal de analisar a morfologia dos grãos, que exercem influência direta sobre as propriedades mecânicas de cada aço e conseqüentemente sua estampabilidade. As análises foram realizadas para os materiais referentes aos modelos A1 e A2.

A Figura 4, apresentada a seguir, mostra a microestrutura da secção longitudinal de seis amostras aleatórias do aço B53 utilizado para estampagem dos painéis laterais A1 e A2.



**Figura 4:** Metalografia da seção longitudinal da chapa com aumento de 200x. Ataque Nital.

As microestruturas mostradas na figura anterior mostram de forma clara um alongamento dos grãos do material na direção da seção reta horizontal, o que é característica dos aços laminados a frio, sem processo de recristalização posterior. Este alongamento preferencial dos grãos na direção de laminação do material torna possível, ainda nesta etapa de testes, caracterizar o material como anisotrópico, devido a esta morfologia dos grãos, o material certamente não apresentará as mesmas características mecânicas quando submetido a esforços formando diferentes ângulos em relação a sua direção de laminação. Este ensaio metalográfico permite ainda a avaliação do percentual de carbono, o que nota-se pelas fotos é uma predominante matriz ferrítica (parte clara), com pouca cementita precipitada e alguns pontos dispersos que parecem inclusões não metálicas, esta configuração é compatível com aço de baixo teor de carbono.

### 3.4 Considerações Finais

O coeficiente de anisotropia normal ( $r$ ) indica quanto o material prefere deformar-se no seu plano (da chapa) e não na espessura, sob tração. O  $r$  médio indica esta mesma tendência com referência a todo o plano da chapa, sem direção específica. Por outro lado, o “ $n$ ” está ligado à capacidade de o material redistribuir a

deformação, estabilizando estrições incipientes. Em tração, o “n” está associado a deformabilidade útil do material.

Constatou-se que a anisotropia normal média ( $r$ ) é mais importante que o coeficiente de encruamento “n” no caso estudado. Portanto, problemas de diminuição de espessura parecem ser mais críticos para ocorrência de defeitos nas situações investigadas.

Uma textura do tipo  $\{111\} \langle uvw \rangle$  é a ideal para estampagem. O ( $r$ ) médio para essa textura ideal é próximo a 3 (segundo Hosford e Caddell,<sup>(6)</sup> ver também a Figura 2). Portanto, o presente estudo aponta para a necessidade de materiais com textura bastante otimizada, próxima à ideal, para evitar ocorrência de defeitos.

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho alcançou os objetivos previstos inicialmente, dentro das circunstâncias especificadas. Foram efetuados os levantamentos de dados do processo de fabricação e as posteriores análises de correlação entre o índice de anisotropia normal e a incidência de fraturas e estrição localizadas, com origem nas operações de repuxo.

Foi demonstrado que não há uma correlação direta entre o coeficiente de Hollomon,  $n$ , e incidência de fraturas estrições localizadas, com origem na operação de repuxo, caracterizando uma operação de embutimento com mínimo estiramento.

A análise de correlação valendo-se do coeficiente de correlação extraído do produto do momento de Pearson, aponta para uma forte dependência ou correlação entre a anisotropia normal média e a incidência de fraturas e estrições localizadas para os painéis laterais A1 e A2, no entanto para A3 não se verificou tal correlação. Este resultado mostra que o desempenho de A1 e A2 no processo depende fortemente das características mecânicas do material, ou seja, é demonstrado uma relação das falhas observadas e a anisotropia normal. Com relação aos painéis laterais A3 é correto inferir que outros fatores além das características de matéria-prima tem influência maior sobre o desempenho em produção.

As análises metalográficas condizem com aços laminados a frio não sendo evidenciadas características importantes que pudessem influenciar nos resultados deste estudo.

Finalmente pode-se inferir que o fornecimento do material B53 em um intervalo mais estreito em relação a variação dos índices de anisotropia normal tende a reduzir a incidência de fraturas e estrições localizadas, desde que este intervalo seja deslocado para o limite superior com valores acima 2,4 para anisotropia normal.

## Agradecimentos

MF de Campos agradece o apoio do CNPq. Ao Dr Nelson Batista de Lima - IPEN, por medidas de textura cristalográfica. Ao Prof. Carlos Sérgio da Costa Viana por comentários e sugestões úteis.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E . Metalurgia Mecânica, 2ª edição, RJ, 1981.

- 2 BRESSIANI FO, E., BUTTON, S.T., GOMES, E., NERY, F.A.C. Conformação Plástica dos Metais. 5ª ed., Ed. da UNICAMP, Campinas, 1997.
- 3 KEELER, S. P. Understanding Sheet Metal Formability: Part 5 – Die Design and Lubrication, New York, 1968.
- 4 KUZMAN, K. Environmental Friendly Lubricants in Deep Drawing of Steel Sheet Metal. Enform Project. Slovenia, TECOS Celje, 2000.
- 5 VIANA, Carlos Sérgio da Costa. Texturas Cristalográficas e suas aplicações em deformações, recristalização e transformação de fases em metais, Apostila EEIMVR-UFF, 2003-2005.
- 6 HOSFORD W.F., CADDELL, R.M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, second ed., Prentice-Hall, 1993.