

# AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA DETERMINAÇÃO DA ANISOTROPIA DE UM AÇO PLANO ATRAVÉS DO ENSAIO DE TRAÇÃO<sup>1</sup>

André Sereno Lopes<sup>2</sup>  
Marcelo Ferreira Lucas<sup>3</sup>  
Marcos Lopes<sup>4</sup>  
Eduardo Nagy Nascimento<sup>5</sup>

## Resumo

Objetivo do trabalho foi identificar alguns parâmetros e suas influências na determinação da anisotropia normal e planar através do ensaio de tração. Para determinação foi utilizada uma máquina de tração universal automatizada. Os resultados demonstram que alguns parâmetros podem ser fundamentais na determinação dos valores de anisotropia. O trabalho possibilitou entender razões, padronizar e procedimentar o ensaio de modo a obter o resultado mais confiável possível.

Palavras-chave: Ensaio de tração, anisotropia,

---

<sup>1</sup> Contribuição Técnica ao XXXXI Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; Joinville, SC, Outubro de 2004.

<sup>2</sup> Eng. Desenvolvimento da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. - [alopes@brasmetal.com.br](mailto:alopes@brasmetal.com.br)

<sup>3</sup> Supervisor de Qualidade da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. - [mlucas@brasmetal.com.br](mailto:mlucas@brasmetal.com.br)

<sup>4</sup> Encarregado de Laboratório da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. - [mlopes@brasmetal.com.br](mailto:mlopes@brasmetal.com.br)

<sup>5</sup> Téc. Metalurgista da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. - [enascimento@brasmetal.com.br](mailto:enascimento@brasmetal.com.br)

## 1. Introdução:

Este trabalho foi realizado na Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. com o principal objetivo de verificar-se quais parâmetros influenciam na determinação da anisotropia planar e normal. Esta necessidade surgiu do fato de encontrar-se muita variação nos valores encontrados durante os testes.

Para tanto foi feita uma breve revisão bibliográfica e estudo de alguns conceitos básicos de ensaios de tração.

O teste de tração é o método mais comumente utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais[1]. Ele apresenta duas principais vantagens:

- é de fácil aplicação;
- fornece, através da curva de tração resultante, um grande número de informações exatas.

O princípio do teste é exercer um alongamento gradual em um corpo de prova da classe a ser caracterizada. A deformação é aplicada numa única direção, o sentido longitudinal do corpo de prova (figura1).

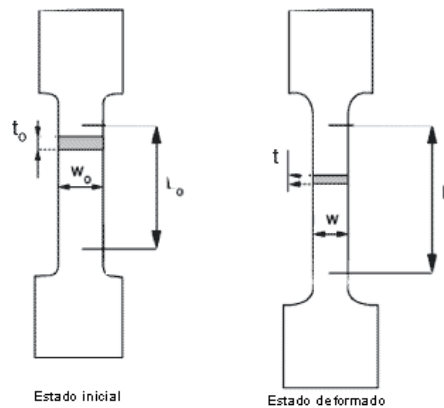


Figura 1 - Ilustração esquemática do ensaio de tração

Mede-se simultaneamente a carga necessária para deformar o corpo de prova até a sua ruptura e a deformação do corpo de prova. Traça-se, então, a curva do esforço (aplicado na seção inicial do corpo de prova), em função da deformação (expressa em porcentagem de alongamento em relação ao comprimento inicial do corpo de prova). É a curva de tração indicada na figura 4.

Esse teste uniaxial encontra-se descrito de maneira precisa na norma EN 10002.

Os valores dependem, da direção de coleta do corpo de prova em relação à direção de laminação da chapa fina.

Do ensaio universal de tração podem ser retirados valores como:

-Limite de escoamento:  $R_e$

Ponto A da curva de tração figura 4. É a carga que delimita a faixa elástica (na qual as deformações são reversíveis) e a faixa plástica (onde começa a deformação irreversível).

Existem duas possibilidades:

1. Se a transição entre a faixa elástica e a faixa plástica mostrar um máximo seguido de um patamar, isto é, de um salto brusco do limite de elasticidade: distingue-se o limite de elasticidade superior  $R_{eH}$ , que corresponde a este máximo, e o limite de elasticidade inferior  $R_{eL}$ , que corresponde ao patamar. O comprimento do patamar é definido pela grandeza  $A_p$  (figura 2).

2. Se a transição se fizer de maneira progressiva: dá-se uma definição convencional do limite de elasticidade, que é, então, medido para um valor de 0,2% do alongamento e indicado por  $R_{p0,2}$  (figura 3).

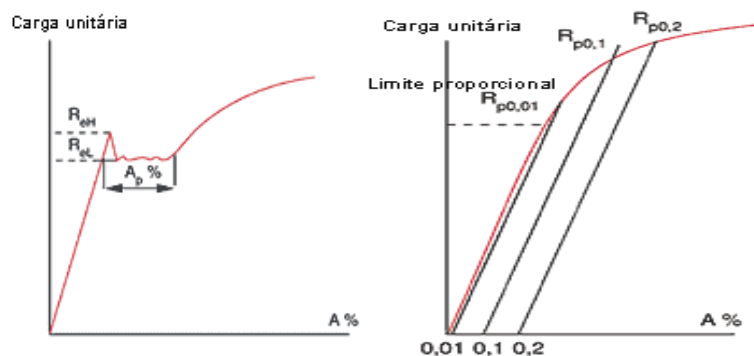


Figura 2 e 3 – limite de escoamento convencional

- resistência à tração (ou à ruptura):  $R_m$

Ponto B da curva de tração (figura 4). Trata-se da carga máxima atingida durante o teste de tração.

É a partir desse ponto que a deformação começa a se localizar sob a forma de estricção, o que explica a diminuição do esforço necessário para uma deformação suplementar para além do ponto B.

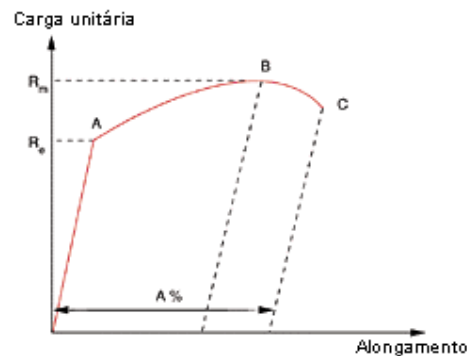


Fig 4 – Curva típica de um ensaio de tração

Um processo de conformação que levaria a ultrapassar este ponto se traduziria por riscos difíceis de controlar de ruptura ou de não conformidade geométrica.

- O alongamento ou deformação
- O coeficiente de encruamento:  $n$

No teste de tração, medem-se os esforços aplicados à seção inicial do corpo de prova.

Se forem calculados os esforços aplicados à seção instantânea do corpo de prova, utilizando as leis da conservação da matéria, determinam-se então as tensões verdadeiras  $\sigma$  e as deformações verdadeiras ( $\epsilon$ ).

A curva que se obtém traçando  $\sigma = f(\epsilon)$  se chama curva de engenharia de tração.

Ela pode ser expressa na forma enunciada por Hollomon:

$\sigma = K \cdot \epsilon^n$ , em que  $n$  é o coeficiente de encruamento.

Esse coeficiente caracteriza a propensão do aço a endurecer durante a deformação na faixa plástica e distribuir homogeneamente a deformação.

- O coeficiente de anisotropia: "r"

O coeficiente de anisotropia "r" é um parâmetro que indica a habilidade da chapa de metal resistir ao afinamento ou espessamento quando sujeita a tensões de tração e/ou compressão no plano da chapa. É a medida da anisotropia plástica e está diretamente relacionada com a orientação cristalográfica preferencial do metal policristalino. Esta resistência ao afinamento contribui para conformação por estampagem profunda, como por exemplo conformação de elementos com geometria cilíndrica. O valor de "r" é portanto considerado um valor que quantifica a capacidade de uma chapa ser conformada por estampagem.

Para a maior parte dos materiais esta razão ou coeficiente mantém-se constante durante uma vasta faixa de deformações plásticas até a máxima força aplicada no ensaio de tração.

Assim como as demais propriedades o coeficiente de anisotropia também varia em função da direção de ensaio em relação ao sentido de laminação[4].

Ele exprime a razão entre a deformação na largura e a deformação na espessura do corpo de prova, refletindo, assim, a aptidão do aço a se embutir profundamente, acomodando a deformação em estreitamento.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(W_0/W_f)}{\ln(t_0/t_f)}$$

Algumas normas recomendam um valor de anisotropia médio obtido através de dois coeficientes:

- o coeficiente de anisotropia normal "r", calculado pela razão:

$$\bar{r} = \frac{r_{00} + 2 \cdot r_{450} + r_{900}}{4}$$

$r = 1$  .... material isotrópico

$r > 1$  .... material anisotrópico, deforma mais na largura

$r < 1$  .... material anisotrópico, deforma mais na espessura

- o coeficiente de anisotropia planar " $\Delta r$ ", calculado pela razão:

$$\Delta r = \frac{r_{00} - 2 \cdot r_{450} + r_{900}}{2}$$

$\Delta r = 0$  .... material isotrópico

$\Delta r > 0$  .... material anisotrópico, formará "orelhas" num copo estampado nas direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$

$\Delta r < 0$  .... material anisotrópico, formará "orelhas" num copo estampado na direção  $45^\circ$

$\Delta r$  mede a propensão de uma chapa a se embutir de maneira não uniforme e a formar "orelhas" na parte lateral de uma peça estampada cilíndrica.

Os valores usuais de "r" são da ordem de 1 para chapas a quente, podem atingir cerca de 3 nas chapas finas para estampagem de qualidade superior[2].

Devido dificuldade de medir-se a variação de espessura com precisão suficiente é feita a medição na largura e no comprimento considerando-se uma constância de volume.

Muitos fatores podem influenciar as medidas feitas para determinar o valor de “r”. Em particular erros de medida na alteração de largura do corpo-de-prova podem tornar os valores encontrados inválidos[5]. Os fenômenos citados abaixo são conhecidos e causam grandes erros na medida da variação de largura do corpo-de-prova e conseqüentemente do valor de “r”:

- Acanoamento do corpo-de-prova – é um fenômeno que ocorre em alguns materiais quando tensionados. Nestes o corpo-de-prova enverga sobre seu eixo longitudinal tomando tipicamente a forma de uma canoa. Neste caso haverá erros significativos nas medidas de largura, e para verificação do valor de “r” deve ser compensado o acanoamento;
- Mau acabamento das bordas do corpo-de-prova– quando são medidas deformações na largura com extensômetros automáticos enquanto as amostras são tensionadas, bordas mau preparadas podem causar deformações localizadas. Este problema é intensificado quando o extensômetro é anexado ao corpo-de-prova com força excessiva. Esta combinação causa tensão compressiva a 90 graus ao sentido da tração. Como resultados são encontrados valores excessivamente altos de “r”.

Vale citar também o valor ou parâmetro “m” [8] que é um coeficiente que correlaciona a taxa de deformação. Adicionado a equação de Hollomon tem-se  $\sigma = K \cdot \epsilon^n (d\epsilon/dt)^m$ . Os diferentes estudos efetuados relativos à influência da taxa de deformação (em ensaios de tração uniaxial a frio) tem evidenciado que o valor de “m” (expoente da taxa de deformação) para os diferentes aços para estampagem é da ordem de 0,005 a 0,015, para temperatura ambiente. Este valor tem normalmente sido considerado desprezível, embora, reconhecidamente contribua para o retardamento do processo de formação da estrição localizada.

Os valores de anisotropia e o índice de encruamento dos materiais planos de aço são variáveis mais importantes que valores simples do ensaio de tração, como limite de resistência, limite de escoamento e alongamento, na determinação da estampabilidade de uma chapa de aço.

## 2. Materiais e métodos:

O material utilizado para os testes foi um aço baixo carbono “IF” com as seguintes características:

### Propriedades Mecânicas

Limite de Escoamento	130 Mpa
Limite de Resistência	303 Mpa
Alongamento	44,8 %
Razão Elástica	0,43
Coeficiente de encruamento “n”	0,251

Microestrutura : ferrítica com tamanho de grão de 20  $\mu\text{m}$

Espessura : 0,60 mm

## Composição Química [% de massa]

C	Mn	P	S	Al	Ti	N [ppm]
0,002	0,11	0,015	0,010	0,042	0,065	54

O material foi ensaiado conforme ASTM E517-00.

Foram determinados no total 916 valores de “r”. Sendo aproximadamente 156 valores para cada variável escolhida.

Para cada parâmetro alterado todos os demais foram fixados.

Conforme norma ASTM E517-00 a variação de largura não deve exceder 0,1% da largura do corpo-de-prova e a espessura deve ser uniforme com variação máxima de 0,013mm. As bordas devem ser bem preparadas e se necessário usinadas e lixadas para remover qualquer tipo de encruamento. A taxa de deformação ou velocidade de ensaio recomenda-se que não ultrapasse 0,5 [1/min]. O posicionamento na máquina é uma característica particular do equipamento que influencia a medição de largura feita pelo extensômetro.

Os parâmetros avaliados foram alguns citados em normas e literaturas e também um específico do equipamento utilizado:

- variação de largura ou paralelismo na largura do corpo-de-prova– foi avaliado resultado com desvio de paralelismo de até 0,55mm
- variação de espessura ou paralelismos de superfície – este parâmetro foi apenas acompanhado.
- Acabamento das bordas – foram testadas três diferentes condições, sem preparação, preparação manual e preparação automática.
- Posicionamento na máquina – trabalhou-se com inclinação de aproximadamente 5 graus de desalinhamento entre o corpo-de-prova, e o dispositivo de fixação da máquina.
- Velocidade ou taxa de deformação – foi avaliado resultado com o dobro da taxa de deformação recomendada por norma, ou seja, 1,0 [1/mm].
- Acanoamento da amostra – este parâmetro foi apenas acompanhado.

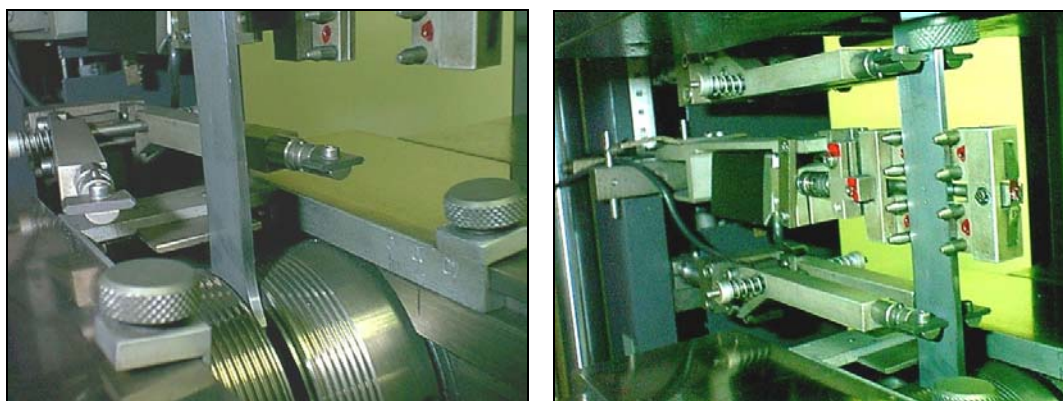


Figura 5: foto onde se visualiza a régua de posicionamento do corpo-de-prova (esquerda) e foto dos extensômetros de largura e comprimento útil do corpo-de-prova (direita).

A máquina de tração utilizada possui as seguintes características:

Marca.....Zwick  
Modelo.....1475-TM  
Capacidade .....100 KN  
Célula de carga de força.  
HBM-Z12 # 122615  
Capacidade 100 KN,  
Resolução 0.171 N  
Extensômetro para medição da redução largura.  
# 122617  
Capacidade 0.3 – 3.0 mm  
Resolução 0.506 um ( micron )  
Extensômetro macro para medição do alongamento.  
MOD. 066511 # 122616  
Capacidade percurso Max 60 mm  
Resolução 0.0002 mm  
Incerteza dos elementos de calibração usados ( 95% probabilidade )  
Força de tração/compressão até 5 KN: classe 1 após 670 N, +- 0.8 + F/16500 N  
Força de tração/Compressão 20-250 KN: classe 00, menor incerteza 0.013%  
Medição de tempo: +-0.01 PPM ( 0.0001% )  
Medição de comprimentos 0-25 mm: +- 0.002 mm  
Medição de comprimentos 25-250 mm: +- 0.010 mm  
Software TXExpert versão 7.01

Normas correspondentes:

DIN 51.221-1

DIN-EM 10002-2

Procedimento Zwick PP-UPMDU 01/12/94



Figura 6: foto ilustrativa do dispositivo e equipamento de lixamento automático.

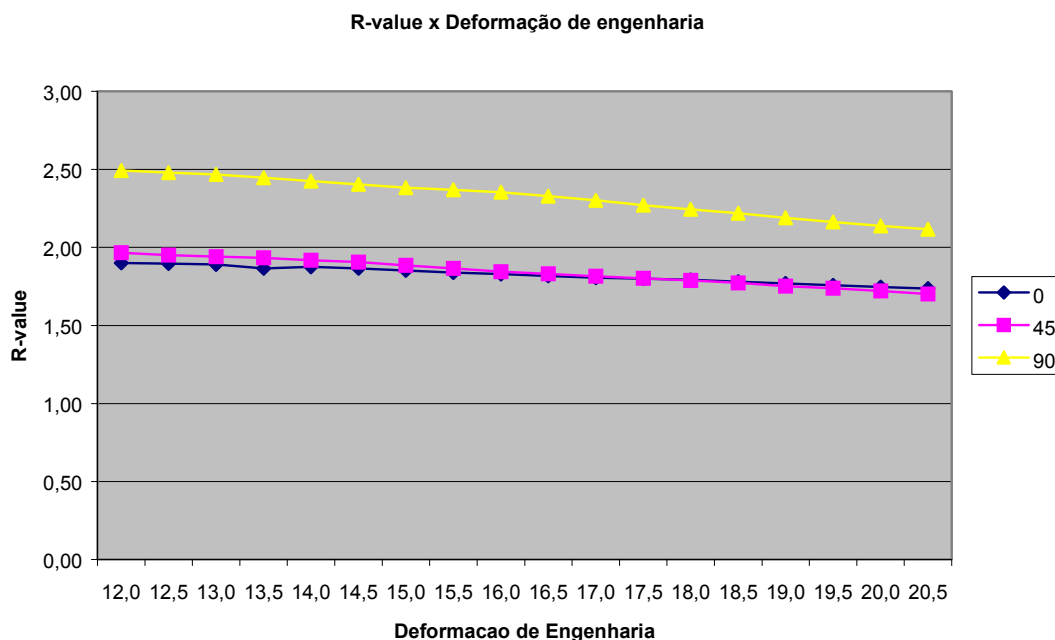
Foi também avaliado para a condição considerada como ideal o valor de r individual a 0, 45 e 90 graus para diferentes deformações: de 12% a 20,5% a cada 0,5%. Objetivo foi avaliar a variação do valor de r em função da deformação aplicada visto que a norma não restringe este valor apenas sugere que seja de 18% a 20%.

### 3.Resultados

A tabela 1 abaixo mostra os valores anisotropia normal , anisotropia planar e seus devidos desvios padrão encontrados para cada condição.

Condição	Anisotropia normal	Desvio padrão	Anisotropia planar	Desvio padrão
Ideal	1,92	0,04	0,29	0,02
Sem preparação	1,88	0,04	0,33	0,06
Alta velocidade	1,80	0,04	0,24	0,07
Desvio de paralelismo	1,14	0,14	-0,04	0,10
Lixamento automático	1,66	0,07	0,18	0,24
Mau posicionamento na maquina	0,93	0,02	0,20	0,12

O gráfico abaixo mostra a variação de valores individuais de “r” em relação a deformação aplicada.





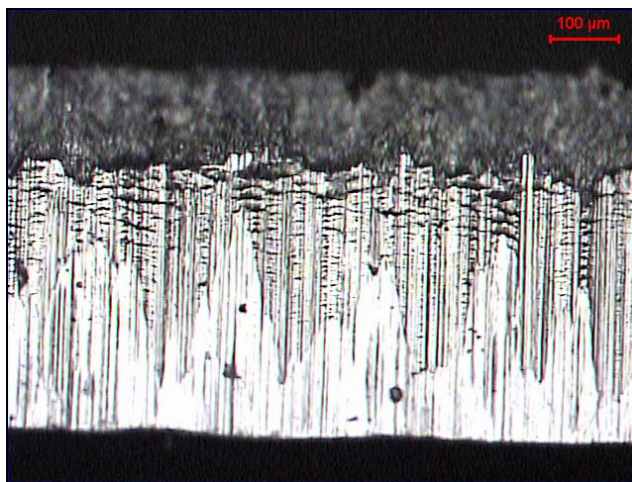


Figura 7: ilustra condição de borda do corpo-de-prova apenas cortado sem preparação posterior.

#### 4. Discussão:

O material utilizado apresentou valores típicos de anisotropia planar e normal de um aço de baixo carbono "IF".

Na condição de sem preparação os resultados foram próximos do considerado em condições ideais. Isto está atribuído a condição de corte do corpo-de-prova na ferramenta de estampagem utilizada, visto que, a mesma provocou pequeno encruamento (aproximadamente 1% da area inicial) na borda do corpo-de-prova. O aumento na taxa de deformação causou um erro relativamente baixo no valor encontrado de anisotropia planar e normal. Não foi encontrada na revisão bibliográfica justificativa para este resultado. Este assunto poderá ser estudado futuramente.

Quando o corpo-de-prova apresenta desvio de paralelismo na largura muito alto (aproximadamente 0,50mm) a variação de largura ocorre também de maneira muito localizada e conseqüentemente os valores encontrados de anisotropia apresentam grandes desvios com relação ao valor real do ensaio padronizado. O mesmo ocorreu também para o corpo-de-prova preparado na lixadeira automática, porém o desvio no paralelismo foi menor (aproximadamente 0.05mm).

Mau posicionamento na máquina é uma causa específica do equipamento. O desvio provocado foi de aproximadamente 4mm o que corresponde a uma inclinação de aproximadamente 5 graus em relação ao eixo vertical. Este desvio provocou dificuldade para o extensômetro de largura visto que o mesmo tem amplitude máxima de 3mm.

#### 5. Conclusão:

O trabalho possibilitou determinar quais as principais características que influenciam na determinação da anisotropia planar e normal de uma chapa de aço. Também foi possível quantificar como estas principais características influenciam. Desta maneira foi possível ter-se resultados mais confiáveis e proceder a atividade.

## 6. Agradecimentos

Agradecemos a Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. possibilitar a nós esta atividade.

## 7.Referências bibliográficas

- [1] Disponível em: <[http://www.arcelorauto.com/v\\_port/produits/definitions2.htm](http://www.arcelorauto.com/v_port/produits/definitions2.htm)> . Acesso em 16 de maio de 2004.
- [2] Disponível em < <http://www.fei.edu.br/mecanica/LabMat/aula541%5Canisot.pdf>> . Acesso em 23 de maio de 2004.
- [3] Disponível em < <http://www.cimm.com.br/noticia/CUR84.HTM>> . Acesso em 23 de maio de 2004.
- [4] Disponível em < [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-17092001-133126/publico/Sergio\\_H\\_Evang.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-17092001-133126/publico/Sergio_H_Evang.pdf)> em 23 de maio de 2004.
- [5] Standard Test method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal – ASTM E517
- [6] J. Huetnik; A.H. Streppel; P.T. Vreede. Development and Experimental Verification of Constitutive Equations for Anisotropic Sheet Metal
- [7] Callister, William D. Science and Material Engineering an Introduction
- [8] EPUSP, IPEN, IPT. Workshop Textura e Relações de Orientação – 2003

## 8.Abstract

In this paper was identified some parameters and it's influence in the determination of normal and planar anisotropy beyond tensile strength test. To determine was used an automatized tensile strength machine. Results show some parameters are fundamental in the determination of anisotropy values. The paper allowed to understand and to standard the test.

Key words: tensile strength test, anisotropy,