

CENTRO UNIVERSITARIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG

ENGENHARIA MECÂNICA

ADRIANO FELIPE PEREIRA FRANCO

N. CLASS. <i>MG11.334</i>
CUTTER <i>F825c</i>
ANO/EDIÇÃO <i>2012</i>

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO EEP G1 E EEP G2 PARA
ESTAMPAGEM**

Varginha

2012

FEPESMIG

ADRIANO FELIPE PEREIRA FRANCO

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO EEP G1 E EEP G2 PARA
ESTAMPAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Erik Vitor da Silva.

Varginha

2012



ADRIANO FELIPE PEREIRA FRANCO

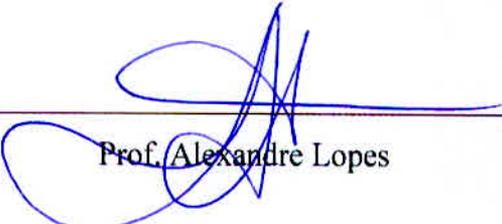
**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO EEP G1 E EEP G2 PARA
ESTAMPAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel pela Banca examinadora compostas pelos membros:

Aprovado em 18/12/2012

Prof. Erik Vitor da Silva

Prof. Luiz Carlos Vieira Guedes



Prof. Alexandre Lopes

OBS.:

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as características das propriedades mecânicas, físicas e tecnológica das chapas metálicas destinadas à estampagem, empregando-se os materiais EEP G1 e EEP G2. Dentro dessa temática foi analisado: a construção das curvas convencionais, a construção das curvas de escoamento, a tensão verdadeira, índice de anisotropia normal, a anisotropia normal, a anisotropia planar e índice de embutimento. Para desenvolver esta temática foi estabelecido um cronograma de trabalho, que consiste na coleta de amostras de chapas de aço EEP G1 e EEP G2 na indústria com o respectivo laudo técnico. A partir dos resultados dos ensaios mecânicos, foi elaborado um laudo para comparar com laudo do fabricante da matéria prima, certificando-se da qualidade. Os resultados foram compilados em diagramas, gráficos e tabelas, facilitando a análise e discussão para elaboração de conclusões.

Palavras-chave: Estampagem. Propriedade mecânica. Anisotropia.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the characteristics of the mechanical, physical and technological blanks intended for printing, using materials EEP G1 and G2. Within this theme was analyzed: the curves conventional construction, the construction of the flow curves to true stress, normal index anisotropy, the anisotropy normal, and the planar anisotropy index inlay. To develop this theme was established a work schedule, which consists of collecting samples of steel plates EEP G1 and G2 in the industry with its technical report. From the results of mechanical tests, a report was prepared report to compare with the manufacturer of the raw material, ensuring quality. The results were compiled into charts, graphs and tables, to facilitate analysis and discussion for drawing conclusions.

Keywords: *Stamping. Mechanical property. Anisotropy.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 ASPECTO DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS	6
2.1 Aços Microligados com baixo teor de carbono para conformação de chapas	6
2.2 Aço laminado a frio para estampagem	7
3 CARACTERIZAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS PARA ESTAMPAGEM	10
3.1 Propriedades mecânicas convencionais	10
3.2 Construção da curva de escoamento verdadeira ($\sigma_v \times \epsilon_v$)	15
3.4 Anisotropia	18
4 ENSAIO DE FABRICAÇÃO	22
4.1 Ensaio de embutimento	22
5 PROCESSO DE ENBUTIMENTO PROFUNDO	24
5.1 Deformações na chapa metálica	24
6 MATERIAIS	27
6.1 Materiais utilizados	27
6.2 Composição química das amostras	27
6.3 Propriedades mecânicas das amostras	27
6.4 Propriedade tecnológica	28
7 METODOLOGIA	29
7.1 Propriedades Mecânicas	29
7.1.1 Ensaio de tração	29
7.1.1.1 Resultado do ensaio de tração	32
7.1.2 Anisotropia	36
7.1.2.1 Resultados de anisotropia	36
8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
8.1 Propriedades mecânicas	38
8.1.1 Ensaio de tração	38
8.1.2 Anisotropia	40
8.2 Propriedade tecnológica	41
9 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A manufatura de componentes que têm sua origem na transformação de chapas metálicas, exige, além das operações de estampagem extra profunda, outras etapas de trabalho como o corte, a dobra, a furação, entre outros. Os processos de fabricação que envolvem as operações de conformação de chapas metálicas tem sua origem numa matéria oriunda do processo de laminação. Os componentes manufaturados por esses processos destinam-se a uma infinidade de ramos industriais, tais como: a indústria automotiva, maquinas agrícolas, indústria aeroespacial e aparelhos de utensílios domésticos.

A continua busca por melhores propriedades mecânicas, leva a novos produtos colocados no mercado e fazem com que a caracterização das propriedades dos produtos acabados e de sua matéria prima sejam perfeitamente conhecidos. Com isto, é necessário dispor de um profundo conhecimento acerca da influência de todas as variáveis sobre o processo de estampagem, para projetar adequadamente o ferramental, e escolher o material que melhor se encaixa para manufaturar um produto com formato e desempenho desejados.

O desenvolvimento deste trabalho consiste na apresentação da caracterização das propriedades mecânicas, físicas e tecnológicas das chapas metálicas destinadas à estampagem de componentes mecânicos, empregando-se os materiais EEP G1 e EEP G2. Outro foco de estudo deste trabalho é avaliar as características mecânica e física do Aço EEP G1 e compararas com o EEP G2. Dentro dessa temática foi analisado: as propriedades mecânicas, a construção das curvas convencionais, a construção das curvas de escoamento, a tensão verdadeira, índice de anisotropia normal, a anisotropia normal, a anisotropia planar e índice de embutimento.

Para desenvolver esta temática foi estabelecido um cronograma de trabalho, que consiste na coleta de amostras de chapas de aço EEP G1 e EEP G2 na industria com o respectivo laudo técnico.

Preparo dos corpos de prova para os ensaios de tração dentro das normas estabelecidas. Tiras de chapas de 20mm de largura e 250mm de comprimento. Estes corpos de prova foram utilizados para a construção das curvas de escoamento e calculo de anisotropia das chapas metálicas.

A partir dos resultados dos ensaios mecânicos, foi elaborado um laudo para comparar com laudo do fabricante da matéria prima, certificando-se da qualidade. Os resultados foram compilados em diagramas, gráficos e tabelas, facilitando a análise e discussão para elaboração de conclusões.

2 ASPECTO DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Segundo Ferrarini (2004, p. 37 a 39) o objetivo final do processo de estampagem profunda é a manufatura de produto, a partir de um blank de chapa, que venha a apresentar o formato desejado, sem defeitos ou falhas. O formato final do produto, após a estampagem, é definido pelo ferramental, blank e parâmetros de processos. Erros no projeto do ferramental ou no formato do blank, bem como a escolha inadequada do material a ser estampado e dos parâmetros de processo podem gerar um produto com formato inadequado ou falha.

A escolha adequada do material a ser estampado depende de suas propriedades mecânicas e tecnológicas. As propriedades mecânicas são obtidas por ensaios tradicionais, como ensaio de tração e de compressão, em busca das características inerentes ao material. As propriedades tecnológicas dos materiais são alcançadas através de ensaios específicos para o processo de manufatura pelas quais os materiais irão passar. No caso da conformação de chapas é requerido um conhecimento sobre a quantidade de deformação que o material aceite.

2.1 Aços Microligados com baixo teor de carbono para conformação de chapas

Segundo Gorni (2009, p.06) os estudos sobre os efeitos de micro-adições de V, Ti e Nb nas propriedades mecânicas de aços de baixo teor de carbono iniciou-se no final da década de 1950. Tais efeitos revolucionaram a siderurgia, já que viabilizaram o desenvolvimento de tratamentos termomecânicos que levam à obtenção de aços apresentados microestrutura com alto grau de refino. Essa intensa redução no tamanho de grão permite aumentar simultaneamente a resistência mecânica e a tenacidade da chapa, permitindo diminuir os teores de elementos de liga do aço, especialmente C. Isso é particularmente interessante para esse tipo de produto, pois melhora sobremaneira sua soldabilidade, minimizando os custos de fabricação das estruturas. Os elementos de micro-liga também podem proporcionar endurecimento por precipitação, aumentando a resistência mecânica da chapa. Esse efeito é causado pela precipitação interfásica de partículas extremamente finas durante a transformação da austenita ao longo do resfriamento após a laminação a quente ou tratamento térmico. Contudo, neste caso há alguma perda de tenacidade. No caso de aços laminados a frio os elementos de micro-liga retardam os processos de recristalização e crescimento de grão que ocorrem durante o recozimento das bobinas laminadas a frio.

2.2 Aço laminado a frio para estampagem

Segundo informações do catálogo (USIMINAS, 2012), os aços laminados a frio são gerados a partir da redução a frio, aplicados ao produto laminado a quente, sendo posteriormente recosido (tratamento térmico). Os produtos assim obtidos apresentam dimensões que podem variar de 0,20 a 3,00 mm de espessura e larguras compreendidas entre 700 e 1.830 mm, fornecidos como bobinas ou chapas. O tratamento térmico, responsável por conferir as principais propriedades mecânicas ao produto, pode, opcionalmente, ser feito por duas tecnologias:

- A. Recozimento em caixa: (BAF – batch annealing furnace)
- B. Recozimento contínuo: (CAPL – continuous annealing and processing line)

A associação entre a composição química específica e os históricos termomecânicos adequados permitem a produção de diferentes qualidades de aço, desde os comerciais até de alta resistência (USIMINAS, 2012).

Na tabela 1 e 2 descreve as propriedades mecânicas e a composição química do aço em estudo NBR 5915.

Tabela 1 – Composição química

<i>Elementos</i>	<i>Grau</i>					
	<i>EM</i>	<i>EP</i>	<i>EEP G1</i>	<i>EEP G2</i>	<i>EEP G3</i>	<i>EEP G4</i>
Carbono (% máx.)	0,130	0,100	0,080	0,060	0,020	0,010
Manganês (% máx.)	0,600	0,450	0,450	0,350	0,250	0,200
Fósforo (% máx.)	0,040	0,030	0,030	0,025	0,020	0,020
Enxofre (% máx.)	0,040	0,030	0,030	0,025	0,020	0,020
Alumínio (% mín.)	0,010	0,010	0,020	0,020	0,010	0,010
Titânio (% máx.)	*	*	*	*	0,300	0,200

Fonte: Norma NBR 5915, (2008).

Nota: sinais convencionais utilizados:

- * Não se aplica dado numérico.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas

Grau	Limite de escoamento ¹ Mpa	Limite de resistência à tração Mpa	Alongamento total Mín. ² %		Dureza Rockwell HRB máx. ³	Anisotropia r 90° ⁴	Expoente de encruamento n 90° mín. ⁵
			Lo = 50 mm	Lo = 80 mm			
EM	280 máx.	270 a 390	30	28	65	*	*
EP	260 máx.	270 a 370	35	33	57	1,3	*
EEP G1	140 a 230	270 a 350	38	36	50	1,7	0,19
EEP G2	140 a 210	270 a 350	39	37	50	1,9	0,20
EEP G3	140 a 180	270 a 330	40	38	48	2,1	0,22
EEP G4	140 a 160	250 a 330	42	40	48	2,3	0,23

Fonte: Norma NBR 5915, (2008).

Nota: Números convencionais utilizados

¹ Para bobinas e chapas de espessuras menores ou iguais a 0,5mm, o limite de escoamento máximo é incrementado em 40 MPa, e para espessuras maiores que 0,5 mm e menores ou iguais a 0,7 mm, o valor Máximo do limite de escoamento é incrementado em 20 MPa.

² Para bobinas e chapas de espessuras menores ou iguais a 0,5 mm, o valor mínimo de alongamento de ruptura diminui em quatro unidades, e para espessuras maiores que 0,5 mm e menores ou iguais a 0,7 mm, o valor mínimo do alongamento de ruptura diminui em duas unidades.

³ Os valores de r e n são válidos apenas para espessuras de produtos maiores ou iguais a 0,5 mm e menores que 2,00 mm.

⁴ Para espessuras maiores que 2,0 mm, quando especificado no pedido de compra, o valor de r deve ser diminuído em 0,2 mm.

⁵ Os valores de dureza são orientativos.

Tabela 3 – Embutimento Erichsen modificado – Valores mínimos de altura do embutimento conforme o grau de estampagem.

<i>Espessura</i>	<i>EEP graus 1 e 2</i>
<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>
0,60	10,00
0,65	10,10

Fonte: Norma NBR 5915, (2008).

Figura 1 – Exemplo de aplicação do aço em estudo.



Fonte: Sites (Leao diesel, portuguese e o-contrastes, 2012).

3 CARACTERIZAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS PARA ESTAMPAGEM

Diante da crescente preocupação com a qualidade das chapas metálicas para a confecção de produtos estampados e diante de um mercado cada vez mais competitivo é de suma importância a caracterização e controle das propriedades mecânicas de chapas metálicas para estampagem, assegurando produtos de excelente qualidade, baixo custo de produção e um baixo índice de refugo, comenta Ferrarini (2004).

3.1 Propriedades mecânicas convencionais

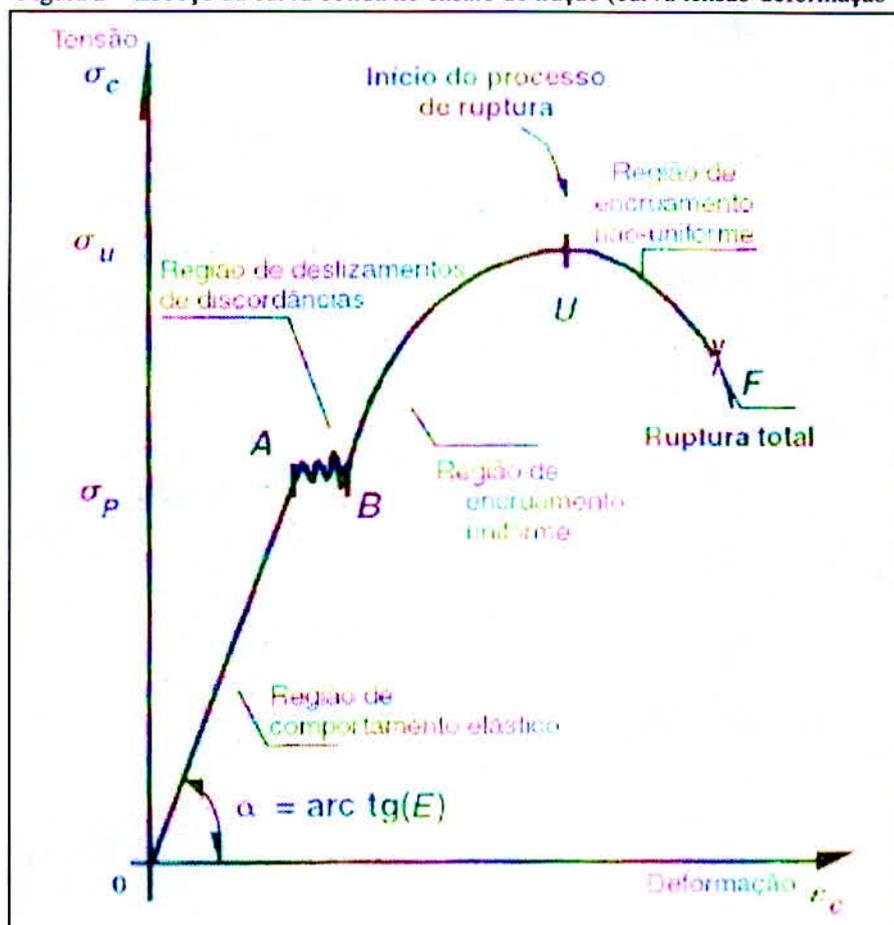
Segundo Tigrinho (2005), para obter êxito na estampagem de chapas metálicas, deve-se levar em consideração algumas variáveis, tais como: propriedades do material, coeficiente de encruamento e anisotropia, geometria da ferramenta, lubrificação na interface punção/chapa metálica e velocidade de conformação, sendo que todas estas variáveis estão inter-relacionadas.

O mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas é o ensaio de tração. Extrai-se de um diagrama $\sigma \times \epsilon$ convencional algumas propriedades mecânicas fundamentais que ajudam a caracterizar um material, segundo Schaeffer (1999 apud TIGRINHO, 2005, p.20):

Schaeffer (1999) define o ensaio de tração como sendo um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que possuem uma garra fixa e outra móvel, a fim de pegar e esticar o corpo de prova. Estas máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e alongamento do corpo de prova.

Segundo Dieter (1996 apud TIGRINHO, 2005), o teste de tração de engenharia é amplamente usado para obtenção de informações básicas sobre a resistência dos materiais, e como um teste de controle de especificações. O resultado do ensaio de tração é o diagrama Tensão x Deformação (figura 2), que corresponde a uma curva de engenharia construída a partir das medidas de carga e da elongação da amostra submetida ao ensaio. A tensão usada na curva é a tensão longitudinal média do corpo de prova, obtida pela divisão da carga pela área inicial da seção do corpo de prova, e a deformação usada para a curva de engenharia é a deformação linear média, obtida pela divisão da elongação do comprimento útil do corpo de prova, pelo comprimento original.

Figura 2 – Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).



Fonte: GARCIA, Ensaios dos materiais, (1999). p 08.

A tensão convencional, nominal ou de engenharia (σ_c), é dada por:

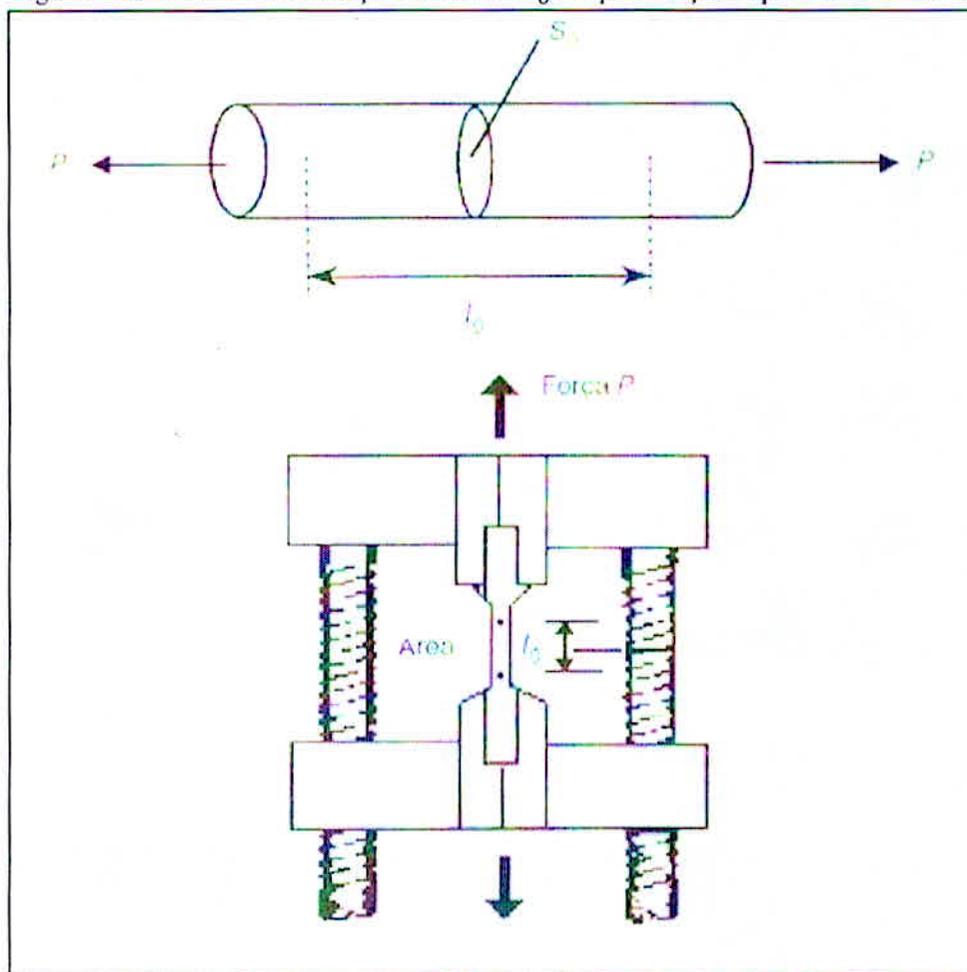
$$\sigma_c = \frac{P}{S_o}$$

Onde: σ_c = tensão (Pa);

P = carga aplicada (N);

S_o = seção transversal original (m²).

Figura 3 – Barra cilíndrica de seção transversal S_0 e representação esquemática do ensaio.



Fonte: GARCIA, Ensaios dos materiais, (1999). p 09.

A deformação convencional ou nominal (ϵ_c) é dada por:

$$\epsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

para: ϵ_c = deformação (adimensional);

l_0 = comprimento inicial de referência (carga zero) (m);

l = comprimento de referência para cada carga P aplicada (m).

Na curva da figura 2 observam-se quatro regiões de comportamentos distintos: OA – região de comportamento elástico; AB – região de escoamento de discordância; BU – região de encruamento uniforme; UF – região de encruamento não-uniforme (o processo de ruptura tem início em U , e é concluído no ponto F), (GARCIA, 1999)

Segundo Garcia (1999, p.9) para um material de alta capacidade de deformação permanente, o diâmetro do corpo de prova começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar a carga máxima (ponto U); assim, a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura total.

A Eq. Abaixo mostra o comportamento da grande parte dos materiais metálicos na fase elástica. (Lei de Hooke).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

No gráfico da figura 2, verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela equação acima, que corresponde à Lei de Hooke. A constante de proporcionalidade E , é conhecida por Modulo de Elasticidade ou Modulo de Young. A linearidade do diagrama termina no ponto A, denominado limite elástico, definido como a maior tensão que pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado. Dentro da faixa AB da curva o material está dentro de zona elástica (GARCIA, 1999).

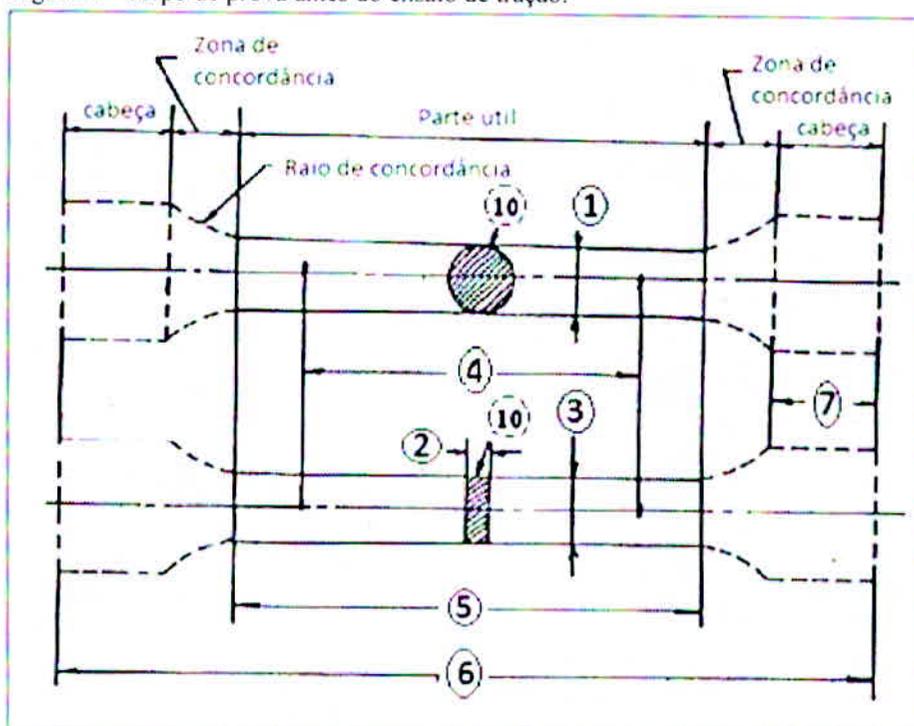
Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente (CALLISTER, 2011).

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte (CALLISTER, 2011).

No momento que o corpo de prova inicia a extricção, não tem mais estado uniaxial de tensão, levando o corpo de prova a ruptura.

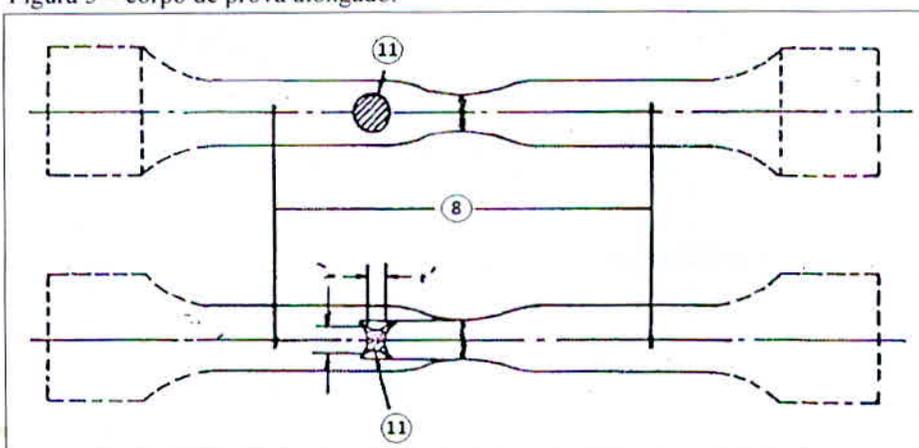
O diagrama tensão convencional (σ_c) versus deformação relativa (ε), é calculado com os valores do diagrama força vs. alongamentos, obtidos no ensaio de tração de acordo com o corpo de prova da figura 4 e 5 é usada as expressões do capítulo 3.1, que representam a área da secção reta inicial do corpo de prova (GARCIA, 1999).

Figura 4 – corpo de prova antes do ensaio de tração.



Fonte: Norma NBR 6673, (1981).

Figura 5 – corpo de prova alongado.



Fonte: Norma NBR 6673, (1981).

- 1 – Diâmetro do corpo de prova (cilíndrico).
- 2 – Espessura do corpo de prova (retangular).
- 3 – Largura do corpo de prova (retangular).
- 4 - l_0 comprimento inicial.
- 5 – Comprimento da parte útil do corpo de prova.
- 6 – Porção do material a ensaiar com forma e dimensão apropriada.
- 7 – Cabeça do corpo de prova (parte pela qual é fixado a máquina).
- 8 – l comprimento final.

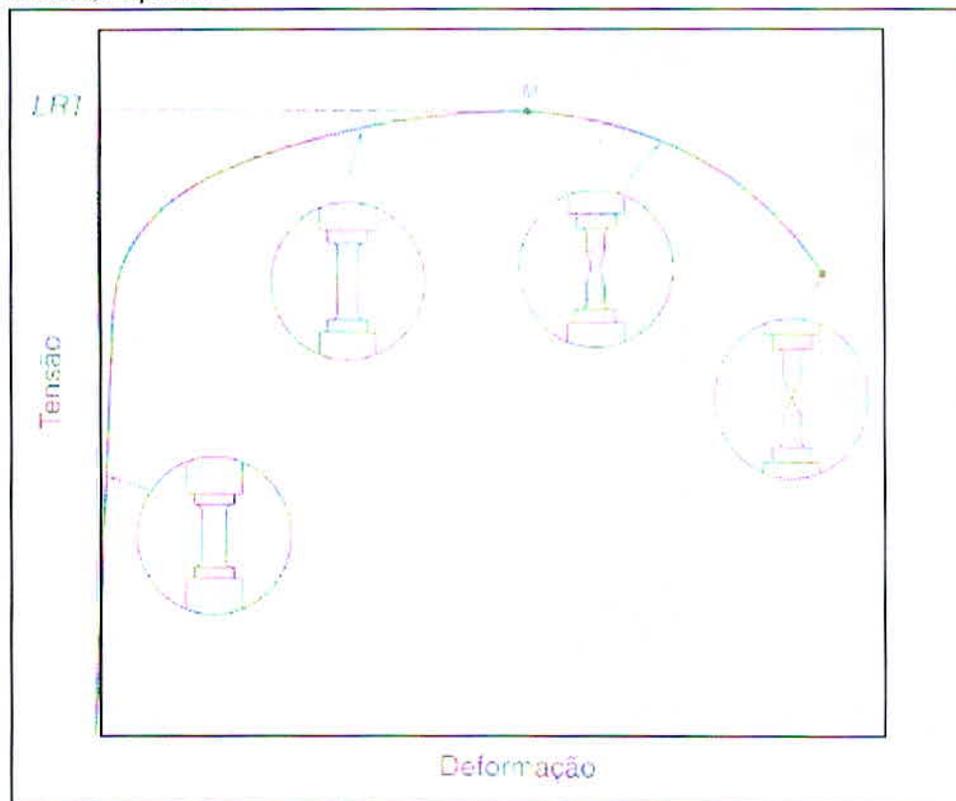
10 - S_0 área da seção.

11 – Área da menor seção transversal reta do corpo de prova após ruptura.

3.2 Construção da curva de escoamento verdadeira ($\sigma_v \times \epsilon_v$)

De acordo com Callister (2011), na figura 6, a diminuição na tensão necessária para continuar a deformação após o ponto de Máximo, ponto M, parece indicar que o metal está se tornando mais fraco. Esse não é, de forma alguma, o caso; na realidade, a sua resistência está aumentando. Contudo, a área da seção transversal está diminuindo rapidamente na região da estricção, onde a deformação está ocorrendo. Isso resulta em uma redução na capacidade da amostra em suportar carga. A tensão, é dada com base na área da seção transversal original antes de qualquer deformação, e não leva em consideração essa redução da área na região da estricção.

Figura 6 – comportamento típico da curva tensão deformação de engenharia até a fratura do material, no ponto F.



Fonte: CALLISTER, Ciência e engenharia de materiais, (2011). p 108.

O limite de resistência à tração LTR está indicado pelo ponto M. os detalhes dentro círculos representam a geometria do corpo de prova deformado em vários pontos da curva.

Algumas vezes, faz mais sentido empregar o conceito da tensão verdadeira-deformação verdadeira. A tensão verdadeira (σ_v) é definida como sendo a carga P dividida pela área da seção transversal instantânea A_i sobre a qual a deformação está ocorrendo.

$$\sigma_v = \frac{P}{A_i}$$

A deformação verdadeira é definida como:

$$\epsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_o}$$

Se não ocorre variação no volume durante a deformação, ou seja, se

$$A_i l_i = A_o l_o$$

As tensões e deformações verdadeiras e de engenharia são relacionadas de acordo com

$$\sigma_v = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon)$$

Segundo Callister (2011), as equações acima são válidas somente até o surgimento da estrição; além desse ponto, a tensão verdadeira deve ser calculada a partir de medições da carga, da área da seção transversal e do comprimento útil reais.

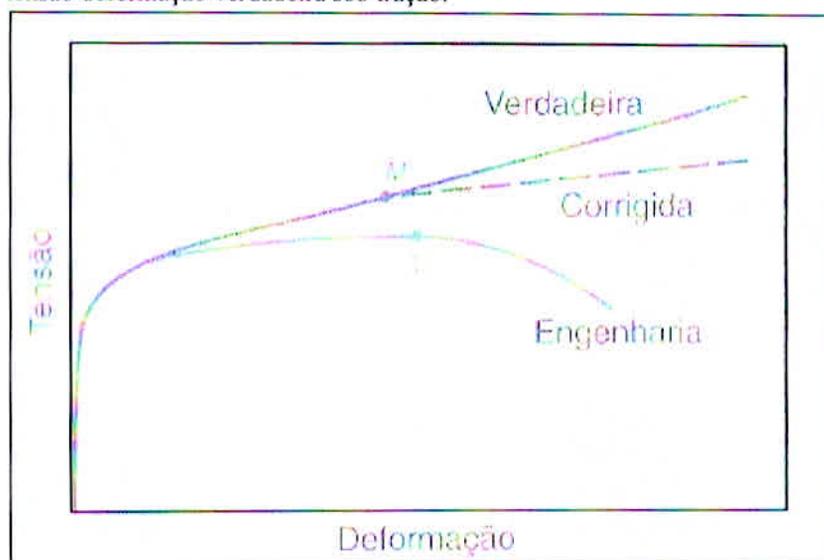
Uma comparação esquemática entre os comportamentos tensão-deformação de engenharia e verdadeiro é feita na figura 7. É importante observar que a tensão verdadeira necessária para manter uma deformação crescente continua a aumentar após o limite de resistência à tração, ponto M (GARCIA, 1999).

Coincidentemente à formação da estrição, há a introdução de um estado de tensões complexo na região da estrição (a existência de outros componentes de tensão além da tensão axial). Como consequência disso, a tensão correta (axial) na estrição é ligeiramente menor do que a tensão calculada a partir da carga aplicada e da área da seção transversal da estrição. Isso leva à curva “corrigida” mostrada na figura 7.

Segundo Callister (2011) para alguns metais e ligas, a região da curva tensão-deformação verdadeira desde o início da deformação plástica até o ponto onde tem início a estricção pode ser aproximada pela relação:

$$\sigma_v = K \epsilon_v^n$$

Figura 7 – Comparação entre os comportamentos típicos tensão deformação de engenharia e tensão deformação verdadeira sob tração.



Fonte: CALLISTER, Ciência e engenharia de materiais, (2011). p 113.

A estricção tem o seu início no ponto M sobre a curva de engenharia, o qual corresponde ao ponto M' na curva verdadeira. A curva tensão deformação verdadeira “corrigida” leva em consideração o estado de tensão complexo na região da estricção.

Tabela 4 Tabulação dos valores de n e de K para varias ligas.

Material	n	K	
		Mpa	psi
Aço com baixo teor de carbono (recozido)	0,21	600	87000
Aço-liga 4340 (revenido a 315°C)	0,12	2650	385000
Aço inoxidável 304 (recozido)	0,44	1400	205000
Cobre (recozido)	0,44	530	76500
Latão naval (recozido)	0,21	585	85000
Liga de alumínio 2034 (submetida a tratamento térmico - T3)	0,17	780	113000
liga de magnésio AZ-31B (recozido)	0,16	450	66000

Fonte: CALLISTER, Ciência e engenharia de materiais, (2011). p 113.

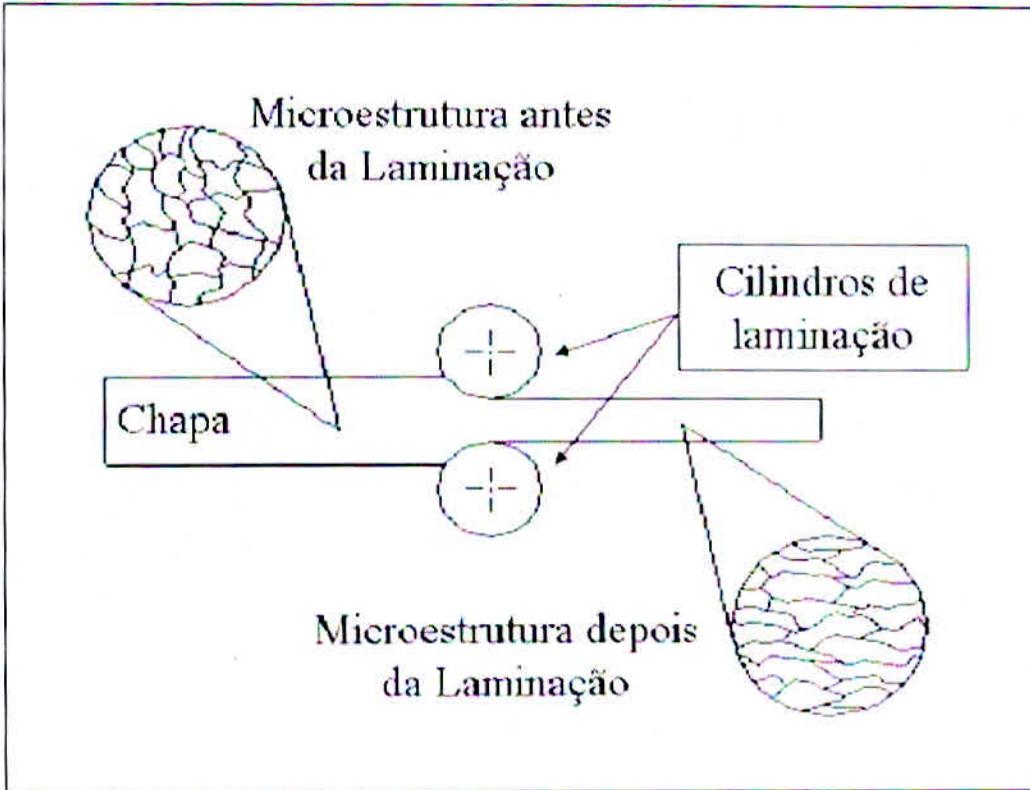
Os valores de n e de k são constantes, cujos valores irão variar de uma liga para outra e também dependerão das condições do material, se ele foi deformado plasticamente ou tratado termicamente (CALLISTER, 2011).

3.4 Anisotropia

Segundo Callister (2011, p.48), as propriedades físicas dos monocristais de algumas substâncias dependem da direção cristalográfica na qual as medições são feitas. Essa direcionalidade das propriedades é denominada anisotropia e está associada à variação do espaçamento atômico ou iônico em função da direção cristalográfica. As substâncias em que as propriedades medidas são independentes da direção da medição são isotrópicas. A extensão e a magnitude dos efeitos da anisotropia nos materiais cristalinos são funções da simetria da estrutura cristalina; o grau de anisotropia aumenta com a diminuição da simetria estrutural. Para muitos materiais policristalino, as orientações cristalográficas dos grãos individuais são totalmente aleatórias. Sob essas circunstâncias, embora cada grão possa ser anisotrópico, uma amostra composta pelo agregado de grão se comporta de maneira isotrópica. Assim, o valor medido de uma propriedade representa uma média dos valores direcionais. Algumas vezes, os grãos nos materiais policristalinos possuem uma orientação cristalográfica preferencial. Nesse caso, diz-se que o material possui uma “textura”.

O surgimento da anisotropia plástica deve-se ao facto de durante os processos de conformação de chapas, os grãos cristalinos individuais serem alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite 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) (CIMA, 2012). Os materiais conformados tornam-se assim anisotrópicos.

Figura 8 – O processo de laminação como origem da anisotropia



Fonte: FERRARINI, Caracterização de materiais para o processo de Estampagem, (2004). p 28.

Normalmente, o modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do coeficiente de anisotropia. Este pode ser obtido a partir de ensaios de tração uniaxial efetuados sobre amostras retiradas segundo varias direções do plano da chapa. Por definição, o coeficiente de anisotropia ou coeficiente de lankford, R , é definido como o quociente entre as deformações verdadeiras segundo a largura, ε_w , e segundo a espessura, ε_t , numa dada gama de deformação predefinida, como por exemplo até 20% de deformação. A equação que descreve o coeficiente de anisotropia é dada por (CIMM, 2012):

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

No entanto, como a extensão segundo a espessura da amostra é de difícil medição, é habitual considerar-se a conservação do volume, $\varepsilon_t = -(\varepsilon_w + \varepsilon_l)$; e definir o coeficiente de anisotropia da seguinte forma:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_w + \varepsilon_l)} = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f \cdot w_f / l_0 \cdot w_0)}$$

Onde, w_0 e w_f são as larguras inicial e final respectivamente e l_0 e l_f são os comprimentos inicial e final, respectivamente. Realça-se que w_f e l_f têm que ser medidos antes do ponto de ruptura do material.

A partir dos coeficientes de anisotropia nas direções 0° , 45° e 90° (figura 9) é possível definir dois parâmetros. A anisotropia normal, \bar{R} , e a anisotropia planar, ΔR . As seguintes equações apresentam a formulação destes dois parâmetros (CIMM, 2012):

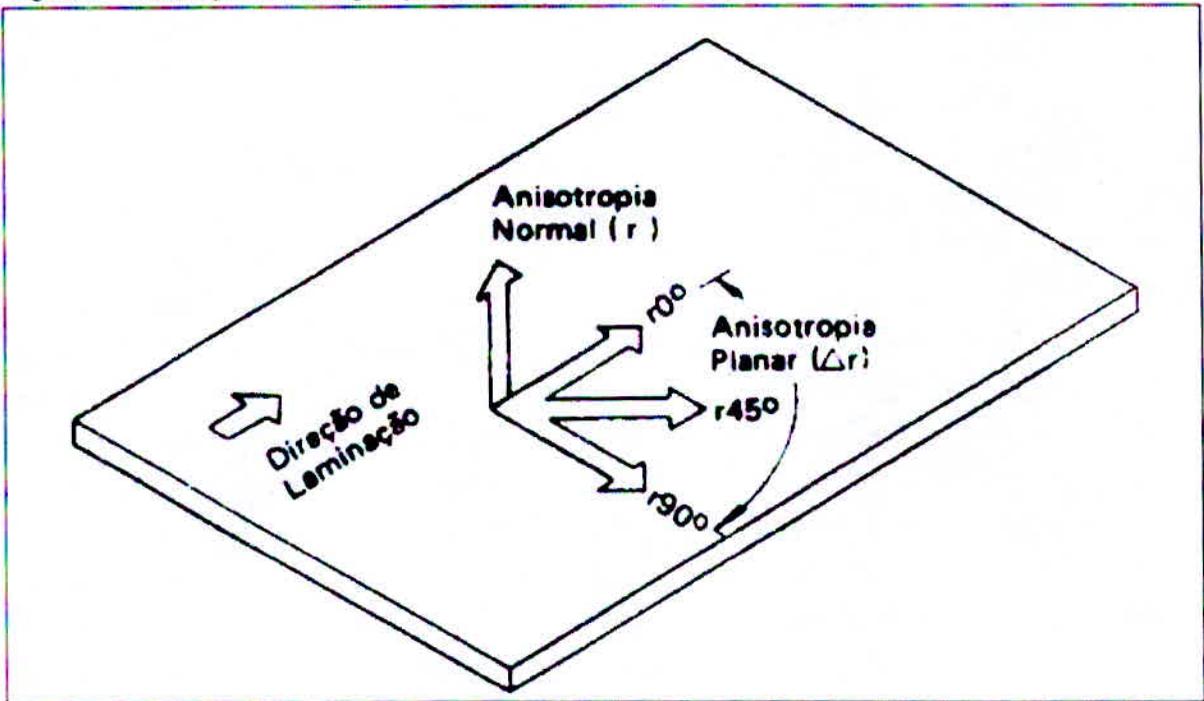
$$\bar{R} = \frac{(R_{0^\circ} + 2 \cdot R_{45^\circ} + R_{90^\circ})}{4}$$

e

$$\Delta R = \frac{(R_{0^\circ} - 2 \cdot R_{45^\circ} + R_{90^\circ})}{2}$$

A anisotropia normal, \bar{R} , evidencia-se quando as propriedades segundo a espessura são diferentes das que se obtém no plano da chapa. Este parâmetro indica a capacidade da chapa metálica em resistir ao alongamento quando submetido a forças de tração e/ou compressão no plano. Nos materiais para estampagem extra profunda é desejado um elevado valor de anisotropia normal, pois, em regra, quando maior \bar{R} maior a razão limite de estampagem. Por outro lado, a anisotropia planar, ΔR , indica a diferença de comportamento que o material pode apresentar no plano da chapa como função das diferentes direções consideradas (FERRARINI, 2004).

Figura 9 – método para amostragem para obtenção do R médio e ΔR .

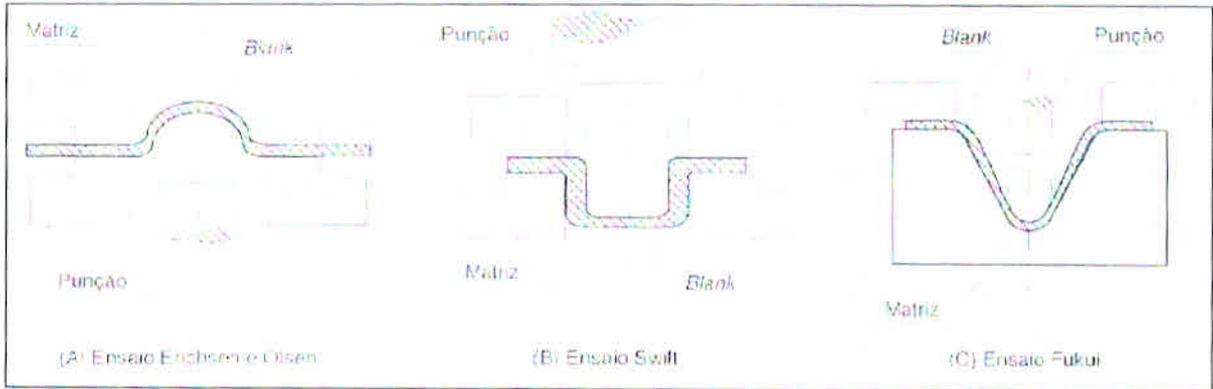


Fonte: TIGRINHO, Luiz Mauricio Valente, (2005). p 28.

4 ENSAIO DE FABRICAÇÃO

Segundo Garcia (1999, p.179), os ensaios de fabricação avaliam características intrínsecas do material na etapa de produção. Em geral, processos que envolvam a conformação de materiais metálicos, muitas vezes exigem o conhecimento do comportamento de determinada peça durante o processo de conformação. Os ensaios de fabricação são utilizados para avaliar condições de conformação que evitarão o enrugamento ou trincas de bordas (no caso da estampagem de copos) ou geometrias de maior complexidade. São úteis, também para determinar as condições de esforços envolvidos entre ferramentas de conformação e material de trabalho (figura 10):

Figura 10 – Tipos de ensaios de estampagem (embutimento).



Fonte: GARCIA, Ensaios dos materiais, (1999). p 181.

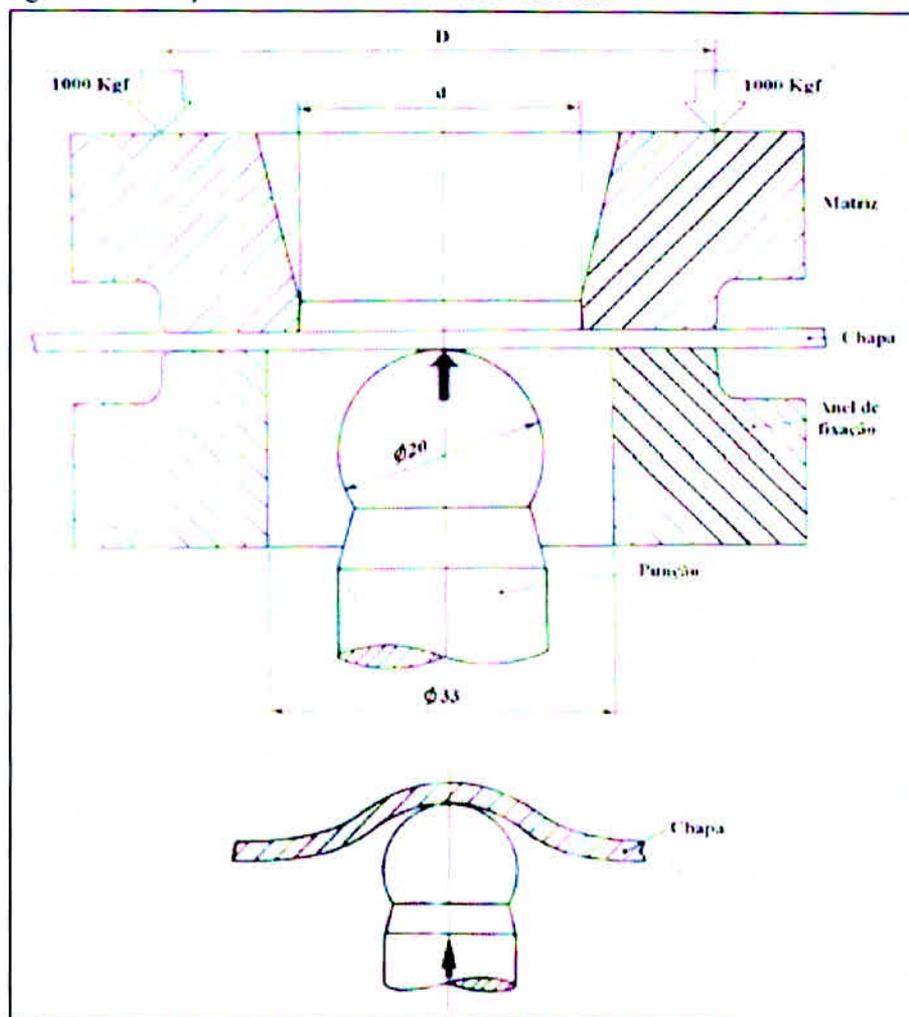
4.1 Ensaio de embutimento

Existem inúmeros ensaios de estampabilidade, dos quais um dos mais empregados é o ensaio de embutimento Erichsen. Segundo Freitas (2003, p.27) esse processo consiste em afinar a espessura de uma chapa por meio de um punção, prendendo-se a chapa numa matriz, de modo a impedir que o material deslize para dentro da matriz. Esse ensaio é o único padronizado pelas normas internacionais, sendo frequentemente realizado para comparação de materiais e para se verificar se a chapa possui a ductilidade desejada.

O ensaio de embutimento Erichsen é realizado em uma máquina apropriada, onde se coloca a chapa entre uma matriz e um anel de fixação, sendo presa por uma carga de compressão. Um punção aplica uma carga que força a chapa a se abaular, formando um copo. A impressão deve ser feita no centro da chapa ou, no mínimo, a 45mm das bordas. Tal ensaio

mede a profundidade do copo no momento da estrição localizada ou no momento em que ocorra a ruptura do copo. O punção tem cabeça esférica, com 20mm de diâmetro, e a carga que prende a chapa é de aproximadamente 1000Kgf. A figura 11 mostra o princípio do ensaio de embutimento Erichsen (GARCIA, 1999).

Figura 11 – Esboço do ensaio de embutimento Erichsen



Fonte: FREITAS, Francisco Nélio Costa, (2003). p 28.

5 PROCESSO DE ENBUTIMENTO PROFUNDO

De acordo com Santos (2007, p.23) na estampagem profunda de um copo, o metal é submetido a três tipos diferentes de deformações. O metal situado no centro do disco, sob a cabeça do punção, é acomodado em torno do perfil do punção e, assim, tem sua espessura reduzida. Nessa região, o metal está sujeito a um estado biaxial de tração devido à ação do punção. O metal situado na região interna do blank é deformado radialmente para o interior em direção da garganta da matriz e, à medida que isto ocorre, a circunferência externa deve descrever continuamente desde a dimensão do disco original até aquela relativa a peça final. Isto significa que o metal está submetido a uma deformação compressiva na direção circunferencial e a uma deformação por tração na direção radial. Quando o metal ultrapassa o raio da matriz, é primeiramente dobrado e depois endireitado, ao mesmo tempo que sofre um esforço de tração. Este dobramento plástico sob tração resulta numa considerável redução da espessura, que modifica o aumento da mesma produzido pela contração circunferencial. Entre a zona interna tracionada e zona externa contraída existe um estreito anel do metal que não foi dobrado, seja sobre a matriz, seja sobre o punção. O metal nesta região foi submetido apenas a um carregamento de tração ao longo da operação de estampagem.

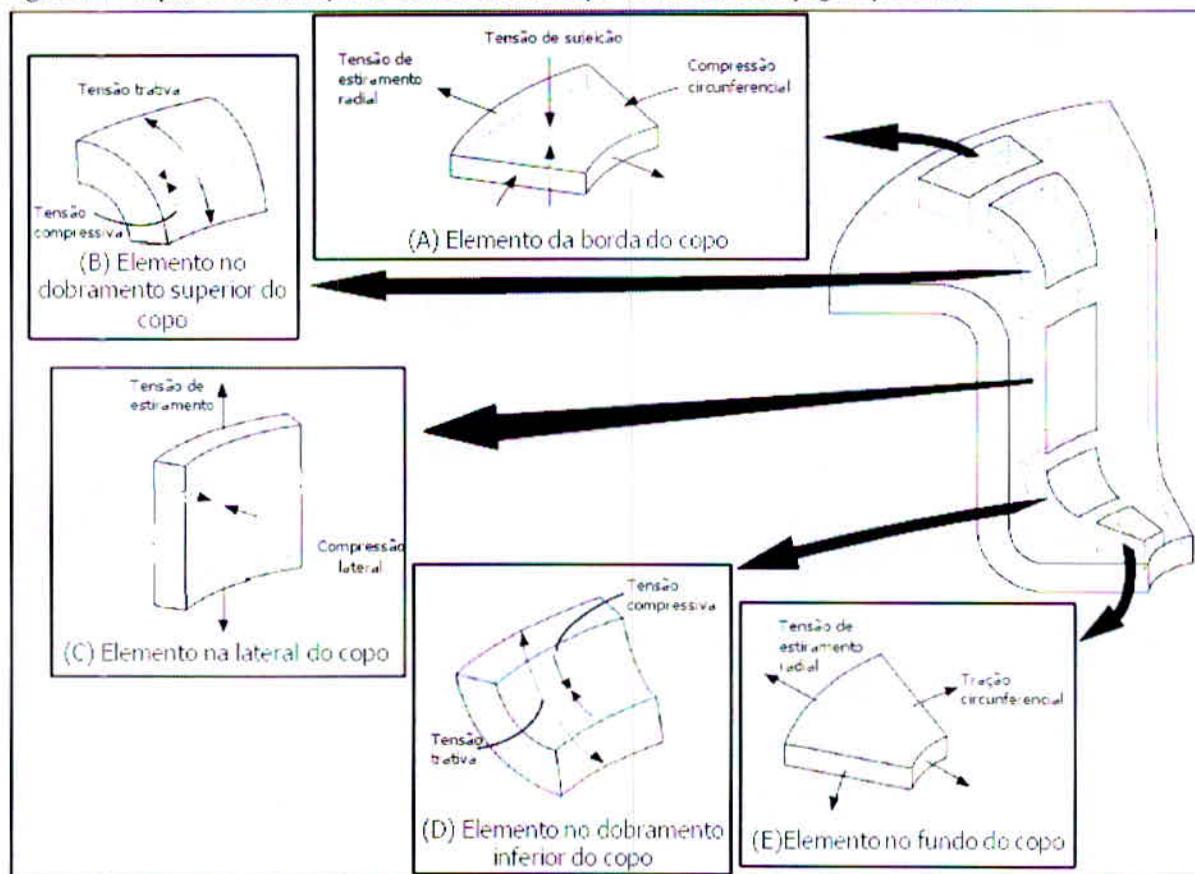
5.1 Deformações na chapa metálica

De acordo com Garcia (1999, p. 181 a 182) ao longo do processo de estampagem, a geratriz (ou blank) é submetida a diferentes tipos de deformações, até atingir a forma final, conforme pode ser observado na figura 12.

O metal situado ao redor da base do punção é deformado radialmente para o interior da matriz, reduzindo assim, seu diâmetro original até o diâmetro de conformação, que corresponde ao do punção. Assim, o metal sofre esforços de compressão na direção circunferencial e tração na direção radial (vide figura 12 - A). Nessa região é necessário cuidar para que não haja enrugamento na borda da peça, o que é feito por sistema de pressão no anel de fixação ou prensa chapas. Se ocorrer enrugamento, as rugas serão transmitidas da borda para o interior da matriz, o que forma e propaga trincas, rompendo a lateral do copo. À medida que o material caminha em direção à matriz, ele é dobrado e depois desdobrado devido ao esforço trativo que ocorre na lateral do copo (figura 12 - B). Nessa região ocorre deformação plana; além disso, em geral, essa região é responsável pela homogeneização da espessura da parede pelo estiramento uniforme, conforme ilustra a (figura 12 - C). Além de

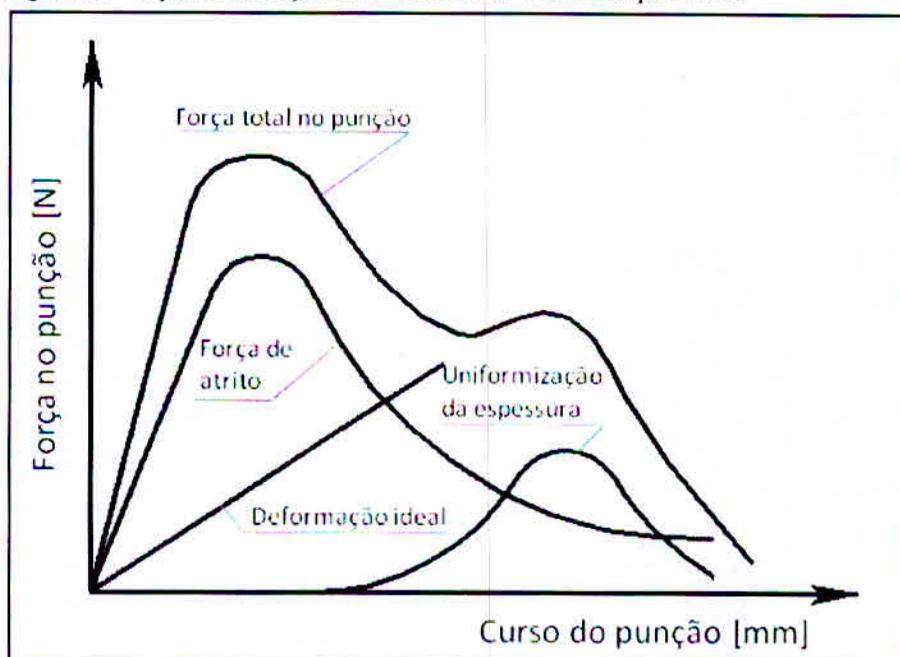
todos os esforços representados na figura 12, deve se considerar ainda o efeito do atrito que ocorre entre a geratriz e o prensa chapas (figura 12 - A), na região de dobramento da chapa, entre a matriz e a chapa (figura 12 - D), na lateral do copo entre chapa e punção e chapa e matriz (figura 12 - C), no interior do copo entre punção e chapa (figura 12 - E) e no fundo do copo também entre punção e chapa (figura 12 - E), (GARCIA, 1999).

Figura 12 – Tipos de deformações e tensões de atrito que ocorre na estampagem profunda.



Fonte: FOLLE, Luiz Fernando, (2008). p 18.

Figura 13 – Tipos de esforços envolvidos no embutimento profundo.



Fonte: FOLLE, Luiz Fernando, (2008). p 19.

6 MATERIAIS

Nesse capítulo serão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso que tem como objetivo a caracterização do aço NBR 5915 EEP G1 e EEP G2 para estampagem.

6.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na realização do presente trabalho são dois aços baixo-carbono, denominados, EEP G1 e EEP G2, que têm sua composição química e propriedade mecânica mostrada na tabela 5 e 6. Os dois aços são do processo de fabricação de canecas para filtros de diesel para motores automotivos de uma empresa do ramo metalúrgico e são procedentes da Usiminas.

Para desenvolver este trabalho foram selecionadas duas amostras de chapa de aço para estampagem com 0,60 mm de espessura com as seguintes características.

Amostra 1: Aço ao carbono EEP G1 NBR 5915 da Usiminas.

Amostra 2: Aço ao carbono EEP G2 NBR 5915 da Usiminas.

6.2 Composição química das amostras

A tabela 5 mostra a composição química dos materiais fornecidos pelos fornecedores dos materiais analisados.

Tabela 5 – Composição química do material analisado.

<i>Material tipo</i>	<i>C (%)</i>	<i>Si (%)</i>	<i>Mn (%)</i>	<i>P (%)</i>	<i>S (%)</i>	<i>Al (%)</i>
EEP G1	0,040	0,010	0,190	0,017	0,016	0,043
EEP G2	0,040	...	0,200	0,016	0,011	0,034

Fonte: Certificado de qualidade do fabricante, (2012).

6.3 Propriedades mecânicas das amostras

A tabela 6 mostra as propriedades mecânicas dos materiais fornecidos pelos fornecedores dos materiais analisados

Tabela 6 – Propriedades mecânicas das amostras analisadas.

<i>Material tipo</i>	<i>Direção</i>	<i>Espessura</i>	<i>Dureza</i>	<i>Limite de resistência</i>	<i>Limite de escoamento</i>	<i>Alongamento</i>
		(mm)	(HRB)	(Mpa)	(Mpa)	(%)
EEP G1	90°	0,60	48	323	217	37,2
EEP G2	0°	0,60	42	293	187	41,3

Fonte: Certificado de qualidade do fabricante, (2012).

6.4 Propriedade tecnológica

A tabela 7 mostra as propriedades tecnológicas dos materiais fornecidos pelos fornecedores dos materiais analisados.

Tabela 7 – Propriedade tecnológica das amostras analisadas

<i>Índice de Embutimento</i>	<i>Rugosidade</i>
(mm)	(um Ra)
EEP G1 - 10,3	...
EEP G2 - 10,4	0,95 / 1,10

Fonte: Certificado de qualidade do fabricante, (2012).

7 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida para a caracterização das propriedades mecânicas e físicas dos materiais estudados foram os ensaios de tração e ensaio de anisotropia. Os ensaios de tração e anisotropia demonstram as propriedades que estão relacionadas com as características de cada qualidade de material.

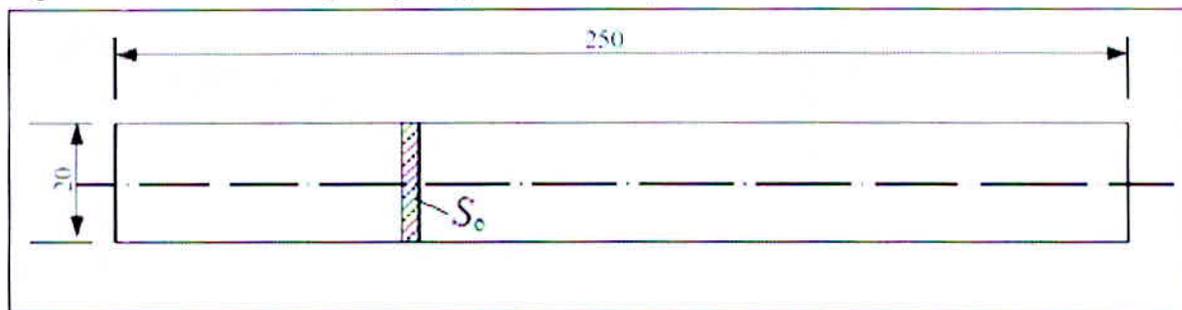
7.1 Propriedades Mecânicas

Através do trabalho realizado foi possível obter os dados necessários para a construção de tabelas e gráficos para compilar os resultados dos ensaios, nesse capítulo foi apresentado os resultados das 12 amostras do material selecionado.

7.1.1 Ensaio de tração

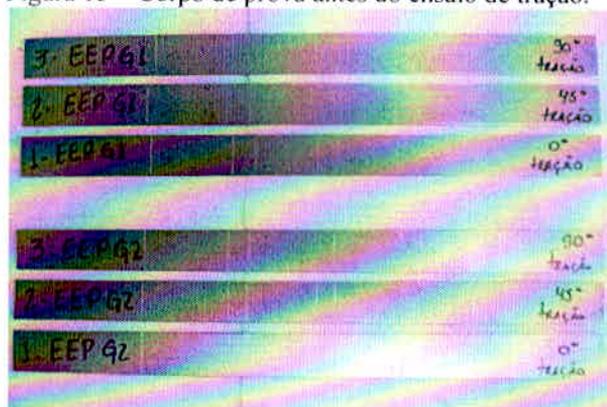
Para os ensaios de tração e anisotropia os corpos de provas foram dimensionados conforme a norma ABNT NBR 6673. Entretanto, foi realizada uma simplificação item 6.1.4 da Norma de modo a facilitar a retirada dos corpos de prova, em que a geometria utilizada pode ser vista na figura 14.

Figura 14 – Geometria do corpo de prova para ensaio de tração. Dimensões em mm.



Fonte: O autor, (2012).

Figura 15 – Corpo de prova antes do ensaio de tração.



Fonte: O autor, (2012).

Para determinar as curvas de escoamento e a anisotropia foram recortados em relação ao sentido de laminação da chapa, corpos de prova a 0° , 45° e 90° , como mostra a figura 16.

Figura 16 – Corpo de prova cortados a 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação.



Fonte: O autor, (2012).

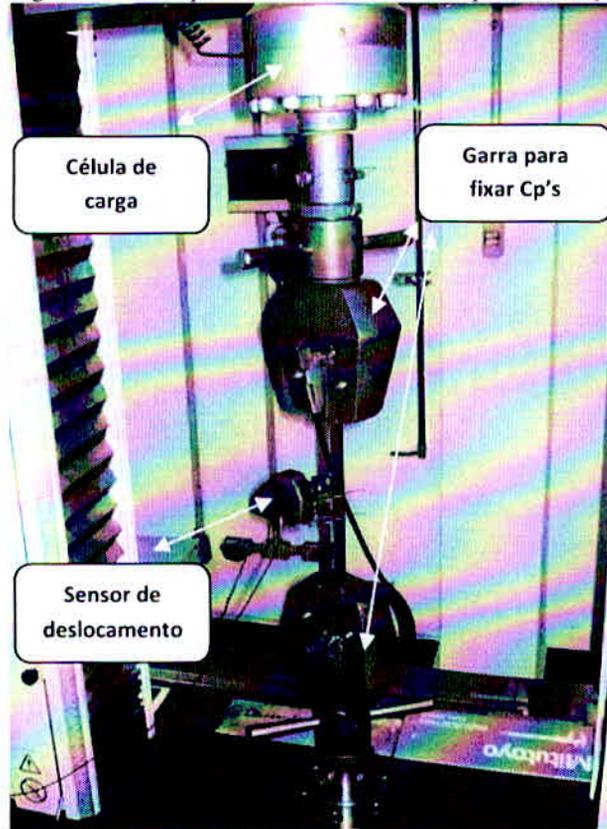
Na preparação dos corpos de prova para a construção das curvas de escoamento e determinar a anisotropia foi utilizado uma guilhotina para o corte dos mesmos e uma retificadora para remover as rebarbas do corte.

Para a realização dos ensaios utilizou-se uma máquina de tração uniaxial com capacidade de 10 toneladas, marca INTRON. O ensaio de tração consiste em fixar um corpo de prova na máquina uniaxial, a qual tem um conjunto de garras que permita prendê-lo e aplicar um carregamento, tracionando-o de modo uniaxial, com velocidade controlada e

constante até a ruptura. Na figura 17, pode observar os componentes da maquina de tração utilizados e na figura 18 observar-se o posicionamento do corpo de prova na maquina.

No ensaio, são registrados os dados da força F [N] (pela célula de carga) e aumento do comprimento l_o [mm] (pelo sensor deslocamento). A força e o deslocamento, medidos durante o ensaio de tração, no qual através das equações do capítulo 3, chega-se a relação tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c e tensão verdadeira σ_v x deformação verdadeira ϵ_v .

Figura 17 – Componentes utilizados na maquina de tração.



Fonte: o autor, (2012).

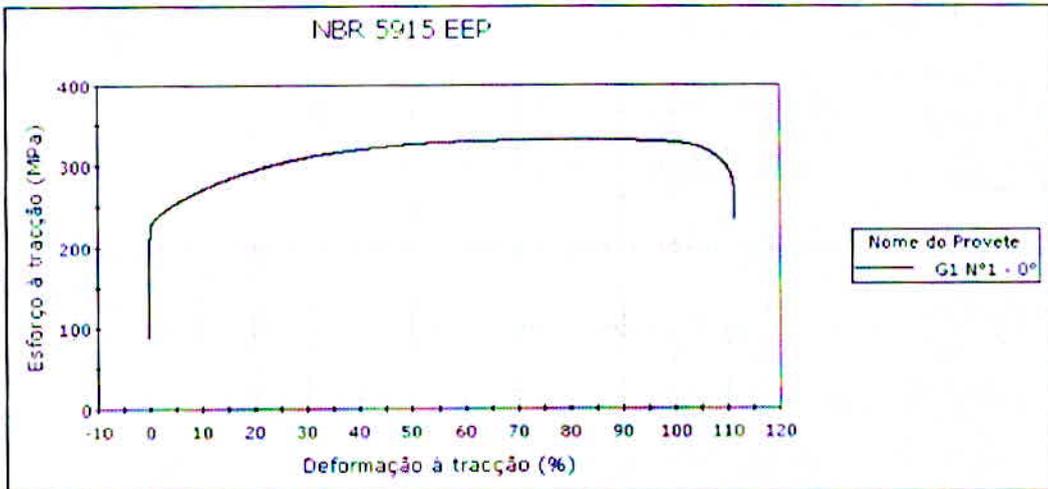
Figura 18 – Posicionamento do corpo de prova na máquina de tração. (“A” – marca utilizadas para mensuração da variação do deslocamento necessário para calculo da anisotropia).



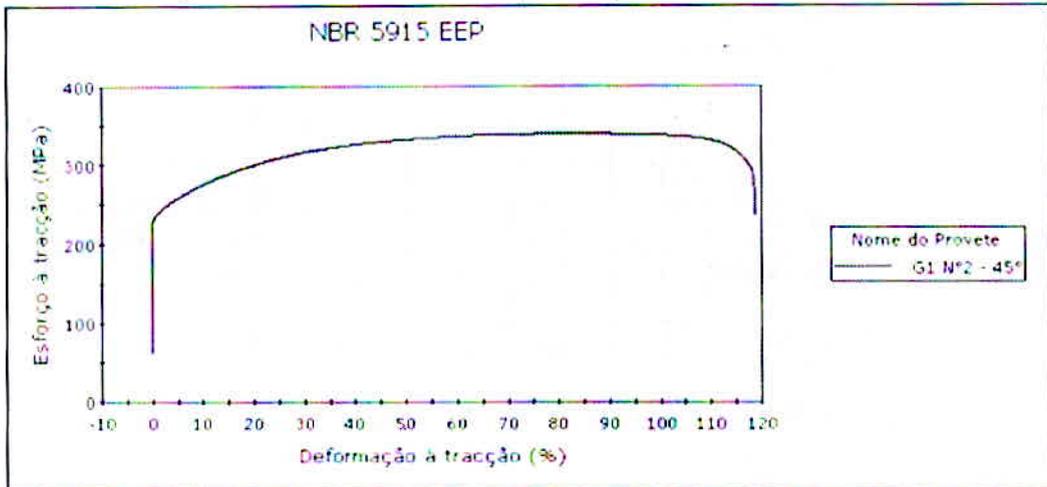
Fonte: O autor, (2012).

7.1.1.1 Resultado do ensaio de tração

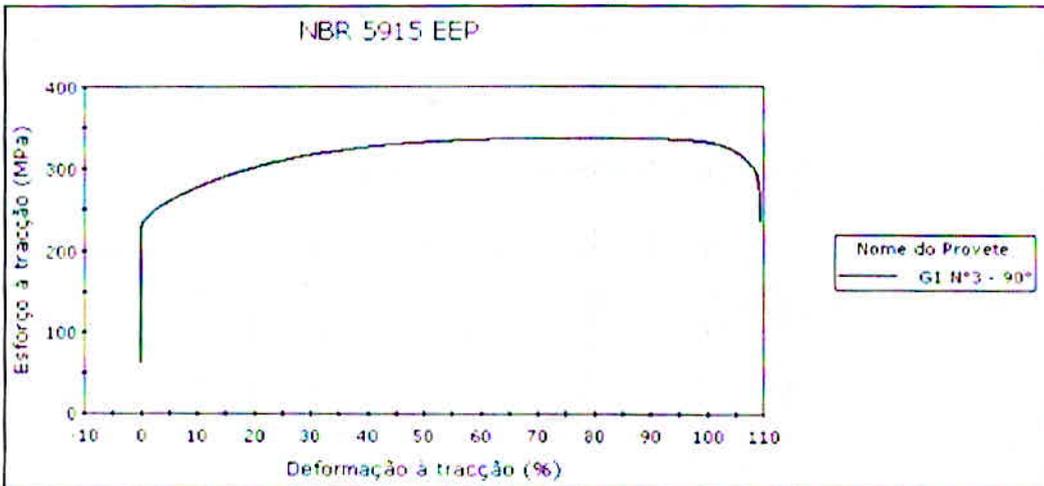
Foram realizados ensaios de tração uniaxial para determinar as propriedades intrínsecas dos materiais aço EEP G1 e EEP G2. Segundo a norma ABNT NBR 6673, fez-se 12 ensaios, sendo 4 na direção de laminação, 4 a 45°, o restante perpendicular à direção de laminação. Para comparativo entre as curvas de tensão x deformação da qualidade de aço EEP G1 e EEP G2, os gráficos 7 demonstra todas as curvas de tenção convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c e o gráfico 8 demonstra todas as curvas de tenção verdadeira σ_v x deformação verdadeira ϵ_v .

Gráfico 1 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

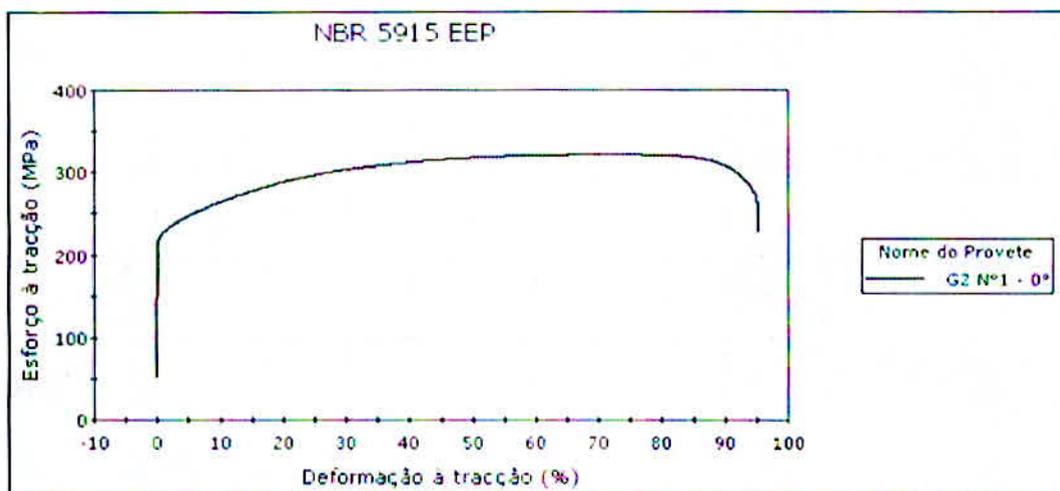
Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 2 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

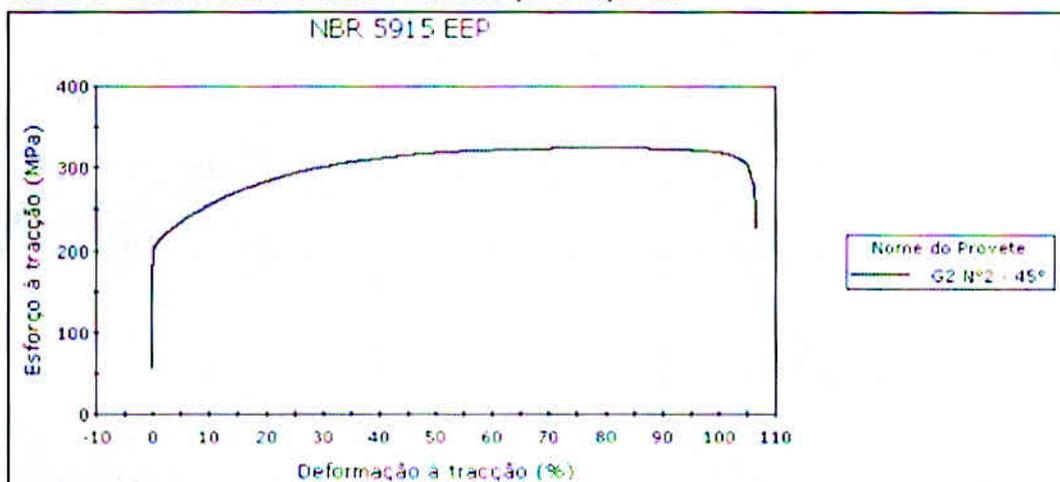
Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 3 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

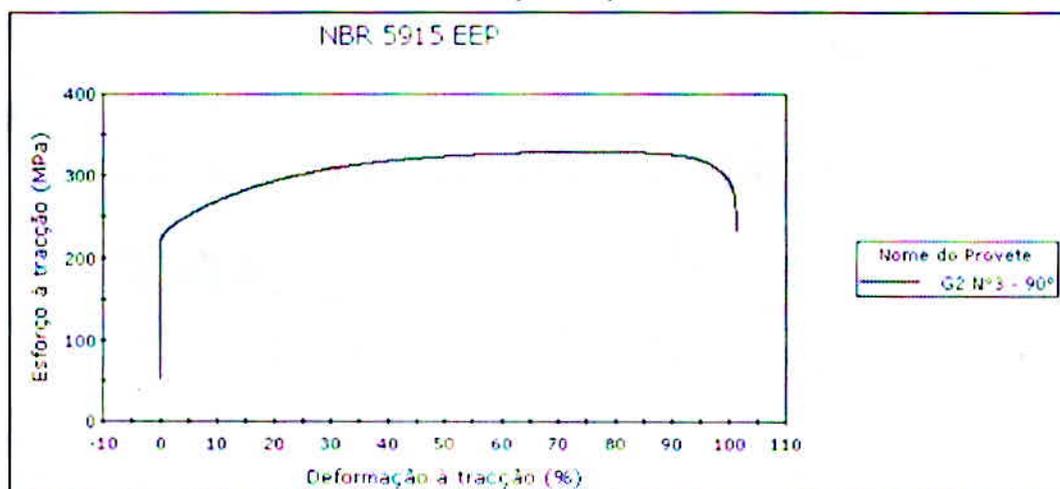
Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 4 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

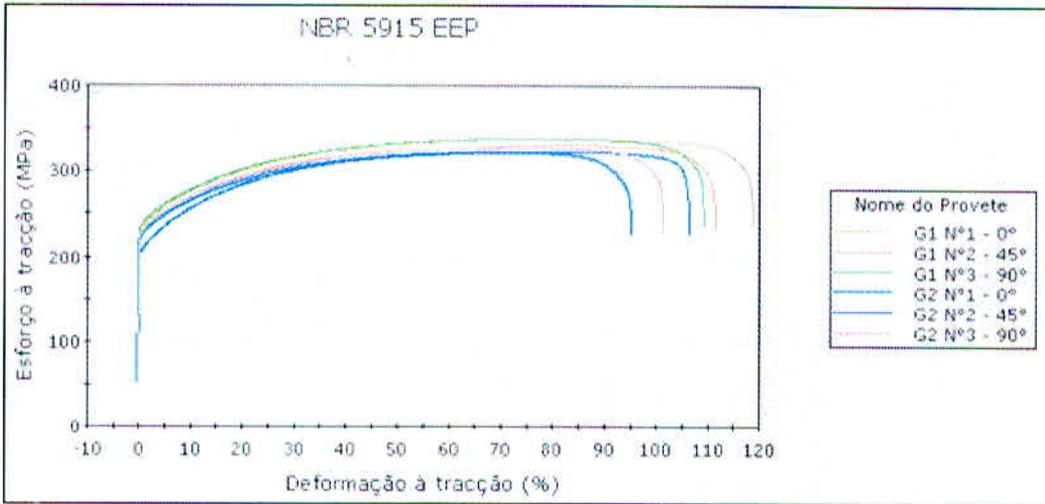
Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 5 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

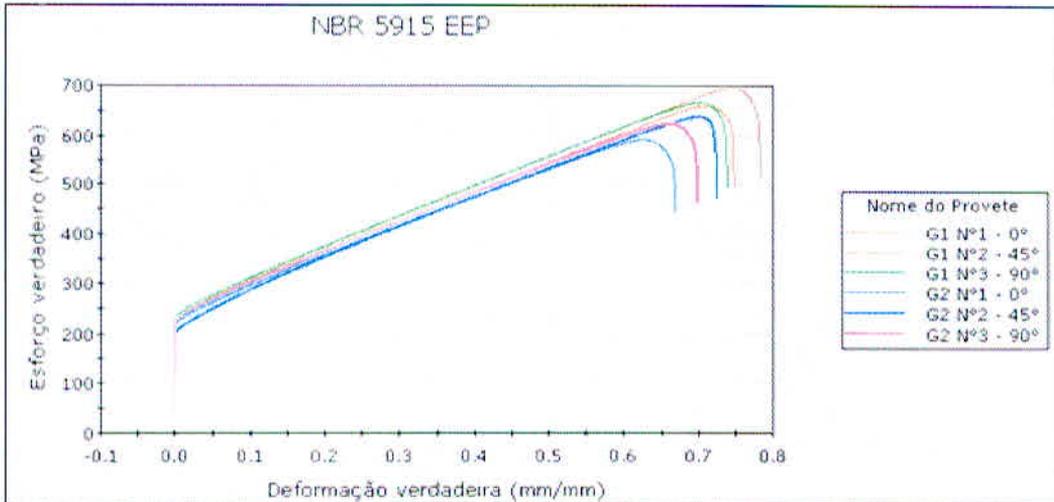
Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 6 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 7 – Tensão convencional σ_c x deformação à tração ϵ_c .

Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Gráfico 8 – Tensão verdadeira σ_v x deformação verdadeira ϵ_v .

Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

Na tabela 8 pode-se observar os resultados obtidos dos dois materiais estudados.

Tabela 8 – Características do aço EEP G1 e EEP G2.

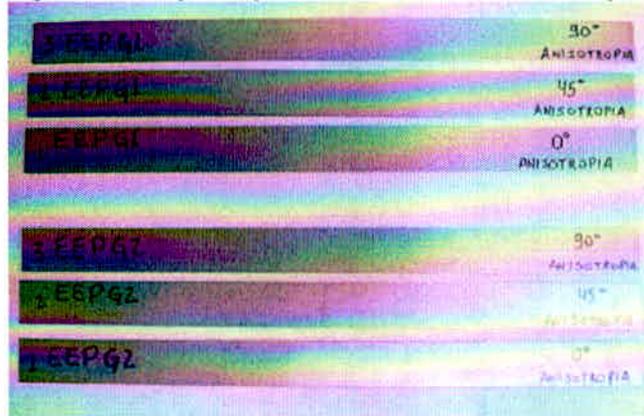
<i>Amostra</i>	<i>Material</i>	<i>Limite de resistência (Mpa)</i>	<i>Limite de escoamento (Mpa)</i>	<i>Along.(%)</i>	<i>Carga máxima (N)</i>	<i>Carga na ruptura (N)</i>	<i>Tensão verdadeira (Mpa)</i>
N°1 - 0°	EEP G1	331,318	227,082	38,60	4307,14	3064,893	428,656
N°2 - 45°	EEP G1	338,212	228,767	38,20	4396,756	3391,144	440,637
N°3 - 90°	EEP G1	335,187	228,627	37,80	4391,281	3233,748	415,062
N°1 - 0°	EEP G2	311,824	213,166	40,20	4365,53	3307,574	465,855
N°2 - 45°	EEP G2	318,179	199,286	38,00	4199,962	2951,187	418,608
N°3 - 90°	EEP G2	304,105	207,179	38,20	4257,466	3192,757	431,745

Fonte: O autor (Software Instron Bluehill, 2012).

7.1.2 Anisotropia

No ensaio de anisotropia, utiliza-se a mesma metodologia do ensaio de tração, entretanto o deslocamento foi pré-estabelecido baseado na alta deformação alcançada pelo material. Nesse ensaio, corpo de prova com as mesmas dimensões do corpo de prova do ensaio de tração foram tracionados durante um determinado deslocamento, e após esse deslocamento a carga foi suspensa.

Figura 19 – Corpos de prova antes do ensaio de anisotropia.



Fonte: O autor, (2012).

Para atenuar o valor da imprecisão no ensaio utilizou o deslocamento de 16 mm (20%) conforme a norma ASTM E-517 para todos os corpos de prova, o seja, a imprecisão do equipamento seria a mesma para todos os corpos de prova.

Com esse deslocamento o material sofreu deformações plásticas que foram analisadas nas três principais direções de deformação (comprimento, largura e espessura). Como visto no capítulo 3.4, foi utilizada a “lei da Constancia do volume” para calcular o índice de anisotropia.

As medidas realizadas nos corpos de prova, antes e após os ensaios, são inseridas numa planilha, a fim de fornecer os dados do índice de anisotropia.

7.1.2.1 Resultados de anisotropia

Na tabela 9 e 10, pode-se observar o resultado de anisotropia dos aços EEP G1 e EEP G2 através da aplicação de 20% de deformação para os corpos de prova a 0° a 45° e a 90° da direção de laminação.

Tabela 9 – Índice de anisotropia aço EEP G1.

<i>Direção</i>	<i>R</i>	\bar{R}	ΔR
0°	2,165		
45°	1,930	2,018	0,176
90°	2,048		

Fonte: O autor (planilha Excel, 2012).

Tabela 10 – Índice de anisotropia aço EEP G2.

<i>Direção</i>	<i>R</i>	\bar{R}	ΔR
0°	2,165		
45°	2,022	2,080	0,110
90°	2,094		

Fonte: O autor (planilha Excel, 2012).

8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma análise e discussão com os dados dos fabricantes dos materiais e dados obtidos nos ensaios mecânicos dos materiais analisados.

8.1 Propriedades mecânicas

Os dados referentes às propriedades mecânicas, Limite de resistência (LR), Limite convencional de escoamento (LE), Alongamento, Tensão máxima verdadeira (σ_v), índice de anisotropia normal (R) e índice de anisotropia planar (ΔR) resultantes dos ensaios mecânicos e propriedades fornecidos pelos fabricantes da matéria prima estão relacionados abaixo em gráficos e tabelas para comparativo de resultados.

8.1.1 Ensaio de tração

Conforme informado pelo catalogo da Usiminas (2012), a classificação dos aços baixo carbono laminados a frio é realizada pela composição química e pelas propriedades mecânicas dos aços. Na tabela 8 os resultados obtidos para o aço EEP G1 estão compatíveis com a especificação, entretanto valores superiores para a tensão de escoamento e tensão máxima. Esse maior valor da tensão de escoamento e da tensão máxima é refletido na diminuição do alongamento do material. Para o aço EEP G2 os resultados também são compatíveis com características muito próximas a do EEP G1, porem observando os resultados de tensão verdadeira na ultima coluna da tabela 8, sua capacidade de resistir a ruptura foi superior ao do EEP G1, refletindo ao aumento do alongamento.

Na tabela 11 e 12, pode-se observar a comparação entre as propriedades mecânicas encontradas para o aço EEP G1 e EEP G2. (Resultados de ensaio e resultados do fabricante).

Tabela 11 – Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado de ensaio

<i>Material tipo</i>	<i>Direção</i>	<i>Espessura</i>	<i>Dureza</i>	<i>Limite de resistência</i>	<i>Limite de escoamento</i>	<i>Alongamento</i>	<i>Tensão verdadeira</i>	
		<i>(mm)</i>	<i>(HRB)</i>	<i>(Mpa)</i>	<i>(Mpa)</i>	<i>(%)</i>	<i>(Mpa)</i>	
Fabricante	EEP G1	90°	0,60	48	323,000	217,000	37,20	...
Ensaio	EEP G1	0°	0,60	...	331,318	227,082	38,60	428,656
Ensaio	EEP G1	45°	0,60	...	338,212	228,767	38,20	440,637
Ensaio	EEP G1	90°	0,60	...	335,187	228,627	37,80	415,060

Fonte: O autor, tabela 6 e 8, (2012).

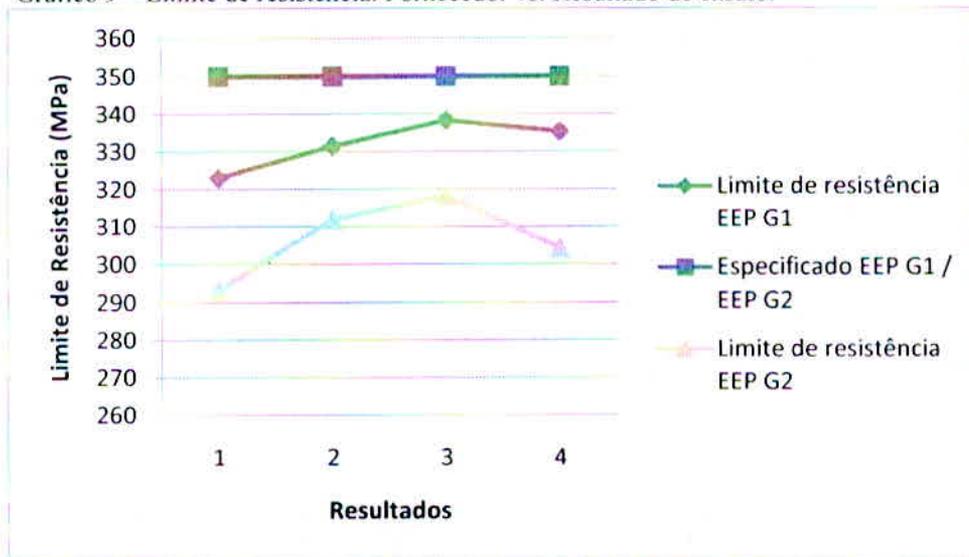
Tabela 12 – Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado de ensaio.

<i>Material tipo</i>	<i>Direção</i>	<i>Espessura</i>	<i>Dureza</i>	<i>Limite de</i>	<i>Limite de</i>	<i>Alongamento</i>	<i>Tensão verdadeira</i>	
				<i>resistência</i>	<i>escoamento</i>			
		<i>(mm)</i>	<i>(HRB)</i>	<i>(Mpa)</i>	<i>(Mpa)</i>	<i>(%)</i>	<i>(Mpa)</i>	
Fabricante	EEP G2	0°	0,60	42	293,000	187,000	41,30	...
Ensaio	EEP G2	0°	0,60	...	311,824	213,166	40,20	465,855
Ensaio	EEP G2	45°	0,60	...	318,179	199,286	38,00	418,608
Ensaio	EEP G2	90°	0,60	...	304,105	207,179	38,20	431,750

Fonte: O autor, tabela 6 e 8, (2012).

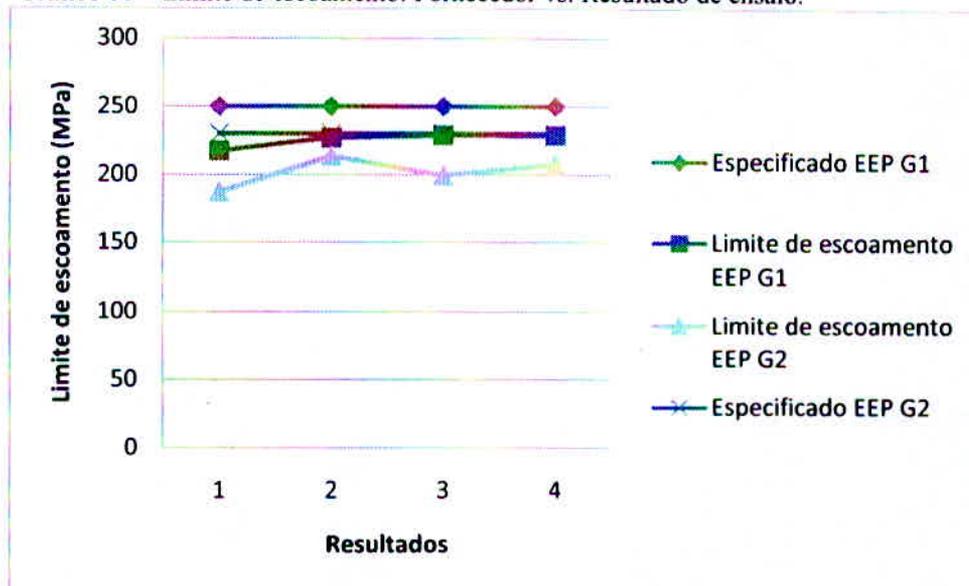
Nos gráficos 9, 10 e 11, pode-se observar a comparação entre limite de resistência, limite de escoamento e alongamento encontrados para o aço EEP G1 e EEP G2. (Resultados de ensaio e resultados do fornecedor).

Gráfico 9 – Limite de resistência: Fornecedor vs. Resultado de ensaio.



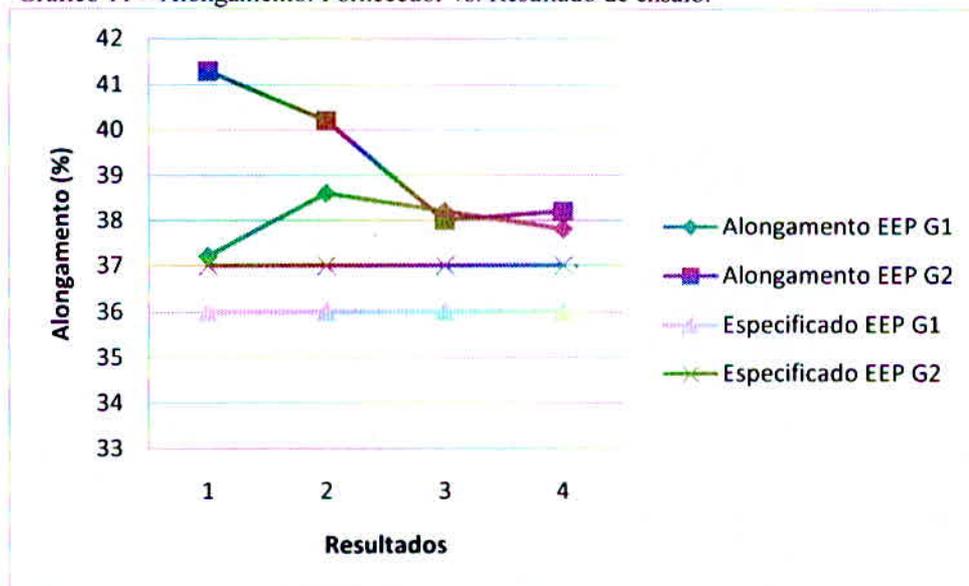
Fonte: O autor, tabela 11 e 12, (2012).

Gráfico 10 – Limite de escoamento: Fornecedor vs. Resultado de ensaio.



Fonte: O autor, tabela 11 e 12, (2012).

Gráfico 11 – Alongamento: Fornecedor vs. Resultado de ensaio.

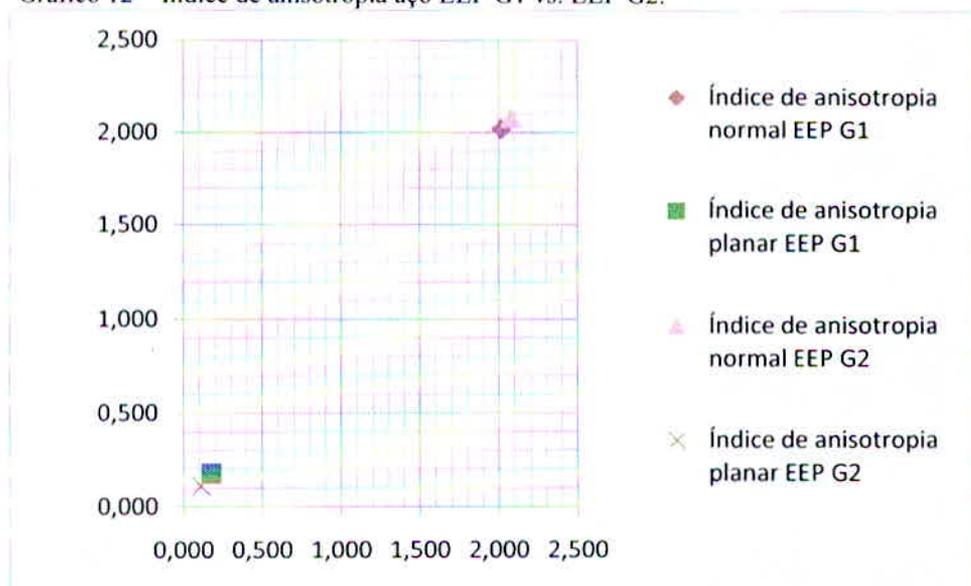


Fonte: O autor, tabela 11 e 12, (2012).

8.1.2 Anisotropia

No gráfico 12 apresenta os resultados da anisotropia normal (\bar{R}) e a anisotropia planar (ΔR).

Gráfico 12 – Índice de anisotropia aço EEP G1 vs. EEP G2.



Fonte: O autor, tabela 9 e 10, (2012).

Não temos dados referentes à anisotropia normal e planar das amostras fornecidas pelos fabricantes das chapas metálicas analisadas. Analisando a tabela 9, 10 e o gráfico 12 verifica-se que: O aço EEP G1 e EEP G2, a anisotropia é positiva para índice de anisotropia normal ($\bar{R} > 1$), o qual favorece o embutimento extra profundo dos aços deste trabalho. A anisotropia planar dos aços EEP G1 e EEP G2 foi diferente de zero, indicando o provável aparecimento do orelhamento quando tem-se o embutimento completo do blank. Entretanto, na comparação entre os dois materiais, o aço EEP G2 tem menor tendência ao aparecimento de orelhas no processo de embutimento extra profundo que o aço EEP G1 devido ao valor da anisotropia planar ser mais próxima de zero.

8.2 Propriedade tecnológica

Na tabela 7 pode-se observar a comparação entre os resultados de propriedades tecnológicas encontradas pelo fabricante. Para o aço EEP G2 o índice de embutimento é superior a EEP G1 o que resulta em uma maior resistência em suportar a deformação durante a conformação mais as propriedades são próximas e atendem as especificações da norma NBR 5915 visto na tabela 3.

9 CONCLUSÃO

De acordo com o objetivo do trabalho proposto, que consiste na caracterização mecânica, física e tecnológica, para determinar as propriedades do aço EEP G1 e EEP G2 de uma chapa metálica verificando se correspondem com o especificado da norma e comparando as propriedades do aço EEP G1 com especificação do EEP G2.

Com relação aos materiais analisados conclui-se que as propriedades dos materiais foram obtidas através de uma sequência de ensaios (tração e anisotropia), onde através das propriedades levantadas, consegue-se caracterizar o aço em estudo para a conformação de chapas aproximando-as dos processos reais e alcançando resultados similares aos reais na estampagem.

As propriedades mecânicas tais como: Limite de resistência, limite de escoamento e alongamento estão conforme o especificado na norma NBR 5915 e Verificou-se que os resultados de limite de resistência do EEP G1 são superiores ao EEP G2 o que resulta no menor alongamento. Os resultados de anisotropia estão conforme o especificado da norma NBR 5915 e é característico de um aço para estampagem extra profunda.

Com relação as propriedades mecânicas e físicas, o aço EEP G1 pode ser utilizado na produção de produtos com especificação EEP G2.

Para o índice de embutimento não foi realizado ensaio para comparativo com o do fabricante. Mais se verificou que os resultados fornecidos pelo fabricante estão de acordo com as especificações da norma NBR 5915.

Após a realização do presente trabalho, algumas sugestões podem ser feitas para complementar o estudo:

1. Realisar ensaio de curva limite de conformação e estudar a sua característica no processo.
2. Avaliar as propriedades dos materiais após a conformação mecânica e do processo de envelhecimento, avaliando a influencia da deformação no aumento de resistência mecânica.
3. Estampar amostras com diferentes geometrias e estudar a influência do coeficiente de atrito no processo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915**: Bobinas e Chapas Finas a Frio de Aço-Carbono para Estampagem – Especificação, 2 ed. 2008.

_____. **NBR 6673**: Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração. 1981.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais uma introdução**: Livros Técnicos e científicos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CIMM, **A Estampabilidade dos Materiais Metálicos**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/6487>. Acesso em: 01set. 2012.

FERRARINI, José Luiz. **Caracterização de materiais para o processo de Estampagem**. 116p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4696/000503391.pdf?sequence=1>> Acesso em: 19set. 2012.

FOLLE, Luiz Fernando. **Metodologia de medição do coeficiente de atrito em Estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica**. 65p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14790/000668164.pdf?sequence=1>> Acesso em: 19set. 2012.

FREITAS, Francisco Nélio Costa. **Adequabilidade das condições de laminação de um aço baixo-carbono à Estampagem profunda**. 90p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br:8080/ri/handle/123456789/2533>> Acesso em: 19set. 2012.

GARCIA, Amauri. **Ensaio dos materiais**: Livros Técnicos e Científicos, Campinas: LTC, 1999.

GORNI, Antonio Augusto. **Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas**. Artigo apresentado no 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aranda Eventos, São Paulo, Outubro de 2009. 20p. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_CongCCM_AHSS_Out2009.pdf> Acesso em: 25set. 2012.

SANTOS, Ricardo Adriano. **Avaliação de Estampabilidade do aço DC05 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação numérica**. 97p. Dissertação (Pós-Graduação)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_080_ricardo_adriano_santos.pdf> Acesso em: 01set. 2012.

TIGRINHO, Luiz Mauricio Valente. **Influência da lubrificação na Estampagem via análise das deformações obtidas em uma chapa de aço de alta Estampabilidade**. 113p.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <
http://www.pgmeec.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_059.pdf> Acesso em: 21set. 2012.

USIMINAS. **Laminado a frio**: Soluções completas em aço. Catalogo, 2012. 21p. Disponível em: <

http://www.usiminas.com/irj/go/km/docs/prtl_doc/usiminas/pt/AreasDeNegocios/Siderurgia/CatalogoProdutos/TirasFrio.pdf> Acesso em: 10set. 2012.