

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JEFFERSON FONSECA VIEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE FOLHAS
DE FLANDRES**

SÃO PAULO

2006

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JEFFERSON FONSECA VIEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE FOLHAS
DE FLANDRES**

Trabalho de Formatura

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica

Orientador:
Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

SÃO PAULO
2006

AGRADECIMENTOS

Pela orientação, sugestões e ajuda, sou grato ao meu orientador Prof. *Dr. Ronald Lesley Plaut.*

Pelo apoio, orientação e atenção, a todos amigos da Companhia Siderúrgica Nacional manifesto meus agradecimentos para todo o time de Embalagens, especialmente para área comercial, centro de pesquisas e usina.

Pelo trabalho desenvolvido, dedicação e orientação, sou grato a todos do Departamento de Metalurgia e de Materiais da Escola Politécnica, que de alguma forma se envolveram no trabalho.

Pela oportunidade, paciência e apoio, sou muito grato ao meu pai, *Walmir Vieira*, à minha mãe, *Neusa Fonseca Vieira*, à minha irmã, *Jeane C. F. Vieira*, à minha namorada *Gláucia Rocha P. Baptista*, e a todos meus amigos.

Principalmente sou grato a *Deus*, pelo presente ao me proporcionar esta oportunidade e as condições necessárias para a realização do trabalho.

RESUMO

A folha metálica é utilizada como matéria-prima para embalagens, em diferentes segmentos: alimentos, produtos químicos em geral, bebidas, entre outros. Pode-se definir folha metálica como uma chapa de aço, microligado ou não, com espessura entre 0,45 mm e 0,14 mm. Pode ser revestida ou não. Quando é revestida com cromo, chama-se Folha Cromada (FCR). Ao revestir um a folha metálica com estanho, denomina-se Folha de Flandres (FFL) . A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) é a única produtora de FFL do país.

Com o aumento da competitividade do mercado, principalmente em relação aos sucedâneos (polímeros, alumínio, compósitos, vidro), a necessidade de inovação torna-se mandatória para a manutenção e ampliação de mercados. A lata expandida, tem-se mostrado muito atraente na gôndola devido aos seus formatos diferenciados e aspectos de modernidade inseridos na lata, além de apresentar custos atrativos aos fabricantes de lata e boa performance nas linhas de expansão. A CSN desenvolveu um aço específico para este tipo de lata: o CSNT59 CA LEX (recozimento contínuo).

Atualmente, o fabricante de lata expandida para o segmento de atomatados utiliza para a confecção do corpo um aço de recozimento em caixa que possui variação, significante para o processo, nas propriedades mecânicas e anisotropia, tendo por consequência a geração de custos para o fabricante, para

selecionar e classificar o material em três diferentes lotes e para cada um fazer um ajuste na linha diferenciado, ocasionando perda de produtividade.

O objetivo do trabalho é estudar a estampabilidade dos dois aços, através de levantamento de parâmetros de propriedades mecânicas e anisotropia com limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento (A), coeficiente de encurramento (n), anisotropia plástica (R), anisotropia planar (ΔR). Também, confrontar os resultados com as texturas através de mapas de grãos e função de distribuição de orientação (FDO). Com isso poderemos comparar os dois ações em termos de conformabilidade e assim criar alternativas para o problema.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUÇÃO	2
2.1 Descrição do problema	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Aspectos gerais de estampabilidade	13
3.2 Anisotropia	15
3.3 Curva Limite de Conformação – CLC	16
3.4 Fatores que afetam a posição da CLC	17
3.5 CLC teórica	21
3.6 Textura	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Metalografia	26
4.2 Ensaio de Tração	27
4.3 Ensaio de Curva Limite de Conformação em Chapa Metálica	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33

5.1 Resultados do ensaio de tração	33
5.2 Curva Limite de Conformação	35
5.3 Ensaio metalográfico	38
5.4 Textura	39
6. CONCLUSÃO	44
7. SUGESTÕES	46
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas das folhas metálicas produzidas pela CSN	5
Tabela 2 – Têmpera da folha de flandres NBR 6665	7
Tabela 3 - Têmpera norma CSN	7
Tabela 4 - Dimensões das folhas metálicas	8
Tabela 5 – Propriedades e condições de processo para as FFL's	23
Tabela 6 – Composição química T52 BA	24
Tabela 7 – Composição química doT59 CA LEX	25
Tabela 8 – Parâmetros do T52 BA obtidos pelo ensaio de tração	34
Tabela 9 – Parâmetros do T59 CA obtidos pelo ensaio de tração	34
Tabela 10 – Medidas Poli para validação da CLC – T52 BA	35
Tabela 11 – Medidas Poli para validação da CLC T59 CA	36
Tabela 12 - CLC ₀	37
Tabela 13 – Tamanho de grão médio	39
Tabela 14 – Resumo das propriedades mecânicas e anisotropia	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da folha de flandres	4
Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação de folha metálica	5
Figura 3 – Características da folha de flandres	6
Figura 4 – Fluxograma do processo de fabricação de lata expandida	10
Figura 5 – Fluxo para descrição do problema	11
Figura 6 – Parâmetros que influem na estampabilidade	13
Figura 7 – Fatores que influem na estamparia de peças	14
Figura 8 - Principais parâmetros a serem controlados nas chapas para estampagem	15
Figura 9 – Relação entre textura e R	16
Figura 10 – Relação entre tamanho de grão e R	16
Figura 11 – CLC para aço	17
Figura 12 – Caminho de deformação	17
Figura 13 – Efeito da espessura da chapa na posição da CLC	18
Figura 14 – Efeito da orientação (em relação à direção de laminação), na posição da CLC	19
Figura 15 – Posição na bobina em que foram retirados os corpos de prova	26
Figura 16 – Máquina de tração Instron 15T	27
Figura 17 – Punção	28
Figura 18 – CP octogonal	29

Figura 19 – CP usinado	29
Figura 20 – Gradeamento do CP	30
Figura 21 – CP gradeado	30
Figura 22 – Ensaio Nakazima	31
Figura 23 – Perfilômetro	32
Figura 24 – Curva Limite de Conformação para os dois materiais	36
Figura 25 – CLC experimental X CLC teórica	37
Figura 26 – Microestrutura T52 BA – 500X	38
Figura 27 – Microestrutura T59 CA - 500 X	38
Figura 28 – Espaço Euleriano	40
Figura 29 – ODF T52 BA sem estampar	40
Figura 30 – ODF T59 CA sem estampar	41
Figura 31 – ODF T59 CA após estampagem	41
Figura 32 – Mapa de Grãos T52 BA	42
Figura 33 – Mapa de Grão T59 CA	42

1. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho são:

- 1) Caracterizar a estampabilidade de duas folhas de flandres de especificações diferentes;
- 2) Levantar parâmetros de propriedades mecânicas, anisotropia, além da curva limite de conformação;
- 3) Analisar a textura das folhas de flandres e correlacionar com os parâmetros e as CLC's obtidas para compreensão da conformabilidade das respectivas folhas.
- 4) Sugerir alternativas de melhoria para maior conformabilidade das folhas.

2. INTRODUÇÃO

O uso de folhas metálicas para produção de embalagens surgiu de experimentos rudimentares feitos no século XVIII. Foi o francês Nicolas Appert o primeiro a constatar, em 1790, que alimentos aquecidos e acondicionados em embalagens devidamente seladas podiam ser guardados por mais tempo, livre da ação de certos tipos de bactérias. O método foi cientificamente comprovado mais de 70 anos depois pelo pesquisador Louis Pasteur, que batizou o processo de pasteurização. No século XIX, em 1810, o inglês Peter Durand patenteava uma inovação: uma técnica especial permitindo o uso do metal na fabricação de embalagens. Um ano depois, a empresa Dartford Iron Works fazia os primeiros testes em grande escala, atendendo a uma solicitação da marinha e do exército britânico.

Finalmente, em meados do século XX, mais precisamente na década de 40, as embalagens metálicas passaram por um importante e decisivo teste de ordem prática: mostraram-se perfeitas para o fornecimento de alimentos aos combatentes e à população civil, durante a II Guerra Mundial.

Desde então, as embalagens de aço são utilizadas para acondicionar, proteger e conservar os mais diferentes produtos. As características exclusivas oferecidas pelo aço tornaram este tipo de embalagem insubstituível na composição da imagem e da qualidade de muitos dos mais renomados e conhecidos produtos que fazem parte do nosso cotidiano.

O papel da CSN no mercado de embalagem é o de produtora de matéria-prima, única no mercado brasileiro e maior fornecedora de folhas metálicas da América Latina.

A CSN obtém hoje folhas metálicas com espessura de até 0,14 mm, incomparavelmente mais finas que as de cinqüenta anos atrás.

As folhas metálicas são fabricadas a partir de processos diversos, atendendo às necessidades específicas de resistência, conformação, revestimento, acabamento e dimensão.

Folhas metálicas podem ser definidas como produto plano de aço de baixo teor de carbono com espessura que pode variar entre 0,14 mm e 0,50 mm. Podem ser revestidas, através de processo eletrolítico com estanho, denominadas Folhas de Flandres, ou com cromo, sendo denominadas Folhas Cromadas. Também podem ser não revestidas, sendo então denominadas de Folhas Não-Revestidas.

Folhas de Flandres podem ser definidas com folhas laminadas de aço baixo carbono, revestida com camadas de estanho e filme de passivação com compostos de cromo em ambas as faces.

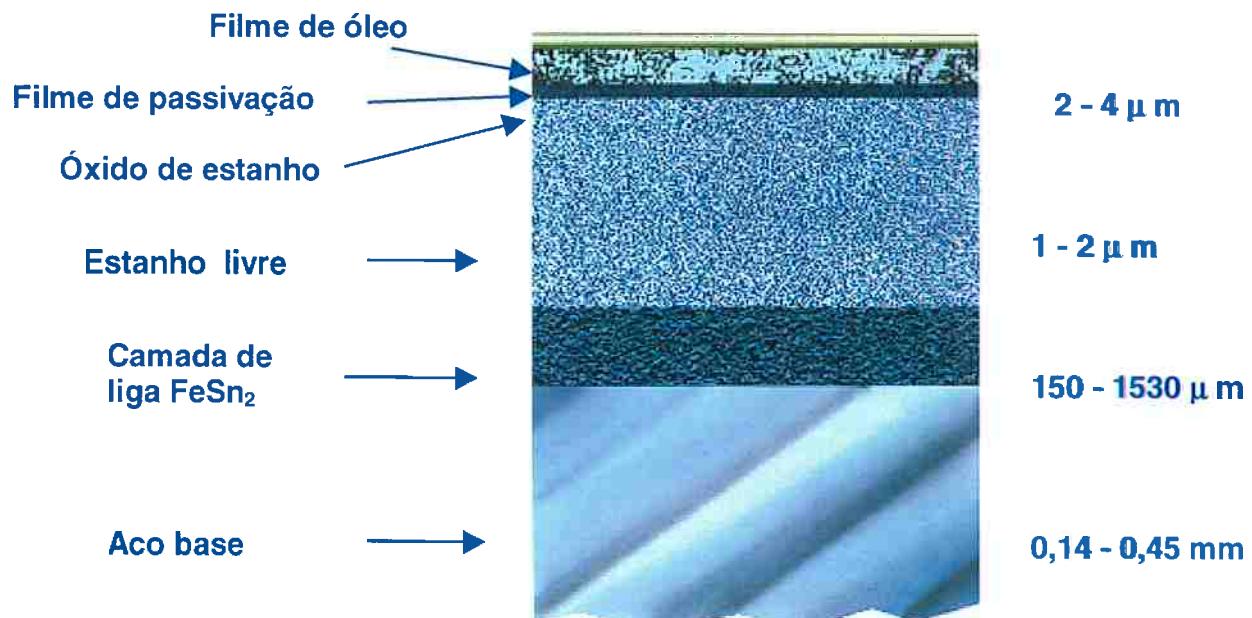


Figura 1 – Estrutura da folha de flandres

As Folhas Cromadas são definidas com folhas laminadas de aço baixo carbono, com revestimento de cromo metálico e óxido de cromo em ambas as faces.

Por último as folhas não revestida, definidas como folhas laminadas de aço baixo carbono, oleada sem revestimento metálico.

Aplicações de folhas metálicas abrangem os segmentos de : Alimentos, latas para tintas, latas de óleos, rolhas metálicas, produtos químicos, bebidas, latas decorativas, pilhas elétricas, baldes, etc.

As seguintes normas técnicas são produzidas pela CSN:

Tabela 1 – Normas das folhas metálicas produzidas pela CSN

Produto	Norma
FL / BFL	NBR-6665 / ASTM-A-624 / ASTM-A-626/EM-10203/JIS-G-3303 SPTE
FCR / BCR	NBR-6665 / ASTM-A-657 / JIS-G-3315 SPTFS EURONORM EN-10202
FNR / BNR	NBR-6665 / ASTM-A-625 / JIS-G-3303 SBP / NM 42:95 EURONORM EN-10203

O processo de fabricação de folhas metálicas está descrito no fluxograma a seguir:

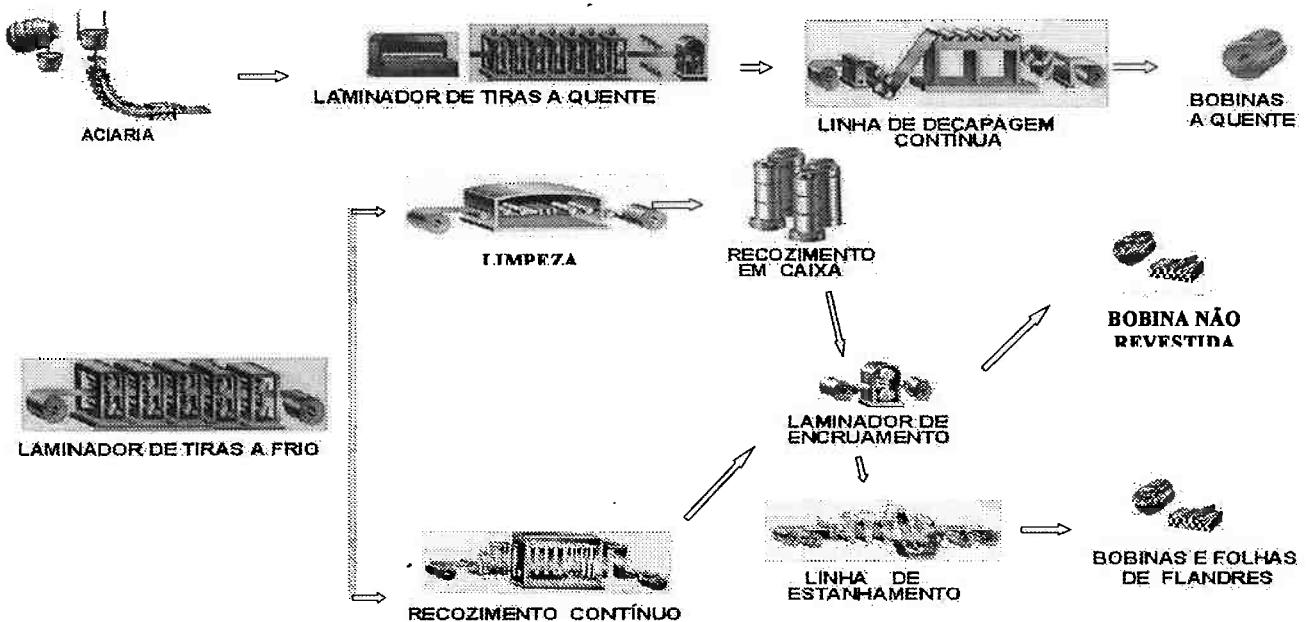


Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação de folha metálica

Abaixo, encontra-se um resumo das características das folhas de flandres:

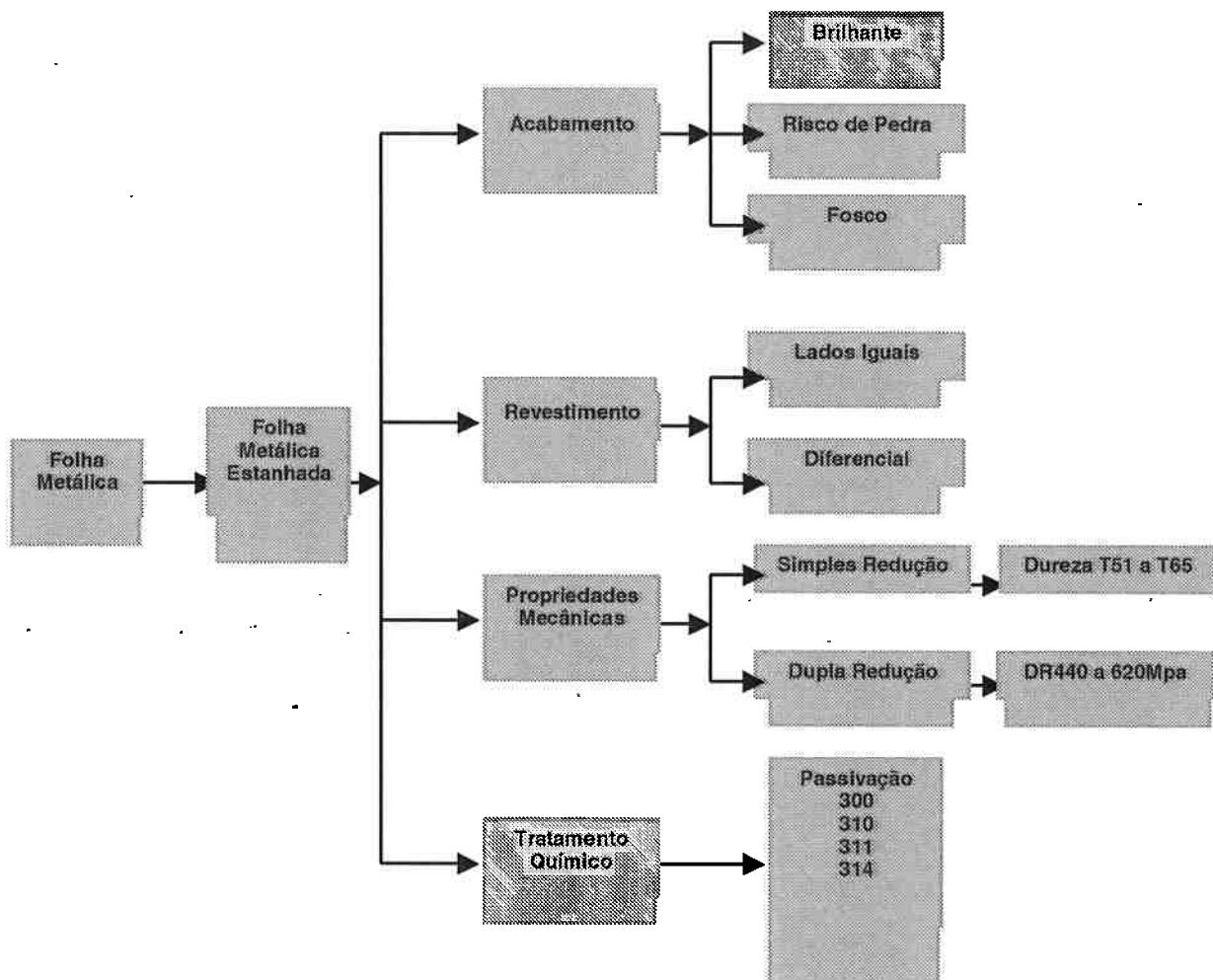


Figura 3 – Características da folha de flandres

Podemos afirmar que o leque de utilizações das folhas metálicas na produção de embalagens depende, basicamente da têmpera, em última análise a dureza do produto.

Tabela 2 – Têmpera da folha de flandres NBR 6665

Redução	Têmpera	Dureza (HR 30T)	LE(MPa)	LR(MPa)	Along. %
Simples	T50	52 máx.	220	320	35
	T52	52 ± 4	235	330	33
	T57	57 ± 4	250	360	30
	T61	61 ± 4	370	460	16
	T65	65 ± 4	440	470	12
Dupla	DR 520	70 ± 3	520	540	5
	DR 550	73 ± 3	550	570	3
	DR 620	76 ± 3	620	630	1 - 2
	DR 660	77 ± 3	660	670	1

Tabela 3 - Têmpera norma CSN

Redução	Têmpera	Dureza (HR 30T)	LE(MPa)	LR(MPa)	AI(%)
Simples	T59 LEX	59 ± 4	410	440	19

As folhas metálicas produzidas apresentam quatro tipos de acabamento superficial:

- Brilhante/Bright: Aplica-se em bobinas e folhas-de-flandres. Obtido pela fusão da camada de estanho sobre o aço base polido.

Rugosidade: 14 a 24 μ pol

- Risco de Pedra/Stone: É obtido no laminador de encruamento sobre o aço base pelo uso de cilindros de trabalho polidos, possuindo leves riscos de rebolo de retífica. Este acabamento é o usual para produtos cromados e não revestidos.

Rugosidade: 14 a 24 μ pol

- Fosco/Matte: É obtido no laminador de encruamento sobre o aço base pelo uso de cilindros de trabalho jateados, no caso das folhas-de-flandres, sem a fusão da camada de estanho.

Rugosidade: 30 a 60 μ pol

- Silver : É obtido no laminador de encruamento sobre o aço base pelo uso de cilindros de trabalho jateados, no caso das folhas-de-flandres, com a fusão da camada de estanho.

Rugosidade: 30 a 60 μ pol

Tabela 4 - Dimensões das folhas metálicas

Dimensões (mm)	Simples Redução	Dupla Redução
Espessura	0,19 a 0,45	0,15 a 0,22
Largura	700 a 1000	700 a 966
Comprimento (folhas)	508 a 1174	508 a 1086

Nos últimos anos no Brasil podemos fazer uma distribuição do consumo, em valor, de embalagem, por tipo de material da seguinte forma ⁽¹⁾: Plásticos (51%), Celulósicas (27%); Metálicas (17%) e Vidro (5%).

Folhas de flandres são utilizadas em larga escala no Brasil e no mundo para a produção de latas de três peças (corpo, tampa e fundo) que são envasadas com frutas, legumes, derivados de leite, café, etc. Outro mercado importante é o de pescado que utiliza canecos produzidos a partir dessas folhas pelo processo Draw.

O mercado de bebidas carbonatadas no Brasil, a partir de 1988 começou a utilizar latas de duas peças fabricadas pelo processo DWI (Draw Wall Ironning) em alumínio ⁽²⁾. O processo foi tão viável que, em menos de seis meses, todo o mercado nacional já era de latas de duas peças, tendo substituído por completo as latas de três peças produzidas, até então, com folhas de flandres.

No Brasil, há cerca de sete anos, começou-se a produzir latas de duas peças DWI, utilizando folhas de flandres. Uma companhia instalada em Fortaleza-CE produz hoje o equivalente a 6% do mercado nacional ⁽³⁾.

Além dos processos de construção de embalagens metálicas já citados existem processos que visam atribuir formas a corpos de latas, a princípio paralelas, por um mecanismo de expansão aumentando a atratividade da embalagem na gôndola. Esta expansão pode ser obtida por processos Mecânicos, Hidráulicos e Pneumáticos. Estes processos já são utilizados em países como México, Japão, Alemanha, França dentre outros, sendo na maioria dos casos a expansão efetuada por processo mecânico.

A seguir o processo de fabricação de latas expandidas:

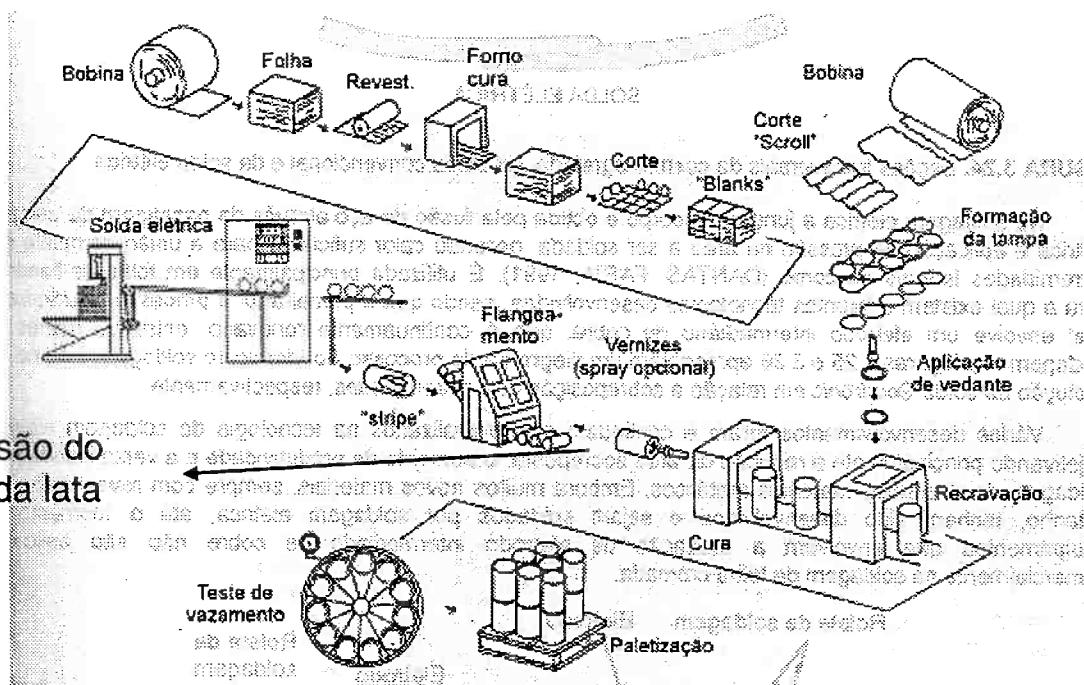


Figura 4 – Fluxograma do processo de fabricação de lata expandida

2.1 Descrição do problema

O fabricante de lata expandida para atomatados utiliza atualmente para confecção do corpo um aço de especificação NBR 6665 T52 BA, fabricado via recozimento em caixa. Uma característica desse material é a sua não homogeneidade de propriedades mecânicas e anisotrópicas. Como o processo de fabricação da lata envolve etapas de expansão, estas variações se tornam prejudiciais.

A saída atual para o fabricante é a seleção e separação em três tipos de lotes de folhas, feitas em um beneficiador intermediário. Esta seleção se dá através de critério de dureza por amostras. Na linha da fábrica, é feito um ajuste diferente para cada tipo de lote, ocorrendo perda de produtividade. O fluxograma a seguir descreve a situação atual:

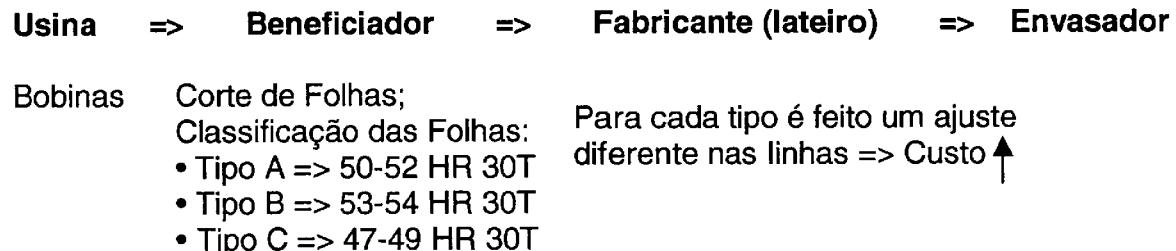


Figura 5 – Fluxo para descrição do problema

Os aços fabricados via recocimento contínuo possuem boa homogeneidade nas suas propriedades.

Atualmente, o aço de recocimento contínuo de melhor conformabilidade é o CSN T59 CA LEX.

Neste trabalho, através do estudo da estampabilidade do T52 BA e do T59 CA, será avaliada a viabilidade de alteração do aço usado atualmente para outro (a priori o T59 CA) que possa garantir melhor homogeneidade nas propriedades mecânicas e de anisotropia, porém sem comprometer a performance em termos de estampabilidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais de estampabilidade

Novos desenvolvimentos de processos de fabricação de chapas fazem com que se torne cada vez mais importante considerar o relacionamento entre a microestrutura e a estampabilidade, dentro do contexto do desenvolvimento de novos produtos. Novos desenvolvimentos na área de fundição contínua de placas/chapas, controle de inclusões, tamanho de grão austenítico e ferrítico (laminação controlada, resfriamento acelerado, altas deformações na ferrita, etc.), têm possibilitado o desenvolvimento de novos materiais com diferentes microestruturas e propriedades mecânicas ⁽⁴⁾.

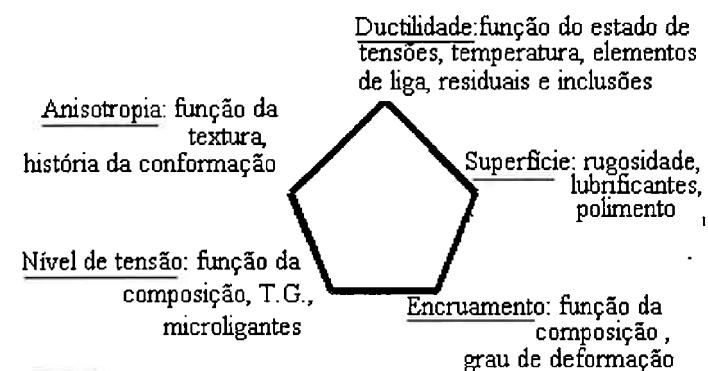


Figura 6 : Parâmetros que influem na estampabilidade

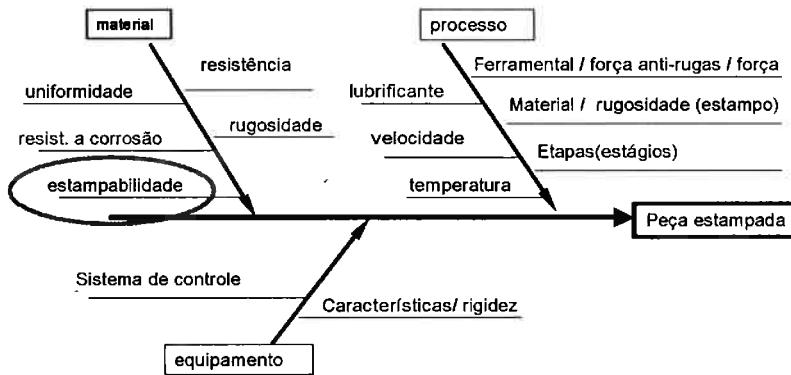


Figura 7 – Fatores que influem na estamparia de peças.

O processo de conformação envolve diferentes operações de dobramento, estampagem profunda, estiramento, afinamento de parede- “ironing” e combinações destas, de modo que, uma peça aparentemente simples, pode apresentar dificuldades, devido ao fato de que a chapa apresenta, entre outros aspectos, variações de espessura, anisotropia, irregularidades locais na aplicação dos esforços de conformação, lubrificação não uniforme, etc. Devido à complexidade da inter-relação destas variáveis, a deformação plástica de chapas tem sido extensamente estudada, tanto do ponto de vista teórico, como experimental ⁽⁴⁾.

O controle dos parâmetros de operação é necessário, pois se visa uma otimização das propriedades mecânicas das chapas laminadas a frio e recozidas, como apresenta a figura 8, de maneira resumida.

Parâmetro	Recozimento em caixa (aço baixo C)	Recozimento contínuo (aço baixo C)	Aço IF recoz. Caixa ou Contínuo
Teor de C	Baixo (*)	Baixo (**)	Baixo (***)
Teor de Mn	Baixo (*)	Baixo (**)	Baixo (***)
Microrigores: (Al, Nb ou Ti)	Al (***)	(#)	Nb, Ti (***)
Temp. aquecim. da placa d/ LQ	Alta (***)	Baixa (*)	Baixa (*)
Esquema LQ	(#)	(#)	(#)
Temp. final LQ	> A3(***)	> A3 (**)	> A3 (*)
Temp. bobinam.	Baixa < 600 C (***)	Alta > 700 C (***)	Alta (*)
Redução a frio	~ 70 %	~ 85 %	~ 90 %
Veloc. Aquec. recozim.	20-50 K/h (***)	20-50 K/s (*)	(#)
Temp. max. de recozimento	~ 720 C	~ 850 C	~ 900 C

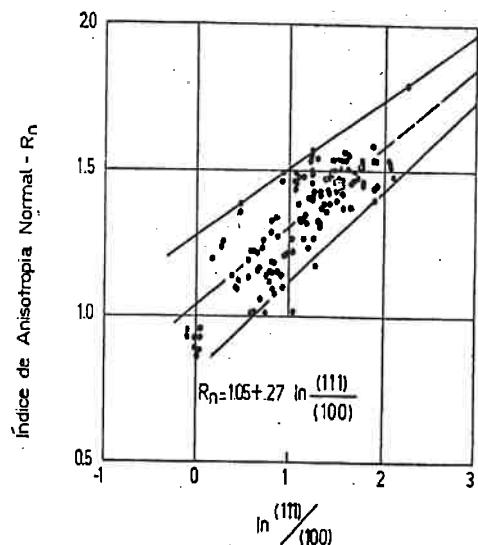
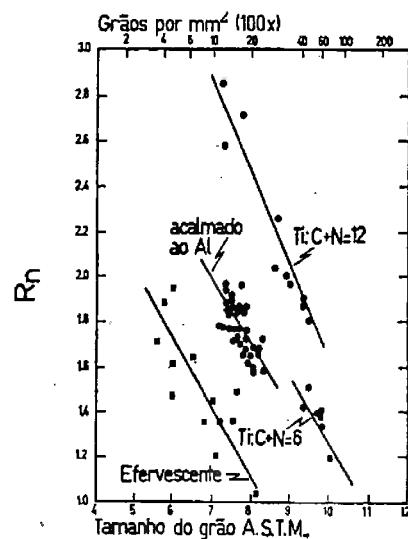
(#) não crítico (*) significativo (**) importante (***) fundamental

Figura 8 - Principais parâmetros a serem controlados nas chapas para estampagem.

3.2 Anisotropia

Sabe-se que para uma chapa na qual a operação de estiramento é preponderante, objetiva-se maximizar n . No caso de ser estampagem profunda, objetiva-se maximizar R e minimizar ΔR ⁽⁵⁾.

É importante destacarmos, também, a boa correlação existente entre o parâmetro R e a textura do tipo {111}<110> (figura 9) e com o tamanho de grão (figura 10).

Figura 9 - Relação entre textura e R Figura 10 - Relação entre tamanho de grão e R

3.3 Curva Limite de Conformação - CLC

A curva limite de conformação - CLC (também conhecida por Diagrama Limite de Conformação – DLC) foi introduzido por Keeler (lado esquerdo do diagrama) ⁽⁶⁾ e por Goodwin (lado direito do diagrama) ⁽⁷⁾ e permite representar de uma maneira abrangente a estampabilidade de uma chapa.

O limite de conformação de uma chapa é definido como sendo o estado em se inicia o afinamento localizado (o qual culmina na fratura) ⁽⁸⁾.

A CLC tem sido empregada largamente como critério na otimização do processo de estampagem e no projeto de matrizes. Estes diagramas indicam ambas as deformações principais ε_1 e ε_2 na instabilidade difusa ou localizada no estado plano de tensão, para diferentes caminhos de deformação. Elas foram construídas de maneira

empírica, procurando descrever o estado das deformações principais, para as quais uma zona de deformação de afinamento intenso ou localizado (instabilidade) se tornasse visível na superfície da chapa⁽⁴⁾.

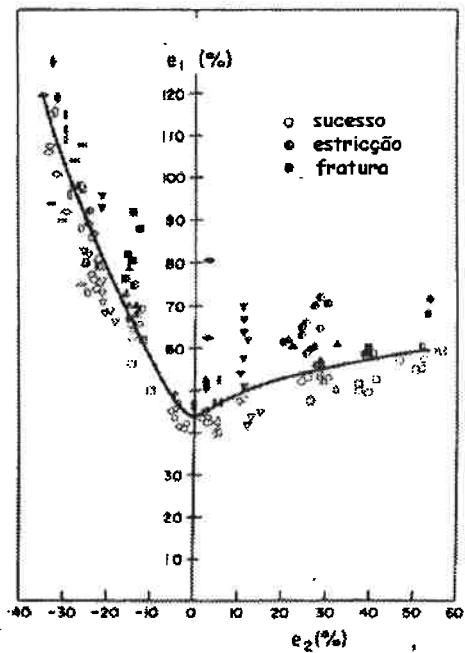


Figura 11- CLC para aço.

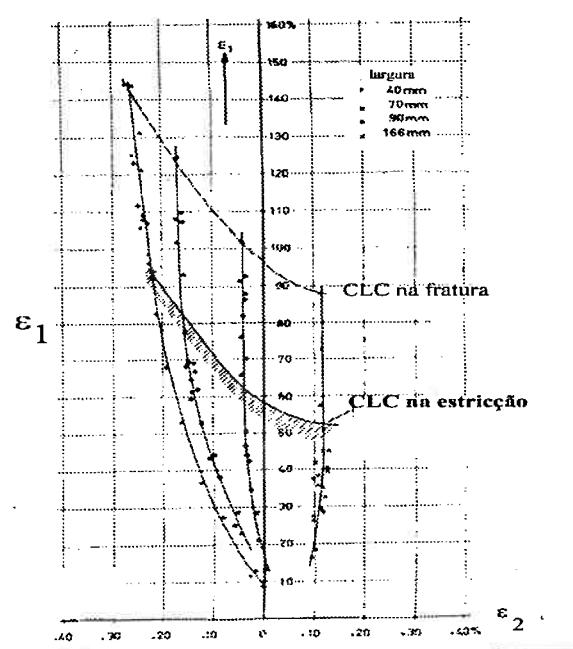


Figura 12- Caminho de deformação.

3.4 Fatores que afetam a posição da CLC

- **n**: Na CLC, no estado plano de deformação ($\varepsilon_2 = 0$) (ou CLC_0), o valor de ε_1 tem um valor igual ao valor de **n**. Se houver redução no valor de **n** (por exemplo, por redução a frio, diminuição do tamanho de grão, aumento dos teores de C, N e Mn, observa-se uma redução acentuada na posição da CLC para deformações biaxiais⁽⁴⁾.

- **R:** Diversos estudos têm demonstrado que o nível da CLC independe do valor de **R**. Para deformações menores negativas, a posição da CLC é insensível ao valor de **R**. No entanto, o valor de **R** afeta no caminho tomado durante a deformação, ou seja, para valores mais elevados de **R** o caminho se torna não-linear e se desloca para pontos mais altos da CLC ⁽⁹⁾. Para deformações menores positivas (deformação biaxial), há discrepância de opiniões: a posição da CLC é diminuída com o aumento do valor de **R**. para a estampagem profunda (ex: cárter do motor), o valor de **R** é uma medida adequada, porém para a deformação biaxial (estiramento), ele não é apropriado ⁽⁴⁾.

- **Espessura e Orientação:** O efeito da espessura , na posição da CLC é ilustrado na figura 13. O aumento da espessura implica em retardar a formação da deformação localizada. O efeito da orientação em relação à direção de laminação, na posição da CLC, tem pequena influência, como podemos observar na figura 14.

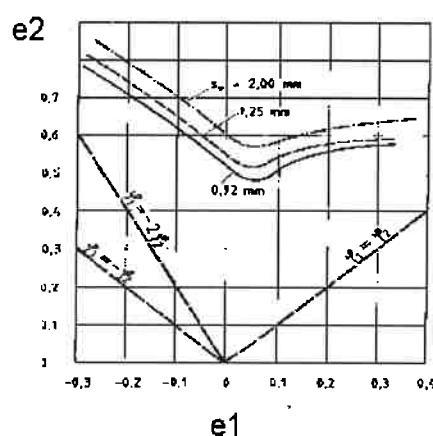


Figura 13 - Efeito da espessura da chapa na posição da CLC.

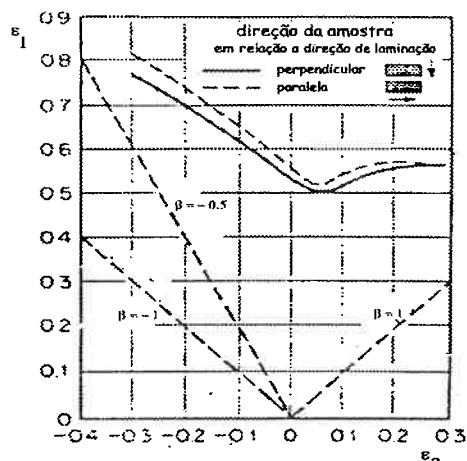


Figura 14 - Efeito da orientação (em relação à direção de laminação), na posição da CLC

- **Atrito:** Graf e Hosford ⁽¹⁰⁾ analisaram o efeito do atrito sobre o caminho da deformação (para dois tipos de aço carbono). A presença do lubrificante atrasa a tendência no surgimento da deformação planar (as curvas se deslocam na direção do eixo ϵ_1 na ausência de lubrificante).

- **Temperatura:** Durante a estampagem de peças, o ferramental pode chegar a 100 ou até 200°C, de maneira localizada. Leighton e Lee observaram que para aços acalmados ao Ar, na operação de estampagem profunda, havia substancial melhoria no processo (medido através da altura do copo estampado, sem defeito), com a diminuição da temperatura do punção. Temperaturas de punção, da ordem de 15°C, (a matriz permanecendo a 20°C), aumentavam a altura estampada em 10% e, com 5°C, aumentava para 40% (com o decréscimo da temperatura, verifica-se o aumento

do LE do aço de 290 para 340 MPa e o alongamento permanece elevado ~ 43%, aumentando, assim , o valor de LDR). Por outro lado, o aumento da temperatura da matriz para 125°C conduzia à diminuição no valor de LDR, da ordem de 10%. ⁽⁴⁾

- Revestimentos: Rees e Power ⁽¹¹⁾, apresentaram resultados em chapas de 0,81mm zincadas a fogo (por imersão) onde verificaram que não havia nenhuma alteração substancial na estampabilidade, embora possa haver uma propensão à solda a frio da camada de Zn com o ferramental. De um modo geral, o problema encontra-se associado à tendência do filme trincar (sob tensão biaxial de tração/compressão), acelerando a separação do filme de seu substrato, formando flocos (“flaking”), esfoliações, ou, ainda, pó de partículas de Zn (“red dust”). Estudo recente ⁽¹²⁾, salientou que nos revestimentos a base de Zn (de elevada pureza), a composição, encruamento, microestrutura, textura cristalográfica, adesão e o modo de deformação (escorregamento ou maiação) do revestimento de Zn, durante a operação de estampagem, têm influência marcante na formação destas trincas (as quais já se iniciam para deformações, que ainda estão dentro da zona segura da CLC da chapa de base). A CLC é, então, controlada pelo “flaking limit”, característico para cada tipo de revestimento.

Chapas revestidas com polímeros, como, por exemplo PMMA-polimetil metacrilato, devido ao seu caráter lubrificante, têm melhorado a estampabilidade do “conjunto”. O abaixamento do coeficiente de atrito, no entanto, tem demandado modificações operacionais, tais como: necessidade de maior força no anti-rugas, necessidade de mossas adicionais, diminuição do raio de curvatura e melhor

polimento do ferramental. Como estes revestimentos são sensíveis à temperatura, deve-se empregar prensas hidráulicas ($v < 30\text{mm./seg}$) e refrigeração do ferramental. O emprego de lubrificantes adicionais depende da compatibilidade com o revestimento polimérico. Dificuldades maiores serão encontradas quando houver a operação de afinamento de parede (“ironing”).⁽⁴⁾

3.5 CLC teórica

Visando simplificar a determinação experimental e teórica da CLC e, auxiliando na utilização ao nível de fábrica, o NADDRG (North American Deed Drawing Research Group), desenvolveu uma equação empírica (equação de Keeler-Brazier), para estimar o valor de CLC_0 , em termos da deformação convencional, dada por :

$$e_0 = (23.3 + 14.2*t) (n/0.21), \quad (1)$$

onde t =espessura da chapa em mm, com $t < 3.1$ mm.

De acordo com este procedimento, obtém-se e_0 e as inclinações são de 45 graus à esquerda de 20 graus à direita.⁽⁴⁾

3.6 Textura

A orientação preferencial pode ser introduzida no material por diversos modos: a deformação plástica é uma delas. Em geral, diz-se que a textura é formada

por componentes. Uma componente é representada por uma orientação cristalina ideal próxima da qual as orientações de um razoável volume do material se agrupam.

As texturas de laminação a frio dos materiais cúbicos de corpo centrado (CCC) se caracterizam por apresentar suas orientações principais localizadas em duas fibras parciais: $\{hkl\}<110>$ e $\{111\}<uvw>$.

A primeira é chamada fibra DL (direção de laminação) por ter várias orientações $<110>$ paralelas a DL. A segunda é chamada de DN por ter várias componentes com as normais dos planos $\{111\}$ paralelas a DN. Essas fibras são mais bem observadas de $fhi2 = 45^\circ$.⁽¹³⁾

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas as folhas de flandres T52 BA e T59 CA LEX para o estudo da estampabilidade.

No quadro a seguir estão descritas as características de processo e algumas propriedades conhecidas:

Tabela 5 – Propriedades e condições de processo para as FFL's

Características	Unidade	Atual T52 BA	Proposta T59 CA LEX
Espessura	mm	0,20	0,20
Largura	mm	879,0	877,0
Recozimento	-	Caixa	Contínuo
Grau da Norma	-	T52	T59
Revestimento Sn	g/m ²	5,6/2,8	5,6/2,8
Rugosidade	Mpol	B1 - Brilhante 14 a 24	S2 - Stone 14 a 24
Resfriamento	-	Água	Ar
Espessura à quente	mm	2,25	2,25
Espessura à frio	mm	0,2	0,2
Grau de Aço	-	2440	4130
Passivação	-	311	311
T Acabamento	°C	894	893
T Embobinamento	°C	630	701
Norma Técnica	-	NBR 6665	CSN - LEX

A composição química de ambas as folhas:

Tabela 6 – Composição química T52 BA:

Elemento	%	Elemento	%
C	0,02	Mo	0
	0,06		0,02
Mn	0,25	Sn	0
	0,35		0,02
P	0	Al	0,02
	0,02		0,07
S	0	N	0,0001
	0,015		0,006
Si	0	Nb	0
	0,02		0
Cu	0	V	0
	0,06		0
Ni	0	Ti	0
	0,04		0
Cr	0,03	B	0
	0,07		0

Tabela 7 – Composição química do T59 CA LEX:

Elemento	%	Elemento	%
C	0,018	Mo	0
	0,024		0
Mn	0,1	Sn	0
	0,2		0,02
P	0	Al	0,02
	0,02		0,06
S	0	N	0,0015
	0,02		0,005
Si	0	Nb	0
	0,02		0,005
Cu	0	V	0
	0,06		0
Ni	0	Ti	0
	0,04		0,005
Cr	0	B	0
	0,04		0,0005

As principais diferenças entre os materiais que afetam suas propriedades mecânicas são a composição química e o tipo de recozimento.

Para avaliação da estampabilidade das folhas de flandres em questão, foram realizados: ensaio de tração, ensaio Nakazima para a CLC ⁽⁴⁾, metalografia e EBSD ⁽¹⁴⁾. Foram confeccionados corpos de prova para o T52 BA e o T59 CA LEX. Retirou-se esses corpos de prova de bobinas já revestidas de estanho, segundo a NBR 6665.

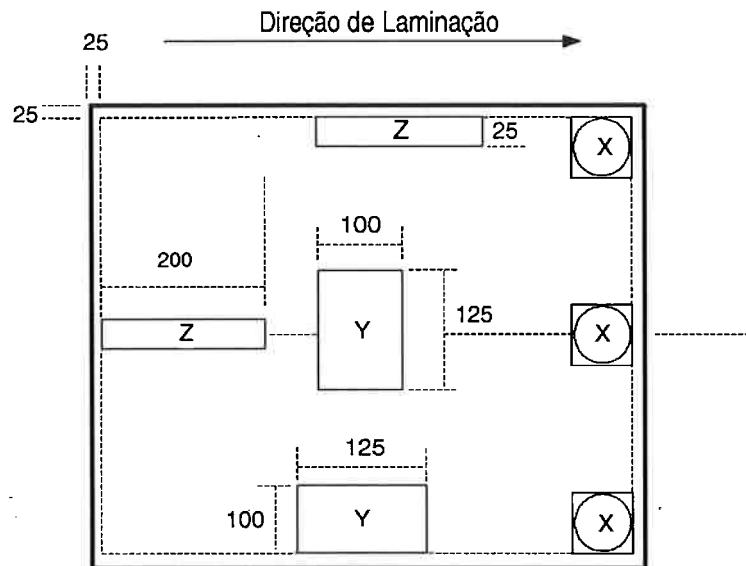


Figura 15 – Posição na bobina em que foram retirados os corpos de prova.

Os corpos de prova foram retirados da região Z da bobina, para todos os ensaios realizados.

4.1 Metalografia

A metalografia foi realizada em um microscópio óptico no centro de pesquisas da CSN. Foram medidos os tamanhos de grão.

4.2 Ensaio de tração

O ensaio foi realizado no centro de pesquisas da CSN em uma máquina Instron 15 T segundo padrão definido pela NBR 6673. Através desse ensaio foram levantados: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), anisotropia plástica (R), anisotropia normal (\bar{R}), anisotropia planar(ΔR), coeficiente de encruamento (n), alongamento (A).



Figura 16 – Máquina de tração Instron 15T

4.3 Ensaio de Curva Limite de Conformação em Chapa Metálica

O Ensaio tem por objetivo determinar de forma comparativa o limite de conformação de materiais metálicos, tendo em vista as diferenças de lubrificação e velocidade de deformação entre o ensaio e o processamento de peças na fábrica.

Através do ensaio, serão levantadas duas CLC's: uma para o T52 BA e outra para o T59 CA LEX.

O ensaio consiste em comprimir um punção de formato elíptico, contra uma série de corpos de prova, impresso com círculos entre um suporte e a matriz.

Punção



Figura 17 - Punção

Existem três critérios a serem considerados para a obtenção da CLC:

- 1) a CLC no limite da deformação do material: são medidas as elipses próximas a estrição localizada, utilizado neste trabalho;

- 2) a CLC na extricção: são medidas as elipses próximas à fratura cuja extricção passa pelo seu centro;
- 3) a CLC na fratura: são medidas as elipses cuja fratura passa pelo seu centro;

Confecção dos corpos de prova

Para cada material foram confeccionados dez corpos de prova de áreas diferentes, sendo seis no formato octogonal e quatro de outra geometria (usinado).



Figura 18 – CP octogonal



Figura 19 - CP usinado

Os corpos de prova foram gradeados através do processo de eletrocorrosão, onde fora impressos círculos de 2,5 mm de diâmetro. Descrição do procedimento:

Após limpados, são colocados sobre os corpos de prova a tela de impressão e em seguida o filtro. Com o eletrólito é umedecido o filtro, ligado o aparelho é submetido uma corrente durante aproximadamente 15 s. Após esse procedimento, os corpos de prova são levados em água corrente, secados e envernizados.



Figura 20 – Gradeamento do CP



Figura 21 – CP gradeado

Após o gradeamento, os corpos de prova foram levados até a máquina Amsler 100t. São colocados no centro da matriz, onde o lubrificante (PVC) é ao corpo de prova. O prensa chapas foi montado então o punção é comprimido até haver estrição do corpo de prova.



Figura 22 – Ensaio Nakazima

Após a conformação, os círculos das regiões deformadas se tornaram elipses. São escolhidos para medição os círculos que sofreram maior deformação próximos à estrição. É escolhido como ε_1 como sendo a dimensão da elipse com maior deformação, e ε_2 a de menor deformação. Foi utilizado para medição um perfilômetro.

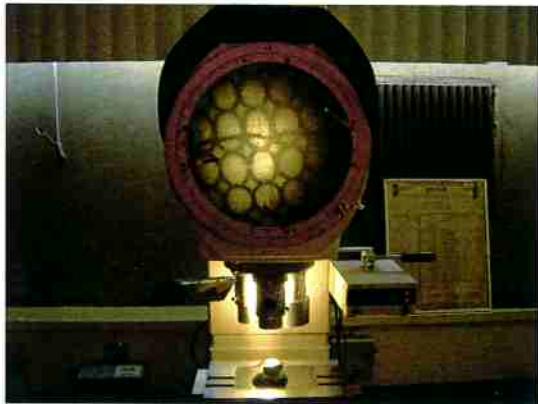


Figura 23 – Perfilômetro

Após todas as medições, foram plotados os pontos no gráfico e assim construiu-se a CLC, através de uma linha de tendência.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesse trabalho serão apresentados em duas partes. A primeira parte são mostrados os resultados referentes às propriedades mecânicas, ou seja, os resultados dos ensaios de tração e da CLC. A segunda parte, os resultados metalográficos, ODF'S, serão expostos, para o confronto entre a textura das folhas de flandres e suas propriedades mecânicas e conformabilidade.

5.1 Resultados do ensaio de tração

Os resultados obtidos pelo ensaio de tração para as folhas de flandres estão nas tabelas a seguir:

Tabela 8 – Parâmetros do T52 BA obtidos pelo ensaio de tração

MATERIAL	T52 BA		
DIREÇÃO SOBRE A DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO	90°	0°	45°
LIMITE DE ESCOAMENTO (MPA)	267	265	263
LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPA)	374	369	361
ALONGAMENTO TOTAL (%)	35,5	30,0	36,7
ALONGAMENTO UNIFORME (%)	21,5	21,5	23,8
ANISOTROPIA PLÁSTICA = R	0,849	0,781	1,274
EXPOENTE DE ENCRUAMENTO = n	0,194	0,194	0,213
ANISOTROPIA NORMAL = R barra	1,044		
ANISOTROPIA PLANAR = DELTA R	-0,459		
EXPOENTE DE ENCRUAMENTO MÉDIO = n barra	0,203		
ALONGAMENTO UNIFORME MÉDIO = A barra	22,640		

Tabela 9 – Parâmetros do T59 CA obtidos pelo ensaio de tração

MATERIAL	T 59 CA		
DIREÇÃO SOBRE A DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO	90°	0°	45°
LIMITE DE ESCOAMENTO (MPA)	444	415	423
LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPA)	483	459	466
ALONGAMENTO TOTAL (%)	14,6	18,6	17,8
ALONGAMENTO UNIFORME (%)	22,3	20,6	20,3
ANISOTROPIA PLÁSTICA = R	1,162	1,062	1,524

EXPOENTE DE ENCRUAMENTO = n	0,201	0,187	0,184
ANISOTROPIA NORMAL = R barra	1,318		
ANISOTROPIA PLANAR = ΔR	-0,412		
EXPOENTE DE ENCRUAMENTO MÉDIO = n barra	0,189		
ALONGAMENTO UNIFORME MÉDIO = A barra	20,91		

5.2 Curva Limite de Conformação

Foram utilizados para a confecção da curva, as medidas máximas e médias das elipses de cada corpo de prova, e traçaram-se duas linhas de tendência para cada material. Também foram feitas medidas das elipses utilizando-se um corpo de prova de cada material, através de um microscópio óptico do laboratório de metalografia do Departamento de Metalurgia e de Materiais da Escola Politécnica e um capilar. As espessuras nas elipses escolhidas para medição dos épsilons foram medidas para confronto com a calculada a partir das dimensões das elipses medidas:

Tabela 10 – Medidas Poli para validação da CLC – T52 BA

ϵ long	ϵ trans	Espessura Calculada (mm)	Espessura Medida (mm)	Erro
0,221	0,056	0,152	0,168	10%
0,252	0,040	0,149	0,165	9%
0,269	0,041	0,147	0,162	9%
0,307	0,040	0,141	0,153	8%
0,287	0,030	0,146	0,148	2%
0,247	0,031	0,152	0,152	0%
0,241	0,035	0,152	0,158	4%
0,211	0,055	0,153	0,165	7%

Tabela 11 – Medidas Poli para validação da CLC T59 CA

ϵ long	ϵ trans	Espessura Calculada (mm)	Espessura Medida (mm)	Erro
0,072	0,049	0,177	0,192	8%
0,072	0,049	0,177	0,181	2%
0,095	0,040	0,175	0,185	6%
0,213	0,037	0,156	0,165	6%
0,161	0,004	0,170	0,161	-5%
0,107	0,012	0,178	0,179	1%
0,084	0,018	0,181	0,185	2%
0,084	0,037	0,177	0,198	10%

Assim, foram plotados no gráfico os pontos obtidos “Polí”:

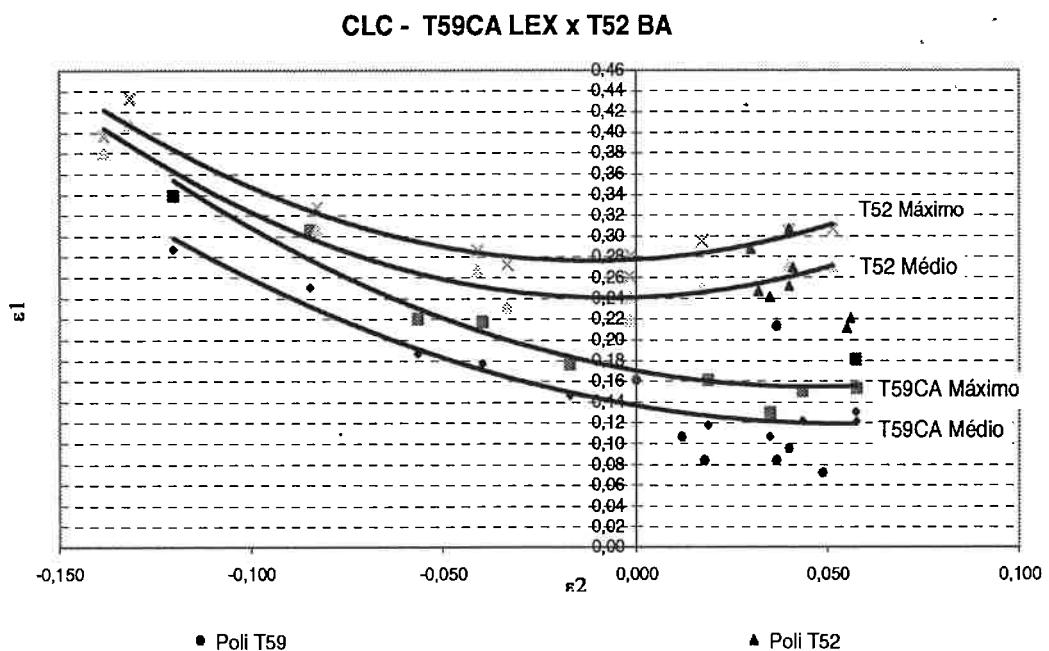


Figura 24 – Curva Limite de Contormação para os dois materiais

Foi calculado a CLC_0 para cada matéria através da equação (1)

Tabela 12 - CLC_0

Material	T52 BA	T59 LEX
espessura (mm)	0,20	0,20
n	0,203	0,189
e_0	0,25	0,23

Assim, plotamos no gráfico a partir dos dados calculado as curvas de tendência segundo procedimento da NADDRG ⁽⁴⁾.

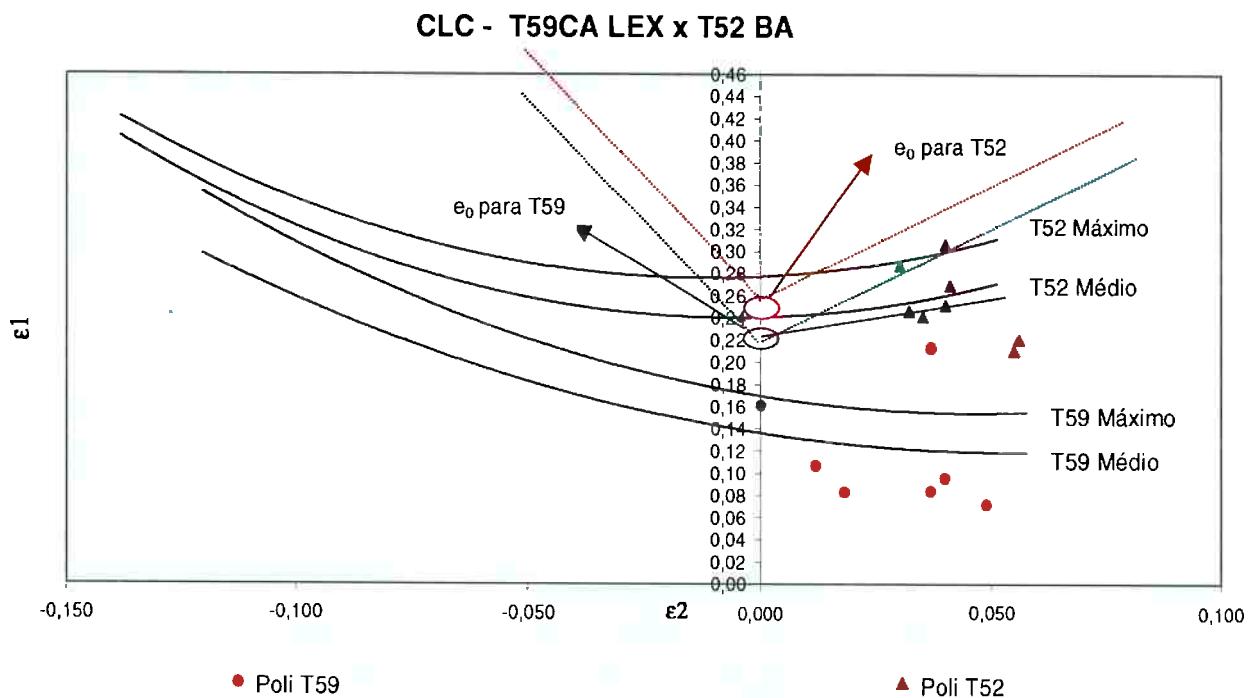


Figura 25 – CLC experimental X CLC teórica

5.3 Ensaio Metalográfico

As amostras T52 apresentaram microestrutura formada por grãos ferríticos poligonais, associados a bastante cementita globular fina dispostas em alinhamentos.

As amostras T59 apresentaram microestrutura formada por grãos ferríticos poligonais, associados a bastante cementita grosseira dispostas em alinhamentos fragmentados.

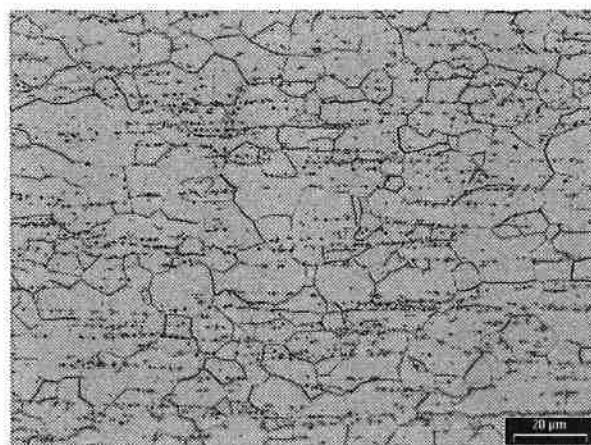


Figura 26 – Microestrutura T52 BA – 500X

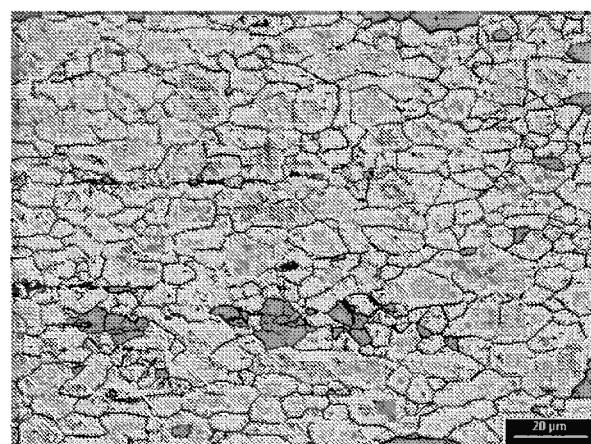


Figura 27 – Microestrutura T59 CA - 500 X

Também foram medidos os tamanhos de grão médios de cada material, segundo ASTM E 112:

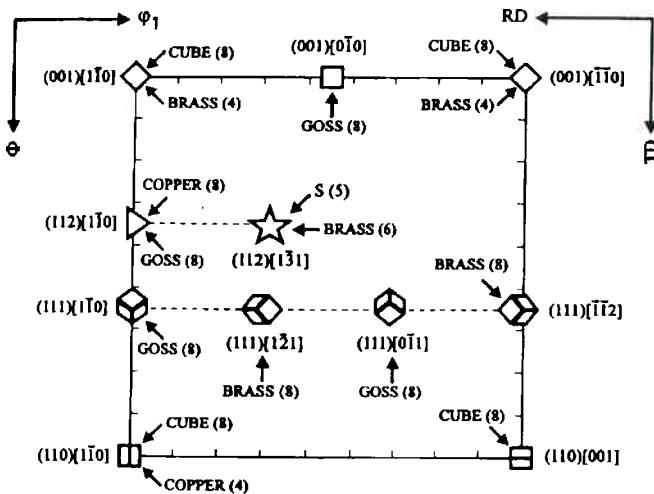
Tabela 13 – Tamanho de grão médio

AMOSTRA	TGF
T52 (B)	11,0
T52 (C)	11,0
T52 (B1)	11,0
T59 (B)	11,5
T59 (C)	11,5
T59 (B1)	11,5

5.4 Textura

Através do ensaio realizado no microscópio eletrônico de varredura (MEV), obteve-se as FDO's.

Os resultados são apresentados no espaço Euleriano, com os ângulos φ_1 , teta e φ_2 como representado na figura 27. As fibras α (110//DL) e fibra γ ({111}//DN) são as principais, pois representam de melhor maneira a evolução da textura nos diferentes estágios de fabricação até a peça estampada ⁽¹⁵⁾.



Selected bcc product orientations in $\phi_2=45^\circ$ section (Bunge notation), showing fcc parent orientations from which they originate

Figura 28 – Espaço Euleriano

As fig. 29 e fig. 30 representam as ODF's completas para os dois materiais, sem estampar.

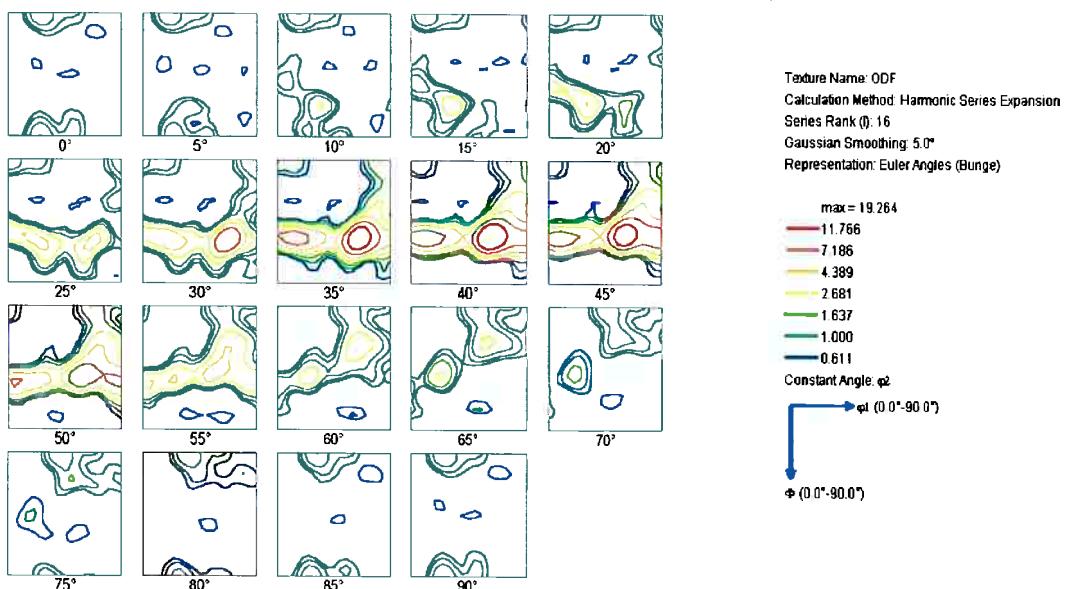


Figura 29 – ODF T52 BA sem estampar

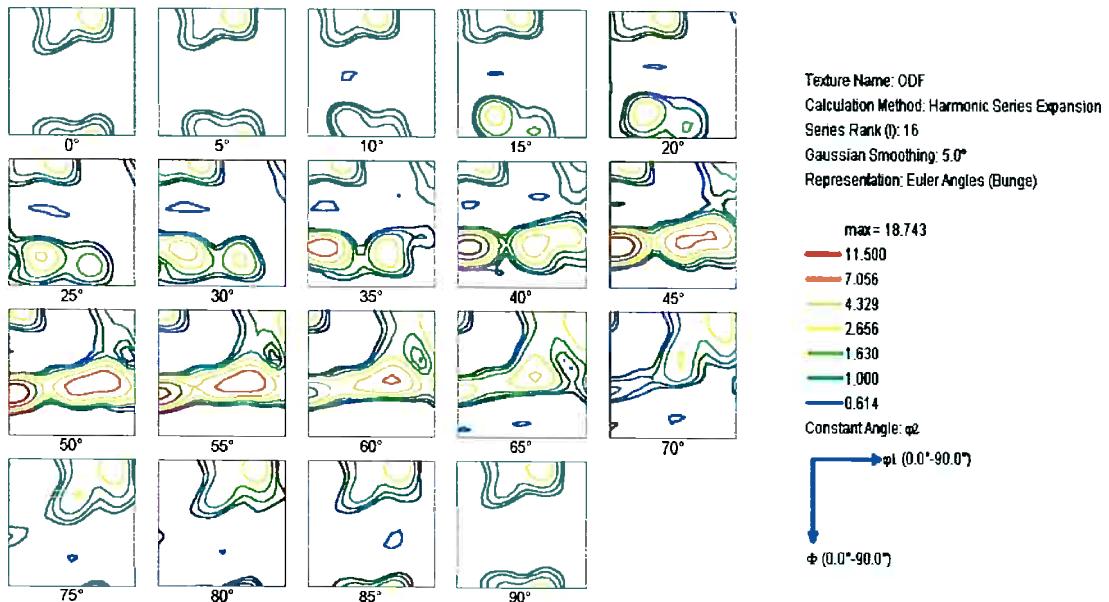


Figura 30 – ODF T59 CA sem estampar

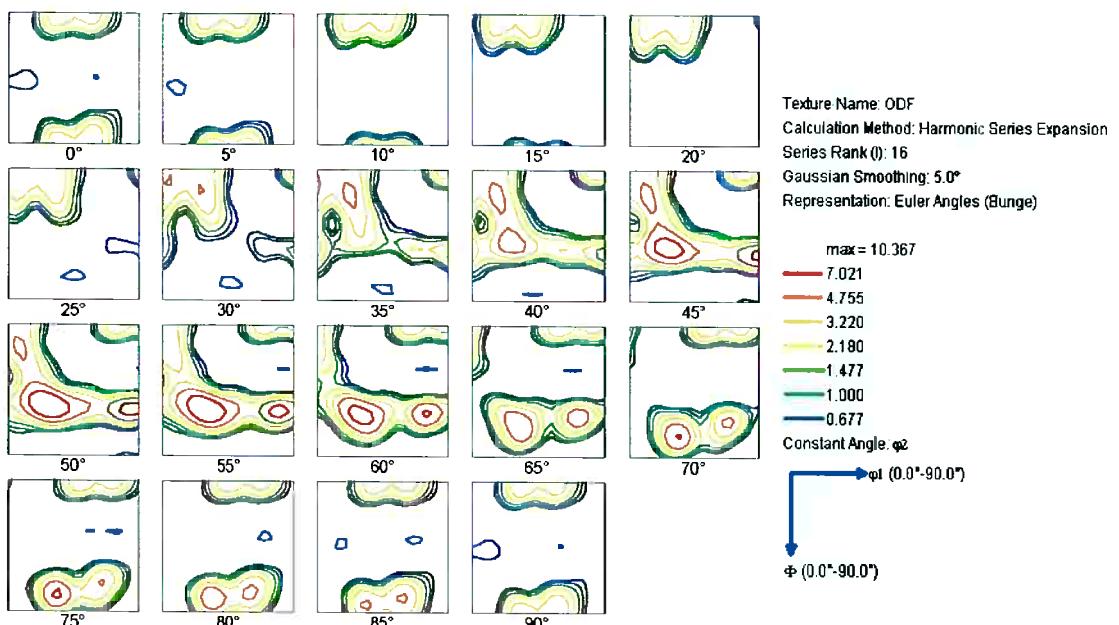


Figura 31 – ODF T59 CA após estampagem

Os resultados obtidos foram os mapas de grãos para os dois materiais:



Figura 32 – Mapa de Grãos T52 BA

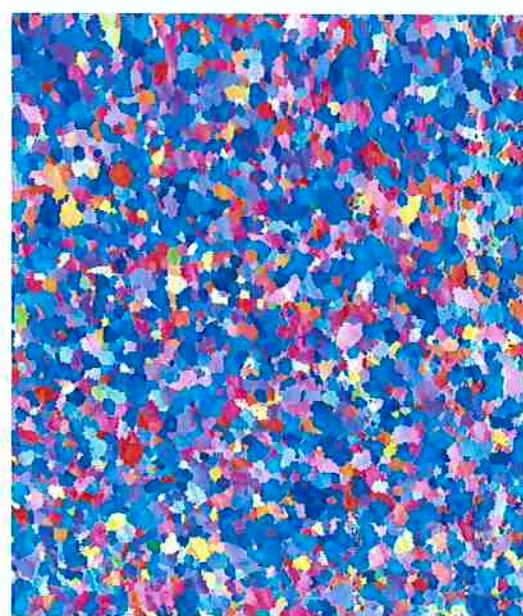


Figura 33 – Mapa de Grão T59 CA

Podemos observar a presença acentuada da fibra gama em 45°, sendo no T52 BA levemente mais intensa do que no T59 CA.

No T59 CA após estampagem, percebe-se a deteriorização da textura global, com diminuição de fibra γ e aparecimento de fibra α .

Ao contrário da metalografia óptica, por este ensaio verificamos com melhor precisão a diferença de tamanho de grão entre os dois materiais, sendo o T52 BA o de maior tamanho de grão.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

Tabela 14 – Resumo das propriedades mecânicas e anisotropia

Mat	T52	T59
LE	↓	↑
Al	↑	↓
R	↓	↑
n	→	→
Profundidade do Estampo.	↑	↓

- 1) Observa-se através dos parâmetros de propriedades mecânicas e de anisotropia, como n , alongamento e a profundidade do estampo, a melhor conformabilidade pertence ao T52 BA;
- 2) A CLC levantada demonstra este fato. A curva obtida através dos pontos experimentais está próxima da curva levantada a partir de CLC_0 calculada através da equação (1) do procedimento da NADDRG. Nesta equação, verifica-

se que os valores de e_0 são diretamente proporcionais ao valor de n e à espessura do material. Como os materiais possuem mesma espessura, o fator determinante na altura da CLC é o valor de n , maior no T52 BA.

- 3) Textura: ao observar os ODF's dos dois materiais, verifica-se que a intensidade de fibra γ no T52 BA assemelha-se ao T59 CA, não apresentando variação significativa. Porém ao analisar os mapas de grãos, percebe-se o maior tamanho de grão sendo do T52, e também ao analisarmos uma região de mesmas dimensões, verifica-se visualmente com nitidez, a maior proporção de grão azulados, ou seja, grãos com orientações favoráveis à conformação. No T59 CA após estampagem, observa-se através do ODF, a deteriorização da textura global, com surgimento de fibra α .

7. SUGESTÕES

Dentro do objetivo do trabalho, ou seja, através do estudo da estampabilidade da folha utilizada atualmente (recozimento em caixa) para a confecção do corpo da lata expandida para atomatados, e de uma proposta de folha já existente no mercado (recozimento contínuo) para diminuir as variações de propriedades mecânicas e anisotrópicas da atual folha, oriundas do recozimento em caixa, e levando em consideração os resultados e conclusões obtidas, seguem algumas sugestões para solução:

1) Melhorar a conformabilidade do T59 CA:

- i. Alteração da composição química;
- ii. Grau de deformação no Laminador de encruamento: quanto menor a redução no passe, menor é a “perda” de *n*.
- iii. Maior controle de textura: verificar a evolução da textura durante o processo de fabricação para obter maiores controles para indução da mesma;

2) Fabricar T52 BA via recozimento contínuo:

- i. Alteração do ciclo térmico do forno de RC: introduzir resfriamento rápido após etapa de encharque, isto garante ao material um alto grau de super saturação de carbono na rede ferrítica, para que durante o super-envelhecimento, ele se precipite em carbonetos

discretos, assim adequando as propriedades mecânicas e anisotrópicas ao material de durezas menores (T52, T57, por exemplo) ⁽¹⁶⁾;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Brasil Pack Trends 2005: Embalagem, Distribuição e Consumo. CETEA, 2000.
- 2 - K. Koyama, S. Urayoshi, T. Tanaka, R. Shoji, Y. Tsuzuki and H. Matsuda, "Development of Low-Earing Can Body Stock Using the 4-stand hot finishing Mill at the Fukui Works"(Furukawa Review, n°18,1999).
- 3 – Campissi, P.R. ; Cabral, C. A O. ; Viana, C.S.C.; Sá, A.P.; Pinheiro, T.N.; "DESENVOLVIMENTO DA FOLHA METÁLICA VIA RECOZIMENTO CONTÍNUO PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS METÁLICAS EXPANDIDA" , 41º Seminário de Laminado. ABM 2004.
- 4 - Plaut, R.L.; Estampabilidade de chapas: Ensaios e Aplicações. II Workshop de textura e Relações de Orientação. IPEN, 2003.
- 5 - W. Zimnik, K. Freier, S. Hussy, H-J. Bunge – Steel Research, v.64, n.8/9, 1993, pp. 420-424.
- 6 - S. P. Keeler - Sheet Met. Ind., v.45, 1969, pp. 633-640.
- 7 - G. M. Goodwin - Metall. Ital., v.60, 1968, pp. 767-771.
- 8 - J. H. Schmitt, J. M. Jalinier - Acta Met. , v.38, 1982, pp. 1789-1809.
- 9 - V.M.Nandedkar,K. Narasimhan-J. Mat.Proc.Tech, v.89-90, 1999, pp. 24-29
- 10 - A. F. Graf, W.F. Hosford - Met.Trans., v. 24A, 1993, pp. 2497-2501.
- 11 - D.W.Rees, R.K. Power- J. Mat. Proc. Tech., v. 45, 1994, pp. 571-575.
- 12 - B. V. Cooman, K. DeWitt, C. M. Wichern - steel research, v.73, n.11, 2002, pp. 498-507

- 13 – VIANA, C.S.; Paula, AS.; “Texturas de deformação”; II Workshop de textura e Relações de Orientação. IPEN, 2003.
- 14 – Branco, V.P.V.; “Análise crítica do setor de resfriamento de chapas laminadas a quente do aço LN28”.
- 15 – Plaut, R.L.; “Evolução da textura em chapas de aço IF laminadas a frio e estampadas”; Seminário de laminação; 2003.
- 16 – Pinto, M.P; Lourenço, M.L; Marinho, M.; Menezes, AM. ; “Produção de folhas metálicas T3 via recozimento contínuo”; Setec; 1989.