

MARCELO DALL'ONDER MICHELON

ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LATAS DE BEBIDAS COM  
LIGA DE ALUMÍNIO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre  
2004



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LATAS DE BEBIDAS COM LIGA DE ALUMÍNIO**

**MARCELO DALL'ONDER MICHELON**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-  
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Flávio José Lorini  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. DARCI BARNECH CAMPANI  
UFRGS / DEMEC

Prof. MSc. HERALDO AMORIM  
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO  
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre  
2004

de modo especial, à pessoa do *Eng. Sergio Eglan Silveira Netto* que tornou este trabalho possível de ser realizado e prestou toda a ajuda necessária, se mostrando mais do que um profissional, e sim, um amigo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* que me disponibilizou estudo público gratuito e de qualidade inquestionável durante estes quatro anos e meio de curso de Engenharia Mecânica.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer* que sempre esteve presente e nunca negou qualquer ajuda solicitada.

aos meus pais *Tarcísio Vasco Michelin e Ermelinda Maria Dall'Onder Michelin*, que apesar das dificuldades e ausências necessárias, sempre foram meus amigos e incentivadores de meus estudos.

ao colega de aula *Luis Fernando Folle* pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos e na preparação dos corpos de prova necessários.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- LdTM/UFRGS – Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- LAFUN/UFRGS – Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- LS&TC/UFRGS – Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Se em vez de enchermos o bolso,  
enchermos a cabeça,  
não seremos roubados.

*Autor desconhecido*

MICHELON, M. D. O. **Análise do Processo de Fabricação de Latas de Bebidas com Liga de Alumínio**. 2004. 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

## **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo avaliar o processo de fabricação do corpo de latas de bebidas de alumínio. É dado enfoque para a caracterização mecânica da matéria-prima através do ensaio de tração. Busca-se a caracterização da conformabilidade mecânica do material através da determinação da curva de escoamento, do grau de encruamento e da anisotropia. A estampabilidade, o grau de esforço da matéria-prima acumulado ao longo do processo e a análise dos esforços nas principais etapas de produção da lata (uma etapa de estampagem, uma de reestampagem e três de *ironing*) também são importantes abordagens deste trabalho. Conclui-se que o grau de encruamento é um dado importante no processo e que através da avaliação do grau de esforço, nas etapas de *ironing*, pode-se estabelecer novos parâmetros de fabricação.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Ironing*, AA3104-H19, Latas de bebidas, Liga de Alumínio, Curva Limite de Conformação, Ensaio de Tração, Ensaio Nakazima

MICHELON, M. D. O. **Fabrication Process Analysis of Aluminum Beverage Cans**. 2004. 27f. Monograph (Conclusion Work for Mechanical Engineer course) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

### **ABSTRACT**

This work has the objective of appraising the fabrication process of aluminum beverage cans. The focus is mechanical characterization of material through tensile test. There is a searching for mechanical forming characterization through construction of yielding curve, work hardening exponent and anisotropy. The stampability, the effort degree for material during the process and the effort analysis at the principal steps for can production (cup, redraw and three ironings) are also important for this work. The conclusion is that the work hardening exponent is an important factor in the process, and through avaluation of effort degree, at the three ironings, could be establish new fabrication parameters.

**KEYWORDS:** Ironing, AA3104-H19, Beverage cans, Aluminum alloy, Forming Limit Diagram, Tensile test, Nakazima's test

## SUMÁRIO

ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	12
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	12
4.1 Corpos de Prova	12
4.2 Metodologia de Ensaio	13
5. RESULTADOS E ANÁLISES	14
5.1 Tensões e Módulo de Young	14
5.2 Grau de Encruamento e Coeficiente de Resistência	15
5.3 Índice de Anisotropia	17
5.4 Curva Limite de Conformação	18
5.5 Força de Estampagem	18
5.5.1 Primeira estampagem	18
5.5.2 Reestampagem	20
5.6 Força de Trefilação ( <i>Ironing</i> )	20
6. CONCLUSÕES	24
7. REFERÊNCIAS	25
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	25
ANEXO - Propriedades da liga AA3104-H19	27

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o processo de fabricação do corpo de latas de bebidas de alumínio. É dado enfoque para a caracterização mecânica da matéria-prima através do ensaio de tração. Busca-se a caracterização da conformabilidade mecânica do material através da determinação da curva de escoamento, do grau de encruamento e da anisotropia. A estampabilidade, o grau de esforço da matéria-prima acumulado ao longo do processo e a análise dos esforços nas principais etapas de produção da lata (uma etapa de estampagem, uma de reestampagem e três de *ironing*) também são importantes abordagens deste trabalho.

O tema proposto é de grande importância para o desenvolvimento do conhecimento profissional. As caracterizações do material e das forças envolvidas no processo são de grande valia para o pleno conhecimento do processo atual de alta produção de latas de alumínio para bebidas.

Através da caracterização mecânica do material avalia-se a possibilidade de redução de espessura do produto final acarretando em diminuição de volume da lata e conseqüentemente de custos, maior produção e maior controle, implicando em melhorias de ordem econômica e produtiva.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de fabricação de bobinas para produção de latas de alumínio inicia-se pelo encaminhamento de matéria-prima “bruta” para um forno de fusão circular, onde é feito o acerto de composição química. O próximo passo é o forno de tratamento, que é um processo fundamental para o controle da porosidade no metal. Na etapa seguinte é realizado o lingotamento seccionado. As placas resultantes são encaminhadas para a faceadeira onde há remoção da camada superficial de óxidos e após são colocadas em fornos poço. Toda esta preparação é indispensável para os processos de laminação a quente que são seguidos pelos a frio, restando assim, somente o processo de acabamento da largura e o enrolamento das bobinas.

A produção da lata segue o organograma apresentado na figura 2.1. A bobina passa pelo desenrolador onde sofre um tratamento químico para limpeza de óleos aplicados pelo fornecedor e é aplicada uma nova lubrificação, sendo conduzida a primeira prensa para corte dos discos e estampagem dos copos. Após esta etapa os copos são conduzidos por esteiras até a segunda prensa para a segunda etapa de estampagem e ao processo de *ironing*.

Na seqüência a lata é conduzida as demais partes do processo que são o corte da aba excedente, lavagem de desengraxe, pintura, aplicação de verniz externo, cura, verniz interno, nova cura, conformação do gargalo, inspeção, paletização e armazenagem.



Figura 2.1 – Diagrama de bloco do processo. (Fonte: PENTEADO, 2002).

*Ironing* é um processo que se assemelha com a trefilação de tubos (ver figura 5.7), mas neste trabalho adota-se o termo em inglês por não possuir uma tradução correta para o português e por ser assim conhecido no meio científico.

O grau de encruamento ( $n$ ) é uma propriedade mecânica que define a capacidade do material deformar-se de modo homogêneo. Quanto maior o  $n$ , maior a capacidade de o material deformar-se por estiramento.

A curva de tensão vs. deformação verdadeira representa o comportamento geral do material na zona de deformação plástica e é uma maneira viável para encontrar o grau de encruamento deste. Também é importante para determinar qual a tensão máxima admissível para que o material não apresente rupturas, onde o material já não se permite deformar plasticamente. A fabricação de latas acontece a partir da região de deformação plástica, devido ao nível elevado de deformações impostas.

Quando se trata do alumínio, em contrapartida a grande parte dos materiais ferrosos, não há uma região bem definida de transição elasto-plástica. É comum nestes casos se utilizar a tensão de escoamento traçando uma reta com inclinação paralela a reta da zona elástica do gráfico e distanciando esta ao valor correspondente à 0,2% de deformação. Ver tabela 5.1.

Já a anisotropia do material ( $r$ ) dá uma idéia sobre a texturização dos materiais, informa a influência da orientação dos grãos numa chapa metálica laminada. Dependendo de como se posicionam os grãos há uma maior ou menor resistência à deformação plástica da chapa. Uma quantificação desses fenômenos, na prática técnica, é dado pelo fator de anisotropia, que usualmente é obtido num ensaio de tração. Esta relação nos informa o quanto de um determinado material, durante a conformação, escoar da largura e da espessura e vai ao comprimento. Um valor de  $r = 1$  significa um comportamento isotrópico do material. Quando temos  $r \neq 1$ , há fenômenos de anisotropia. No embutimento profundos valores de  $r > 1$  são desejados, pois os maiores escoam na largura, não modificando a espessura. Quanto maior é a diferença entre os valores de  $r$  maior é a tendência de defeitos. Um conhecimento dos planos de escorregamento fornece informações mais profundas dos modelos de análise de textura.

Quanto a Curva Limite de Conformação (CLC), é uma ferramenta que quantifica a estampabilidade do material. É utilizada para avaliar a possibilidade de fabricação de uma peça estampada ou para fazer análise de falhas. O gráfico da figura 2.2 é traçado considerando a deformação principal  $\varphi_1$  (deformação no comprimento do corpo de prova, conforme equação 3) pela deformação principal  $\varphi_2$  (que é deformação na largura do corpo de prova, também calculada pela equação 3 devidamente corrigida). Tudo o que está abaixo da curva de ruptura pode ser realizado, e o que estiver acima provavelmente não é possível de conformar.

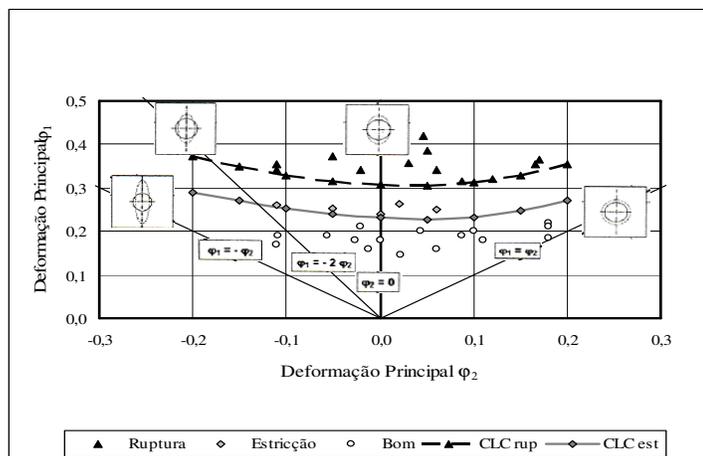


Figura 2.2 – Curva Limite de Conformação para alumínio aeronáutico 6061-O com os tipos de deformações possíveis. (Fonte: SILVEIRA NETTO, 2003).

As retas representadas na figura 2.2 mostram os tipos de deformações possíveis e suas respectivas nomenclaturas, conforme tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das deformações em Curva Limite de Conformação.

Relação de deformação	Classificação
$\varphi_1 = -\varphi_2$	Embutimento profundo
$\varphi_1 = -2\varphi_2$	Tração uniaxial
$\varphi_2 = 0$	Estado plano de tensões
$\varphi_1 = \varphi_2$	Estiramento biaxial

### 3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo inicial deste trabalho é caracterizar o processo para se conhecer quais os principais parâmetros que interferem neste. Com as modificações destas propriedades será possível uma otimização do processo de fabricação.

O conhecimento das propriedades mecânicas convencionais (tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento) não é o suficiente para caracterizar um processo. Para a técnica de conformação, onde se trabalha na zona plástica de deformação, é necessário um conhecimento mecânico mais amplo do material utilizado, isto é, saber informações sobre a anisotropia, o encruamento, o limite de estampagem e a capacidade de se permitir deformar considerando as particularidades da fabricação da lata (estampagem, reestampagem e *ironing*).

### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.1 CORPOS DE PROVA

Para realização do ensaio de tração extraíram-se várias amostras, conforme a norma DIN EN 10002 (1991). Para caracterização da anisotropia do material optou-se por diferenciar os corpos de prova de acordo com a direção de laminação, ver figura 4.1. Devido à diferença de espessura da chapa, consequência natural do processo de laminação, fez-se ensaios com corpos de prova extraídos à direita, no meio e à esquerda da chapa.

Por causa do processo de produção da matéria prima há diferenças metalúrgicas e mecânicas ao longo da bobina, então, para uma caracterização mais completa, extraíram-se corpos de prova no início, no meio e no fim. Cada resultado apresentado tem um mínimo de três ensaios válidos.

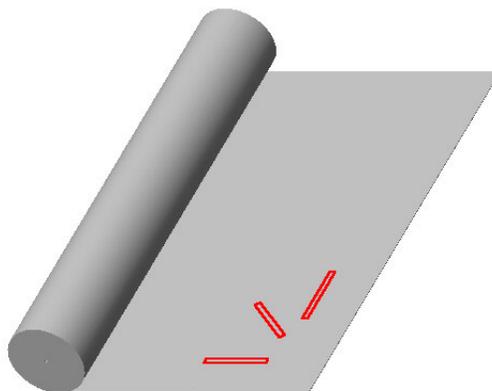


Figura 4.1 – Esquema de corte dos corpos de prova para ensaio de tração.

Para a caracterização da estampabilidade foi determinada a Curva Limite de Conformação (CLC) de acordo com a norma ISO 12004 (1997), e a metodologia utilizada foi a proposta por Nakazima, de acordo com Silveira Netto et al. (2003).

Por ser uma estimativa de conformabilidade do material, a CLC foi determinada para o início, meio e fim de uma bobina, não havendo necessidade de confeccionar curvas a 0, 45 e 90° do sentido de laminação.

## 4.2 METODOLOGIA DE ENSAIO

Para a medição da força através do ensaio de tração foi utilizado uma máquina universal de ensaios marca KRATOS, com capacidade de 100kN, presente no LdTM. A razão entre a força e a área instantânea é a tensão de escoamento  $k_f$ , conforme equação 1:

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde  $k_f$  [MPa] é a tensão de escoamento,  $F$  [N] é a força de tração e  $A$  [mm<sup>2</sup>] é a área instantânea da secção transversal do corpo de prova.

A coleta dos dados provindos da máquina de tração e dos sensores de deslocamento foi realizada com o *Spider*, que é um aparelho específico para aquisição de dados, sendo que estes foram posteriormente tratados no programa *Microsoft Excel*. Os dados coletados foram validados utilizando-se o critério de Chauvenet, de acordo com Schneider (2003).

Para a medição do deslocamento longitudinal, se utilizou o sensor INSTRON 2630-100 série *Clip-on Extensometers*, com precisão de  $\pm 0,06$  FS. Ver figura 4.2.

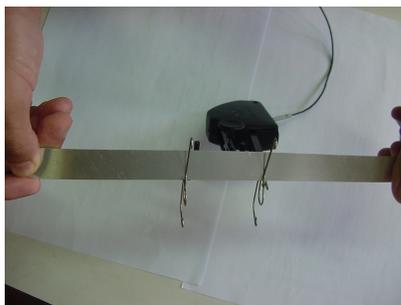


Figura 4.2 – Sensor de deslocamento longitudinal INSTRON 2630-100.

Este sensor INSTRON 2630-100 mede a variação do comprimento inicial em um ensaio de tração e conhecendo este, se aplica a equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde  $\Delta l$  [mm] é variação do comprimento inicial  $l_0$  [mm] e  $\varepsilon$  [-] é a deformação relativa.

Utilizando  $l_0$  igual a 50mm (comprimento útil) e os valores medidos, se encontra  $\varepsilon$ . Tendo o seu valor se pode encontrar a deformação verdadeira  $\phi$ [-], na direção do comprimento, que é utilizada para construção da curva de escoamento, conforme se vê na equação 3.

$$\varphi_l = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

Durante o ensaio para determinação da curva de escoamento, se utilizou o sensor de deslocamento transversal INSTRON 2640-010 de tipo estático com erro de  $\pm 0,06$  FS, ver figura 4.3. Conforme a norma SEW 1126 (1984), através dos resultados obtidos com este sensor, chega-se a deformação  $\varphi_b$  [-], que é a deformação na largura de cada corpo de prova e conseqüentemente no valor de anisotropia  $r$ . Ver equação 4.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_b + \varphi_l} \quad (4)$$

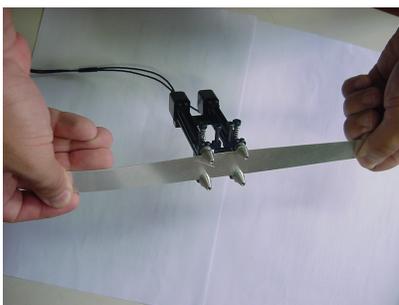


Figura 4.3 – Sensor de deslocamento transversal INSTRON 2640-010 tipo estático.

O ensaio de Nakazima foi realizado numa prensa de marca DANPRESSE com capacidade máxima de 200kN encontrada no LdTM. Para leitura das deformações fez-se a gravação eletroquímica nos corpos de prova e, após o ensaio, fez-se uso de uma fita flexível com escala logarítmica, que serve para medir as deformações encontradas nos corpos de prova.

Para realização dos ensaios foram utilizadas três bobinas de AA3104-H19 que são identificadas como: bobina A, bobina B e bobina C. Todos os resultados da bobina A, apresentados a seguir, foram obtidos através de corpos de prova retirados do meio do comprimento da bobina e no centro da largura.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 TENSÕES E MÓDULO DE YOUNG

Nas tabelas 5.1 a 5.3 são apresentados os valores de tensão de escoamento, tensão máxima e módulo de Young encontrados para cada direção e é feito, também, a média ponderada destes valores. Para cada valor médio encontrado foi calculado o desvio padrão. O erro de amostragem é calculado considerando  $t$  de Student, um número de amostras três e a probabilidade de 95% de confiança, conforme Schneider (2003).

Tabela 5.1 – Tensão de Escoamento medida com 0,2% de deformação. Material: bobina A.

	MPa
$\sigma_{e0,2\_0^\circ}$	250 $\pm$ 6
$\sigma_{e0,2\_45^\circ}$	244 $\pm$ 5
$\sigma_{e0,2\_90^\circ}$	259 $\pm$ 6
$\sigma_{e0,2}$	250 $\pm$ 6
Erro da amostragem	15

Tabela 5.2 – Tensão Máxima. Material: bobina A.

	MPa
$\sigma_{m\_0^\circ}$	284±15,1
$\sigma_{m\_45^\circ}$	262±13,9
$\sigma_{m\_90^\circ}$	298±15,9
$\sigma_m$	281±15,0
Erro da amostragem	37

Tabela 5.3 – Módulo de Young. Material: bobina A.

	GPa
$E_{0^\circ}$	70,39±1,7
$E_{45^\circ}$	72,25±1,8
$E_{90^\circ}$	75,49±1,3
$E_m$	72,71±1,2
Erro da amostragem	3,3

Analisando os resultados da tensão de escoamento, tensão máxima e módulo de Young (ou módulo de elasticidade) em relação às propriedades da liga citada em anexo, pode-se ver que os valores encontrados são coerentes e não se afastam muito, já que estes são sempre dados médios.

Através da equação 1, é possível construir a curva tensão vs. deformação verdadeira para as direções a 0, 45 e 90° da direção de laminação, faz-se uma média entre as propriedades e plota-se a curva final teórica, conforme a figura 5.1.

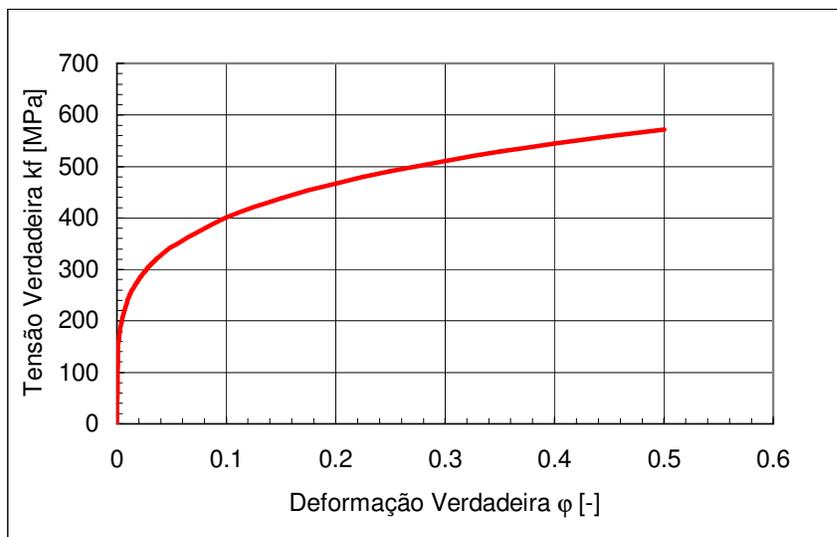


Figura 5.1 – Tensão vs. Deformação Verdadeira. Material: bobina A.

## 5.2 GRAU DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA

A curva da figura 5.1 é estimada matematicamente como:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (5)$$

onde  $n$  [-] é o grau de encruamento e  $C$  [MPa] é o coeficiente de resistência.

Através da norma SEW 1125 (1984), vê-se que uma maneira prática de obter o grau de encruamento é transpor a curva  $k_f$  vs.  $\varphi$  para escala logarítmica onde na maioria dos casos surge uma reta cuja inclinação é o  $n$ , ver figura 5.2. Tem-se o valor de  $C$  como sendo o valor de  $k_f$  ao prolongar esta reta até o valor da deformação verdadeira  $\varphi$  igual a 1.

Nas tabelas 5.4 e 5.5 são apresentadas estas constantes calculadas para cada uma das direções e o valor médio que é utilizado na equação 5.

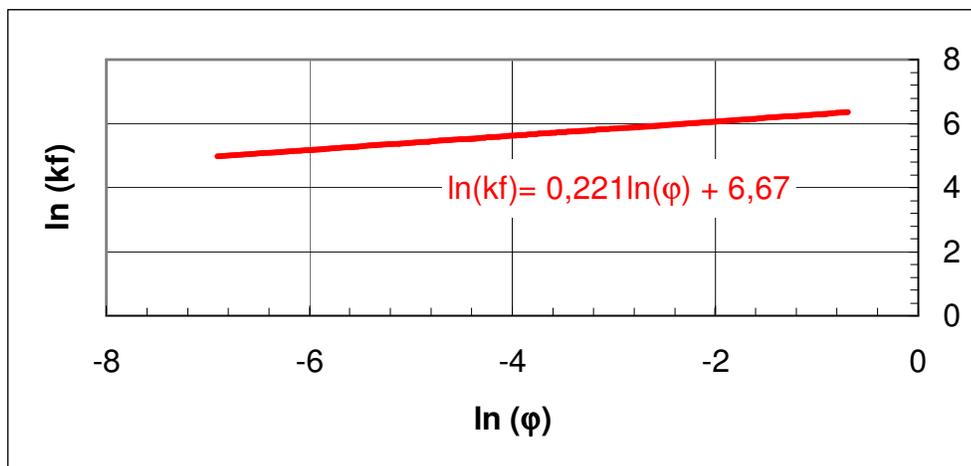


Figura 5.2 – Curva Tensão vs. Deformação Verdadeira (figura 5.1) em escala logarítmica. Material: bobina A.

Tabela 5.4 – Grau de encruamento. Material: bobina A.

$n_{0^\circ}$	0,210±0,005
$n_{45^\circ}$	0,224±0,006
$n_{90^\circ}$	0,227±0,006
$n$	0,221±0,006
Erro da amostragem	0,019

Tabela 5.5 – Coeficiente de Resistência. Material: bobina A.

	MPa
$C_{0^\circ}$	661±6,9
$C_{45^\circ}$	664±6,9
$C_{90^\circ}$	679±7,1
$C$	667±7,0
Erro da amostragem	18

Após terem sido coletados os dados da bobina A, fizeram-se novos ensaios com amostras coletadas das bobinas B e C. Destas bobinas extraiu-se tiras do início, do meio e do final. E com essas tiras, ou corpos de prova, fez-se ensaios para determinar o grau de encruamento no lado direito, no meio e no lado esquerdo da chapa, três ensaios válidos por região, ver tabela 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Grau de encruamento. Material: bobina B.

Região da Bobina	Esquerda	Meio	Direita
Início	0,101 ± 0,003	0,190 ± 0,005	0,137 ± 0,004
Meio	0,095 ± 0,005	0,098 ± 0,002	0,101 ± 0,003
Fim	0,097 ± 0,003	0,086 ± 0,014	0,079 ± 0,001

Tabela 5.7 – Grau de encruamento. Material: bobina C.

Região da Bobina	Esquerda	Meio	Direita
Início	0,171 ± 0,005	0,172 ± 0,001	0,136 ± 0,010
Meio	0,102 ± 0,003	0,097 ± 0,005	0,092 ± 0,003
Fim	0,077 ± 0,004	0,083 ± 0,002	0,070 ± 0,003

Através dos resultados das tabelas 5.6 e 5.7 vê-se que há um gradiente de encruamento ao longo da bobina, uma vez que se nota um decréscimo na direção do final da mesma.

Isto denota uma pior formação das latas no final da bobina (centro quando esta se encontra enrolada) o que pode acarretar em um número maior de amostras defeituosas.

### 5.3 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

Utilizando os sensores INSTRON 2630-100 e INSTRON 2640-010, próprios para medir deformação na direção do comprimento e da largura, mediram-se as deformações nas três direções de laminação, ver figura 5.3, onde é mostrada uma média ponderada. Aplicando a equação 4 para uma deformação de 20%, define-se a anisotropia do material, que é vista na tabela 5.8.

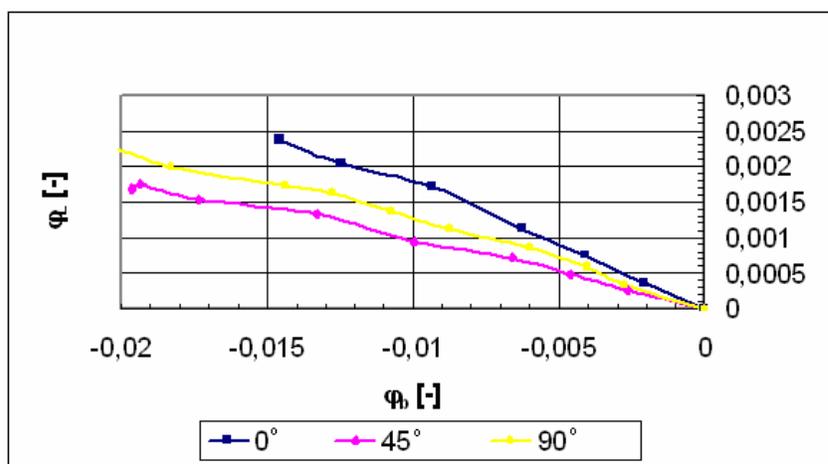


Figura 5.3 – Medição das deformações principais do material de acordo com a direção de laminação. Material: bobina A.

Tabela 5.8 – Anisotropia com 20% de deformação. Material: bobina A.

$r_{0^\circ}$	0,852±0,026
$r_{45^\circ}$	0,914±0,024
$r_{90^\circ}$	0,892±0,005
$r$	0,893±0,019
Erro da amostragem	0,048

## 5.4 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

O ensaio Nakazima (ver item 4.1) utilizou um punção do tipo hemisférico com raio de 50mm e para redução de atrito, o lubrificante PU 45.

Na figura 5.4 são apresentadas as medições realizadas, após os ensaios, para corpos de prova retirados do início, meio e final da bobina. Extrapolando estes pontos por um polinômio tem-se a CLC. Em azul está representada a curva encontrada para o final da bobina e em vermelho vê-se a para o início que é válida para o meio também.

Analisando estes resultados, vemos que a curva azul está com um limite menor que a vermelha, o que mostra que no final da bobina a estampabilidade do material é pior do que no início e no meio.

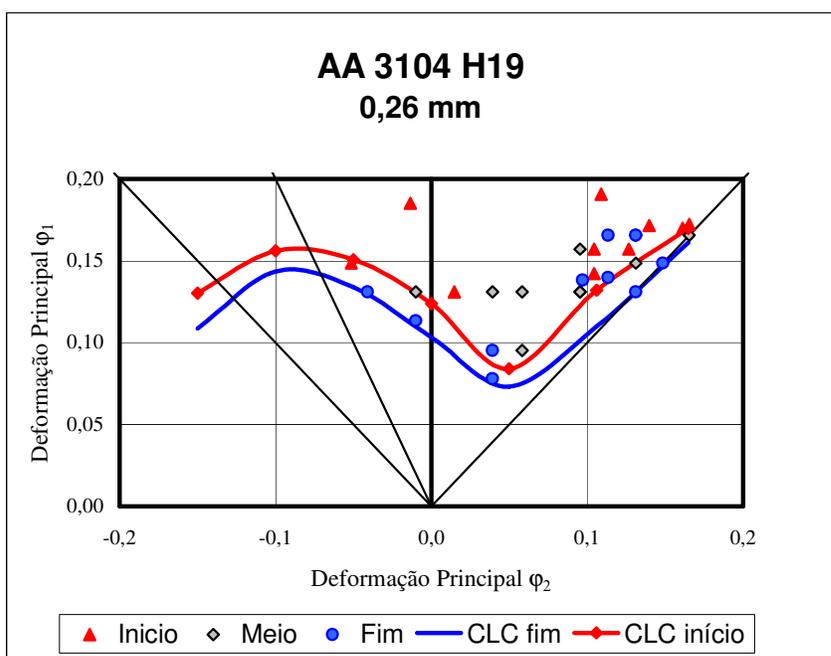


Figura 5.4 – Curva Limite de Conformação. Material: bobina C.

## 5.5 FORÇA DE ESTAMPAGEM

No processo de fabricação de latas de alumínio abordado neste trabalho, existem duas etapas que podem ser classificadas como de estampagem. A primeira é a chamada estampagem e a segunda é a de reestampagem, conforme detalhado abaixo.

### 5.5.1 Primeira estampagem

Para o cálculo das forças de estampagem e do prensa-chapas durante a etapa onde é formado o primeiro copo, ver figura 5.5, foram utilizadas as equações 6 e 7, conforme Schaeffer (1999).

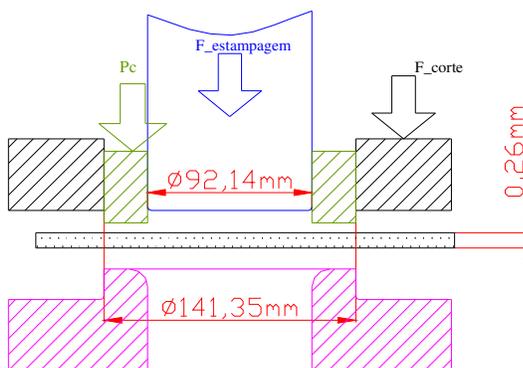


Figura 5.5 – Desenho esquemático da primeira etapa de estampagem.

$$F = \pi \cdot (d1 + t) \cdot t \cdot \sigma_m \cdot 1,2 \cdot \left( \frac{\beta - 1}{\beta_{m\acute{a}x} - 1} \right) \quad (6)$$

onde  $F$  [N] é a força de estampagem,  $d1$  [mm] é o diâmetro do punção,  $t$  [mm] é a espessura nominal da chapa,  $\sigma_m$  [MPa] é a tensão máxima do material,  $\beta$  [-] é a razão limite de estampagem (que relaciona o diâmetro do disco cortado com o diâmetro do punção) e  $\beta_{m\acute{a}x}$  [-] é a razão de estampagem máxima do material, que é retirado da literatura: Chang (1997).

$$Pc = \frac{\sigma_m}{400} \cdot \left[ (\beta - 1)^2 + \frac{d1}{200 \cdot t} \right] \cdot A \quad (7)$$

onde  $Pc$  [N] é a força do prensa-chapas,  $A$  [mm<sup>2</sup>] é a área do disco descontando-se a área de contato entre este e o punção.

Aplicando estas equações para a primeira etapa, e substituindo pelos valores da tabela 5.9, tem-se que a força de estampagem encontrada é de 13,5kN e a força do prensa-chapas é de 13,1kN. Uma vez tendo calculado a força de estampagem e a área, envolvidas na etapa de deformação do copo, calcula-se a tensão do material após esta etapa, através da equação 8, e encontra-se o valor de 251MPa.

$$kf_{est} = \frac{F}{A} + \sigma_{e0,2} \quad (8)$$

onde  $kf_{est}$  [MPa] é a tensão de escoamento do material após a estampagem e  $\sigma_{e0,2}$  [Mpa] foi retirado da tabela 5.1.

Tabela 5.9 – Valores para a primeira etapa de estampagem.

$A$	9024mm <sup>2</sup>
$d1$	92,14mm
$t$	0,26mm
$\beta$	1,54
$\beta_{m\acute{a}x}$	2 (segundo Chang (1997))
$\sigma_m$	281Mpa (tabela 5.2)

### 5.5.2 Reestampagem

Para o cálculo das forças de estampagem e do prensa-chapas durante a etapa de reestampagem, ver figura 5.6, também foram utilizadas as equações 6, 7 e 8, devidamente corrigidas com os parâmetros geométricos condizentes, ver tabela 5.10, e encontrou-se a força igual a 7,1kN, uma força no prensa-chapas de 3,2kN e uma tensão de escoamento para reestampagem de aproximadamente 253MPa.

Tabela 5.10 – Valores para a etapa de reestampagem.

$A$	3222mm <sup>2</sup>
$d_1$	66,24mm
$t$	0,26mm
$\beta$	1,39
$\beta_{máx}$	2 (segundo Chang (1997))
$\sigma_m$	281Mpa (tabela 5.2)

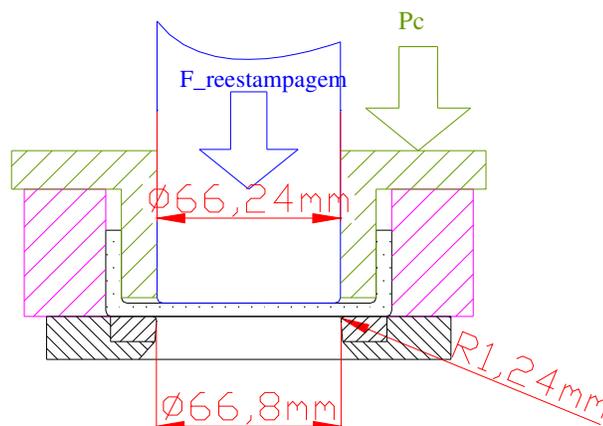


Figura 5.6 – Desenho esquemático da etapa de reestampagem.

### 5.6 FORÇA DE TREFILAÇÃO (*IRONING*)

Nesta etapa final do processo de conformação do corpo da lata, conforme figuras 5.7 e 5.8 e tabela 5.11, é apresentada a geometria do ferramental para cada etapa de *ironing*.

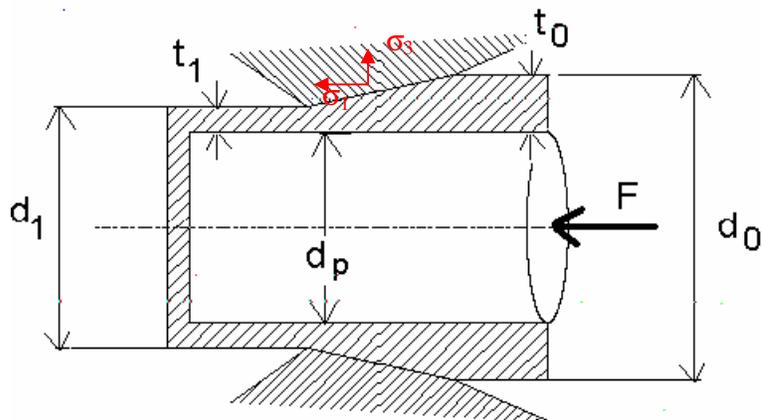


Figura 5.7 – Desenho esquemático de cada etapa de *ironing* (Fonte: DANCKERT, 2001).

Tabela 5.11 – Geometria do ferramental.

Ferramenta	[mm]
Diâmetro do Punção	66,24
Diâmetro da Ferramenta de Reestampagem	66,80
Diâmetro da Primeira Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,65
Diâmetro da Segunda Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,55
Diâmetro da Terceira Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,44

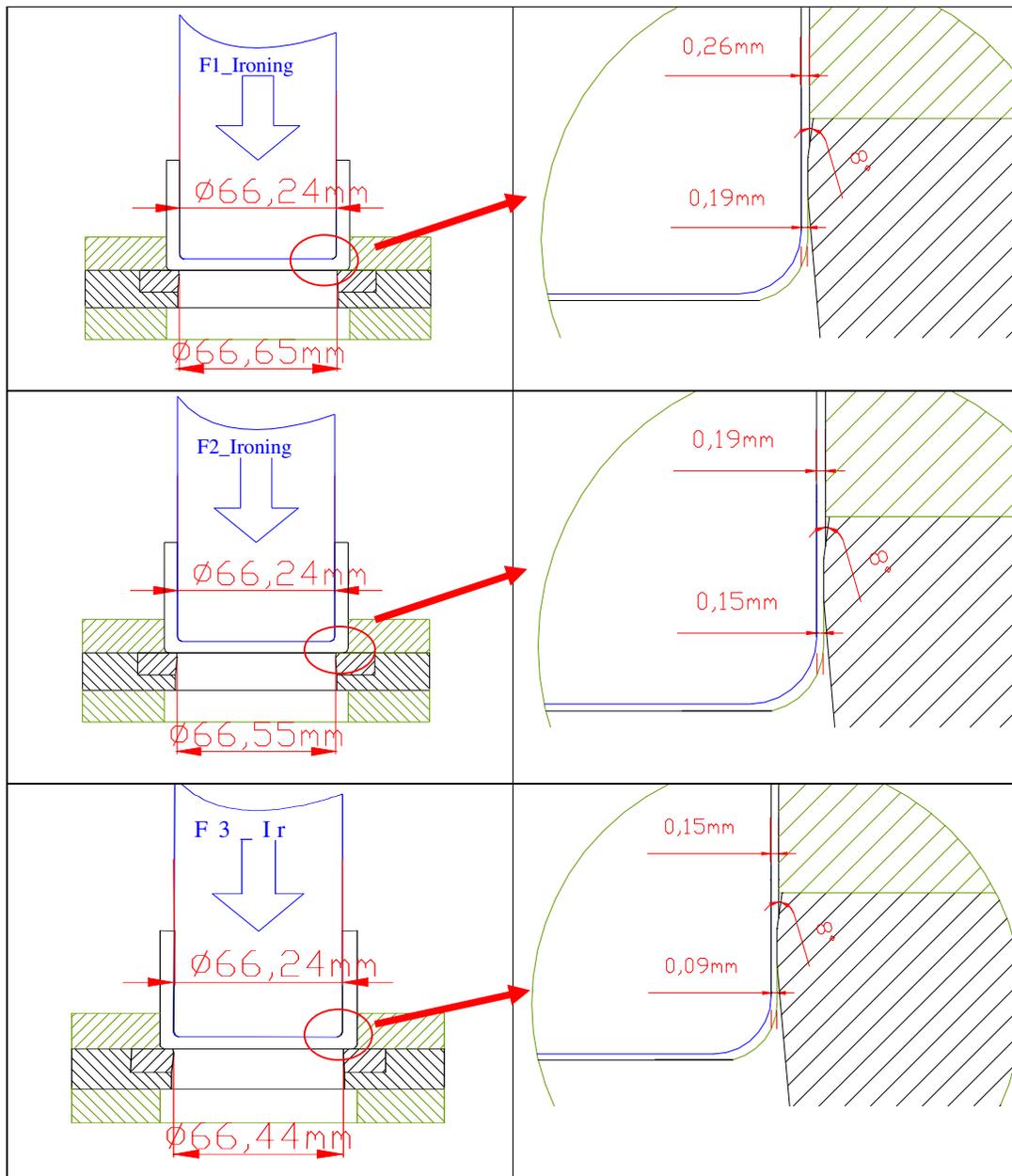


Figura 5.8 – Desenho esquemático do ferramental. À direita uma vista em detalhe da etapa.

Segundo Campion (1980) antes da primeira etapa de *ironing* não há variação de espessura, logo a espessura inicial é a espessura da bobina. O diâmetro externo da lata antes de passar pelo *ironing* é:

$$d_0 = d_p + 2 \cdot t_0 \quad (9)$$

onde  $d_0$  é o diâmetro externo da lata antes de cada *ironing*,  $d_p$  é o diâmetro do punção da etapa de *ironing* e  $t_0$  é a espessura da lata antes de cada *ironing*, todos em mm.

E a equação que define a área transversal da lata nesta etapa é:

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_0^2 - d_p^2) \quad (10)$$

O diâmetro externo da lata após cada *ironing*  $d_1$  [mm] é:

$$d_1 = d_p + 2 \cdot t_1 \quad (11)$$

onde  $t_1$  [mm] é a espessura da lata após cada *ironing*.

A área referente ao diâmetro é:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_p^2) \quad (12)$$

A deformação principal envolvida é encontrada pela equação 13, conforme Altan (1999).

$$\varphi_A = \ln \left( \frac{d_0^2 - d_p^2}{d_1^2 - d_p^2} \right) \quad (13)$$

Ao aplicar a deformação da equação 13 na equação 5, tem-se a tensão de escoamento do material no ponto antes ( $kf_0$ ) e após cada etapa de *ironing* ( $kf_1$ ) dados em MPa, sendo utilizado o valor médio no cálculo da força de *ironing*, ver equação 14.

$$kf_m = \frac{kf_0 + kf_1}{2} \quad (14)$$

A força de *ironing* é dada pela fórmula 15, conforme Schaeffer (1999), e utilizou-se o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) sugerido por Chang (1997) como sendo 0,02 e o ângulo da fieira ( $\alpha$ ) é 8 graus (0,139rad).

$$F = kf_m \cdot A_1 \cdot \varphi_A \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2 \cdot \alpha}{3 \cdot \varphi_A} \right) \quad (15)$$

A redução máxima (grau de esforço máximo), é dada pela desigualdade abaixo (fórmula 16). O grau máximo admissível ( $a$ ) encontrado por Schaeffer (1999) é 0,75. Valores acima de 0,75 indicam que o processo não é viável.

$$a = \frac{\sigma_1}{kf_1} \leq 0,75 \quad (16)$$

onde  $\sigma_1$  [MPa] é a tensão axial (ver figura 5.7) que é razão entre a força de *ironing* e área na saída da fieira, conforme a equação 17 e  $kf_1$  [MPa] é a tensão radial é encontrada pela Teoria da Máxima Tensão Cisalhante ou Critério de Tresca, ver equação 18.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_1} \quad (17)$$

$$kf_1 = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (18)$$

Na tabela 5.12 são apresentados os resultados do cálculo das tensões e das forças de *ironing* envolvidas em cada etapa.

Tabela 5.12 – Cálculos de Força de *Ironing*. Material: bobina A.

	<i>Ironing 1</i>	<i>Ironing 2</i>	<i>Ironing 3</i>
$d_0$	66,76mm	66,66mm	66,55mm
$A_0$	54,07mm <sup>2</sup>	43,48mm <sup>2</sup>	32,58mm <sup>2</sup>
$d_1$	66,66mm	66,55mm	66,44mm
$A_1$	43,48mm <sup>2</sup>	32,58mm <sup>2</sup>	20,38mm <sup>2</sup>
$\varphi_A$	-0,22	-0,29	-0,47
$kf_0$	253MPa	474MPa	506MPa
$kf_1$	474MPa	506MPa	564Mpa
$kf_m$	364MPa	490MPa	535MPa
$F$	5,43kN	6,76kN	6,87kN
$\sigma_1$	123MPa	207MPa	337MPa
$\sigma_3$	-351MPa	-299MPa	-287MPa
$a$	0,25	0,31	0,60

Pode-se visualizar (tabela 5.12) que o grau de esforço ( $a$ ) aumenta conforme se avança nas etapas de *ironing*, no entanto, não é atingido o limite máximo de 0,75 o que representa que o material não está sendo exigido ao máximo. Outra constatação é que a força de *ironing* é crescente no sentido do final do processo, o que é correto já que o grau de esforço também segue esta tendência.

Através dos dados obtidos, monta-se um diagrama entre o grau de esforço com a espessura final da lata, variando-se o grau de encruamento. A figura 5.9 mostra que:

- para obter uma espessura final da lata (3° *ironing*) de 0,098mm (condição do projeto) tem-se um grau de esforço de 0,6 ou 60%, caso o encruamento seja 0,22;
- se houver a diminuição do encruamento tem-se um aumento do grau de esforço do material, mantendo a condição de projeto;
- caso haja uma variação na espessura final da parede da lata, tem-se na figura qual seria o grau de esforço obtido para um encruamento conhecido.

A figura 5.9 é um gráfico que relaciona propriedade mecânica e metalúrgica do material e projeto de ferramental.

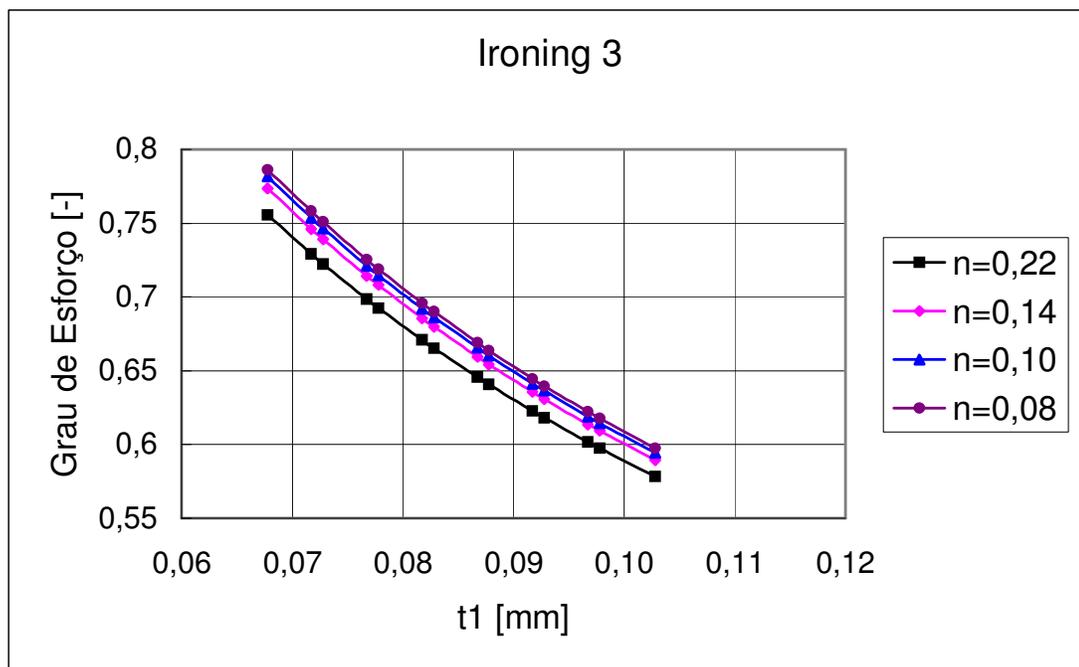


Figura 5.9 – Relação de grau de esforço, encruamento e folga entre ferramentas.

## 6. CONCLUSÕES

O processo de fabricação de latas de bebidas de alumínio já está bastante desenvolvido tecnologicamente, portanto, é de grande interesse ter tantas informações, sobre o material e ferramental, quantas forem possíveis para a sua otimização.

Nota-se que o grau de encruamento varia ao longo da bobina, decrescendo na direção do final da mesma. Isto traz maiores refugos de produção e demonstra a grande importância deste fator na qualidade das latas produzidas. Com isso, pode-se fazer um controle de qualidade através de ensaios nas bobinas recebidas pela fábrica através do monitoramento do grau do encruamento e ter, assim, uma garantia de que a matéria-prima é de boa qualidade e que gerará latas sem defeitos.

A anisotropia do material se mostrou bastante satisfatória, já que estava muito próxima de um, ou seja, quase isotrópico (tabela 5.8).

Os cálculos de força e análise de ferramental mostram que o material não está sendo exigido ao máximo, então se constrói um gráfico (figura 5.9) que demonstra que quando se quer diminuir a espessura final da lata tem-se um maior grau de esforço para um determinado encruamento. Estas curvas mostram um mapeamento de possibilidades que juntamente com a CLC (figura 5.4) podem ser combinadas e utilizadas conforme a necessidade e/ou possibilidade do fabricante de latas.

O fabricante pode utilizar o gráfico da figura 5.9 para simular alterações de espessura final da lata sabendo o grau de encruamento da matéria-prima e se será possível de obter o produto final sem defeitos.

## 7. REFERÊNCIAS

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. **Conformação de metais – fundamentos e aplicações**. São Carlos/SP: EESC-USP, 1999. 350p.

CAMPION, D. Deep drawing & ironing – theory and practice. **Sheet Metal Industries**, p. 111-119. February, 1980.

CHANG, D. F.; WANG, J. E. Influence of Process Parameters on the ironing of Deep-Drawn Cups. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, p. 699-705. 1997.

DANCKERT, J. Ironing of Thin Walled Cans. **Annals of the CIRP**, v. 50, p. 165-168. 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10002**: Tensile Testing of metallic materials. Berlim, 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. **ISO 12004**: Metallic Materials – Guidelines for the Determination of Forming-Limit Diagram. Suisse, 1997.

PENTEADO, E. **Fabricação de Latas de Alumínio pelo Processo de Drawing Ironing**. In: V Conferência Nacional de Conformação de Chapas. [Anais]. Gramado, RS: Gráfica e Editora Brasil, 2002. p. 183-208.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 167p.

SCHNEIDER, P. **Notas de aula da disciplina de Medições Térmicas**. Porto Alegre, 2003.

SILVEIRA NETTO, S. E; MALVEIRA, N. N.; CRIVELLARO, R. S.; BORSOI, C. A.; SCHAEFFER, L. **Determinação da curva limite de conformação para alumínio aeronáutico 6061-O**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (2. : 2003 : Uberlândia). [Anais]. Uberlândia, MG : Bit House Brasil, 2003. COF03-0017.pdf (260.8 KB).

STAHL-EISEN-WERKSTOFFPRÜFBLATT. **SEW1125**: – Ermittlung des Verfestigungsexponenten (n-Wert) von Feinblech aus dem Zugversuch. Düsseldorf, 1984.

STAHL-EISEN-WERKSTOFFPRÜFBLATT. **SEW1126** – Ermittlung der senkrechten Naisotropie (r-Wert) von Feinblech aus dem Zugversuch. Düsseldorf, 1984.

## 8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CAMPION, D. Deep drawing and ironing – theory and practice – 2. **Sheet Metal Industries**, p. 330-341. April, 1980.

CAMPION, D. Deep drawing and ironing – Theory and practice – Part 3. **Sheet Metal Industries**, p. 563-566. June, 1980.

CAMPION, D. Deep drawing and ironing – theory and practice – Part 4 Practical considerations. **Sheet Metal Industries**, p. 830-836. September, 1980.

COURBON, J. Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans. **Scripta Materialia**, v. 48, p. 1519-1524. 2003.

GOTOH, M.; KIM, Y. S.; YAMASHITA, M. A fundamental study of can forming by the stretch-drawing process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.138, p. 545-550. 2003.

HACKWORTH, M. R.; HENSHAW, J. M. A pressure vessel fracture mechanics study of the aluminium beverage can. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 65, p. 525-539. 2000.

JIANJUN, W. The calculation of ironing force. **Elsevier Science B. V.**, p. 462-467. 1994.

KAMMERER, M.; PÖHLANDT, K.; TEKKAYA, A. E. Non-conventional extrusion of less-common materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 49, p. 345-354. 1995.

KAMPUS, Z.; KUZMAN, K. Analysis of the factors influencing the geometrical shape of workpieces produced by ironing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 49, p.313-332. 1995.

RAGAB, M. S.; ORBAN, H. Z. Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 99, p. 54-61. 2000.

YANRAN, Z.; WANG Z. R.; WEIMIN, C. Numerical simulations for extrusion and ironing and die-angle optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 55, p. 48-52. 1995.

## ANEXO – Propriedades da liga AA3104-H19

**MatWeb.com, The Online Materials Database****Aluminum 3104-H19****Subcategory:** 3000 Series Aluminum Alloy; Aluminum Alloy; Metal; Nonferrous Metal**Close Analogs:****Composition Notes:**

Aluminum content reported is calculated as remainder.

Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

**Key Words:** UNS A93104; Aluminium 3104-H19; AA3104-H19

Component	Wt. %	Component	Wt. %	Component	Wt. %
Al	95 - 98.4	Mg	0.8 - 1.3	Si	Max 0.6
Cu	0.05 - 0.25	Mn	0.8 - 1.4	Ti	Max 0.1
Fe	Max 0.8	Other, each	Max 0.05	V	Max 0.05
Ga	Max 0.05	Other, total	Max 0.15	Zn	Max 0.25

**Material****Notes:**

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

Physical Properties	Me- tric	English	Comments
Density			2.72 g/cc AA; Typical
<b>Mechanical Properties</b>		0.0983 lb/in <sup>3</sup>	
Hardness, Brinell	78		
Hardness, Knoop	101	78	500 kg load with 10 mm ball. Calculated value.
Hardness, Vickers	88	101	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	290 MPa	88	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Yield	260 MPa	42100 psi	
Elongation at Break	4 %	37700 psi	
Modulus of Elasticity	69 GPa	4 %	In 5 cm; Sample 1.6 mm thick
Poisson's Ratio	0.34	10000 ksi	Average of Tension and Compression. In Aluminum alloys, the compressive modulus is typically 2% greater than the tensile modulus. Estimated from trends in similar Al alloys.
Shear Mo- dulus	26 GPa	0.34	Estimated from trends in similar Al alloys.
Shear S- trength	175 MPa	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.

Copyright 1996-2004 by Automation Creations, Inc.