

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA – CÂMPUS GERALDO WERNINGHAUS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO DA  
CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL 304, NO PROCESSO DE  
DOBRAMENTO EM V**

**CLEBER JOSÉ PEDROSO**

**JARAGUÁ DO SUL  
2016**

**CLEBER JOSÉ PEDROSO**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO DA  
CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL 304, NO PROCESSO DE  
DOBRAMENTO EM V**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica campus Geraldo Werninghaus do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica

Orientador:

Alexandre Galiotto

**JARAGUÁ DO SUL  
2016**

P372a Pedroso, Cleber José

Análise da influência do sentido de laminação da chapa de aço inoxidável 304, no processo de dobramento em V / Cleber José Pedroso ; orientador Alexandre Galloto. – Jaraguá do Sul, SC, 2016. 67 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Retorno elástico. 2. Dobramento. 3. Sentido de laminação. I. Galloto, Alexandre. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO DA CHAPA DE AÇO  
INOXIDÁVEL 304, NO PROCESSO DE DOBRAMENTO EM V**

**CLEBER JOSÉ PEDROSO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em  
Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora  
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 15 de Setembro de 2016.



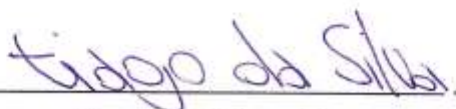
---

Alexandre Galiotto, Me.



---

Fernando Dorte, Esp.



---

Tiago da Silva, Dr.

Dedico este trabalho, primeiramente a minha esposa e meu filho. Dedico também a todos que em algum momento contribuíram para realização deste projeto.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pois sem fé não se chega a lugar algum.

A minha esposa Marcia que me incentivou e apoiou na realização deste curso.

Aos colegas de classe que me acompanharam desde o início deste curso, e me apoiaram com palavras de incentivo ou compartilhando conhecimentos e experiências.

A toda equipe do IFSC, em especial aos professores.

Obrigado.

*“Cada dia sabemos mais e entendemos menos”.*  
*“A educação é o que resta depois de ter esquecido*  
*tudo que se aprendeu na escola”.*  
*(Albert Einstein, 1879 - 1955)*

## RESUMO

O dobramento é um método utilizado na indústria para transformação de peças metálicas planas. O baixo custo e a simplicidade de operação são algumas das inúmeras vantagens do processo de dobramento. Para dobrar uma peça metálica é aplicada uma força sobre a peça alterando sua forma. A alteração de forma é obtida pela deformação elástica e plástica do material e ao serem retirados os esforços pode ocorrer uma variação na forma final da peça, essa variação é uma característica deste processo conhecida como retorno elástico. O retorno elástico depende de vários fatores que alteram seu comportamento, alguns fatores já foram estudados outros ainda podem ser fontes de pesquisas. Um fator a ser avaliado, é a influência do sentido de laminação no retorno elástico. Neste contexto este trabalho vem analisar o dobramento em V do aço inoxidável 304, e qual é a influência do sentido de laminação no retorno elástico, na força de dobramento e no aumento da microdureza. Para isso foram geradas amostras em três espessuras diferentes 1,52 mm, 3,04 mm, e 4,18 mm, com três sentidos de laminação distintos 0°, 90° e 120°, dobradas em uma matriz em V com três ângulos, 60° 90° 120°. Após o dobramento e as medições de força, microdureza e retorno elástico, os resultados obtidos demonstraram a influência que o sentido de laminação exerce sobre os fatores estudados para este material específico.

Palavras-Chave: Retorno elástico. Dobramento. Sentido de laminação.

## ABSTRACT

The bending is a method used in industry for the processing of flat metal parts. The low cost and simplicity of operation are some of the many advantages of the bending process. To bend a metal part a force is applied on the piece changing its shape. The shape change is achieved by elastic deformation and plastic material and when removed the efforts can occur a variation in the final shape of the part, this variation is a characteristic of this process known as springback. The springback depends on several factors that alter their behavior, some factors have been studied other can still be sources of research. One factor to be assessed is the influence of the direction of rolling in springback. Therefore, this work is to analyze the bending in stainless steel 304 V, and what is the influence of the direction of rolling in springback in bending strength and increased hardness. For samples that were generated at three different thicknesses 1.52 mm, 3.04 mm and 4.18 mm, three different rolling directions 0 °, 90 ° and 120 °, bend in a V matrix with three angles, 60 ° 90 ° 120 °. After folding and force measurements, hardness and elastic return, the results showed the influence that the direction of lamination has on the factors studied for this specific material

Keywords: *Springback*. Bending. Rolling direction

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regiões da seção dobrada .....	20
Figura 2: Diagrama de tensão em materiais elastoplásticos .....	20
Figura 3: Geometria para cálculo do tamanho mínimo 0° a 90° .....	24
Figura 4: Geometria para cálculo do tamanho mínimo 90° a 165° .....	24
Figura 5: Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico .....	25
Figura 6: Retorno elástico .....	27
Figura 7: Definição das deformações para obter o índice de anisotropia.....	31
Figura 8: Fluxograma .....	33
Figura 9: Projeto do corte das amostras .....	35
Figura 10: Matriz em "V" para o dobramento .....	35
Figura 11: Punções utilizados no dobramento .....	36
Figura 12: Experimento fatorial multinível .....	37
Figura 13: Amostras dobradas a: (a) 120°, (b) 90° e (c) 60°. .....	37
Figura 14: Projetor de perfil .....	39
Figura 15: Pontos de medição do retorno elástico .....	40
Figura 16: Microdurômetro .....	41
Figura 17: Pontos de medição da microdureza .....	42
Figura 18: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e sentido de laminação para resposta força .....	44
Figura 19: Gráfico de interação entre espessura e sentido de laminação para resposta força.....	45
Figura 20: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e espessura para resposta força.....	46
Figura 21: Gráfico da microdureza na posição 1 .....	47
Figura 22: Gráfico da microdureza na posição 2.....	47
Figura 23: Gráfico da microdureza na posição 3.....	48
Figura 24: Gráfico da microdureza na posição 4.....	48
Figura 25: Gráfico da microdureza na posição 5.....	49
Figura 26: Gráfico da microdureza na posição 6.....	49
Figura 27: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e sentido de laminação para resposta do retorno elástico .....	52

Figura 28: Gráfico de interação entre espessura e sentido de laminação para resposta do retorno elástico. ....	53
Figura 29: Gráfico de interação entre ângulo e espessura para resposta do retorno elástico .....	54
Figura 30: Análise de Regressão: .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Raio mínimo de dobramento para espessuras até 7 mm .....	23
Tabela 2: Fator de correção k com valores arredondados .....	25
Tabela 3: Resultados de dureza do AISI 304 com dois raios de punção diferentes..	29
Tabela 4: Composição química do aço inoxidável 304 .....	34
Tabela 5: Propriedades mecânica do aço inoxidável 304 .....	34
Tabela 6: Amostras selecionadas para medição da microdureza. ....	42
Tabela 7: Valores de microdureza para amostras de 4,18 mm de espessura .....	50
Tabela 8: Comparação de microdureza para as espessuras de 4,18 e 1,52 mm .....	51
Tabela 9: Comparação de microdureza para as espessuras de 4,18 e 3,04 mm .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*a* - Aba lateral da chapa  
*AISI* - American Iron and Steel Institute  
*b* - Aba lateral da chapa  
*C* - Carbono  
*Co* - Cobalto  
*Cr* - Cromo  
*Cu* - Cobre  
*DIN* - Deutsches Institut für Normung  
*dl<sub>e</sub>* - Comprimento recuperado da fibra externa  
*DOE* - Design of Experiments  
*E* - Módulo de elasticidade  
*F* - Força  
*gf* - Gramas força  
*HRB* - Rockwell B  
*HV* - Hardness Vickers  
*K* - Fator do retorno elástico relativo  
*k* - Fator para correção da posição da linha neutra  
*kg* - Quilograma  
*l* - Tamanho mínimo da chapa  
*LE* - Limite de escoamento  
*LR* - Limite de resistência a tração  
*l<sub>0</sub>* - Comprimento da linha neutra  
*mm* - Milímetro  
*mm/min* - Milímetros por minuto  
*mm<sup>2</sup>* - Milímetro ao quadrado  
*Mn* - Manganês  
*Mo* - Molibdênio  
*MPa* - Megapascal  
*N* - Newton  
*Ni* - Níquel  
*P* - Fósforo

$p$  - Profundidade de dobramento  
 $r$  - Raio do punção  
 $ra$  - Índice de anisotropia  
 $ram$  - Índice de anisotropia média  
 $R_f$  - Raio após o retorno elástico  
 $r_{min}$  - Raio mínimo  
 $R_0$  - Raio antes do retorno elástico  
 $s$  - Espessura da chapa  
*SAF* - Sandvik Austenitic Ferritic  
*Si* - Silício  
*Ti* - Titânio  
 $V$  - Abertura da matriz  
 $\alpha_0$  - Ângulo antes do retorno elástico  
 $\alpha_f$  - Ângulo após o retorno elástico  
 $\beta$  - Ângulo de dobramento  
 $\varepsilon E$  - Deformação verdadeira na direção da espessura  
 $\varepsilon L$  - Deformação verdadeira na direção da largura  
 $\varphi$  - Deformação verdadeira ou real  
 $\sigma_e$  - Limite de elasticidade  
 $(\sigma_{xd})_{ext}$  - Tensão do retorno elástico na fibra externa  
 $v$  - Fator de compensação  
 $y$  - Posição da linha neutra  
 $\lambda$  - Largura da chapa  
 $\Delta\alpha$  - Variação em torno da linha neutra  
 $\Delta ra$  - Índice de anisotropia planar  
 $^\circ$  - Graus

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	Questão central da pesquisa.....	18
1.2	Objetivo Geral .....	18
1.2.1	Objetivos Específicos .....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Dobramento .....	19
2.2	Retorno elástico .....	25
2.3	Ensaio de microdureza.....	27
2.4	Estudos realizados sobre o tema .....	28
3	MÉTODOS .....	33
3.1	Materiais.....	34
3.2	Análise Fatorial .....	36
3.4	Retorno Elástico.....	38
3.5	Microdureza .....	40
3.6	Força de dobramento.....	43
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	44
4.1	Força de dobramento.....	44
4.2	Análise da microdureza.....	46
4.2.1	Comparação da microdureza em função das diferentes espessuras ....	50
4.3	Retorno Elástico.....	51
5	CONCLUSÕES .....	56
	REFERÊNCIAS .....	58
	APÊNDICE 1: Análise ANOVA.....	60
	APÊNDICE 2: Análise ANOVA.....	61
	APÊNDICE 3: Tabela 1 dados do experimento.....	62
	APÊNDICE 4: Tabela 2 dados do experimento.....	63
	ANEXO 1: Matriz para Dobramento .....	64
	ANEXO 2: Punção 1,52 mm.....	65
	ANEXO 3: Punção 3,04 mm.....	66
	ANEXO 4: Punção 4,18 mm.....	67

## 1 INTRODUÇÃO

A conformação de chapas metálicas é um processo que evoluiu muito nos últimos anos, no entanto, ainda existem algumas características empíricas no processo difíceis de prever com exatidão. Essas características dependem da combinação de fatores como a espessura da chapa, o raio da ferramenta de dobra, a abertura da matriz e as características químicas e mecânicas do material a ser dobrado.

Um processo de conformação muito utilizado na indústria para dar forma às peças metálicas é o dobramento. Nesse processo a chapa metálica é conformada através da deformação plástica e, inerente a isso a deformação elástica. Sendo assim, as tensões são variáveis na seção dobrada, ou seja, parte das tensões atuantes estará no regime plástico enquanto outra estará no regime elástico. Ao serem retirados os esforços de dobramento, na região em que as tensões atuantes permanecem em regime elástico o material tende a retornar ao estado original. O resultado desse último é conhecido como retorno elástico ou *springback*. (MESQUITA; RUGANI, 1997).

Uma classe de aço que vem sendo largamente utilizada nos processos de conformação por dobramento para produção de vários produtos em diversas áreas da indústria é a dos aços inoxidáveis.

Para caracterizar-se como aço inoxidável, a porcentagem de cromo deve estar acima de 11%, admitindo outros elementos em menor grau na sua liga, tais como níquel, cobre, molibdênio e alumínio. (CALLISTER; RETHWISCH, 2013)

Segundo Souza (1989), os aços inoxidáveis foram concebidos para suprir as deficiências observadas nos aços-carbono, tais como a baixa resistência à corrosão e à oxidação em ambientes nos quais esses fatores estão presentes.

Segundo Chiaverini (1986), nos aços inoxidáveis ocorre um fenômeno conhecido como passivação, que pode ser interpretado como uma camada de óxidos mistos. A dissolução dessa camada no meio corrosivo é que confere a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.

Esses aços caracterizam-se pelo teor de níquel e cromo que, em alguns casos, garante alta resistência à corrosão e à oxidação. Dependendo da composição, podem assumir características distintas como martensítica, ferrítica ou

austenítica. Para obter um aço com característica austenítica, a porcentagem de níquel deve ser mais elevada, da ordem de 6% a 22%. Essa porcentagem de níquel confere aos aços austeníticos boa conformabilidade, característica fundamental em materiais destinados à conformação. (SOUZA, 1989)

Entre os aços inoxidáveis austeníticos classificados pela norma AISI, o mais conhecido é o 18-8, característica que define em porcentagem o teor de cromo e níquel, respectivamente, na sua composição. O níquel presente na liga, além de melhorar a resistência à corrosão e oxidação, também melhora as características sob altas temperaturas. (CHIAVERINI, 1986).

O aço inoxidável austenítico tem como característica não ser magnético e não ser endurecido por tratamento térmico. Todavia, é possível aumentar a dureza e a resistência do aço inoxidável austenítico através de deformação a frio, processo que resulta no encruamento. (SOUZA, 1989).

As aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos são as mais diversas na indústria, incluindo peças de decoração até peças para estufas e fornos, sujeitos a altas temperaturas. Outras aplicações são: peças estruturais, componentes para indústria química, alimentícia, naval entre outras. Muitos desses produtos são concebidos através da conformação por dobramento. (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os produtos conformados por dobramento, em aço inoxidável, podem ser simples ou complexos. De qualquer forma, algumas características são comuns como, por exemplo, o retorno elástico e o aumento da dureza em regiões específicas da peça dobrada. Essas características podem gerar erro dimensional ou a falha precoce do material.

Estas características dependem de vários fatores citados anteriormente, esses fatores influenciam em maior ou menor grau na deformação elástica, que é considerada uma das principais causas do retorno elástico, por exemplo.

Embora este tema já tenha sido abordado por vários autores, ainda existem algumas propriedades do aço inoxidável 304 que podem ser fonte de vários estudos.

Uma área que ainda não se esgotaram as fontes de pesquisa é a variação na orientação dos grãos em aços laminados, essa variação é definido como a anisotropia da chapa. Isso se dá pelo fato da chapa de aço deformar-se de forma distinta nas várias direções de laminação.

As propriedades de um material trabalhado mecanicamente podem variar em função da anisotropia. Esta variação das propriedades mecânicas pode influenciar de alguma maneira no dobramento de chapas em aço inoxidável 304.

### **1.1 Questão central da pesquisa**

Diante disso, surge a pergunta de pesquisa: De que maneira uma das características do processo de fabricação do material - o sentido de laminação da chapa - influencia no dobramento do aço inoxidável AISI 304?

### **1.2 Objetivo Geral**

Avaliar a influência do sentido de laminação do aço inoxidável AISI 304 no processo de dobramento em “V”.

#### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Realizar o dobramento das amostras;
- Medir o retorno elástico;
- Avaliar a influência do sentido de laminação no retorno elástico e na força de dobramento;
- Avaliar a influência do sentido de laminação na distribuição da microdureza dos corpos de prova com 4,18 mm de espessura após o dobramento;
- Comparar a variação da microdureza em função da espessura, utilizando corpos de prova de 1,52 mm, 3,04 mm e 4,18 mm, com sentido de laminação a 0° e ângulo de dobramento de 90°.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os resultados das pesquisas bibliográficas. As principais áreas estudadas foram: o processo de dobramento, retorno elástico, microdureza e estudos realizados sobre o tema.

### 2.1 Dobramento

O processo de conformação de chapas de aço é muito utilizado atualmente na indústria para dar forma a produtos.

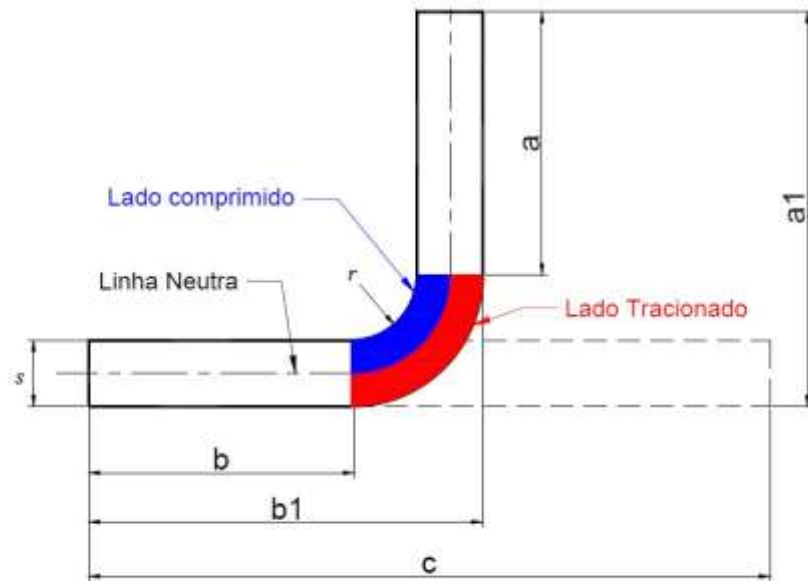
“As operações de conformação são aquelas em que a forma de uma peça metálica é alterada por deformação plástica”. (CALLISTER; RETHWISCH, p. 355, 2013).

“Obviamente, a deformação deve ser induzida por uma força ou tensão extrema cuja magnitude deve exceder o limite de escoamento do material. A maioria dos materiais metálicos é especialmente suscetível a esse procedimento”. (CALLISTER; RETHWISCH, p. 356, 2013).

Um processo de conformação muito utilizado é o dobramento devido ao baixo custo e pela simplicidade do processo. Porém, a simplicidade do processo vem na contramão da complexidade de se definir parâmetros para atender as especificações dos projetos atuais cada vez mais complexos. Características como o retorno elástico podem causar problemas como falta de precisão em peças que necessitam de montagem, por exemplo.

Na Figura 1 pode-se observar as características do processo de dobramento. Ficam visíveis duas regiões, a região tracionada e a região comprimida. Isso ocorre, pois ao dobrar o metal a deformação é causada por flexão, as tensões são variáveis a partir de uma terceira região que não sofre deformação chamada linha neutra. (MESQUITA; RUGANI, 1997)

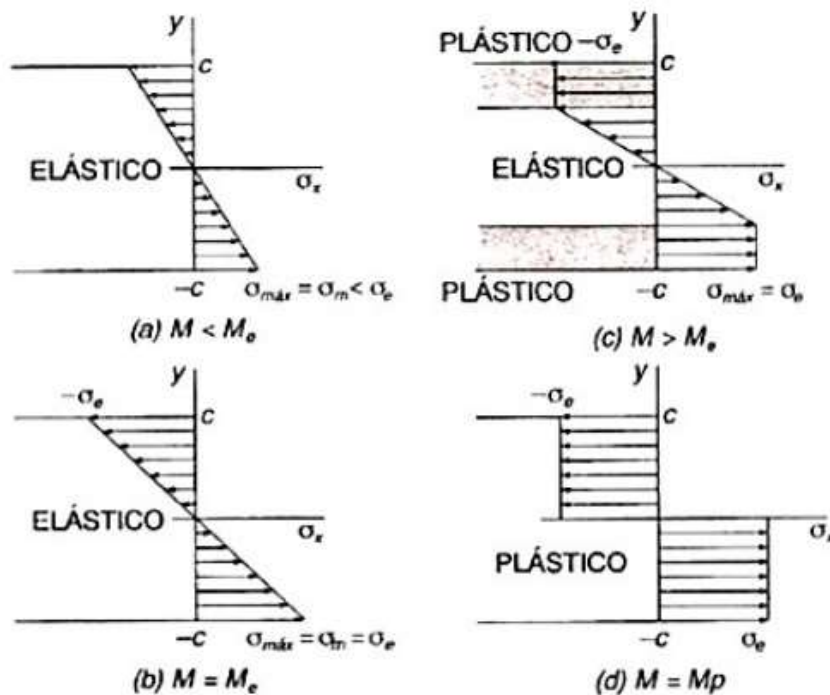
Figura 1: Regiões da seção dobrada



Fonte: Adaptada pelo autor de Santos (2013, p. 37).

Beer e Johnston Jr. (1995) realizaram um estudo para demonstrar as etapas envolvidas na deformação plástica de materiais em flexão.

Figura 2: Diagrama de tensão em materiais elastoplásticos



Fonte: Adaptada pelo autor de Beer e Johnston Jr. (1995, p. 375).

Identificaram que, se a tensão normal não ultrapassar a tensão de escoamento do material, ainda vale o princípio da lei de Hooke e a distribuição de tensão é linear ao longo da seção (Figura 2a).

Contudo, com o aumento do momento fletor até atingir níveis em que a tensão de escoamento do material chega ao máximo momento elástico. Esse ponto é definido como o limite que o material pode suportar em que as deformações se mantêm totalmente elásticas (Figura 2b).

Aumentando mais o momento fletor, o material apresenta uma região em regime plástico nas extremidades da seção, e outra em regime elástico, no núcleo da seção, variando de forma linear a partir da linha neutra (Figura 2c).

Assim se aumentar ainda mais o momento fletor, o material atinge uma condição totalmente plástica (Figura 2d)

Para o processo de dobramento em “V”, o punção penetra na abertura da matriz até o ponto em que o material atinge seu fundo. A folga entre o punção e a matriz neste processo é diretamente a espessura da chapa. O ângulo final da peça é o ângulo da matriz, descontando o retorno elástico (neste caso o punção não influencia no ângulo final nem no raio interno de dobra).

Porém, existem casos especiais em que as especificações de projeto exigem o uso do raio do punção para definir o raio interno de dobra, para isso, é necessária a utilização de uma força maior no dobramento, assim o material dobrado assume um ângulo de dobramento desejado sem o retorno elástico. (MESQUITA; RUGANI, 1997).

Rodrigues e Martins (2010) utilizaram a equação (1) para uma definição teórica aproximada da profundidade de deslocamento do punção no processo de dobramento em “V”. Admitindo algumas generalidades, relacionaram o ângulo de dobramento “ $\beta$ ” com a penetração do punção na matriz “ $p$ ”.

$$p = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)} - (r + s) \left[ \frac{1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right] \quad (1)$$

Onde:

$p$  - é a profundidade de dobramento;

$V$  - é a abertura da matriz;

$\beta$  - é o ângulo de dobramento;

$r$  - é o raio do punção;

$s$  - é a espessura da chapa.

Para definir a força necessária para executar o dobramento de uma chapa metálica, é necessário conhecer as características mecânicas do material, e a especificidades da matriz e do punção. Desprezando o atrito e considerando que as reações “R” da matriz são verticais, Rodrigues e Martins (2010), utilizaram a equação (2) para definição teórica dessa força.

$$F = \sigma_e \frac{\lambda s^2}{V} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_e$  - é o limite de elasticidade do material;

$\lambda$  - é a largura da chapa;

$V$  - é a abertura da matriz;

$s$  - é a espessura da chapa.

No processo de dobramento de chapas laminadas a frio, faz-se necessária a utilização de fatores específicos. Para isso o Instituto Alemão de Normalização “Deutsches Institut für Normung” (DIN) criou uma norma destinada a este processo de conformação.

A norma DIN 6935 (2010) apresenta uma série de cálculos e tabelas a serem seguidos, para auxiliar no processo de dobramento de chapas de aço laminados a frio. (DIN, 2010, tradução nossa). Essa norma aplica-se a peças dobradas a partir de chapas de aço planos para uso na construção de peças para a engenharia em geral.

Segundo a norma: “No dobramento de chapas de aço, independente do sentido de laminação deve-se escolher a combinação de parâmetros que atendam as condições de dobramento.” (DIN, p. 4, 2010, tradução nossa)

Pela norma DIN 6935 é possível definir o raio mínimo de ferramenta para dobramento, o comprimento do *blank* necessário para o dobramento, o fator de correção da posição da linha neutra entre outros.

Utilizando a Tabela 1 é possível definir o raio mínimo “ $r_{min.}$ ” para o dobramento. Essa tabela é destinada a chapas dobradas com ângulos de 0° até 120°. Nela são apresentadas as características que influenciam na escolha do raio

mínimo para o dobramento. Característica como tensão de escoamento do material, sentido de laminação e variação de espessura do material de 1 mm até 7 mm. (DIN, 2010, tradução nossa).

Tabela 1: Raio mínimo de dobramento para espessuras até 7 mm

		Raio mínimo de dobramento, " $r_{\min.}$ " Para ângulos de dobramento, $\beta$ até 120°, para chapas de aço com espessura " $s$ " em milímetro							
Tensão mínima de escoamento (MPa)	Relação entre dobramento e laminação	1	>1 até 1.5	>1.5 até 2.5	>2.5 até 3	>3 até 4	>4 até 5	>5 até 6	>6 até 7
até 390	Transversal	1	1.6	2.5	3	5	6	8	10
	Longitudinal	1	1.6	2.5	3	6	8	10	12
de 390 até 490	Transversal	1.2	2	3	4	5	8	10	12
	Longitudinal	1.2	2	3	4	6	10	12	16
de 490 até 640	Transversal	1.6	2.5	4	5	6	8	10	12
	Longitudinal	1.6	2.5	4	5	8	10	12	16

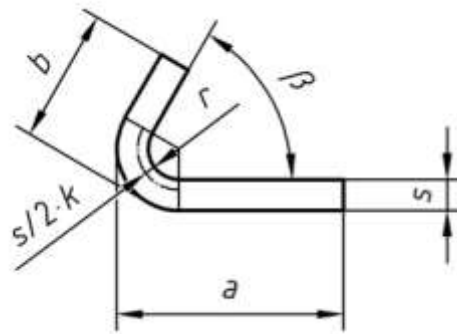
Fonte: Adaptada pelo autor da norma DIN 6935 (2010).

Utilizando a equação (3) é possível definir o tamanho mínimo da chapa para dobramento, onde " $a$ " e " $b$ " são as abas laterais da chapa a ser dobrada e " $v$ " é um fator que depende do ângulo final de dobramento. Para ângulo de abertura " $\beta$ " com variação de 165° até 180°, o valor de " $v$ " é igual a zero. (DIN, 2010, tradução nossa).

$$l = a + b + v \quad (3)$$

A Figura 3 apresenta as características da seção dobrada para ângulo de abertura " $\beta$ " com variação de 0° até 90°. Para essa variação de ângulo o fator " $v$ " é definido através da equação (4).

Figura 3: Geometria para cálculo do tamanho mínimo 0° a 90°

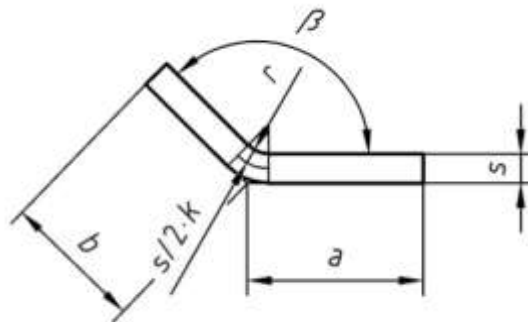


Fonte: DIN 6935 (2010, p. 7).

$$v = \pi * \left( \frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) * \left( r + \frac{s}{2} * k \right) - 2 * (r - s) \quad (4)$$

Na Figura 4 estão representadas as características da seção dobrada para ângulo de abertura “ $\beta$ ” com variação de 90° até 165°. Para essa variação de ângulo o fator “ $v$ ” é definido através da equação (5).

Figura 4: Geometria para cálculo do tamanho mínimo 90° a 165°



Fonte: DIN 6935 (2010, p.7).

$$v = \pi * \left( \frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) * \left( r + \frac{s}{2} * k \right) - 2 * (r - s) - \tan \frac{180^\circ - \beta}{2} \quad (5)$$

A equação (6) é utilizada para a definição do fator para a correção da posição da linha neutra “ $k$ ”.

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} * \log \frac{r}{s} \quad (6)$$

Na Tabela 2 são apresentados alguns valores típicos desse fator, utilizando-se o raio de dobramento em função da espessura da chapa.

Tabela 2: Fator de correção k com valores arredondados

Raio interno de dobramento "r" em função da espessura da chapa "s"	Razão r:s	de 0,65 até 1mm	de 1 até 1,5mm	de 1,5 até 2,4 mm	de 2,4 até 3,8 mm	Acima de 3,8 mm
Fator de correção "k" (valores arredondados)		0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm	1mm

Fonte: Adaptada pelo autor da norma DIN 6935 (2010).

Utilizando a equação (7) é possível prever a posição da linha neutra após o dobramento.

$$y = \frac{s}{2 * k} \quad (7)$$

Onde:

$r$  - é o raio do punção;

$s$  - é a espessura da chapa;

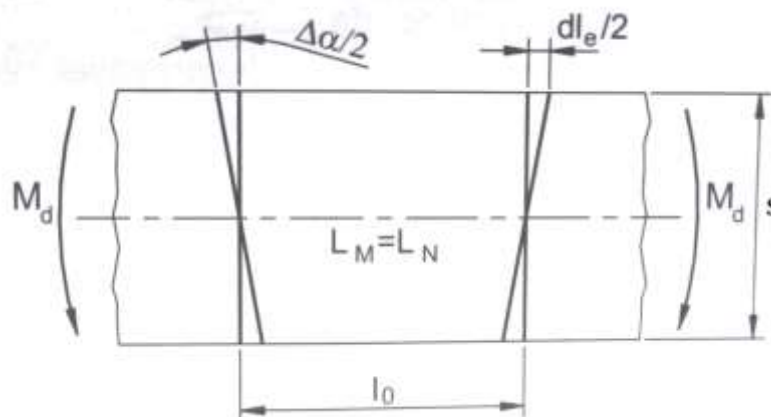
$\beta$  - é o ângulo de dobramento;

$y$  - é a posição da linha neutra.

## 2.2 Retorno elástico

O retorno elástico é a variação angular da peça quando as cargas aplicadas para deformar o material são retiradas. Essa variação se dá em torno da linha neutra e pode ser representada analogamente por  $\Delta\alpha/2$ . A Figura 5 é uma representação esquemática dessa variação.

Figura 5: Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico



Fonte: Adaptada pelo autor de Rodrigues, Martines (2010, p. 655).

Considerando que essa rotação se dá em domínio elástico em torno da linha neutra, o valor da recuperação elástica pode ser previsto através da equação (8).

$$\tan \frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{dl_e}{s} \quad (8)$$

Onde “ $dl_e$ ” é o comprimento recuperado da fibra externa da peça e “ $s$ ” é a espessura da peça.

Levando em consideração que a variação angular ou retorno elástico se dá em domínio elástico e o ângulo de variação angular é relativamente pequeno, pode-se adotar a equação (9) para a definição teórica do valor do retorno elástico.

$$\frac{\Delta\alpha}{l_0} = \frac{2 \cdot (\sigma_{xd})_{ext}}{E} \quad (9)$$

Onde “ $l_0$ ” é o comprimento da linha neutra, “ $(\sigma_{xd})_{ext}$ ” é a tensão do retorno elástico na fibra externa da peça e “ $E$ ” é o módulo de elasticidade do material.

Através das equações (8) e (9) é possível quantificar os fatores que podem gerar um aumento no retorno elástico. Alteração de fatores, tais como a redução do módulo de elasticidade ou da espessura do material, teoricamente, tem por consequência um retorno elástico maior. (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Os fatores que influenciam no retorno elástico estão relacionados a variáveis como espessura e resistência do material, raio punção, abertura da matriz e ângulo de dobramento.

A abertura da matriz de dobramento, geralmente, é definida em função da espessura da chapa, admitindo-se uma abertura de até oito vezes a espessura da chapa a ser dobrado. (MESQUITA; RUGANI, 1997).

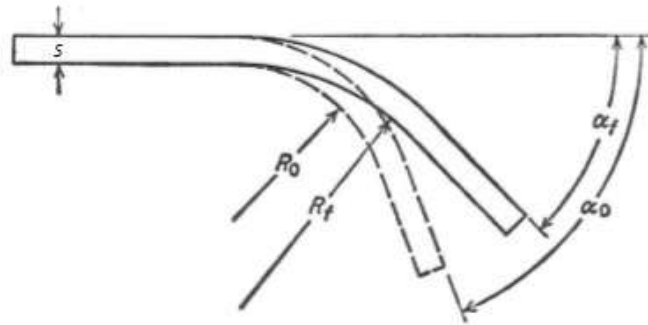
Para Dieter (1981), o retorno elástico é a variação que a peça deformada sofre após serem retiradas as forças de dobramento; prever essa variação é uma das dificuldades da conformação. Seu resultado depende das características do material e é proporcional ao limite de escoamento do material, e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade. A deformação plástica é outro fator responsável pelo aumento do retorno elástico. Assim, quanto maior a deformação plástica, maior a variação da peça.

O retorno elástico está presente em todos os processos de conformação, contudo no processo de dobramento é mais visível. Na Figura 6 é possível identificar de maneira análoga como ocorre o retorno elástico. Uma característica deste processo é que no dobramento ( $R_0$ ) apresenta um valor menor que ( $R_f$ ), após serem

retiradas as forças de dobramento. Esta variação pode ser descrita pela equação (10). (DIETER, 1981).

$$k = \frac{\alpha_f}{\alpha_0} = \frac{R_0 + s/2}{R_f + s/2} \quad (10)$$

Figura 6: Retorno elástico



FONTE: Adaptada pelo autor de Dieter (1981, p. 582)

Onde:

$\alpha_f$  - é o ângulo após o retorno elástico;

$\alpha_0$  - é o ângulo antes do retorno elástico;

$R_f$  - é o raio após o retorno elástico;

$R_0$  - é o raio antes do retorno elástico;

$K$  - é um fator do retorno elástico relativo;

$s$  - é a espessura.

Em geral, aços inoxidáveis austeníticos apresentam um retorno elástico maior que os ferríticos. Devido ao grau de encruamento maior, o valor do retorno elástico é normalmente proporcional a  $\frac{1}{2} * (0,2 * +LR)$ , onde LE é o limite de escoamento e LR é o limite de resistência à tração do aço inoxidável. (MESQUITA; RUGANI, 1997).

### 2.3 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza é uma forma de avaliar a dureza em peças pequenas, ou em camadas superficiais de peças tratadas termicamente, ou modificadas por trabalho mecânico. Esse tipo de ensaio também pode ser utilizado para definir microconstituintes do material ensaiado.

O ensaio de microdureza Vickers é realizado utilizando cargas inferiores a 1 kg, produzindo uma impressão na peça ensaiada através de um penetrador piramidal de diamante, que só é possível analisar microscopicamente. Assim para realização deste ensaio, é necessário uma preparação prévia da peça a ser medida.

Para medição de microdureza Vickers calcula-se a área da impressão do penetrador na peça medindo suas diagonais, com uma carga definida durante um tempo. (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

A microdureza Vickers de um material metálico pode ser correlacionada com limite de resistência à tração desse material, ou ainda com a sua resistência à deformação plástica. O aumento da dureza, por outro lado, diminui a ductilidade desse material.

Esse fato ocorre devido ao encruamento, que é um dos mecanismos de endurecimento muito utilizado na indústria para aumentar a dureza de materiais. O encruamento se dá pela movimentação das discordâncias reduzindo a distância média entre elas; ocorre assim uma maior densidade dessas discordâncias, o que aumenta a resistência à movimentação, tornando o material mais frágil. Uma forma de eliminar ou reduzir os efeitos do encruamento é realizando um tratamento térmico no material após a conformação. (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

O encruamento nos aços inoxidáveis austeníticos gera um fenômeno que não é comum na maioria dos aços. Esse fenômeno é o aumento da dureza de maneira exponencial. Isso é atribuído à instabilidade da austenita, que mediante a deformação a frio se transforma em martensita. A resistência à tração nesse caso pode chegar a níveis da ordem de 250 kg/mm<sup>2</sup>. Para os aços inoxidáveis austeníticos, o tratamento térmico também pode reduzir os níveis de encruamento, e garantir a presença da austenita, melhorando a ductilidade e a tenacidade ao aço. (CHIAVERINI, 1981).

## **2.4 Estudos realizados sobre o tema**

Sales (2013) analisou diferentes condições de dobramento do aço inoxidável AISI 304 e do aço inoxidável SAF 2205. Entre os pontos analisados estão os efeitos do ângulo e do raio de dobramento na ocorrência de fratura dos materiais e, no retorno elástico, também a distribuições de dureza ao longo da seção transversal e a influência do tratamento térmico no retorno elástico.

O estudo foi realizado utilizando amostras com dimensões e espessuras iguais, para dobrar as mostras utilizou-se uma matriz em V com três ângulos distintos de 30°, 60° e 90°, e como ferramenta de dobramento utilizou-se cinco punções com raios de (2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 10 mm).

As análises foram realizadas no material em três condições diferentes: no estado como recebido do fabricante e após dois tratamentos térmicos variando o tempo de resfriamento com 15 e 60 minutos,

Os resultados apresentados pelo autor mostram que a ocorrência de trincas ou fraturas foram inexistente em todas as condições. Contudo, a influência do raio do punção no retorno elástico ficou visível, seguindo uma tendência. Quanto maior o raio do punção e o ângulo de dobramento, maior o retorno elástico, sendo mais acentuado no SAF 2205. Essa tendência se manteve nos corpos de prova tratados termicamente com apenas duas exceções. Porém, nas peças tratadas termicamente houve um retorno elástico menor em comparação às amostras sem tratamento térmico. Na análise da influência do tempo de resfriamento no retorno elástico, o autor observou que essa diferença foi considerada aleatória.

Os resultados de microdureza exibiram distribuições heterogêneas e dentro do esperado considerando o método experimental utilizado. Os níveis de dureza mais elevados foram medidos nas extremidades externas e internas do dobramento. Avaliando as condições de dureza entre as amostras propostas, o aço SAF 2205 apresentou maiores variações de dureza que o AISI 304 em todas as condições avaliadas.

A Tabela 3 apresenta os resultados de dureza para o aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido e com a variação do raio do punção de 2 mm e 8 mm.

Tabela 3: Resultados de dureza do AISI 304 com dois raios de punção diferentes

Aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido após o dobramento										
	ângulo = 90° e raio = 2 mm					ângulo = 90° e raio = 8 mm				
Posição	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Dureza Vickers	287	244	213	187	243	284	275	237	229	245

Fonte: Adaptada pelo autor de Sales (2013, p. 104).

Rocha (2006) realizou um estudo sobre a conformabilidade do aço austenítico 304. Características como o aumento na demanda desse material na indústria de conformação e sua boa conformabilidade, excelente resistência e

principalmente por apresentar transformação de fase induzida por deformação, fato que contribui na deformação uniforme, foram as razões que levaram o autor a realizar um estudo sobre os aços austeníticos.

Com foco na transformação induzida por deformação, em que a austenita retida altera sua estrutura para martensita. O autor utiliza diferentes caminhos de deformação, variando as condições de laminação do material, constatou que a anisotropia do material pode ser avaliada através da relação entre a resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano e da espessura das chapas. Sabendo que as propriedades mecânicas podem variar nas diferentes direções no plano, o autor utilizou a equação (11) para relacionar os três planos em função do sentido de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ).

$$ra = \varepsilon L / \varepsilon E \quad (11)$$

Onde:

- $ra$ - coeficiente de anisotropia ou de Lankford;
- $\varepsilon L$ - deformação verdadeira na direção da largura;
- $\varepsilon E$ - deformação verdadeira na direção da espessura.

Com os resultados o autor observou que aumentando a deformação ocorria um aumento gradativo da martensita, aumentando assim a possibilidade de falha precoce do material. Através dos ensaios constatou que o aumento da microdureza chegou a níveis de 366HV até 460HV. Esses valores de microdureza foram relacionados com o aumento gradativo do grau de encruamento durante a deformação. (ROCHA, 2006).

Ferrarini (2004) realizou um estudo por meio de ensaios de tração sobre as propriedades mecânicas das chapas metálicas empregadas na fabricação de produtos estampados, propriedades como dureza, índice de anisotropia, anisotropia média e anisotropia planar. A partir de ensaios de tração estudou a influência da anisotropia na estampagem profunda.

Através do estudo observou que o material escoava melhor nas direções com maior índice de anisotropia.

Assim o autor utilizou uma metodologia para o estudo seguindo três casos:

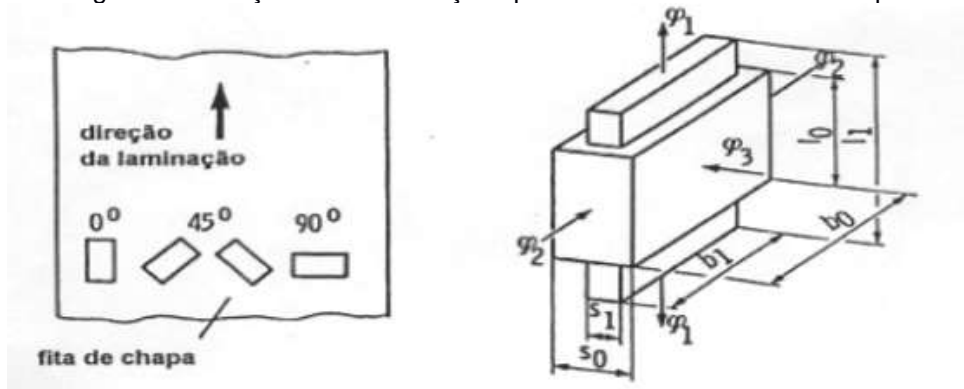
- Primeiro caso:  $ra_{0^\circ} = ra_{45^\circ} = ra_{90^\circ} = 1$  (anisotropia total).

- Segundo caso:  $ra_{0^\circ} = ra_{45^\circ} = ra_{90^\circ} \neq 1$  (anisotropia normal ou média e anisotropia planar).
- Terceiro Caso:  $ra_{0^\circ} = ra_{45^\circ} = ra_{90^\circ} \neq 1$  (anisotropia média ou normal + anisotropia planar).

O estudo se deu através do cálculo do índice de anisotropia que define as deformações na largura e na espessura do corpo de prova. Utilizando esse método, o autor pode avaliar indiretamente a conformabilidade da chapa metálica.

Na Figura 7 estão apresentadas esquematicamente as definições das deformações volumétricas utilizadas para obter o índice de anisotropia.

Figura 7: Definição das deformações para obter o índice de anisotropia



Fonte: Ferrarini (2004, p. 31).

Para comparar os resultados obtidos nos ensaios utilizou-se as seguintes equações.

Através da equação (12) obteve o índice de anisotropia teórico.

$$ra = \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_3}\right) = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) / \left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (12)$$

A equação (13) para a definição teórica da anisotropia média.

$$ram = \frac{1}{4}(ra_{0^\circ} + 2ra_{45^\circ} + ra_{90^\circ}) \quad (13)$$

E a equação (14) para definição teórica da anisotropia planar.

$$\Delta ra = \frac{ra_{0^\circ} + ra_{90^\circ}}{2 - ra_{45^\circ}} \quad (14)$$

Onde:

$\varphi$  - é a deformação verdadeira ou real;

$ra$  - é o índice de anisotropia;

$ram$  - é o índice de anisotropia média;

$\Delta ra$  - é o índice de anisotropia planar.

Através desse estudo, chegou-se aos seguintes resultados: índice de anisotropia média ( $ram = 0,991$ ) e anisotropia planar ( $\Delta ra = -0,283$ ). (FERRARINI, 2004).

A variação da orientação dos grãos do material em relação à solicitação ao qual é submetido, e as tensões de elasticidade do material variam segundo esse índice, com uma tendência de serem maiores no sentido perpendicular ao sentido de laminação. (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Santos (2013) realizou um estudo sobre a influência da geometria da ferramenta e da força aplicada após o dobramento no retorno elástico em aços de alta resistência. O autor utilizou dois métodos de dobramento, em “V” e “L”, para três materiais distintos. Os corpos de prova foram fabricados variando o sentido de laminação a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  para analisar o coeficiente de anisotropia e encruamento, e sua influência nos resultados.

Para o dobramento em “V” foi utilizado três níveis de força diferentes, 2500N, 5000N e 8000N, aplicados após o punção atingir a folga especificada, que nesse caso era a espessura da chapa. Assim, foi possível avaliar como os diferentes níveis de força, aplicada após o dobramento, podem auxiliar na redução do retorno elástico. Outro parâmetro analisado foi o raio de ferramenta, para isso utilizam-se quatro raios distintos, 10 mm, 5 mm, 2,5 mm e punção sem raio.

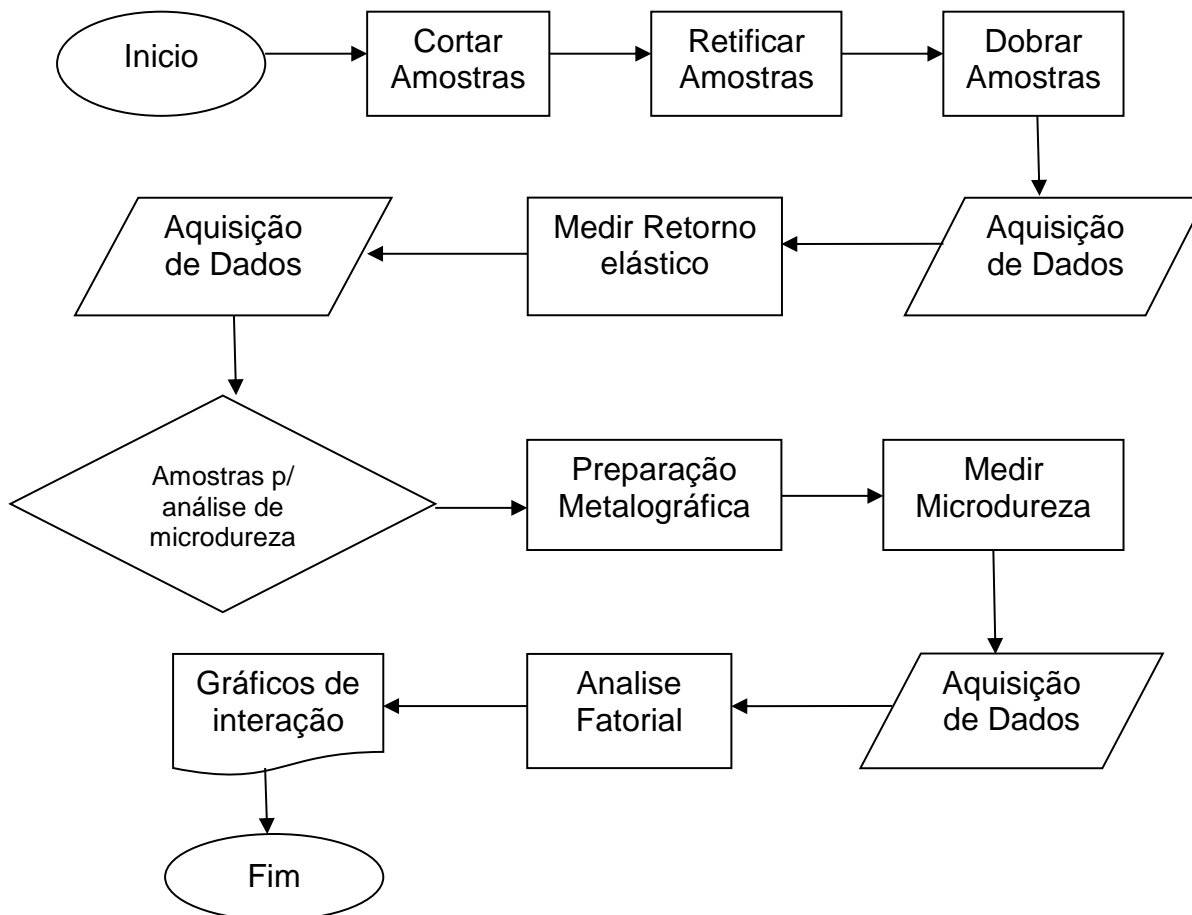
Os resultados apresentados mostraram que com a variação do raio do punção, o retorno elástico ficou dentro do esperado para a metodologia utilizada. Apenas nas amostras dobradas com punção sem raio os valores de retorno elástico, foram negativos, caracterizando um avanço elástico. Para a análise do retorno elástico em função da força após o dobramento, os resultados obtidos foram bem heterogêneos para os diferentes materiais analisados, contudo seguiram uma tendência: com o aumento da força, o retorno elástico foi menor, chegando a níveis negativos, caracterizando assim um avanço elástico.

### 3 MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho e a obtenção de dados.

A metodologia utilizada está representada no fluxograma abaixo.

Figura 8: Fluxograma



Fonte: o autor (2016)

### 3.1 Materiais

Foram utilizadas chapas de aço inoxidável AISI 304 com espessura de 1,52 mm, 3,04 mm e 4,18 mm. A Tabela 4 apresenta a composição química do aço inoxidável 304 fornecida pelo fabricante; já na Tabela 5 são apresentadas as propriedades mecânicas, também fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4: Composição química do aço inoxidável 304

Composição química do AISI 304 em %									
C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Co
0,032	1,290	0,580	0,039	18,00	8,00	0,143	0,0032	0,2697	0,176

FONTE: o autor (2016)

Tabela 5: Propriedades mecânica do aço inoxidável 304

Propriedades Mecânicas do AISI 304			
Lim. Resistência (Mpa)	Lim. Escoamento (Mpa)	Alongamento %	Dureza HBR
695	336	52	83,16

FONTE: o autor (2016)

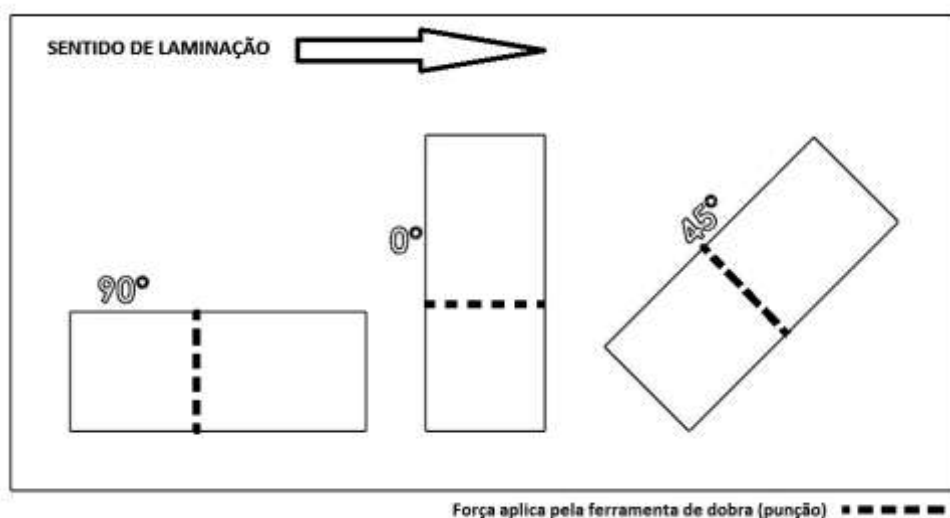
Para determinar o tamanho do *blank* (tamanho das amostras) necessário para os ensaios, foram utilizadas as equações (3, 4, 5 e 6), e assim definir as abas laterais “a” e “b” das amostras.

Com as medidas “a”, “b” e o raio do punção de dobramento, foi projetado um modelo em 3D no software SolidWorks para identificar o deslocamento limite do punção, ou o tamanho da flecha necessária para cada combinação de espessura e o ângulo de dobramento. O limite especificado foi a folga entre o corpo de prova e a matriz, que para este caso, é a espessura da chapa.

Os corpos de prova foram cortados através do processo de eletroerosão a fio na máquina AgieCharmilles FW1U, com dimensões de 21 mm de largura e 50 mm de comprimento. A Figura 9 apresenta o projeto de posição de corte dos corpos de prova com os sentidos de laminação 0°, 45° e 90°. Para cada espessura, foram retirados 4 corpos de prova com o mesmo sentido de laminação, gerando um total de 108 corpos de prova.

Finalizado o corte, os corpos de prova foram separados por espessura; a fim de garantir a mesma largura todos foram retificados utilizando a retificadora Mello P25. Para todas as amostras foi atribuído um número para identificação nas etapas seguintes do trabalho.

Figura 9: Projeto do corte das amostras



Fonte: o autor (2016)

Para o dobramento foi utilizada uma matriz em "V" com quatro ângulos distintos, 30°, 60°, 90° e 120°, representada na Figura 10. A variável ( $V$  abertura da matriz) tem a medida de 35 mm para todos os ângulos de dobramento.

Figura 10: Matriz em "V" para o dobramento



Fonte: o autor (2016)

Como ferramentas para realizar o dobramento, foram utilizados três punções com raio equivalente a uma vez a espessura da chapa, que estão representados na Figura 11.

As características dos punções foram definidas em função das características químicas e mecânicas do aço inoxidável 304. Outro fator para definição dos punções foram às condições encontradas em outros estudos que indicaram, com a utilização de raio de punção menor, os resultados de retorno elástico são menores.

Figura 11: Punções utilizados no dobramento



Fonte: o autor (2016)

A produção dos punções e da matriz utilizadas nos ensaios foi realizada anteriormente, durante o sexto semestre do Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, na unidade curricular Projeto Integrador III, pelos discentes Fabiano Cardoso e Rhafael Beppler. Todas as especificações estão apresentadas nos anexos 1, 2, 3 e 4.

### **3.2 Análise Fatorial**

A sequência dos ensaios foi planejada utilizando o método DOE (Design of Experiments) com o auxílio do software Minitab<sup>®</sup> na versão 17.1. Foi optado pela sequência aleatória para diminuir a influência das condições do ambiente e do equipamento. O experimento foi realizado com três fatores e três níveis para cada

fator, com quatro réplicas para cada caso, os dados do ensaio estão representados na Figura 12.

Figura 12: Experimento fatorial multinível

### Experimento fatorial multinível

Fatores:	3	Réplicas:	4
Ensaio base:	27	Total de ensaios:	108
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

Número de Níveis: 3; 3; 3

Fonte: o autor (2016)

Todos os valores coletados foram transferidos para o software Minitab® para análise fatorial de interação.

Variáveis analisadas no experimento:

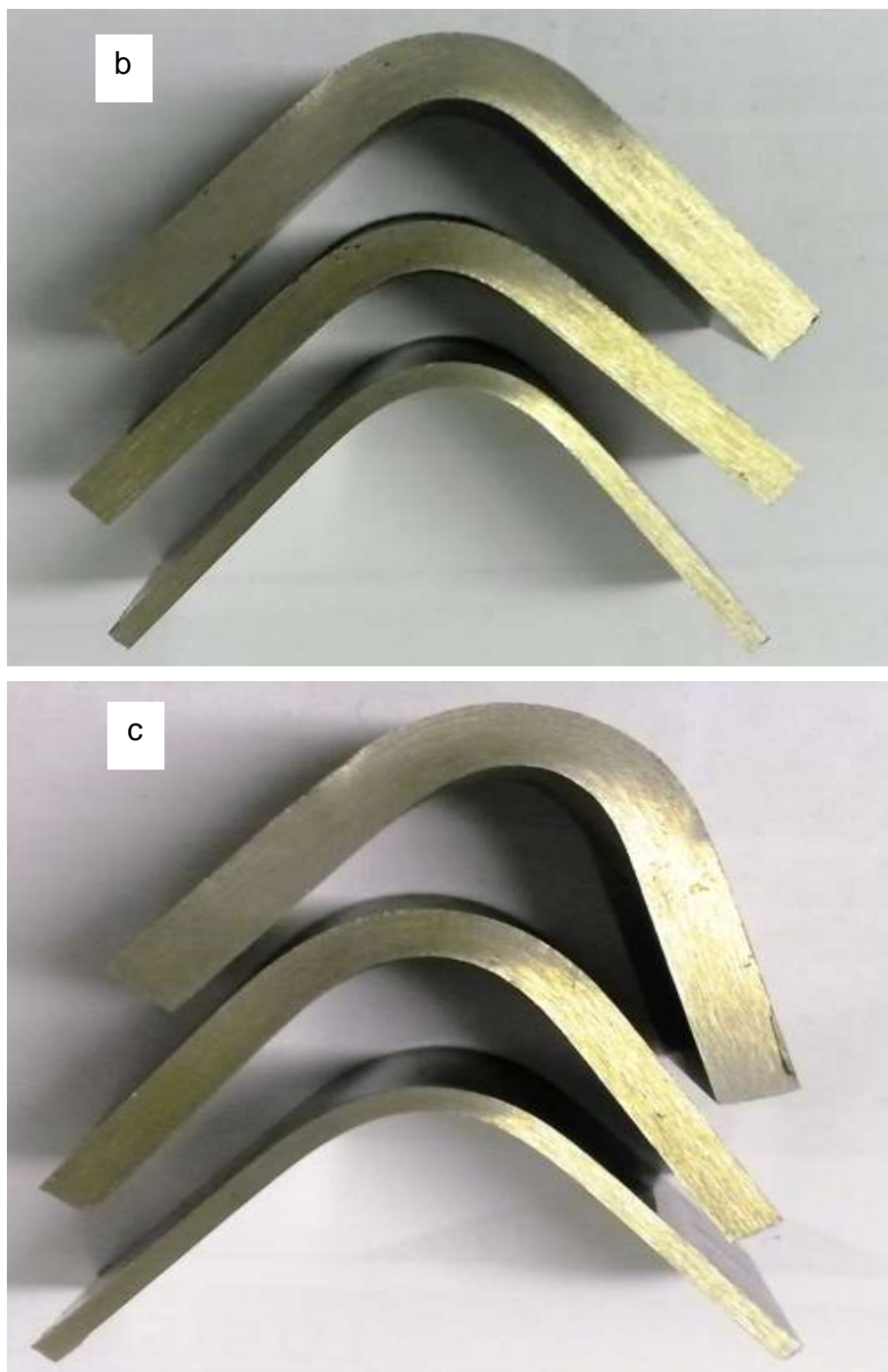
- Espessura e direção de laminação;
- Direção de laminação e ângulo de dobramento;
- Espessura e ângulo de dobramento;
- Análise completa de interação.

### 3.3 Dobramento

O dobramento das 108 amostras foi realizado na máquina de ensaios universal EMIC DL10000, utilizando-se uma velocidade de ensaio constante de 0,5 mm/min. As amostras dobradas estão representadas na Figura 13.

Figura 13: Amostras dobradas a: (a) 120°, (b) 90° e (c) 60°.





Fonte: o autor (2016)

### 3.4 Retorno Elástico

A medição do retorno elástico foi realizada utilizando-se um projetor de perfil da marca Mitutoyo modelo PJ-A3000 que possui uma resolução de 1' ou 0,01°, representado na Figura 14. Os valores de retorno elástico estão representados nos apêndices 3 e 4.

Figura 14: Projetor de perfil



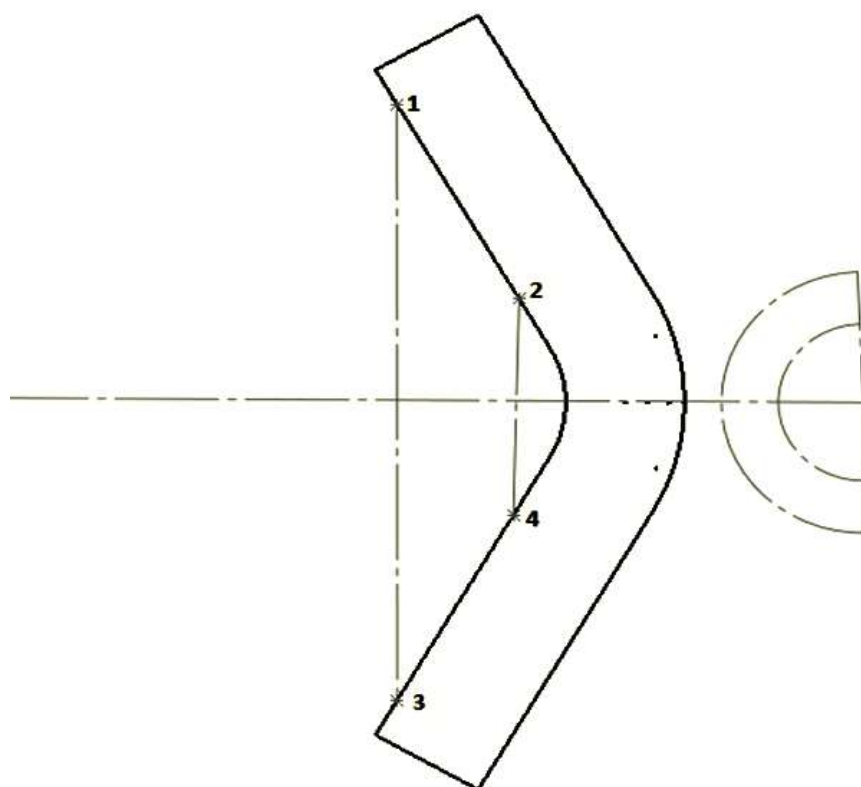
Fonte: o autor (2016)

A Figura 15 apresenta o modelo esquemático para a realização das medições do retorno elástico. A ordem de medição seguiu a seguinte sequência.

Inicialmente, foram medidos os corpos de prova de 1,52 mm; em seguida, os corpos de prova de 3,04 mm e, por fim, os corpos de prova de 4,18 mm.

Para as médias dos valores de retorno elástico foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, garantindo um índice de confiança de 95%. Assim foi possível obter os valores de média e desvio padrão das análises, os resultados das análises estão representados nos apêndices 1 e 2.

Figura 15: Pontos de medição do retorno elástico



Fonte: o autor (2016)

### 3.5 Microdureza

Para medição de microdureza foi necessária uma preparação prévia das amostras. Para isso, as amostras selecionadas foram embutidas utilizando-se um método a frio. Posteriormente, foram lixadas em uma lixadeira modelo PFL, seguindo uma sequência de lixas com granulometria de 150, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200. Em seguida, foi realizado o polimento das amostras.

A medição de microdureza foi realizada utilizando-se o microdurômetro FM-800, que possui uma resolução de  $0,01\mu\text{m}$  e está representado na Figura 16. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: força de penetração de 200gf e tempo de ensaio de 10 segundos.

Figura 16: Microdurômetro



Fonte: o autor (2016)

A análise de microdureza foi realizada nas amostras com 4,18 mm de espessura. Para cada um dos três ângulo de dobramento foi selecionada uma amostra com sentido de laminação distinto, somando um total de 9 amostras. O número das amostras, ângulo de dobramento e sentido de laminação utilizado está representado na Tabela 6.

Foram selecionados seis pontos para medição da microdureza, a Figura 17 apresenta esquematicamente a posição dos pontos selecionados. As posições têm como objetivo:

- Análise dos níveis de microdureza no ponto máximo de tração (ponto 1);
- Análise da microdureza na linha neutra (ponto 4);
- Pontos intermediários de microdureza da região dobrada (pontos 5 e 6).

Para determinar a posição da linha neutra (ponto 4) foram utilizadas as equações (6 e 7), da norma DIN.

Tabela 6: Amostras selecionadas para medição da microdureza.

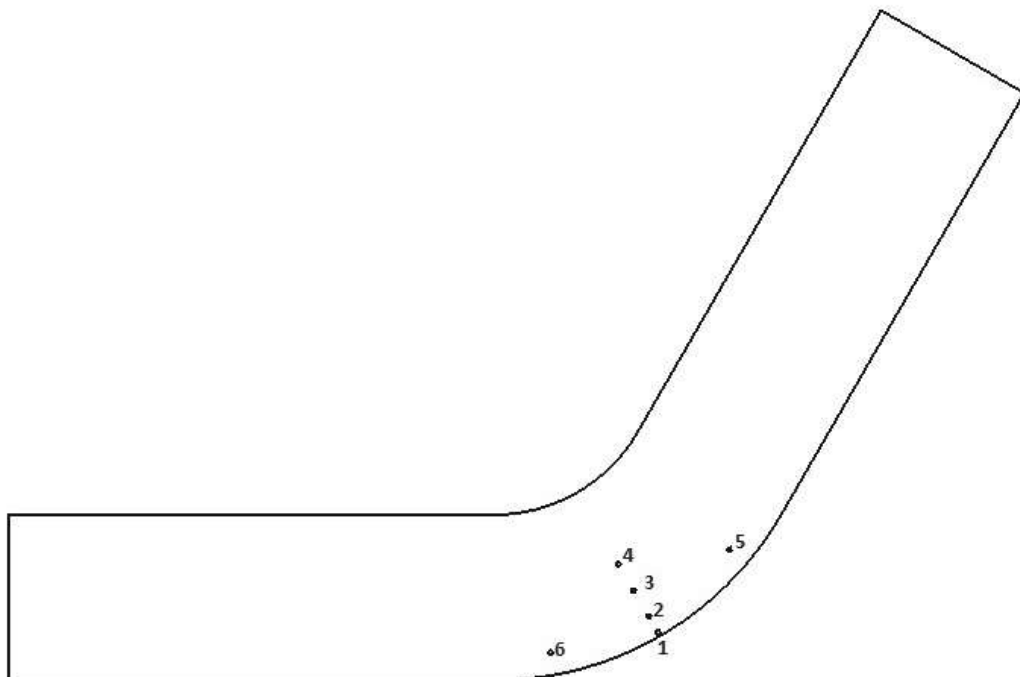
Número da amostra	Sentido de Laminação	Ângulo de Dobramento
16	0°	60°
<b>50</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>
68	0°	120°
9	45°	60°
<b>37</b>	<b>45°</b>	<b>90°</b>
61	45°	120°
29	90°	60°
<b>7</b>	<b>90°</b>	<b>90°</b>
40	90°	120°
<b>Corpos de prova de 1,52mm e 3,04mm</b>		
<b>46</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>
<b>87</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>

Fonte: o autor (2016)

Outro parâmetro analisado foi a variação da microdureza em relação à espessura do material. Para isso, a distância dos pontos 2 e 3 coincidem com o ponto máximo de tração dos corpos de prova de 3,04 mm e 1,52 mm.

Para comparar os valores de microdureza obtidos nas diferentes espessuras, foram separadas uma amostra com espessura de 1,52 mm e uma com 3,04 mm, com sentido de laminação de 0° e ângulo de dobramento de 90°.

Figura 17: Pontos de medição da microdureza



Fonte: o autor (2016)

### **3.6 Força de dobramento**

Os valores de força foram obtidos durante o dobramento das amostras utilizando um transdutor de medição de força (célula de carga), presente na máquina de ensaios universal EMIC DL10000, esses valores foram repassados para um microcomputador que se comunica diretamente com a máquina. Todos os valores obtidos estão representados nos apêndices 3 e 4.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

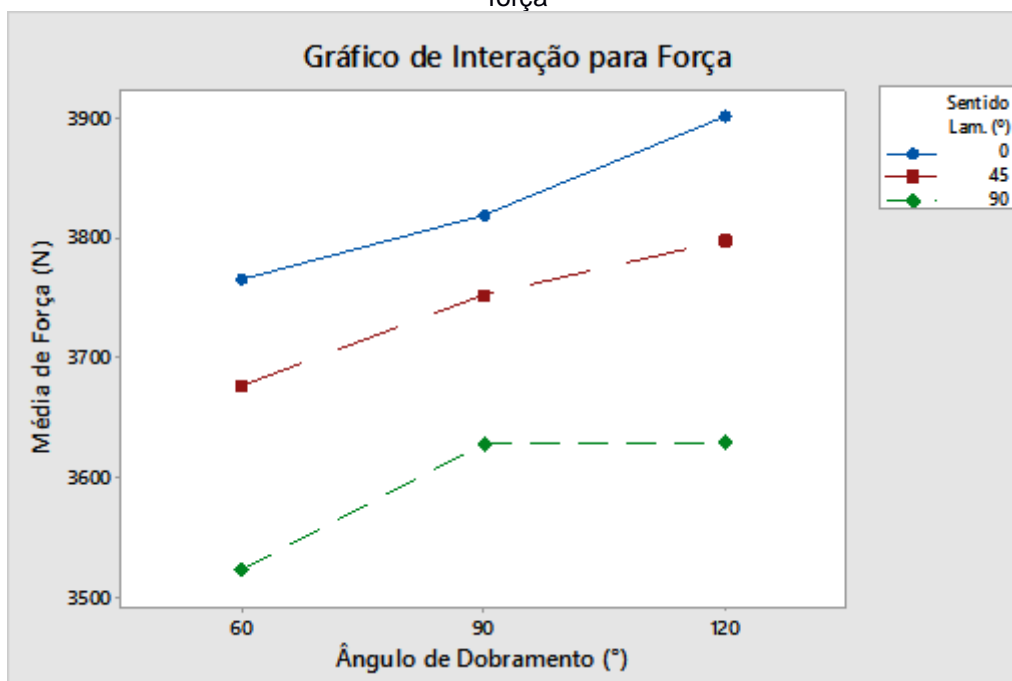
### 4.1 Força de dobramento

Os resultados da interação entre os fatores sentido de laminação *versus* ângulo de dobramento, e sentido de laminação *versus* espessura, para a resposta força estão representados nos gráficos a seguir.

A Figura 18 apresenta o gráfico de interação dos fatores sentido de laminação *versus* ângulo de dobramento. Através do gráfico é possível observar que o fator sentido de laminação tem influência considerável na força média de dobramento para essa combinação de fatores. Os menores valores são apresentados nas amostras com sentido de laminação a 90°, cujo alongamento dos grãos do material laminado é perpendicular à força aplicada. Esse resultado possivelmente está relacionado com o índice de anisotropia do material, tendo como base o estudo realizado por Ferrarini (2004), o qual por meio de ensaios de tração constatou que o material escoia melhor com índices de anisotropia maiores.

Os resultados se mostraram coerentes, tendo em vista que as variações dos valores de força seguem uma sequência, apresentando valores maiores para as amostras com sentido de laminação a 45°, e atingindo o valor máximo para as amostras com sentido de laminação a 0° e ângulo de dobramento a 120°.

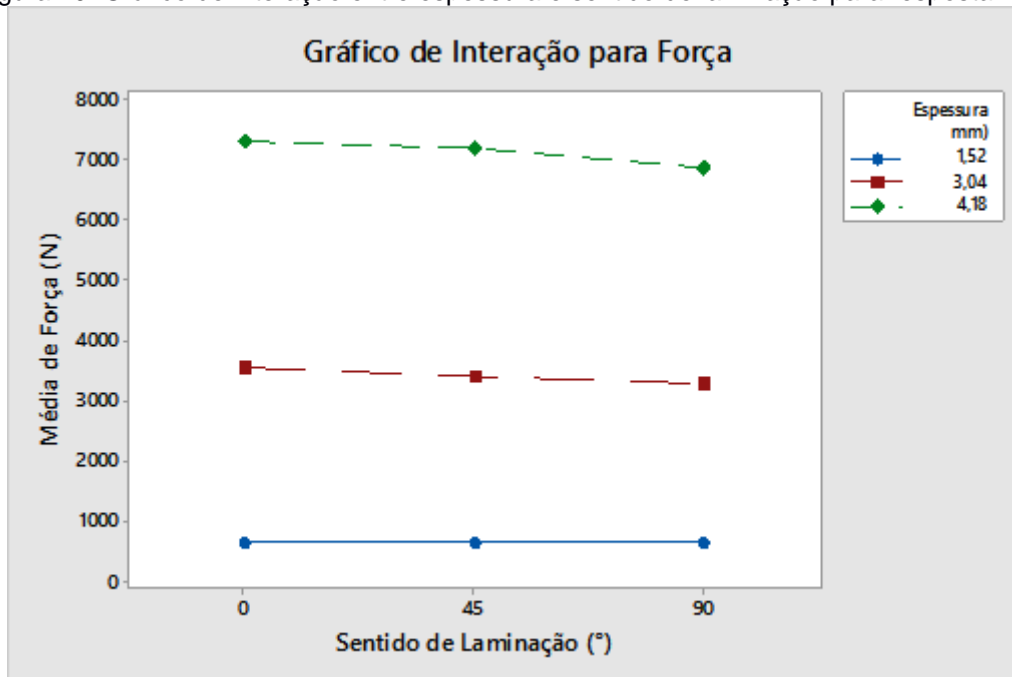
Figura 18: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e sentido de laminação para resposta força



Fonte: o autor (2016)

A Figura 19 apresenta o gráfico de interação de fatores sentido de laminação *versus* espessura. Nesse gráfico fica visível que o principal efeito nos resultados de força de dobramento é a espessura do material.

Figura 19: Gráfico de interação entre espessura e sentido de laminação para resposta força



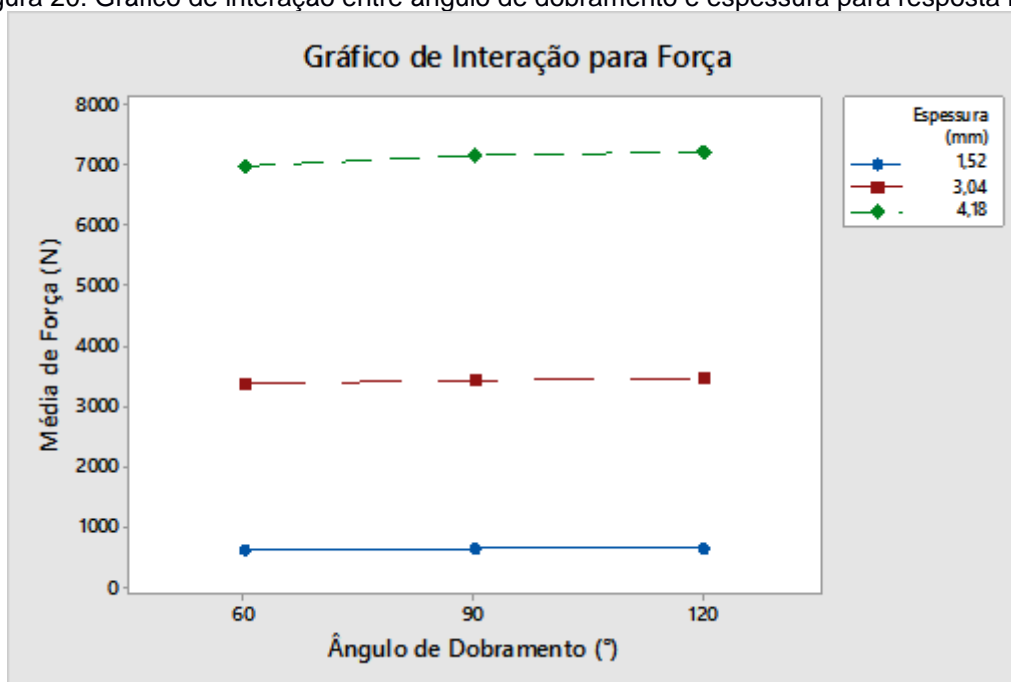
Fonte: o autor (2016)

Esse resultado já era esperado, conforme foi apresentado por Rodrigues e Martins (2010), através da equação (2), nessa equação é possível avaliar que a espessura é um fator ao quadrado na definição da força necessária para dobrar o material.

Isso pode ser observado na Figura 20, a qual apresenta a interação da espessura com o ângulo de dobramento. Outro fato que pode ser observado é que para todas as interações o ângulo de dobramento não apresenta influência significativa para a análise da força de dobramento.

Todos os valores de força coletados nos ensaios estão representados nas tabelas dos apêndices 3 e 4.

Figura 20: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e espessura para resposta força



Fonte: o autor (2016)

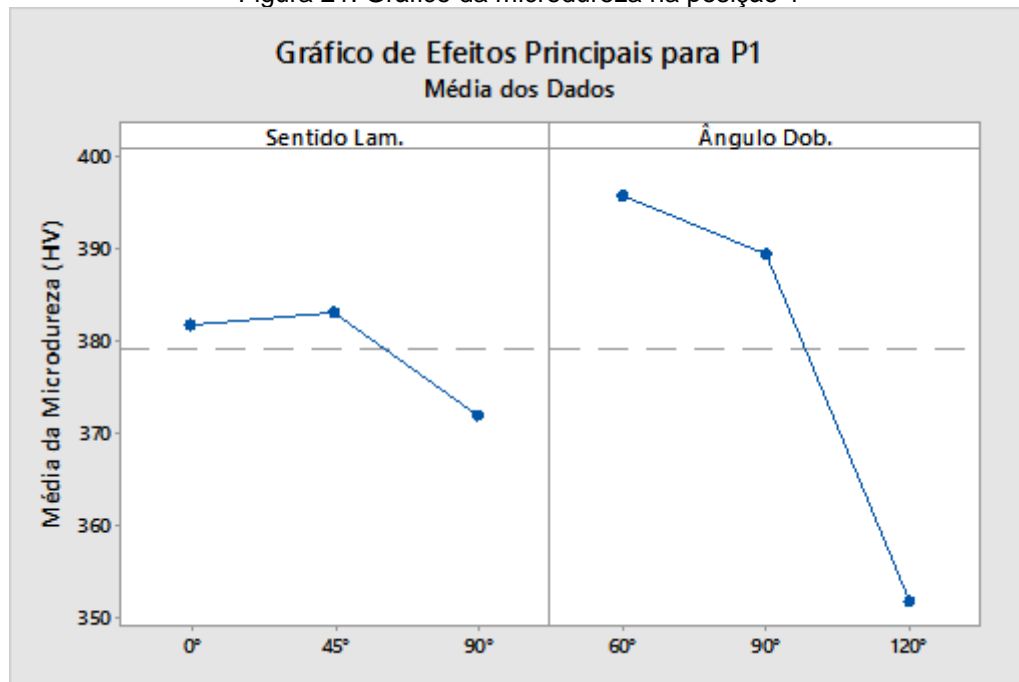
## 4.2 Análise da microdureza

As Figuras 21 até 26 apresentam os gráficos de análise da microdureza para as seis posições medidas nas amostras com 4,18 mm, três ângulos de dobramento e três sentidos de laminação.

Os resultados da microdureza para o ângulo de dobramento seguem uma tendência, em todas as posições medidas. Os valores de microdureza aumentaram gradualmente com o aumento da deformação, com resultados que variaram de 250,8 HV na posição 4 (linha neutra teórica) a 400,1 HV na posição 1 (posição de máxima deformação).

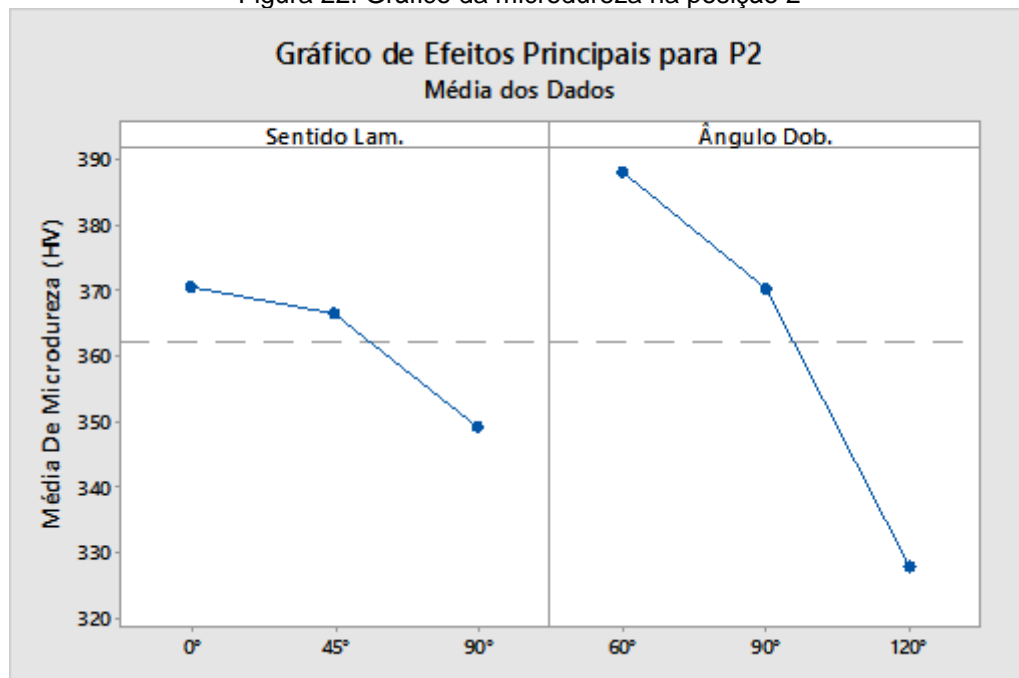
Esse aumento é explicado por Chiaverine (1981), devido ao aumento dos níveis de encruamento do material com o aumento da deformação. Outro fator é o trabalho mecânico a frio em que ocorre a transformação da austenita em martensita. Esse fenômeno está diretamente relacionado à classe dos aços inoxidáveis austeníticos.

Figura 21: Gráfico da microdureza na posição 1



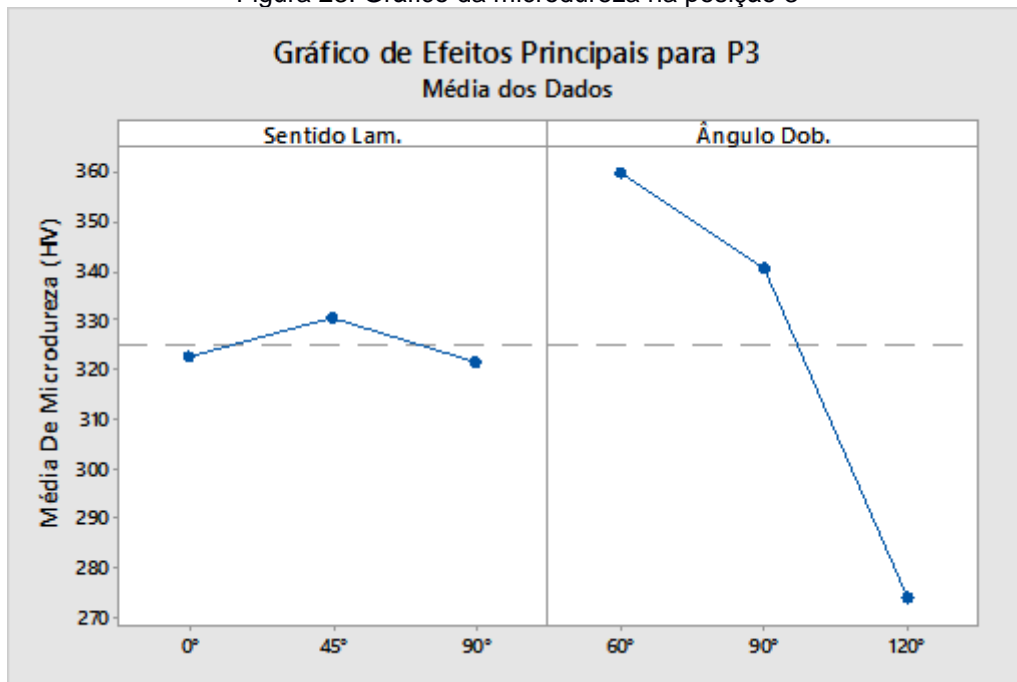
Fonte: o autor (2016)

Figura 22: Gráfico da microdureza na posição 2



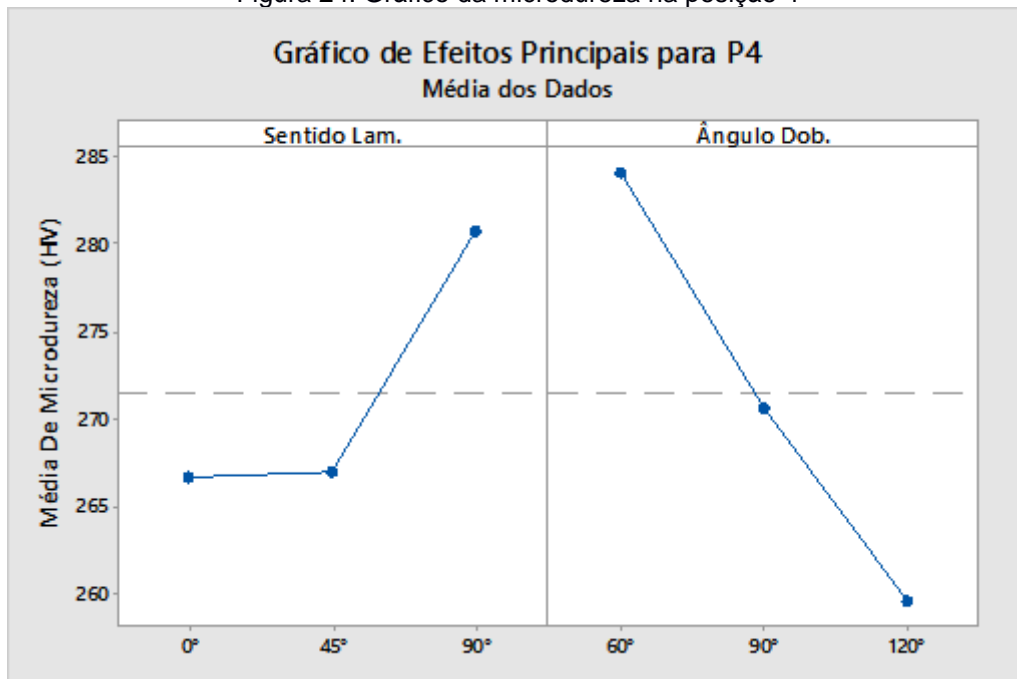
Fonte: o autor (2016)

Figura 23: Gráfico da microdureza na posição 3



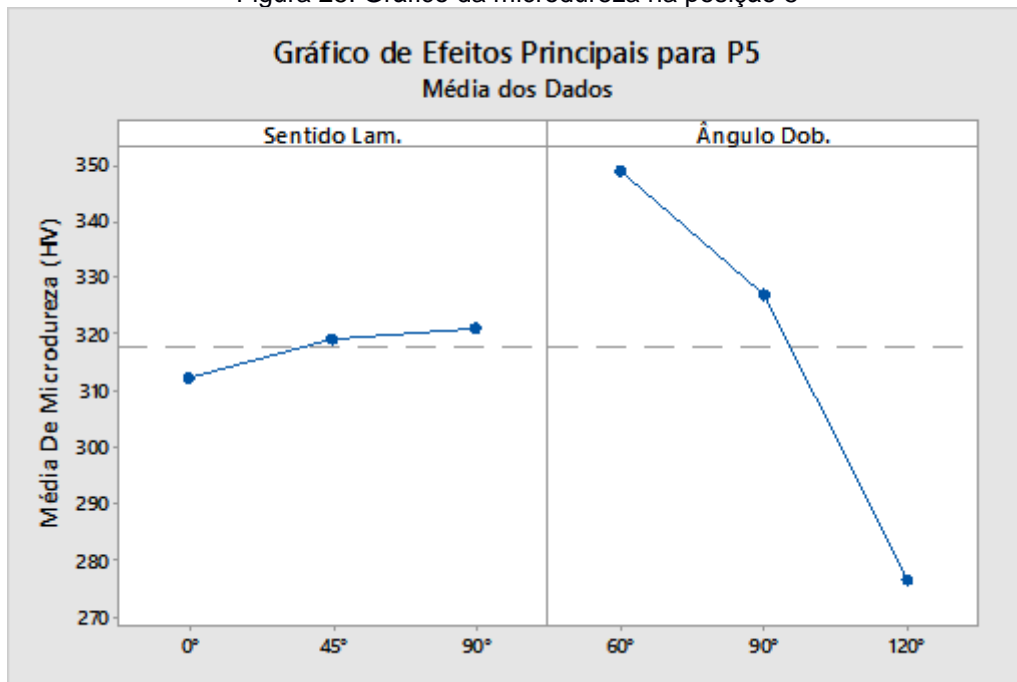
Fonte: o autor (2016)

Figura 24: Gráfico da microdureza na posição 4



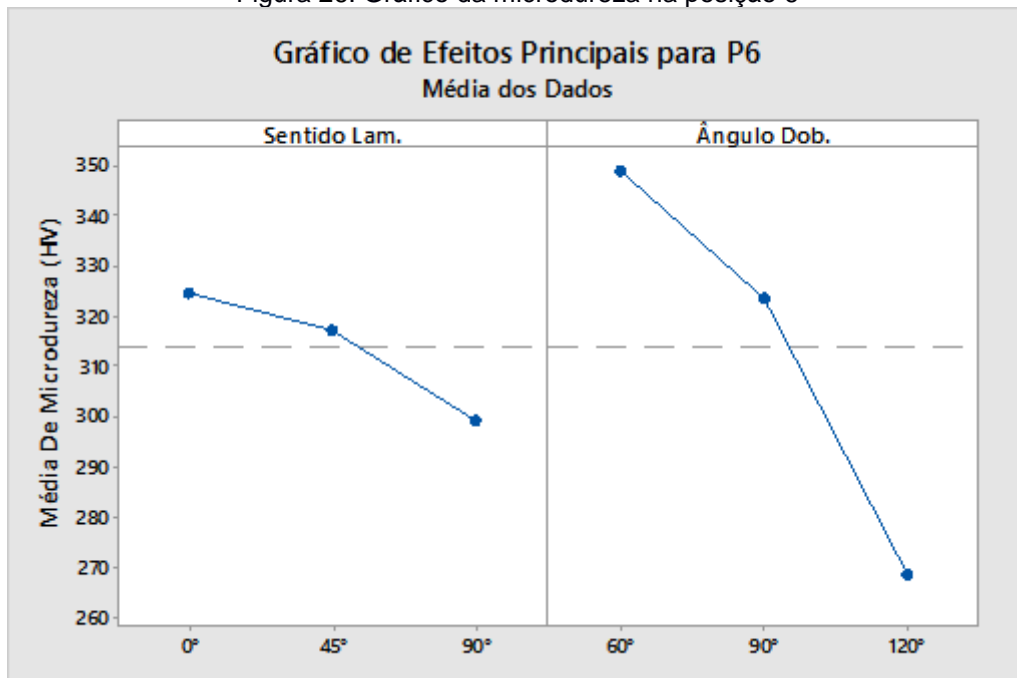
Fonte: o autor (2016)

Figura 25: Gráfico da microdureza na posição 5



Fonte: o autor (2016)

Figura 26: Gráfico da microdureza na posição 6



Fonte: o autor (2016)

Os resultados encontrados são coerentes com os resultados obtidos por Rocha (2006), em um estudo realizado com aços inoxidáveis austeníticos. Nos

resultados dos ensaios de tração, ele relacionou o aumento da do material com o aumento gradativo do grau de encruamento.

Na Tabela 7 estão representados os valores de microdureza medidos das amostras com 4,18 mm nos diferentes ângulos de dobramento e sentidos de laminação. Na tabela pode-se visualizar que os maiores valores estão relacionados com as maiores deformações para todas as posições.

Tabela 7: Valores de microdureza para amostras de 4,18 mm de espessura

Sentido Lam. em (°)	Ângulo Dob. em (°)	Posição de Medição da microdureza em HV					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
0°	60°	400,1	390,8	364,4	283,8	346,1	356,5
45°	60°	388,2	387,2	352,5	270,2	347,4	352,3
90°	60°	399,1	386,9	363,3	298,4	353,2	338,0
0°	90°	394,6	375,3	328,4	265,6	314,8	344,0
45°	90°	396,2	376,5	357,5	267,0	333,7	328,4
90°	90°	377,4	359,1	336,3	279,5	333,0	298,3
0°	120°	350,7	345,6	275,7	250,8	276,1	273,3
45°	120°	365,2	335,9	281,7	263,8	276,3	270,7
90°	120°	339,5	302,3	265,1	264,5	277,4	261,4

Fonte: o autor (2016)

Já para os resultados de microdureza em função do sentido de laminação, os valores se mostraram heterogêneos, e com uma tendência nas posições 1, 2, 3 e 6. Com essa tendência é possível mensurar uma influência do sentido de laminação nos níveis de microdureza. Sabendo que o material pode apresentar níveis distintos de encruamento em função da deformação sofrida, é possível relacionar também que esta variação do encruamento pode se apresentar em função do sentido de laminação. Outro fator que pode explicar os resultados é o tipo de ensaio utilizado, tendo como base Rodrigues e Martins (2010). Segundo os autores o ensaio de microdureza é uma forma de avaliar a dureza em peças pequenas, ou em camadas superficiais de peças modificadas por trabalho mecânico, também pode ser utilizado para definir microconstituintes do material ensaiado. Teoricamente a camada analisada pode apresentar essas variações, o que pode explicar a variação de microdureza apresentada nos resultados.

#### 4.2.1 Comparação da microdureza em função das diferentes espessuras

As Tabelas 8 e 9 apresentam a comparação de microdureza para as diferentes espessuras das amostras.

Tabela 8: Comparação de microdureza para as espessuras de 4,18 e 1,52 mm

Ângulo 90°	1,52mm Lam. 0°	4,18mm Lam. 0°	4,18mm Lam. 45°	4,18mm Lam. 90°
1,52 mm (P1) 4,18 mm (P3)	262,0 HV	328,4 HV	357,5 HV	336,3 HV
Linha Neutra	235,5 HV	265,6 HV	267,0	279,5 HV

Fonte: o autor (2016)

Tabela 9: Comparação de microdureza para as espessuras de 4,18 e 3,04 mm

Ângulo 90°	3,04mm Lam. 0°	4,18mm Lam. 0°	4,18mm Lam. 45°	4,18mm Lam. 90°
3,04 mm (P1) 4,18 mm (P2)	376,6 HV	375,3 HV	376,5 HV	359,1 HV
Linha Neutra	256,4 HV	265,6 HV	267,0 HV	279,5 HV

Fonte: o autor (2016)

Na comparação entre as espessuras na posição 3, em que é feita a análise entre as amostras de 4,18 mm e 1,52 mm, não é possível estabelecer nenhuma relação para as diferentes espessuras. Possivelmente esse resultado pode ser explicado pelo pequeno espaço amostral, já que somente uma amostra da espessura de 1,52 mm foi analisada. Sendo assim, para obter maior confiabilidade nos resultados, seria necessária uma análise mais ampla, com maior número de amostras analisadas, gerando assim uma média confiável.

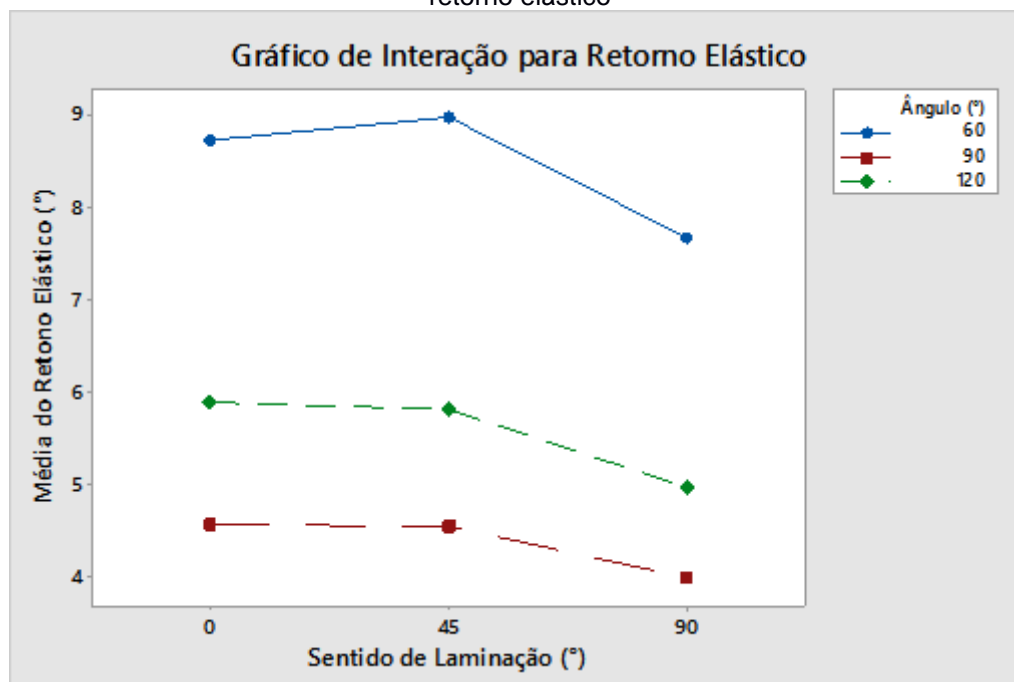
Já para a posição 2 em que é feita a análise entre as amostras de 4,18 mm e 3,04 mm, é possível estabelecer uma relação. Com esse resultado podemos demonstrar a variação da deformação a partir da linha neutra, e sua relação com a espessura. Teoricamente as deformações nas regiões próximas à linha neutra tendem a serem menores. Com essa lógica, quanto menos espessas as amostras, menores as deformações, devido à proximidade com a linha neutra. (MESQUITA; RUGANI, 1997).

### 4.3 Retorno Elástico

Os gráficos a seguir apresentam os resultados da interação dos fatores para a resposta retorno elástico.

A Figura 27 apresenta o resultado da análise de interação entre os fatores ângulo de dobramento *versus* o sentido de laminação para a resposta retorno elástico.

Figura 27: Gráfico de interação entre ângulo de dobramento e sentido de laminação para resposta do retorno elástico



Fonte: o autor (2016)

Para essa combinação de parâmetros, o retorno elástico foi maior em função do ângulo de dobramento.

O resultado encontrado pode ser explicado pela equação (8), apresentada por Rodrigues e Martins (2010), em que é avaliada a variação angular em torno da linha neutra. Assim, quanto maior essa variação, teoricamente o retorno elástico é maior. Sales (2013), através de ensaios confirmou essa teoria, quando analisou o raio do punção e o ângulo de dobramento, e constatou que quanto maior o raio do punção e o ângulo de dobramento, maior é o retorno elástico.

Contudo, o resultado apresentado demonstra que para o ângulo de dobramento de 90°, em algumas amostras, houve um avanço elástico. Esse resultado possivelmente está relacionado com a força aplicada no dobramento, tendo como base o estudo realizado por Santos (2013), que avaliou a força aplicada após o dobramento em aços de alta resistência, e encontrou resultados semelhantes em níveis de força mais elevados. Segundo Dieter (1981), com níveis mais elevados de força ocorre um fenômeno conhecido como cunhagem, em que a peça dobrada

deve ser calçada no fundo da matriz. Esse método é utilizado em processos de dobramento para que haja a redução das tensões no material e, conseqüentemente, o retorno elástico é menor.

Analisando o retorno elástico em função do sentido de laminação para essa interação, o resultado apresenta a seguinte condição: as amostras cortadas a 90° apresentaram os menores valores de retorno elástico.

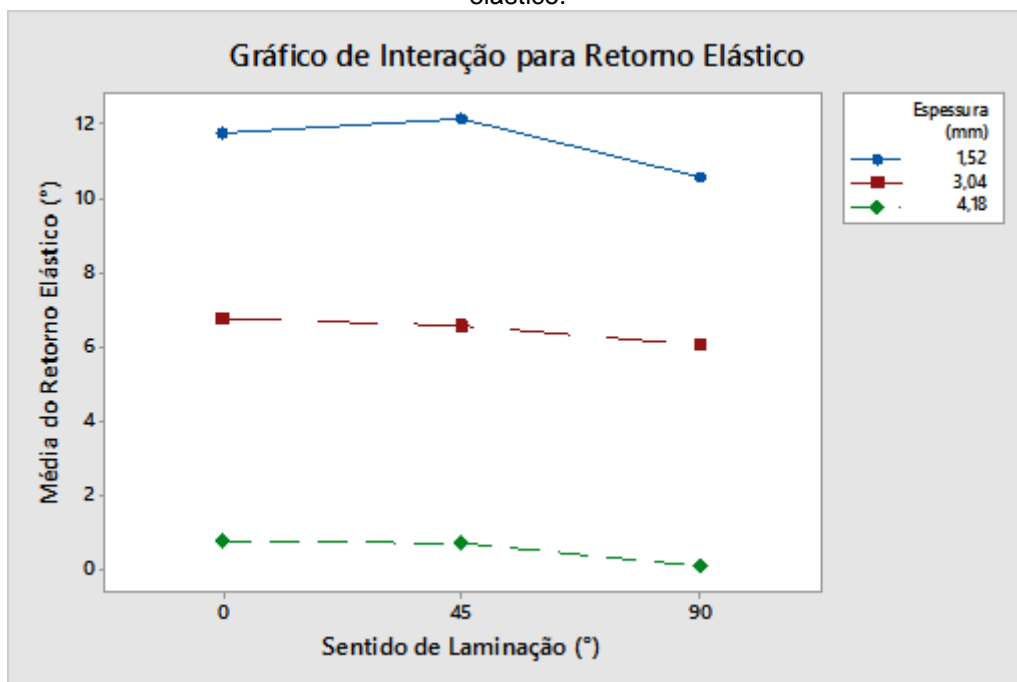
Este resultado está relacionado diretamente com a anisotropia do material. Retomando os resultados apresentados por Ferrarini (2004), relacionados com a variação do índice de anisotropia do material e os níveis de deformação encontrados.

Para Rodrigues e Martins (2010), as tensões de elasticidade do material variam em função do índice de anisotropia, com a tendência de serem maiores no sentido perpendicular ao sentido de laminação.

Para as amostras cortadas a 45° e 0°, os valores de retorno elástico são bem semelhantes, não apresentando nenhuma influência considerável nessa combinação de fatores.

A Figura 28 apresenta o gráfico de interação de fatores espessura e sentido de laminação.

Figura 28: Gráfico de interação entre espessura e sentido de laminação para resposta do retorno elástico.



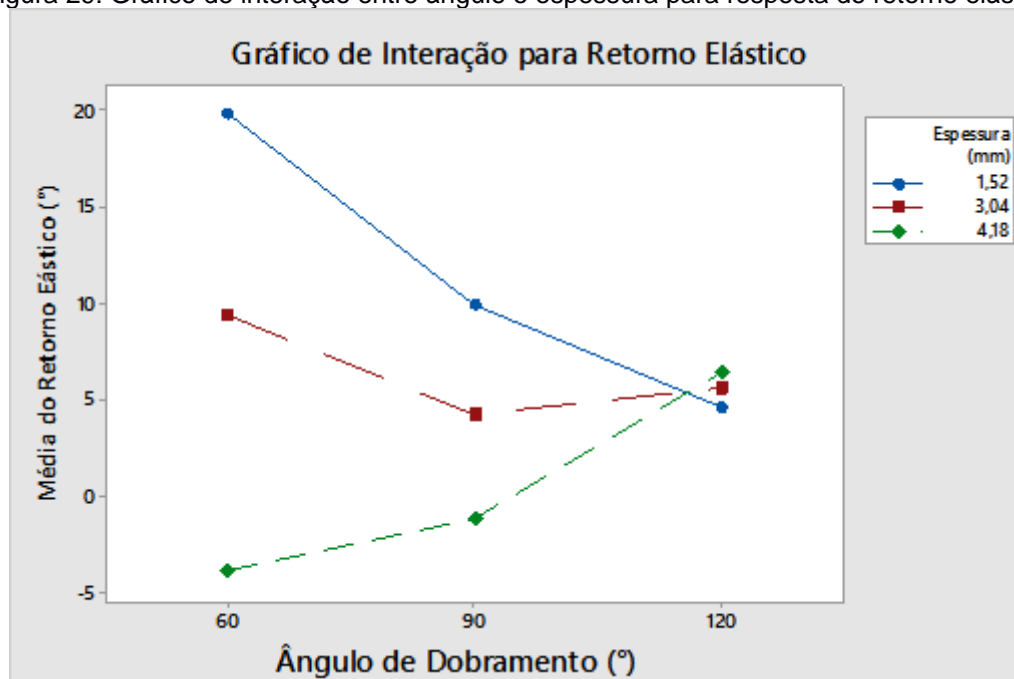
Fonte: o autor (2016)

Para essa interação os valores do retorno elástico seguem uma tendência: com o aumento da espessura, o retorno elástico foi menor. Esse resultado é coerente com a bibliografia pesquisada, tendo como base que vários autores indicam a espessura como uma das variáveis responsáveis pelo retorno elástico. Isso pode ser confirmado através da equação (8) proposta por Rodrigues e Martins (2010), em que a espessura é o divisor, ou seja, com o aumento da espessura, conseqüentemente, o retorno elástico é menor.

Para essa combinação de fatores o sentido de laminação teve pouca influência no retorno elástico. Novamente as amostras cortadas a 90° apresentaram o menor retorno elástico. Esse fator possivelmente está relacionado à anisotropia do material, sabendo que as tensões de elasticidade do material variam em função do índice de anisotropia, com a tendência de serem maiores no sentido perpendicular ao sentido de laminação.

A Figura 29 apresenta o gráfico de interação dos fatores espessura e ângulo de dobramento.

Figura 29: Gráfico de interação entre ângulo e espessura para resposta do retorno elástico



Fonte: o autor (2016)

Para a metodologia utilizada é possível observar que as variações de retorno elástico são maiores à medida que se aumenta os valores do ângulo de dobramento, apresentando avanço elástico nos maiores níveis de deformação em função das

maiores espessuras. Assim, quanto menor a espessura e maior a deformação, o retorno elástico é maior. Esse resultado é inversamente proporcional, contudo a variação também é menor, ou seja, quanto menor a deformação e a espessura o retorno elástico é menor, e a variação também é menor.

Além dos gráficos de interação de fatores, utilizando o Software Minitab® foi possível também fazer uma análise de regressão para o retorno elástico. Esta análise resultou em uma equação para cada um dos três fatores envolvidos no estudo: Sentido de laminação, espessura e ângulo de dobramento. Através das equações de regressão que estão representadas na Figura 30, é possível mensurar em diferentes condições de dobramento em V, o comportamento do aço inoxidável 304.

Figura 30: Análise de Regressão:

### **Análise de Regressão:**

#### **Retorno Elástico versus Espessura; Ângulo; Sentido Laminação**

Equação de Regressão

Sentido  
Laminação

0°	Retorno Elástico = 22,64 - 4,078 Espessura - 0,0485 Ângulo
45°	Retorno Elástico = 22,69 - 4,078 Espessura - 0,0485 Ângulo
90°	Retorno Elástico = 21,79 - 4,078 Espessura - 0,0485 Ângulo

Fonte: o autor (2016)

## 5 CONCLUSÕES

Entre os objetivos propostos neste trabalho, o dobramento das amostras e a medição do retorno elástico foram realizados conforme o planejamento definido.

Nas análises da influência do sentido de laminação para os valores do retorno elástico, os resultados demonstraram que o sentido de laminação apresentou pouca influência, é possível observar essa diferença nas amostras cortadas à 90°, utilizando a análise de regressão. Para os resultados do retorno elástico os fatores que apresentaram maior influência para o método utilizado, foram a espessura e o ângulo de dobramento.

Nas análises da influência do sentido de laminação para os valores de força de dobramento, os resultados demonstraram que na média o sentido de laminação tem influência somente para a interação com o ângulo de dobramento. Porém, esse resultado pode ser desconsiderado, pois, os gráficos demonstraram que o ângulo de dobramento não apresenta nenhuma influência na força de dobramento, tendo como fator principal para os valores de força a espessura do material.

Para os resultados de microdureza em função de sentido de laminação os resultados foram heterogêneos, apresentando uma tendência, que caracteriza uma possível variação do encruamento em função do sentido de laminação.

Para as diferentes posições analisadas a microdureza se apresentou dentro do esperado conforme a bibliografia analisada.

Na comparação entre as três espessuras a microdureza se mostrou coerente com a teoria, em que foi possível demonstrar a variação da deformação a partir da linha neutra.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar estudos para:

- Avaliar o comportamento do aço inoxidável 304 no dobramento variando parâmetros como: raio do punção, abertura da matriz e largura das amostras;
- Avaliar o comportamento da deformação para diferentes espessuras utilizando valores de raio do punção inferiores aos recomendados pela norma DIN 6935, e qual é o limite dessa redução sem comprometer as características da chapa;

- Comparar os valores de microdureza para diferentes espessuras com maior espaço amostral;
- Realizar uma análise do perfil de dureza com diferentes níveis de deformação;
- Avaliar os objetivos propostos neste trabalho em outras ligas de aço comerciais;
- Analisar através de ensaios de tração os valores de anisotropias e de deformação do aço inoxidável 304.

## REFERÊNCIAS

BEER, F.P.; JOHNSTON, JR., E.R. **Resistência dos Materiais**, 3. ed., Pearson Education, 1995. 1255 p.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 817 p. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1981. 504 p.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia Mecânica: Materiais de construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 1986. 388 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 6935: Dobramento a frio de chapas de aços laminados. Berlim: Instituto Alemão de Normalização, 2010 (Tradução nossa).

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

FERRARINI, José Luiz. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Curso de Programa de Pós-graduação de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4696/000503391.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; RUGANI, Léo Lucas. **Estampagem dos aços inoxidáveis**. Belo Horizonte: Acesita, 1997. 51 p. Consultoria: Prof. José Angelo Bortoloto.

ROCHA, Marcio Roberto da. **ESTUDO DA CONFORMABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 304N E 304H E SUAS CORRELAÇÕES COM AS MICROESTRUTURAS OBTIDAS**. 2006. 154 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Estudo da Conformabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos 304n e 304h e Suas Correlações Com As Microestruturas Obtidas, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89284>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia de Deformação Plástica**. 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010. 695 p. (Vol. I Fundamentos Teóricos).

\_\_\_\_\_. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia de Deformação Plástica**. 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010. 743 p. (Vol. II Aplicações Industriais).

SALES, Valmir. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento.** 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em:  
<[http://www.posmat.cefetmg.br/galerias/arquivos\\_download/Dissertacao\\_Valmir\\_para\\_impressao.pdf](http://www.posmat.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Dissertacao_Valmir_para_impressao.pdf)>. Acesso em: 16 dez. 2015.

SANTOS, Ricardo Adriano dos. INFLUÊNCIA DA FORÇA PÓS DOBRA E DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO RETORNO ELÁSTICO EM PROCESSOS DE DOBRAMENTO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA. 2013. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Composição Química dos Aços. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 134 p.

## APÊNDICE 1: Análise ANOVA

### ANOVA para 1 fator: Retorno Elástico versus Sentido Laminação

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais  
 Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente  
 Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Sentido Lam.	3	0; 45; 90

Médias

Sentido Lam.	N	Média	DesvPad	IC de 95%
0°	36	6,39	6,70	(4,21; 8,58)
45°	36	6,45	6,69	(4,26; 8,64)
90°	36	5,54	6,47	(3,36; 7,73)

DesvPad Combinado = 6,62114

### ANOVA para 1 fator: Retorno Elástico versus Ângulo de Dobramento

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais  
 Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente  
 Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Ângulo	3	60; 90; 120

Médias

Ângulo	N	Média	DesvPad	IC de 95%
60°	36	8,47	9,99	( 6,35; 10,58)
90°	36	4,365	4,638	(2,250; 6,480)
120°	36	5,558	1,283	(3,443; 7,674)

DesvPad Combinado = 6,40041

## APÊNDICE 2: Análise ANOVA

### ANOVA para 1 fator: Retorno Elástico versus Espessura

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais  
Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente  
Nível de significância  $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Espessura	3	1,52; 3,04; 4,18

Médias

Espessura	N	Média	DesvPad	IC de 95%
1,52 mm	36	11,46	6,68	( 9,86; 13,05)
3,04 mm	36	6,442	2,313	( 4,845; 8,039)
4,18 mm	36	0,491	4,481	(-1,106; 2,088)

DesvPad Combinado = 4,83237

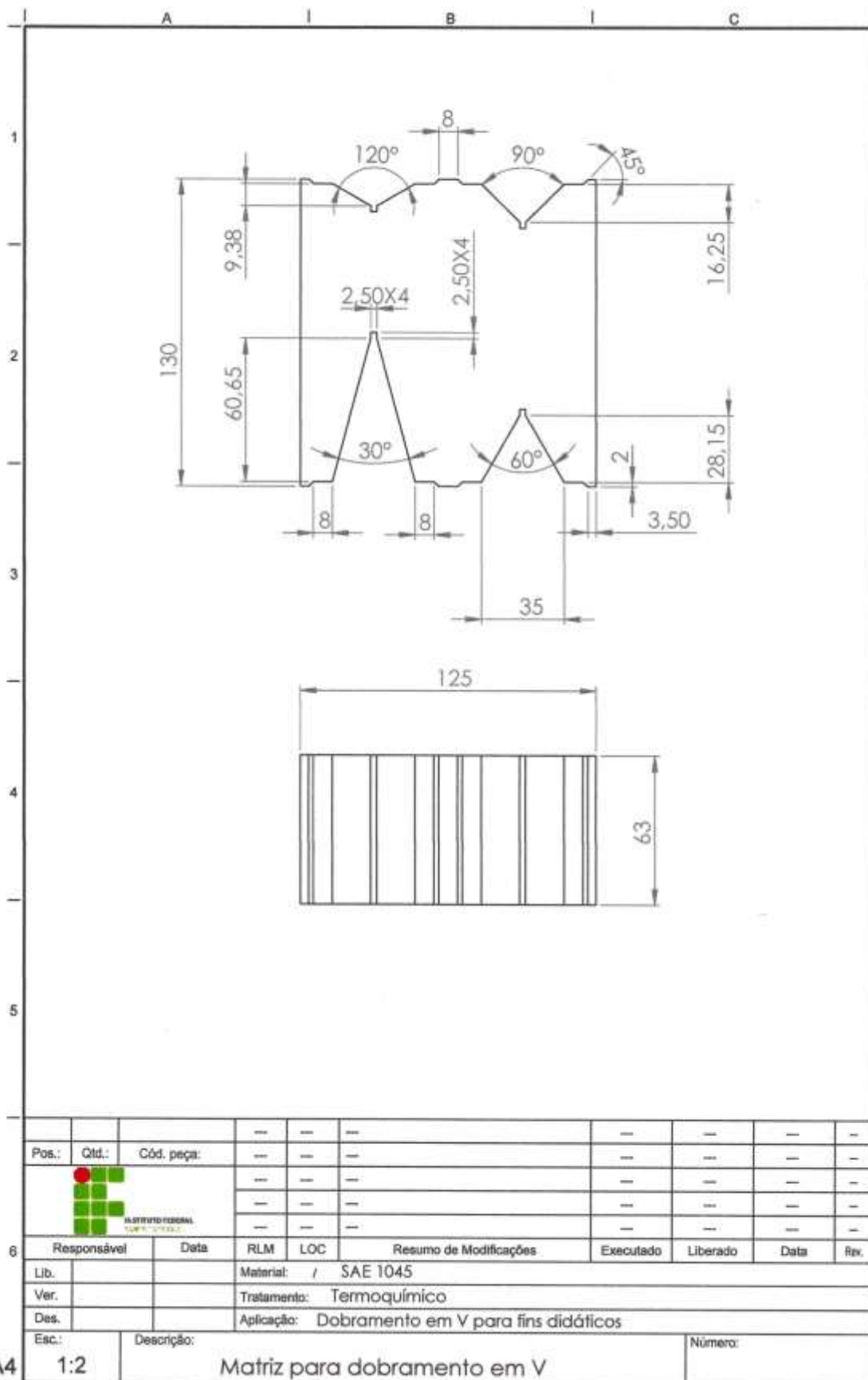
### APÊNDICE 3: Tabela 1 dados do experimento

OrdemPad	OrdemEns	Espessura (mm)	Ângulo (°)	Sentido Lam. (°)	Força (N)	ângulo Final (°)	Retorno Elástico (°)
30	1	1,52	60	90	619,98	70,473	10,473
54	2	4,18	120	90	6771,9	125,07	5,07
86	3	1,52	90	45	613,59	100,524	10,524
64	4	3,04	60	0	3496,2	70,12	10,12
85	5	1,52	90	0	584,83	99	9
38	6	3,04	60	45	3413,1	69,42	9,42
78	7	4,18	90	90	6912,5	88,1	-1,9
52	8	4,18	120	0	7411,1	126,03	6,03
74	9	4,18	60	45	6867,8	57,16	-2,84
49	10	4,18	90	0	7193,7	89,03	-0,97
4	11	1,52	90	0	648,75	100,18	10,18
17	12	3,04	120	45	3512,2	125,53	5,53
76	13	4,18	90	0	7321,6	89,33	-0,67
77	14	4,18	90	45	7343,9	90,2	0,2
89	15	1,52	120	45	648,75	126,25	6,25
46	16	4,18	60	0	7257,7	56,46	-3,54
105	17	4,18	90	90	7254,5	88,11	-1,89
41	18	3,04	90	45	3461	94,12	4,12
83	19	1,52	60	45	619,98	81,28	21,28
6	20	1,52	90	90	623,18	100,03	10,03
100	21	4,18	60	0	7184,2	56,56	-3,44
2	22	1,52	60	45	632,77	81,31	21,31
87	23	1,52	90	90	581,64	99	9
15	24	3,04	90	90	3266,1	93,45	3,45
55	25	1,52	60	0	581,64	80,42	20,42
47	26	4,18	60	45	7002	57,33	-2,67
65	27	3,04	60	45	3419,5	70,34	10,34
96	28	3,04	90	90	3256,5	94,11	4,11
48	29	4,18	60	90	6615,3	55,34	-4,66
35	30	1,52	120	45	651,94	124,33	4,33
95	31	3,04	90	45	3403,5	95,04	5,04
88	32	1,52	120	0	667,92	127,01	7,01
90	33	1,52	120	90	642,36	123,19	3,19
42	34	3,04	90	90	3419,5	93,12	3,12
56	35	1,52	60	45	616,79	81,02	21,02
29	36	1,52	60	45	639,16	79,28	19,28
104	37	4,18	90	45	7085,1	86,41	-3,59
22	38	4,18	90	0	7430,2	90,26	0,26
1	39	1,52	60	0	642,36	82,17	22,17
27	40	4,18	120	90	6743,1	127,2	7,2
97	41	3,04	120	0	3614,7	124,2	4,2
19	42	4,18	60	0	7168,2	55,58	-4,42
8	43	1,52	120	45	648,75	125,16	5,16
45	44	3,04	120	90	3333,2	124,53	4,53
99	45	3,04	120	90	3397,1	124,52	4,52
66	46	3,04	60	90	3224,6	69,07	9,07
23	47	4,18	90	45	7046,7	89,2	-0,8
93	48	3,04	60	90	3250,5	69,27	9,27
62	49	1,52	120	45	648,75	125,33	5,33
103	50	4,18	90	0	7328	89,26	-0,74
34	51	1,52	120	0	683,9	122,54	2,54
5	52	1,52	90	45	629,57	100,06	10,06
59	53	1,52	90	45	651,94	100,39	10,39
14	54	3,04	90	45	3403,5	95,03	5,03
60	55	1,52	90	90	616,79	100,2	10,2
91	56	3,04	60	0	3515,4	69,5	9,5
75	57	4,18	60	90	6839	55,43	-4,57

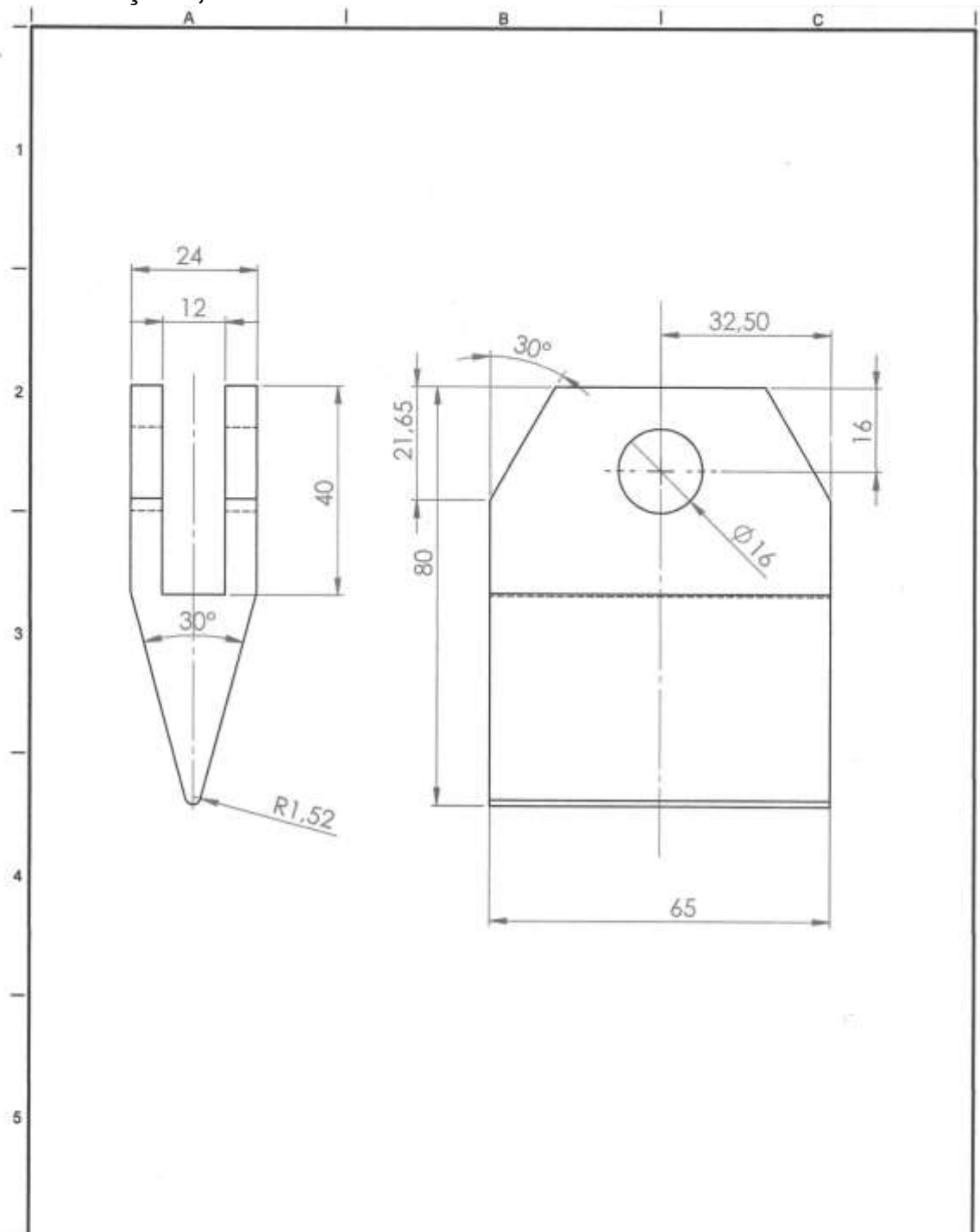
#### APÊNDICE 4: Tabela 2 dados do experimento

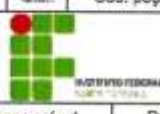
OrdemPad	OrdemEns	Espessura (mm)	Ângulo (°)	Sentido Lam. (°)	Força (N)	ângulo Final (°)	Retorno Elástico (°)
107	58	4,18	120	45	7324,8	126,51	6,51
12	59	3,04	60	90	3275,7	70,3	10,3
36	60	1,52	120	90	648,75	125,59	5,59
53	61	4,18	120	45	7331,2	126,35	6,35
63	62	1,52	120	90	594,42	123,12	3,12
94	63	3,04	90	0	3496,2	94,07	4,07
92	64	3,04	60	45	3374,8	69,33	9,33
13	65	3,04	90	0	3604,9	95,12	5,12
21	66	4,18	60	90	6942,2	55,32	-4,68
80	67	4,18	120	45	7452,6	127,14	7,14
106	68	4,18	120	0	7388,7	126,53	6,53
39	69	3,04	60	90	3167	68,31	8,31
108	70	4,18	120	90	6855	125,52	5,52
10	71	3,04	60	0	3425,9	69,39	9,39
37	72	3,04	60	0	3457,9	69,19	9,19
24	73	4,18	90	90	6861,4	89,39	-0,61
84	74	1,52	60	90	626,38	80,58	20,58
57	75	1,52	60	90	619,98	80,39	20,39
9	76	1,52	120	90	632,77	123,272	3,272
51	77	4,18	90	90	6883,7	88,59	-1,41
11	78	3,04	60	45	3298,1	68,43	8,43
68	79	3,04	90	45	3483,4	94,53	4,53
67	80	3,04	90	0	3505,8	94,29	4,29
25	81	4,18	120	0	7372,7	127,04	7,04
32	82	1,52	90	45	629,57	100,47	10,47
70	83	3,04	120	0	3627,2	127,24	7,24
69	84	3,04	90	90	3234,41	94,37	4,37
71	85	3,04	120	45	3227,8	126,06	6,06
101	86	4,18	60	45	7110,6	57,32	-2,68
58	87	1,52	90	0	591,22	99,49	9,49
33	88	1,52	90	90	623,18	99,38	9,38
18	89	3,04	120	90	3262,9	126,02	6,02
43	90	3,04	120	0	3684,8	127,02	7,02
28	91	1,52	60	0	588,03	80,52	20,52
102	92	4,18	60	90	6538,6	56,54	-3,46
72	93	3,04	120	90	3291,7	125,37	5,37
3	94	1,52	60	90	568,85	81,12	21,12
16	95	3,04	120	0	3662,4	126,51	6,51
44	96	3,04	120	45	3409,9	124,55	4,55
73	97	4,18	60	0	7289,6	55,42	-4,58
50	98	4,18	90	45	7280	88,57	-1,43
20	99	4,18	60	45	7126,6	55,58	-4,42
26	100	4,18	120	45	7276,8	126,56	6,56
31	101	1,52	90	0	654,55	100,4	10,4
7	102	1,52	120	0	597,61	124,23	4,23
81	103	4,18	120	90	7379,1	126,22	6,22
79	104	4,18	120	0	7449,4	127,01	7,01
82	105	1,52	60	0	584,83	79,5	19,5
61	106	1,52	120	0	651,94	125,23	5,23
98	107	3,04	120	45	3448,3	126,12	6,12
40	108	3,04	90	0	3461	94,32	4,32

## ANEXO 1: Matriz para Dobramento

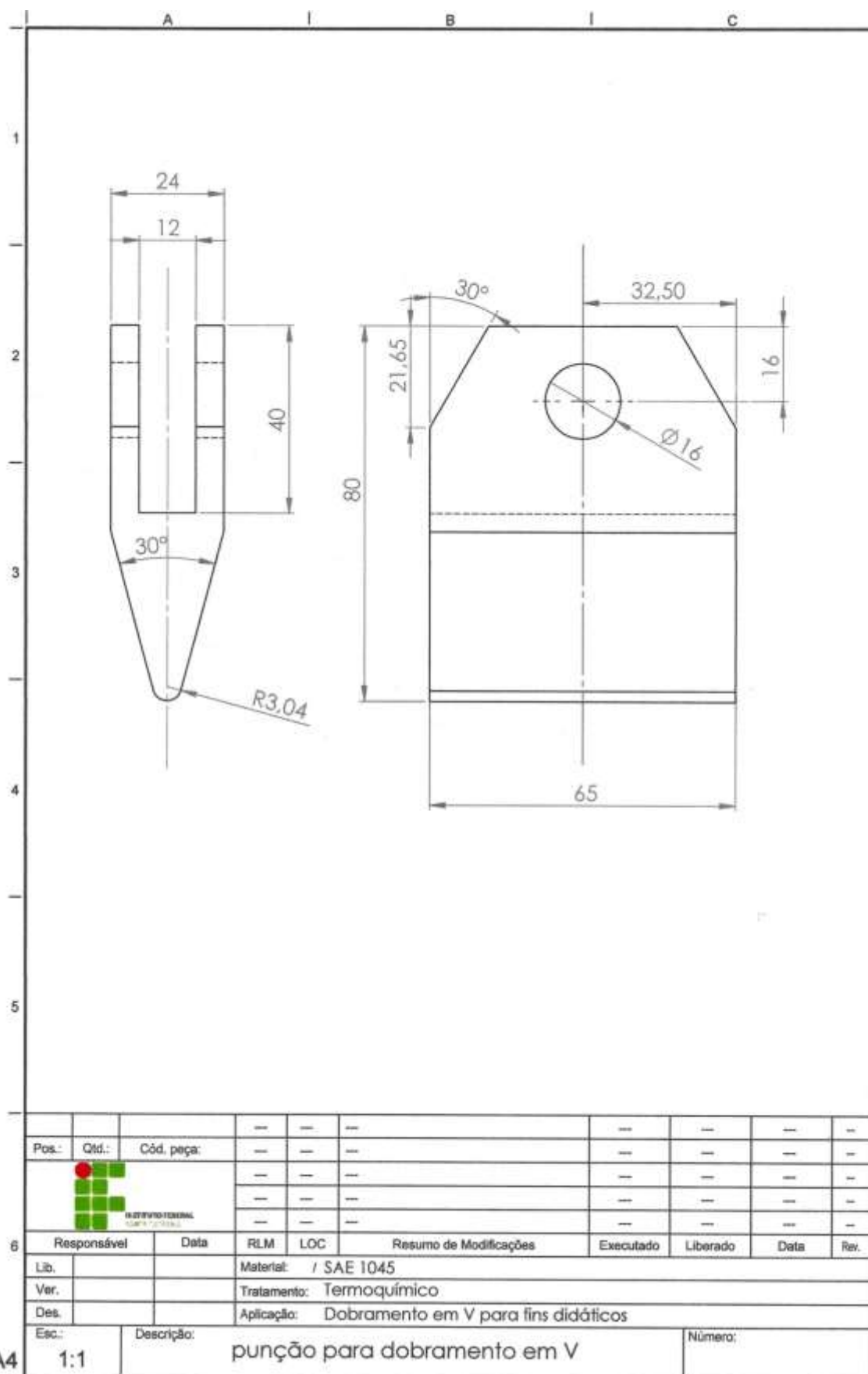


**ANEXO 2: Punção 1,52 mm**

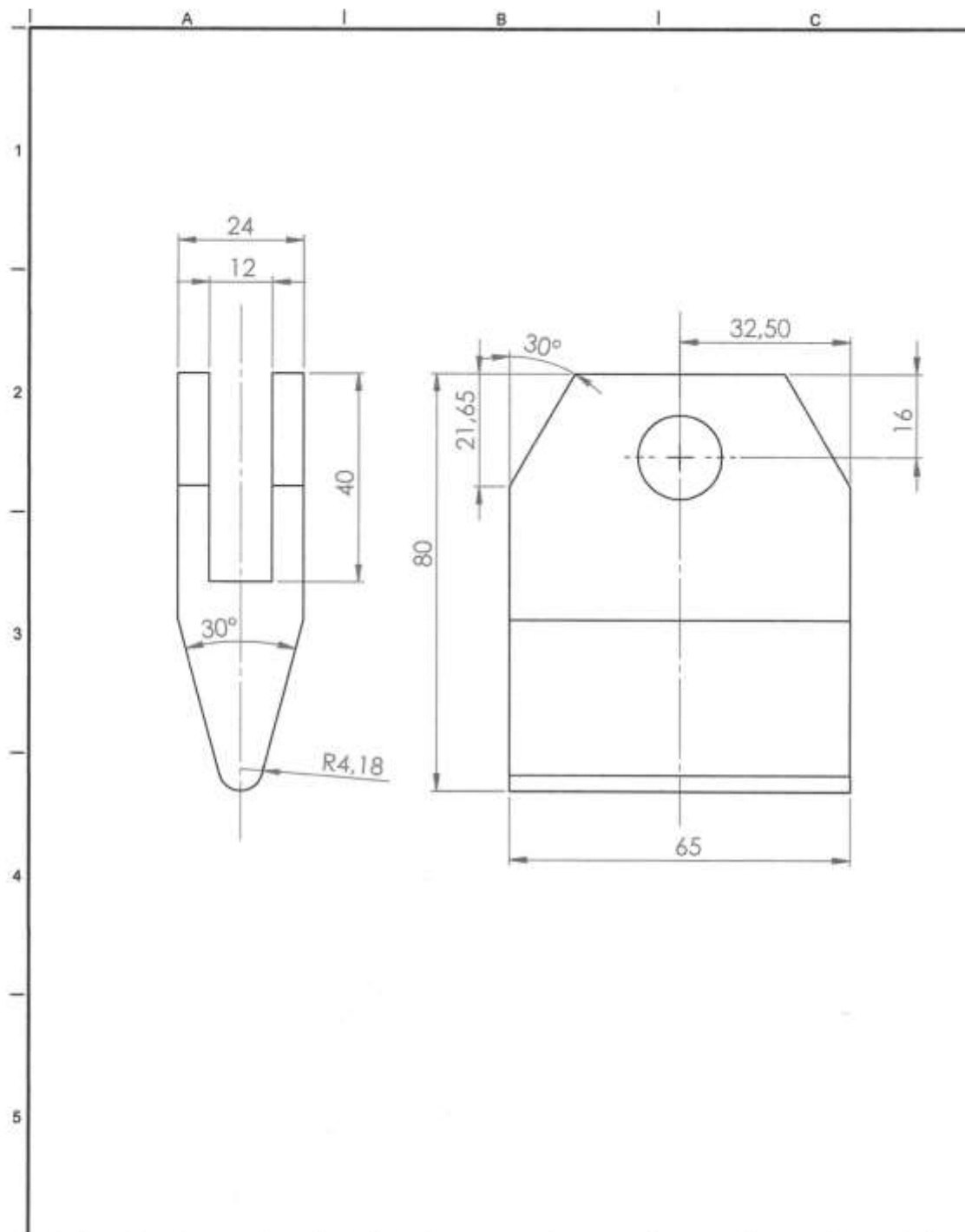



Pos.:	Qtd.:	Cód. peça:							
									
6	Responsável	Data	RLM	LOC	Resumo de Modificações	Executado	Liberado	Data	Rev.
Lib.			Material: / SAE 1045						
Ver.			Tratamento: Termoquímico						
Des.			Aplicação: Dobramento em V para fins didáticos						
Esc.:	Descrição:		punção para dobramento em V				Número:		
A4	1:1								

## ANEXO 3: Punção 3,04 mm



## ANEXO 4: Punção 4,18 mm



			--	--	--	--	--	--	--	
Pos.:	Qtd.:	Cód. peça:	--	--	--	--	--	--	--	
			--	--	--	--	--	--	--	
			--	--	--	--	--	--	--	
			--	--	--	--	--	--	--	--
			--	--	--	--	--	--	--	--
6	Responsável	Data	RLM	LOC	Resumo de Modificações	Executado	Liberado	Data	Rev.	
Lib.			Material: / SAE 1045							
Ver.			Tratamento: Termoquímico							
Des.			Aplicação: Dobramento em V para fins didáticos							
Esc.	1:1	Descrição:	punção para dobramento em V				Número:			

A4