

PHYLIPPE MATHEUS DE CASTRO ESPOSTE

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO
INOXIDÁVEL AISI 304 UTILIZANDO FERRAMENTAS
ESFÉRICAS COM A PEÇA SUBMERSA EM
LUBRIFICANTE MINERAL INTEGRAL COM
ADITIVOS DE EXTREMA PRESSÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

PHYLIPPE MATHEUS DE CASTRO ESPOSTE

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL
AISI 304 UTILIZANDO FERRAMENTAS ESFÉRICAS COM A PEÇA
SUBMERSA EM LUBRIFICANTE MINERAL INTEGRAL COM
ADITIVOS DE EXTREMA PRESSÃO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado no programa de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA - MG

2018

PHYLIPÉ MATHEUS DE CASTRO ESPOSTE

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304
UTILIZANDO FERRAMENTAS ESFÉRICAS COM A PEÇA SUBMERSA EM
LUBRIFICANTE MINERAL INTEGRAL COM ADITIVOS DE EXTREMA PRESSÃO**

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO**
pelo programa de graduação em Engenharia
Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales

MSc Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Prof. Dr. Éder Silva Costa

Uberlândia, 10 de janeiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades concedidas, aos meus pais, Nivaldo e Luciana, pelo exemplo de excelência no trabalho, por todo o carinho e paciência, e também pela valiosa orientação de vida e conduta durante toda a minha caminhada até o presente momento. A meus irmãos, Ruan e Ana, pelo companheirismo e por serem minha grande inspiração para fazer o bem.

Agradeço também a todos os membros do laboratório de ensino e pesquisa em usinagem. Uma menção especial aos senhores Leonardo Rosa, Cláudio Gomes e Bruno Oliveira, companheiros de laboratório, pelo apoio e ensinamentos.

Meus sinceros agradecimentos ao professor e orientador Wisley, não somente pelos ensinamentos repassados, mas também por se tornar meu mentor, orientando e guiando tanto o presente trabalho quanto minha carreira profissional.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos meus companheiros de curso durante minha trajetória dentro da universidade, que com certeza contribuíram indiretamente no meu desenvolvimento pessoal e profissional. Uma menção especial a João Luiz e Milena Vantini, que além de companheiros de turma tornaram-se grandes amigos pessoais.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo conhecer o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 para o processo de Estampagem Incremental de Chapas (ISF - *Incremental Sheet Forming*), baseado nos parâmetros: variação de rotação da ferramenta e variação do fluido lubrificante. Os experimentos baseiam-se na variante da Estampagem Incremental denominada Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF- *Single Point Incremental Forming*). Basicamente, a estrutura empregada foi um dispositivo para fixação da chapa, um centro de usinagem CNC e um *software* de CAD/CAM. Foram realizados cinco ensaios variando a rotação, sendo eles: 0 rpm (ferramenta parada), 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm e um ensaio a 500 rpm com adição de grafite mech ($40\mu\text{m}$) em solução de 10% em peso. O melhor acabamento de superfície conformada medido através da média das rugosidades Ra e Rz foi alcançado no ensaio em que a ferramenta está parada. Após a conformação, os corpos de prova apresentaram diferentes profundidades de estampagem, resultado da recristalização e crescimento de novos grãos resultante do longo tempo de ensaios e do calor gerado durante o processo. Também foram realizados ensaios de tração buscando evidenciar algumas propriedades do aço inoxidável AISI 304.

Palavras-chave: Estampagem Incremental, Aço inoxidável AISI 304, Deformação, Parâmetro médio da rugosidade Ra, SPIF.

ABSTRACT

The present work aims to know the behavior of austenitic stainless steel AISI 304 during the ISF process (Incremental Sheet Forming). The study was based on the following parameters: variation of tool rotation and variation of the lubricating fluid. The tests are based on the ISF variant called Single Point Incremental Forming (SPIF). Basically, the structure employed was a device for fixing the plate, a CNC machining center and a CAD/CAM software. Five rotational test were performed: 0 rpm (stationary tool), 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm and a 500 rpm test with the addition of mech graphite (40 μ m) in 10% by weight solution. The best shaped surface finish measured by the mean roughness Ra and Rz was reached in the test in which the tool is stationary. After the conformation, the specimens had different stamping depths as a result of the recrystallization and growth of new grains resulting from the long test period and the heat generated during the process. Also, tensile tests were carried out in order to show some properties of AISI 304 stainless steel.

Keywords: Incremental Forming, AISI 304 stainless steel, Deformation, Average Roughness parameter Ra, SPIF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tensão e suas direções (HIBBELER, 2004).	15
Figura 2.2 - Estado geral da tensão para um ponto qualquer (HIBBELER, 2004).	16
Figura 2.3 - Diagrama tensão por deformação (SCHAEFFER, 2004)	18
Figura 2.4 - Diferença entre a curva de tensão deformação dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 (GUIDA, 2004).	19
Figura 2.5 - Curva limite de conformação convencional de um alumínio laminado qualquer (STOUGHTON, 2000).	22
Figura 2.6 - Curva CLC para alumínio AA1050-0 durante a estampagem de pirâmides utilizando o processo convencional e não convencional (JESWIET, 2005).	23
Figura 2.7 - Parâmetro de rugosidade Ra (BET, 1999).	24
Figura 2.8 - Definição da média da rugosidade Rz (KÖNIG, 1981).	25
Figura 2.9 - Estampagem incremental simétrica "spinning" (a) e "shear forming" (b). (CARRINO, 2011).	26
Figura 2.10 - Quatro variantes do processo de deformação incremental assimétrica (JESWIET, 2005).	27
Figura 2.11 - Elementos básicos da estampagem incremental assimétrica (JESWIET, 2005).	28
Figura 2.12 - Representação de sistema de estampagem incremental de dois pontos (JESWIET, 2005).	29
Figura 2.13 - Representação esquemática da relação dos principais parâmetros da estampagem incremental (SENA, 2009).	30
Figura 2.14 - Centro de usinagem CNC adaptado ao SPIF (FRATINI, 2004).	32
Figura 3.1 - Suporte fixador de chapas metálicas.	34
Figura 3.2 - Ferramenta de estampagem de ponta semiesférica de diâmetro 5,5 mm fabricada em aço AISI 52100.	35
Figura 3.3 - Dimensões do tronco de cone utilizado na estampagem.	36
Figura 3.4 - Parâmetros de estampagem para o tronco de cone utilizando 1000rpm.	37
Figura 3.5 - Trajetória da ferramenta a estampar o tronco de cone proposto.	38
Figura 3.6 -Foto do ensaio de estampagem de chapa de aço inoxidável AISI 304 a 1000 rpm.	39
Figura 3.7 – Amostras retiradas para análise.	39

Figura 3.8 - Medição da profundidade do cone de aço inoxidável AISI 304 estampado incrementalmente por ponto único a 2000 rpm.	41
Figura 4.1 - Desgaste da ferramenta associado à rotação no SPIF.	43
Figura 4.2 - Geometria da ferramenta e velocidade de rotação (JESWIET, 2005).	44
Figura 4.3 - Chapas de aço inoxidável AISI 304 estampadas a diferentes rotações no SPIF.	45
Figura 4.4 - Textura encontrada durante a estampagem SPIF de aço inoxidável AISI 304.	46
Figura 4.5 – Gráfico Rotação x Rugosidade.	47
Figura 4.6 - Gráfico rotação x Profundidade.	48
Figura 4.7 - Microestrutura de chapa metálica AISI 304 estampada em ponto único a diferentes rotações.	49
Figura 4.8 - Comparação da microestrutura estampada a 2000rpm com a microestrutura original para chapas metálicas de AISI 304.	50
Figura 4.9 - Gráfico de tensão normal (σ) por deformação relativa (ϵ) na direção longitudinal.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304L (GUIDA, 2004).....	20
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 obtidas pelo ensaio de tração realizado em três direções.	51

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engeneering
CNC	Comando Numérico Controlado
CLC	Curva Limite de Conformação
ISF	Incremental Sheet Forming
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
SPIF	Single Point Incremental Forming
TPIF	Two Point Incremental Forming

SÍMBOLOS

σ_z	[N/m ²]	Tensão normal ao plano z
τ_{zx}	[N/m ²]	Tensão de cisalhamento no plano z na direção x
τ_{zy}	[N/m ²]	Tensão de cisalhamento no plano z na direção y
E	[GPa]	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
σ_e	[MPa]	Tensão limite de escoamento
R_m	[MPa]	Limite de resistência
ε	[%]	Alongamento
σ	[N/m ²]	Tensão normal
F	[N]	Força
A_0	[m ²]	Área inicial
l	[mm]	Deslocamento do corpo de prova
l_0	[mm]	Comprimento inicial do corpo de prova
r	-	Razão de deformação
r_m	-	Anisotropia média
Δ_r	-	Anisotropia planar

R_a	$[\mu\text{m}]$	Rugosidade aritmética média
R_z	$[\mu\text{m}]$	Rugosidade singular
R_t	$[\mu\text{m}]$	Rugosidade vertical
ω	$[\text{rpm}]$	Velocidade angular
v	$[\text{mm/s}]$	Velocidade de avanço
ΔZ	$[\text{mm}]$	Incremento vertical
$\emptyset$	$[\text{°}]$	Ângulo de parede
r	$[\text{mm}]$	Raio da ferramenta

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS	13
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 TENSÃO.....	14
2.2 DEFORMAÇÃO.....	17
2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	18
2.4 ÍNDICE DE ANISOTROPIA	20
2.5 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC).....	21
2.6 CURVAS CLC ADAPTADAS A ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	22
2.7 RUGOSIDADE	23
2.8 ESTAMPAGEM INCREMENTAL	25
2.8.1 Estampagem incremental simétrica	25
2.8.2 Estampagem incremental assimétrica	26
2.8.2.1 Estampagem incremental assimétrica de dois pontos (TPIF)	28
2.8.2.2 Estampagem incremental de ponto único (SPIF).....	29
CAPÍTULO III: METODOLOGIA.....	33
CAPÍTULO IV: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	42
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES.....	52
CAPÍTULO VI: REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	54
APÊNDICE I	57
APÊNDICE II	59

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As indústrias de estampagem metálica empregam frequentemente diferentes métodos de conformação que se baseiam no uso de punções e matrizes de geometria precisa. Esses métodos são normalmente utilizados para produção em massa, já que o alto custo das matrizes pode ser difundido em uma grande quantidade de produtos. No entanto, quando uma pequena produção é necessária, os métodos convencionais baseados em matrizes, como estampagem ou desenho, não são mais utilizáveis e, portanto, novos métodos de produção devem ser desenvolvidos para atender aos requisitos impostos pelas indústrias de baixa produção em série. Hoje em dia, a produção de pequenas séries de lotes é exigida por muitos setores industriais (prototipagem rápida, indústrias automotiva e aeronáutica, biotecnologia, mobiliário de design, etc) e atinge um volume de mercado acima de € 4000 milhões/ano, o que requer um importante esforço científico e tecnológico para desenvolver novos métodos de produção adequados para a baixa produção em série (CERRO et al., 2006).

A ideia de conformar plasticamente uma chapa metálica utilizando uma única ferramenta, através de incrementos nos eixos cartesianos foi patenteada por Leszak em 1967 (LESZAK, 1967), quando a tecnologia de máquinas de comando numérico controladas

(CNC) ainda era embrionária. A partir da década de 90, tal ideia foi pesquisada e desenvolvida por Shim e Park (2001), Hirt, et al. (2004) e Martins, et al. (2008).

Comparado com os métodos tradicionais de estampagem, a estampagem incremental não exige ferramentas complexas ou matrizes onerosas. Este processo, pode ser desenvolvido utilizando uma fresadora ou centro de usinagem com controle numérico nos três eixos, em que para conformar a chapa é utilizado uma ferramenta de ponta semiesférica montada sob o mandril da máquina, que com o movimento imposto pelos códigos do programa estampa gradativamente a chapa de metal.

Este trabalho experimental busca evidenciar a influência da rotação da ferramenta e do lubrificante utilizado para estampagem na qualidade final da peça, apresentando as características do processo de estampagem incremental por meio da realização da revisão bibliográfica sobre o assunto, apresentando não somente suas características como também variações existentes dentro deste processo. Também serão apresentados cinco ensaios realizados aplicando a estampagem incremental a chapas de aço inoxidável AISI 304 utilizando o óleo lubrificante SAE 90 API GL5, sendo um deles realizado com a adição de grafite mech (40 μm) ao lubrificante em uma proporção de 10% em peso. Na sequência, serão descritos equipamentos e ferramentas utilizados, juntamente com a análise dos resultados. Por fim, serão apresentadas as conclusões obtidas sobre o assunto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

- Investigar o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 durante o processo de estampagem incremental de ponto único.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a influência da variação de rotação no processo de estampagem incremental de ponto único por meio da variação da rotação da ferramenta em 0 rpm, 500 rpm, 1000 rpm e 2000 rpm;
- Investigar a influência da variação do fluido lubrificante sobre a estampagem incremental de ponto único, por meio da comparação dos resultados obtidos utilizando o óleo mineral SAE 90 API GL5 e o mesmo com a adição de grafite mech (40 μm) em proporção de 10% em peso;

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata alguns assuntos importantes para a compreensão do trabalho, tais como: tensão, deformação, ensaio de tração, índice de anisotropia, curva limite de conformação, rugosidade e variações da estampagem incremental.

2.1 TENSÃO

Determinar a distribuição das cargas internas é essencial para compreender a reação de um material a um determinado esforço, surgindo assim a necessidade de definir o conceito de tensão.

Considere a seção de área seccionada seja dividida em áreas menores, assim como a área ΔA mostrada em sombreado na Fig. 2.1. (a). Quando reduzimos o elemento de área ΔA a tamanhos cada vez menores deve-se supor duas hipóteses em relação ao material. Primeiro, o material é contínuo, ou seja, apresenta distribuição uniforme de matéria, sem vazios. Segunda, o material é coeso, ou seja, todas as suas partes estão muito bem unidas, não apresentando trincas, separações ou falhas.

Partindo dessas duas hipóteses é aplicada uma força finita ΔF , muito pequena, que atua sobre a área associada ΔA , como pode ser visto na Fig. 2.1. (a). Essa força, como uma outra qualquer, apresenta direção única, podendo ser substituída por suas três componentes, ΔF_x , ΔF_y e ΔF_z , assumidos como tangentes e normal a área ΔA , respectivamente.

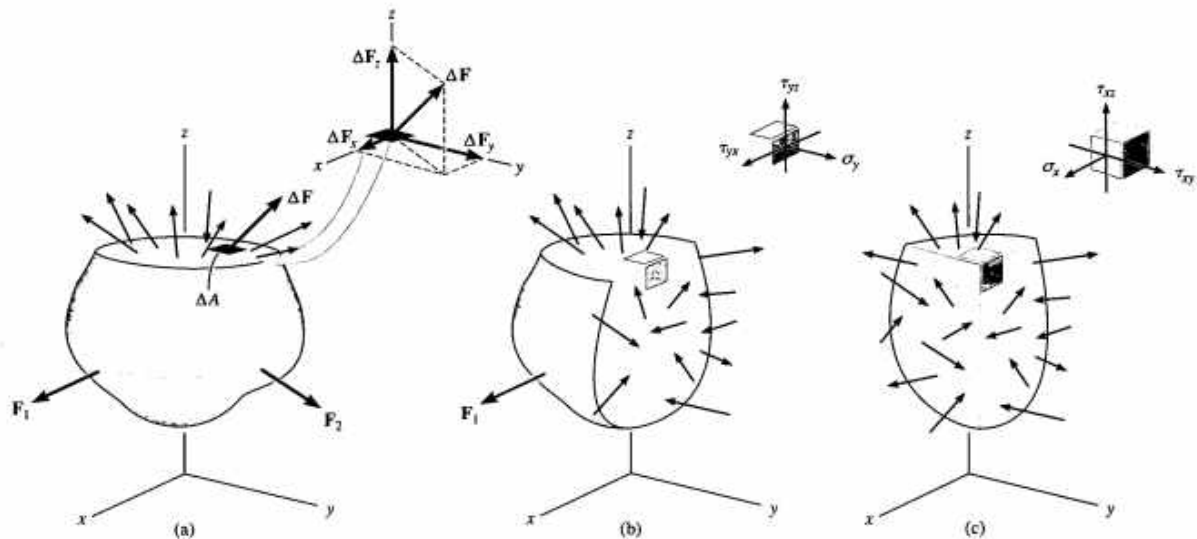


Figura 2.1 - Tensão e suas direções (HIBBELER, 2004).

Da mesma forma que a área ΔA tende a zero, a força ΔF e seus componentes também tendem a zero. Contudo, o quociente entre a força e a área, em geral, tende a um limite finito. Essa relação é chamada de tensão e descreve a intensidade da força interna sobre uma área.

À relação entre a intensidade da força ΔF_z , que atua no sentido perpendicular a área ΔA , dá-se o nome de tensão normal, σ (sigma). Assim sendo:

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Se a força traciona a área como em ΔA mostrado na Fig. 2.1. (a)., é denominado tensão de tração, em contrapartida se a força comprime a área ΔA dá-se o nome de tensão de compressão.

À relação entre as forças tangenciais por unidade de área, que atuam tangente a área ΔA , dá-se o nome de tensão de cisalhamento, τ (tau). Os componentes da tensão de cisalhamento apresentados para a Fig. 2.1. (a) são:

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2.2)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (2.3)$$

Note que o índice z em σ_z é utilizado para indicar a direção da força normal que é aplicada sobre a área ΔA . Já para as tensões de cisalhamento são utilizados dois índices, como pode ser visto em τ_{zx} e τ_{zy} , em que o eixo de z especifica a orientação da área, enquanto x e y indicam a direção das tensões de cisalhamento.

Seccionando o corpo da Fig. 2.1 em planos paralelos aos planos xz (Fig. 2.1. (b)) e yz (Fig. 2.1. (c)), obtemos um elemento cúbico do material. Tal elemento representa o estado geral de tensão que atua no ponto escolhido, caracterizado pelos três componentes que atuam em cada face do cubo. A Fig. 2.2 demonstra o estado geral da tensão para um elemento qualquer.

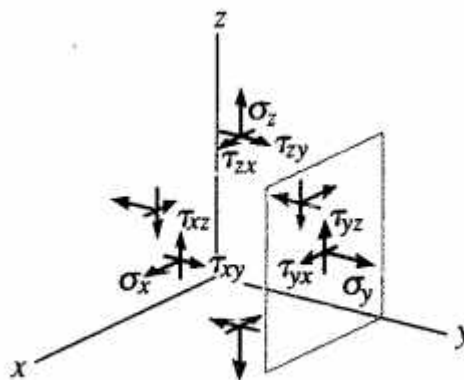


Figura 2.2 - Estado geral da tensão para um ponto qualquer (HIBBELER, 2004).

No sistema internacional, a intensidade tanto da tensão normal quanto da tensão de cisalhamento é caracterizada como newtons por metro quadrado (N/m^2). Entretanto, como essa unidade denominada *pascal* ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$), é muito pequena, normalmente utiliza-se os prefixos mega (10^6), simbolizado pela letra M ou giga (10^9), simbolizado pela letra G, para se referir a valores maiores de tensão.

2.2 DEFORMAÇÃO

Quando uma força é aplicada a um determinado corpo, o mesmo tende a mudar de forma e tamanho. Essas mudanças são conhecidas como deformação, podendo ser visíveis ou imperceptíveis ao olho humano caso não seja utilizado um equipamento de medição adequado.

Normalmente um corpo não apresenta a mesma deformação para todo o seu volume, apresentando mudança na sua geometria através do alongamento e do encurtamento de segmentos ao longo do seu comprimento. Sendo assim, a deformação é a mudança da geometria do corpo, através da mudança de forma ou dimensões do mesmo ocasionado pela ação de uma solicitação externa. Esta solicitação externa pode ser uma força aplicada ao corpo, variação térmica, ou seja, qualquer solicitação capaz de gerar uma tensão no corpo.

As deformações podem ser classificadas em três tipos:

- Deformação transitória ou elástica;
- Deformação permanente ou plástica;
- Ruptura.

A deformação transitória ou elástica recebe esse nome exatamente pelo efeito "mola", caracterizado pela capacidade dos materiais de retornarem às dimensões e geometrias iniciais após serem submetidos a um determinado nível de tensão abaixo da tensão limite de escoamento. Neste tipo de deformação caso o esforço ao qual o material estava exposto seja retirado, o mesmo retorna às dimensões iniciais apresentadas antes do esforço ser aplicado.

Na deformação permanente ou plástica temos uma deformação irreversível, caracterizada pela aplicação de uma tensão superior à tensão de limite de escoamento. Neste tipo de deformação o material é incapaz de retornar às dimensões iniciais apresentadas antes da aplicação do esforço.

Entre a deformação elástica e plástica existe um regime de transição, que pode ser mais ou menos expressivo de acordo com o tipo de material.

Na deformação por ruptura temos a aplicação de um esforço superior à necessária para deformar o corpo plasticamente, a essa tensão dá-se o nome de limite de resistência, representando a tensão máxima capaz de deformar o corpo plasticamente. Uma vez que

essa tensão é atingida a mesma começa a diminuir até provocar a ruptura repentina do material.

2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Segundo Schaeffer (2004), o ensaio de tração é um dos testes mais comuns utilizado para se obter algumas propriedades mecânicas de um determinado material. Por meio deste ensaio é possível obter-se:

- Módulo de elasticidade ou módulo de Young E [GPa];
- Tensão limite de escoamento σ_e [MPa];
- Limite de resistência ou tensão máxima R_m [MPa];
- Alongamento ε [%].

A Figura 2.3 demonstra um esquema de um diagrama de tensão por deformação obtido após um ensaio de tração.

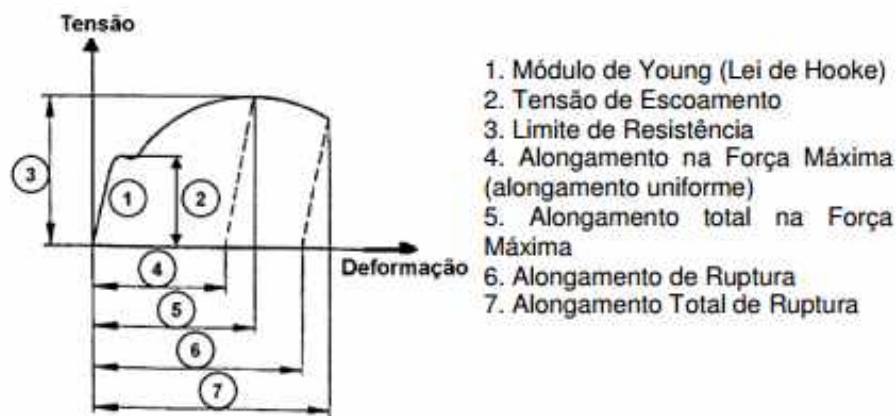


Figura 2.3 - Diagrama tensão por deformação (SCHAEFFER, 2004)

Este ensaio é regido pela norma ABNT 6152, a qual define a dimensão dos corpos de prova de acordo com sua espessura e formato de seção transversal. Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a um estado uniaxial de tensões, sendo tracionado a uma velocidade constante até sua ruptura. Durante a realização do ensaio são obtidos dados de força F (N) e deslocamento l (mm), que posteriormente são utilizados para calcular-se a tensão σ e o alongamento ε .

A tensão σ , além da forma como já foi apresentada anteriormente, também pode ser calculada por:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]} \quad (2.4)$$

Onde:

F [N] é a força instantânea aplicada ao corpo de prova;

A_0 [mm²] é a área de secção transversal inicial do corpo de prova.

A deformação relativa ou alongamento ε pode ser obtido por:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.5)$$

Onde:

l [mm] é o deslocamento do corpo de prova;

l_0 [mm] é o comprimento inicial do corpo de prova.

A Figura 2.4 mostra um diagrama de tensão por deformação obtidos para o aço inoxidável austenítico AISI 304 e o aço inoxidável ferrítico AISI 430, aços que comumente são utilizados na estampagem de chapas metálicas.

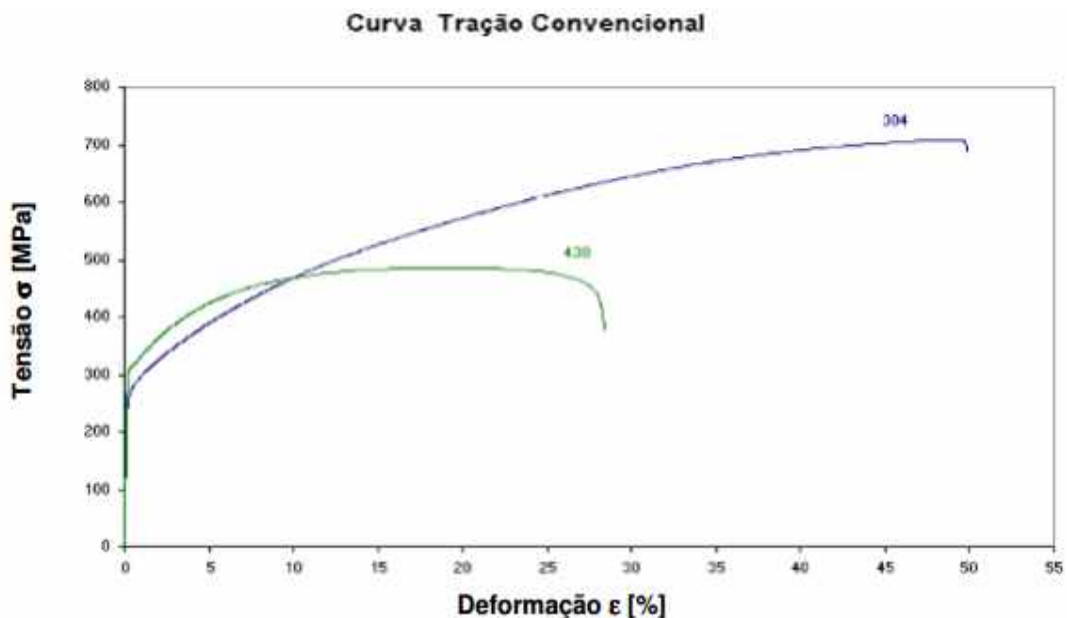


Figura 2.4 - Diferença entre a curva de tensão deformação dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 (GUIDA, 2004).

A Tabela 2.1 apresenta as informações obtidas através do ensaio de tração realizado para o aço inoxidável austenítico AISI 304L (Guida, 2004).

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304L (GUIDA, 2004).

E[GPa]	σ_e [MPa]	R_m [MPa]	ε [%]
193	300	700	54

2.4 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

A anisotropia, na Ciência dos Materiais, é a dependência direcional de uma propriedade física de um material, implicando em diferentes propriedades de acordo com a direção adotada. Pode ser definida como a diferença das propriedades físicas ou mecânicas do material de acordo com a direção. Índice de absorvência, índice de refração, condutividade e resistência à tração são alguns exemplos de propriedades relacionadas a anisotropia.

No caso de chapas metálicas, durante o seu processo de fabricação as mesmas são submetidas a uma orientação preferencial dos grãos após processos de laminação, forjamento, etc. Como resultado temos uma chapa anisotrópica, apresentando diferentes propriedades de acordo com a direção.

O índice de anisotropia é um valor que representa a variação das propriedades do material de acordo com a orientação dos grãos. Este índice é calculado pela razão de deformação r obtido através da realização de ensaios de tração em três diferentes direções de laminação (0° , 45° e 90°).

Segundo Schaeffer(1999), a razão de deformação é definida por:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{b_0 \cdot l_0}{b \cdot l}} \quad (2.6)$$

Onde:

b_0 [mm] é a largura inicial do corpo de prova no ensaio de tração;

b [mm] é a largura instantânea do corpo de prova no ensaio de tração;

l_0 [mm] é o comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração;

l [mm] é o comprimento instantâneo do corpo de prova no ensaio de tração.

Levando em conta as três diferentes direções de laminação é possível calcular os valores de anisotropia média r_m e anisotropia planar Δr (Schaeffer, 1999):

$$r_m = \frac{(r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90})}{4} \quad (2.7)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} \quad (2.8)$$

2.5 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)

Segundo Schaeffer (2004), durante o processo de estampagem vários fatores podem influenciar a deformação imposta ao material; matéria-prima, ferramentas, lubrificação e máquinas são exemplos expressivos que devem ser definidos cautelosamente a fim de prever a deformação nos materiais a serem estampados. As Curvas Limite de Conformação (CLC) fornecem informações de como a combinação das principais deformações que ocorrerão no processo de fabricação poderão dar origem a uma peça com defeito ou não.

Toda chapa metálica apresenta um limite de conformação até que ocorram defeitos como estricção e fratura. Tal limite está diretamente relacionado a combinação das deformações impostas ao material, ou seja, a relação entre as deformações principais, maior e menor.

Um dos ensaios mais comuns utilizados para se determinar uma curva CLC é o Nakajima. Este ensaio consiste em esticar corpos de prova de diferentes larguras mantendo os demais parâmetros constantes. No ensaio é utilizado uma matriz com prensador de chapas e um punção. Neste ensaio os corpos de prova são estampados até o limite, ou seja, até que um dos corpos de prova se rompa.

Devido ao grande número de corpos de prova de diferentes larguras é possível aproximar essas informações de uma estampagem real através de um diagrama $\varphi_1 \times \varphi_2$. A Fig. 2.5 apresenta uma curva CLC convencional para uma chapa de alumínio qualquer.

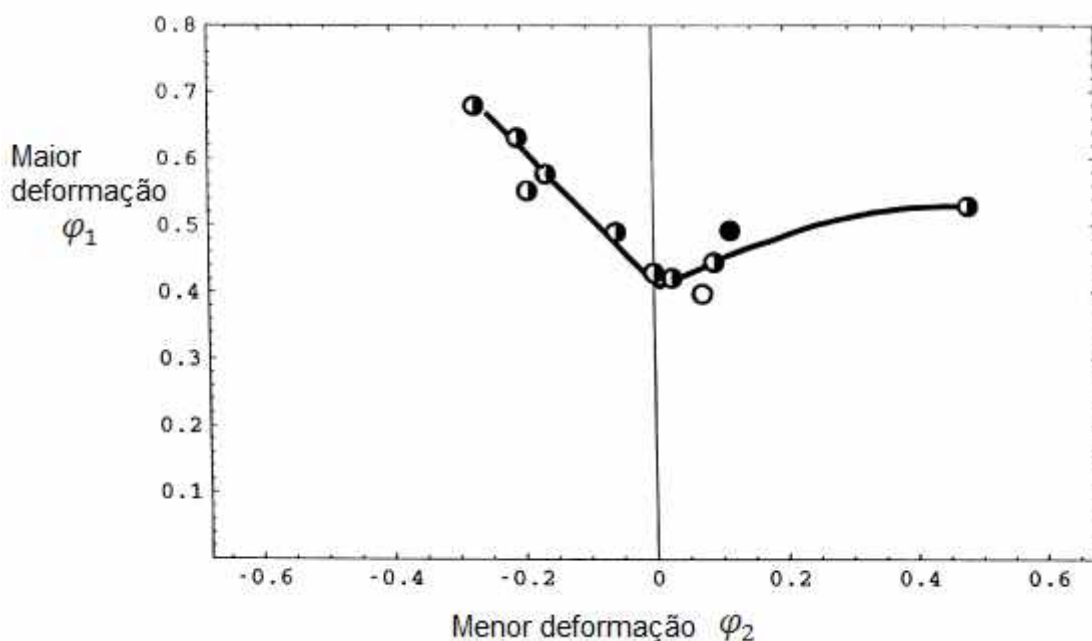


Figura 2.5 - Curva limite de conformação convencional de um alumínio laminado qualquer (STOUGHTON, 2000)

Tipicamente os metais apresentam a curva CLC em formato "V", em que a linha contínua, como pode ser visto na Fig. 2.5, é obtida através da adequação de um polinômio que melhor represente todos os pontos obtidos durante o ensaio Nakajima. Esta linha contínua representa o limite de estampabilidade, ou seja, a combinação de tensões ϕ_1 e ϕ_2 que resultem em um ponto que esteja acima desta linha contínua resultará na falha do material. Em contrapartida, a combinação destas tensões que resulte em um ponto abaixo da curva representa um sucesso no processo de estampagem.

2.6 CURVAS CLC ADAPTADAS A ESTAMPAGEM INCREMENTAL

As curvas CLC, como demonstrado anteriormente na Fig. 2.5, são obtidas através de ensaios de estampagem convencionais, sendo inapropriadas para representar o limite de conformação de chapas através de processos alternativos de estampagem, como o processo de estampagem por ponto único (SPIF, do inglês "*Single Point Incremental Forming*"). A Fig. 2.6 demonstra um comparativo entre uma CLC comum e uma CLC obtida durante o processo de estampagem SPIF.

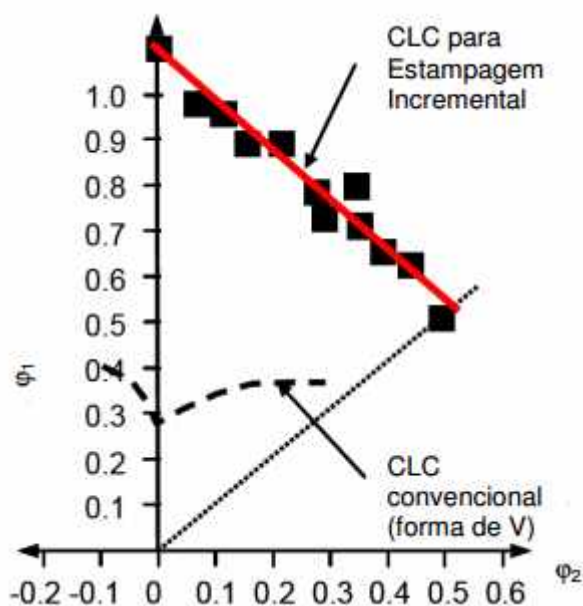


Figura 2.6 - Curva CLC para alumínio AA1050-0 durante a estampagem de pirâmides utilizando o processo convencional e não convencional (JESWIET, 2005).

A Figura 2.6 mostra claramente que a curva de limite de conformação durante a estampagem incremental é bem diferente da correspondente na formação convencional. Tensões muito mais altas podem ser alcançadas na estampagem incremental que em processos tradicionais. Tal circunstância pode ser justificada levando em conta a peculiaridade do processo mecânico. A deformação plástica é induzida pelo pequeno tamanho da ferramenta sendo limitado somente a área de contato da ferramenta com a chapa, que então, de forma incremental progride à medida que a ferramenta se move ao longo do caminho atribuído. Como consequência, as tensões mais elevadas podem ser alcançadas no material antes que a fratura ocorra (FILICE et al, 2002).

2.7 RUGOSIDADE

Segundo König (1981), não é possível produzir superfícies ideais durante os processos de estampagem. A superfície de uma peça, ao ser observada em um microscópio, apresentará regiões de maior ou menor planicidade que é definido como sendo a rugosidade da mesma.

Com o propósito de se analisar a rugosidade das peças existem diversos parâmetros capazes de representar a qualidade do acabamento superficial da mesma. Os parâmetros mais utilizados são: Ra e Rz.

O parâmetro R_a é definido como sendo o desvio médio aritmético, ou seja, a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil em relação à linha média em um determinado comprimento de amostragem. A Fig. 2.7 mostra o parâmetro de rugosidade R_a . Matematicamente R_a é definido por:

$$R_a = \frac{\int_0^{l_m} |y(x)| dx}{l_m} \quad (2.9)$$

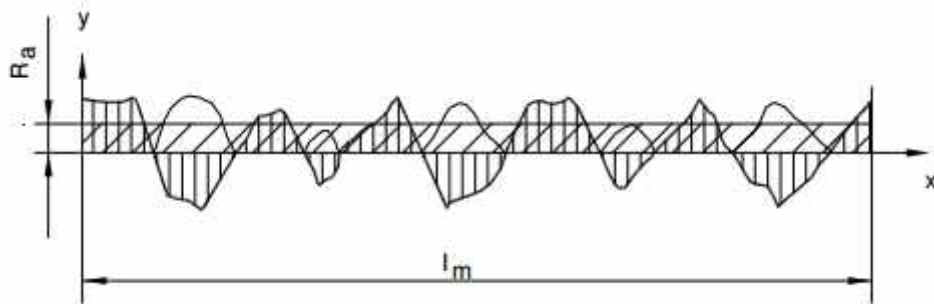


Figura 2.7 - Parâmetro de rugosidade R_a (BET, 1999).

Já a média da rugosidade R_z é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares dos cinco trechos de medição sucessivos. Matematicamente, pode ser descrita por (König, 1981):

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (10)$$

A rugosidade singular Z_i é definida como sendo o afastamento de duas linhas paralelas a linha média, que ocorrem em um dos trechos de medição singular, que tangenciam o perfil de rugosidade no ponto mais elevado e mais baixo, como pode ser visto na Fig. 2.8.

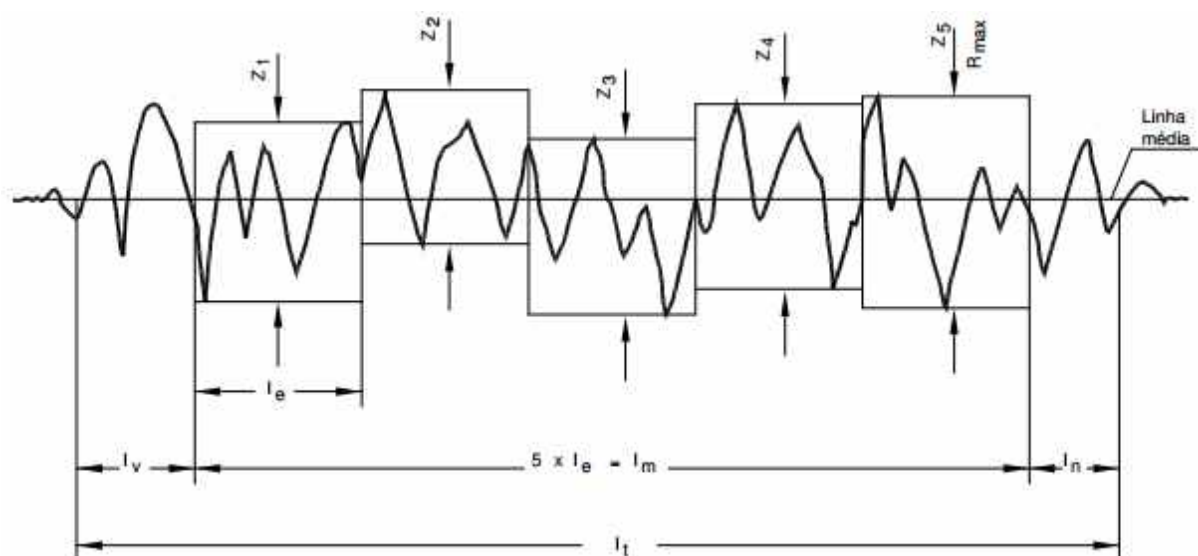


Figura 2.8 - Definição da média da rugosidade Rz (KÖNIG, 1981).

2.8 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A estampagem incremental (ISF, do inglês "*Incremental Sheet Forming*") é um termo que descreve uma variedade de métodos de estampagem de chapas metálicas, tendo em comum a capacidade de originar geometrias simétricas ou não, através da utilização de ferramentas e máquinas de baixo custo quando comparados aos processos convencionais (Alwood et al., 2005).

Neste processo inovador, as chapas de metal fixadas a um suporte, são conformadas por uma ferramenta de ponta semiesférica comandada por um centro CNC ou por uma máquina dedicada. Como esse tipo de estampagem pode ser realizado com uma matriz simplificada ou mesmo ausente, o processo se torna atrativo para pequenos volumes de produção, prototipagem rápida e áreas de saúde (CASTELAN, 2010).

2.8.1 Estampagem incremental simétrica

Antes mesmo da existência das máquinas CNC, a estampagem incremental simétrica ou axissimétrica, também conhecida como "*spinning*" já era aplicada a chapas metálicas em tornos mecânicos.

Neste processo, uma chapa fixa ao mandril através de um suporte de fixação gira em conjunto com o mesmo. Esse mandril apresenta o formato interno da peça a se produzir, limitando a forma geométrica a cilindros e cones. A ferramenta utilizada nesse processo apresenta forma circular e deforma a chapa através de várias passagens sobre sua superfície. Assim como o nome sugere, através desse processo só é possível gerar

geometrias simétricas. Uma variação do "spinning" é o "shear forming", que se diferencia pelo fato de a ferramenta de conformação estar em contato permanente com a peça. A Fig. 2.9 ilustra os dois tipos de estampagem incremental simétrica existentes.

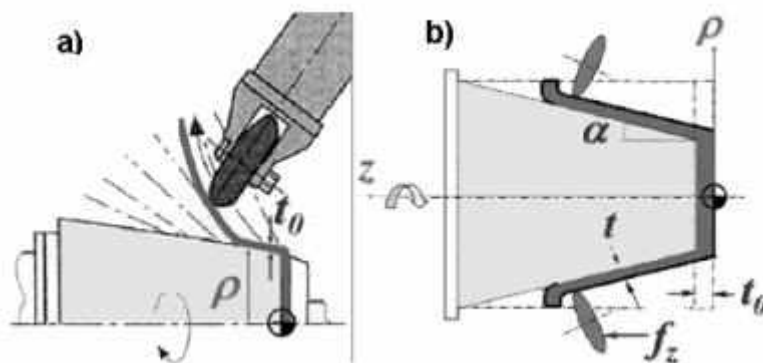


Figura 2.9 - Estampagem incremental simétrica "spinning" (a) e "shear forming" (b). (CARRINO, 2011).

2.8.2 Estampagem incremental assimétrica

Várias novas técnicas de conformação de chapas metálicas foram desenvolvidas nos últimos anos devido a avanços na usinagem controlada por computador, providos principalmente pelo avanço tecnológico de máquinas CNC, através do desenvolvimento de pós processadores capazes de gerar caminhos de ferramenta em *softwares* CAD/CAM.

Como resultado desse avanço tecnológico tivemos o surgimento da estampagem incremental assimétrica de chapas metálicas a baixo custo, tendo a possibilidade de serem executados sem matrizes ou com uma versão muito pequena da mesma.

Segundo Jeswiet (2005), a estampagem incremental assimétrica (ASIF, do inglês "Asymetric Incremental Sheet Forming") pode ser interpretada de diferentes maneiras, apresentando quatro variações de processo. Contudo, apesar dessas variações todos os processos de estampagem incremental assimétrica apresentam as seguintes características:

- Ferramentas genéricas de pequenas dimensões;
- Ausência ou utilização de pequenas matrizes dedicadas;
- Apresenta contato contínuo entre ferramenta e chapa;
- Movimento tridimensional controlado pela ferramenta;
- Pode produzir chapas metálicas assimétricas.

A estampagem incremental assimétrica de uma chapa metálica pode ser efetuada em uma máquina concebida especificamente para o processo ou através da adaptação de

uma máquina CNC de três eixos, sendo o último mais utilizado para a sua execução. A Fig. 2.10 apresenta as quatro variações de processo presentes na estampagem incremental assimétrica.

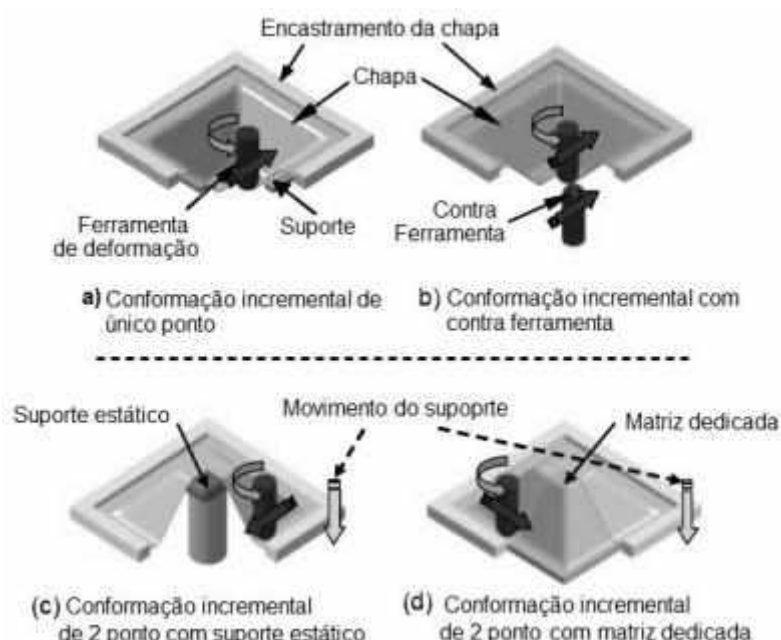


Figura 2.10 - Quatro variantes do processo de deformação incremental assimétrica (JESWIET, 2005).

As configurações mostradas na Fig. 2.10 (a) e 2.10 (b) apresentam um encastramento(fixação) de chapa estacionário, imóvel. Já as configurações mostradas na Fig. 2.10 (c) e 2.10 (d) temos o encastramento que se move ao longo do eixo vertical, de acordo que a ferramenta deforma a chapa. As configurações ilustradas na Fig. 2.10 (c) e 2.10 (d) são normalmente associadas a máquinas dedicadas a esse processo de estampagem assimétrica, enquanto que as mostradas em 2.10 (a) e 2.10 (b) são normalmente desenvolvidas através da adaptação de centros de usinagem CNC.

Sendo assim, devido a facilidade de implementação dos modos de estampagem incremental assimétrica ilustrados pela Fig. 2.10 (a) e 2.10 (b) pode-se dizer que existem dois principais tipos de variantes, a deformação incremental por ponto único (SPIF, do inglês "*Single Point Incremental Forming*") e a deformação incremental de dois pontos (TPIF, do inglês "*Two Point Incremental Forming*").

A estampagem incremental assimétrica é composta por quatro elementos básicos:

- Chapa metálica;
- Suporte fixador(encastrador);

- Ferramenta de conformação;
- Sistema de movimentação CNC orientado por *software* CAD/CAM.

Esses elementos básicos, são ilustrados pela Fig. 2.11.

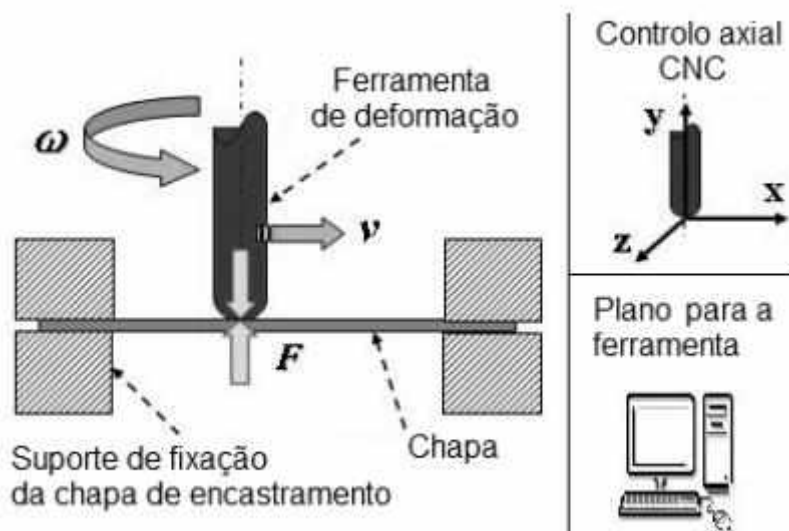


Figura 2.11 - Elementos básicos da estampagem incremental assimétrica (JESWIET, 2005).

Onde:

F [N] é a força de deformação da chapa;

ω [rpm] é a rotação da ferramenta;

v [mm/s] é a velocidade de movimento da ferramenta.

O processo de estampagem é controlado numericamente por uma máquina CNC através de um sistema de coordenadas cartesianas, realizando movimentos verticais, longitudinais e transversais com a ferramenta de conformação. A trajetória da ferramenta é gerada através de um *software* CAM (*Computer Aided Manufacturing* ou Manufatura Auxiliada por Computador), que determina o acabamento superficial de acordo com o tamanho dos incrementos dados nos eixos (Hirt et al., 2003).

2.8.2.1 Estampagem incremental assimétrica de dois pontos (TPIF)

A estampagem incremental de dois pontos (TPIF), recebe esse nome devido a característica da existência do contato simultâneo de dois pontos na chapa que se deseja deformar. Um exemplo da estampagem incremental assimétrica de dois pontos pode ser visto na Fig. 2.10 (c). Um dos pontos dá-se pelo contato entre a chapa e a ferramenta,

causando a deformação plástica no mesmo enquanto a ferramenta segue o caminho proposto. Já o segundo contato é resultado da existência de uma contra ferramenta que tem a função de criar uma contra-força. Em resumo, um é resultado da pressão feita pela ferramenta contra a chapa e o outro através da contra ferramenta que age como matriz parcial. Devido a essa matriz parcial, o TPIF não é verdadeiramente "*dieless*" ou sem matriz, embora muitas vezes seja considerado como tal (Jeswiet, 2005).

A Fig. 2.12 ilustra o equipamento responsável por realizar a estampagem TPIF, em que a chapa encastrada movimenta-se verticalmente através de um sistema de colunas guias, auxiliando na conformação. A contra ferramenta ao centro realiza uma contra força, auxiliando também na determinação da forma da peça.

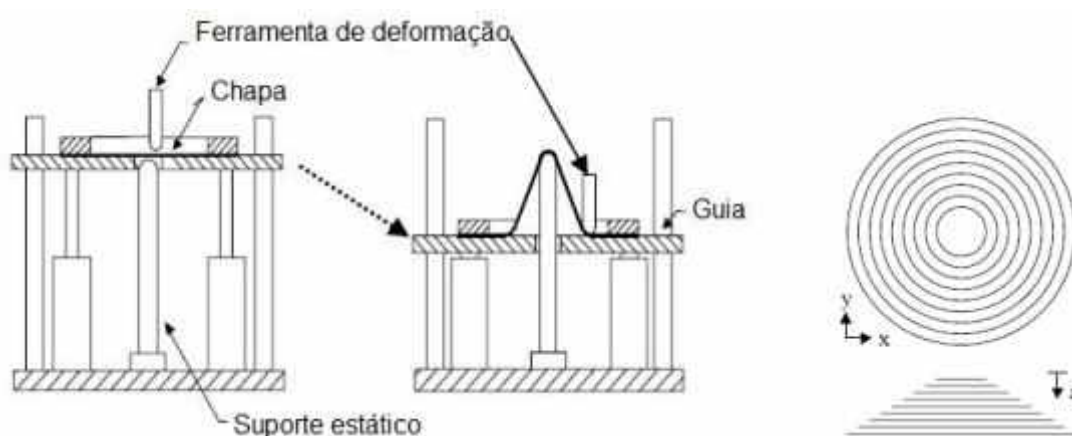


Figura 2.12 - Representação de sistema de estampagem incremental de dois pontos (JESWIET, 2005).

2.8.2.2 Estampagem incremental de ponto único (SPIF)

A estampagem incremental de ponto único (SPIF), como pode ser vista na Fig. 2.10(a), difere de seu antecessor TPIF apresentando somente um ponto de contato com a chapa. O estudo desse processo foi impulsionado por Jeswiet, Leach e Fratini, que mostraram que esse processo pode ser adaptado a um centro de usinagem CNC usando um *software* CAD/CAM, responsável por gerar o caminho da ferramenta (Jeswiet, 2005).

Neste tipo de estampagem, o único ponto de contato existente é resultado do contato entre a chapa e a ferramenta que rotaciona. A deformação plástica resultante é gerada através desse contato, que combinado com o caminho da ferramenta dá forma à chapa através de sucessivos incrementos verticais, dando origem a uma concavidade.

Esse processo apresenta diversos parâmetros que podem ser controlados e que influenciam o estado tribológico da superfície da chapa. As principais variáveis segundo vários autores são:

- Espessura da chapa;
- Diâmetro da ferramenta;
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Velocidade relativa da ferramenta sobre a superfície de trabalho;
- Trajetória de conformação;
- Incremento vertical ΔZ ;
- Lubrificação.

A Figura 2.13 ilustra a relação existente entre os principais parâmetros envolvidos na estampagem incremental, relacionando os mesmos com o custo de fabricação de um componente.

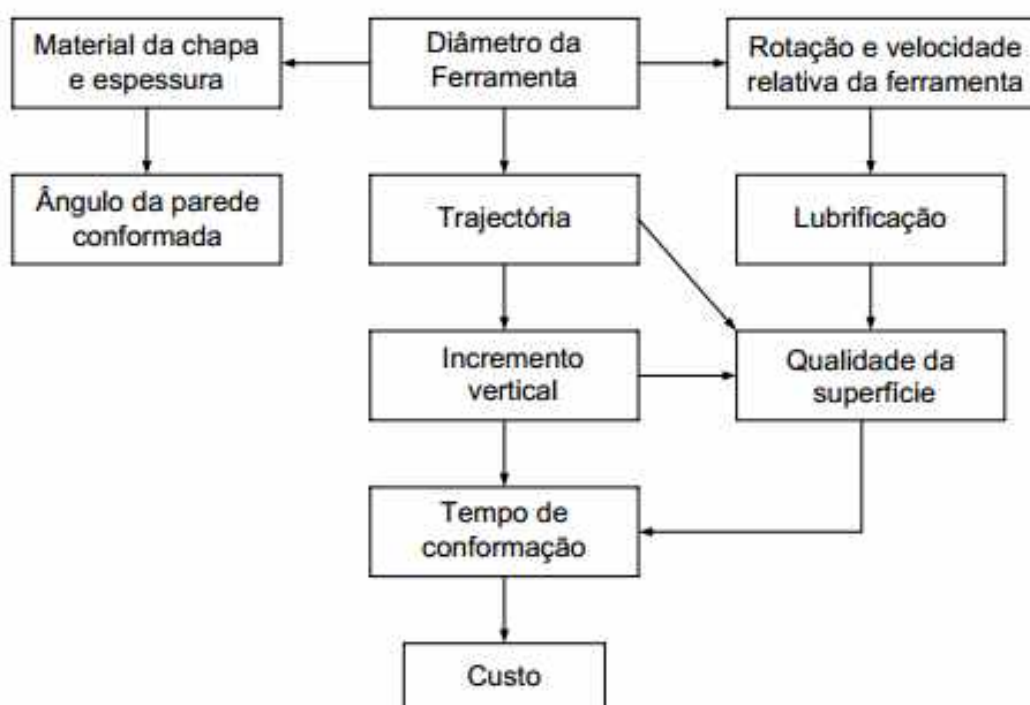


Figura 2.13 - Representação esquemática da relação dos principais parâmetros da estampagem incremental (SENA, 2009)

Segundo Jeswiet (2005), esse processo apresenta as seguintes vantagens:

- O formato da chapa a ser estampada pode ser obtido diretamente através dos dados de um *software* CAD, podendo ser aplicado a prototipagem rápida ou pequenos volumes de produção;
- O processo dispensa o uso de matrizes, contudo é necessário a utilização de um *backing plate* responsável por criar o ângulo de deformação na zona encastrada;
- Mudanças no *design* e tamanho de forma podem ser facilmente aplicados, aumentando o grau de flexibilidade;
- Devido à pequena zona plástica e à natureza incremental do processo temos o aumento da conformabilidade do material;
- Um centro CNC convencional pode ser utilizado neste processo;
- O tamanho do componente só é limitado pelo tamanho da máquina CNC;
- A qualidade do acabamento superficial pode ser facilmente controlada através do controle dos incrementos verticais;
- O processo de conformação é silencioso e relativamente livre de ruídos.

Assim como todos os processos, o mesmo também apresenta desvantagens:

- A maior desvantagem é o tempo de estampagem das peças, apresentando um tempo muito superior quando comparado aos processos convencionais;
- Como resultado da primeira desvantagem, esse processo fica limitado à produção de pequenos lotes;
- A formação de elevados ângulos de parede não pode ser alcançado em um único passo, sendo necessário a aplicação de multiprocessos;
- Há a existência da recuperação elástica, sendo necessária a aplicação de algoritmos de correção.

Sendo assim, levando-se em conta as vantagens e desvantagens desse processo, a aplicação do mesmo é recomendada nas seguintes situações:

- Em aplicações da medicina, permitindo a fabricação de próteses com as características exclusivas de cada paciente;
- Na produção de pequenos lotes, quando o processo de estampagem convencional apresenta um elevado custo;
- No desenvolvimento de protótipos, concepção de novos produtos, auxiliando na análise funcional e na forma do produto.

A Figura 2.14 demonstra um processo de estampagem SPIF adaptado a um centro de usinagem CNC.

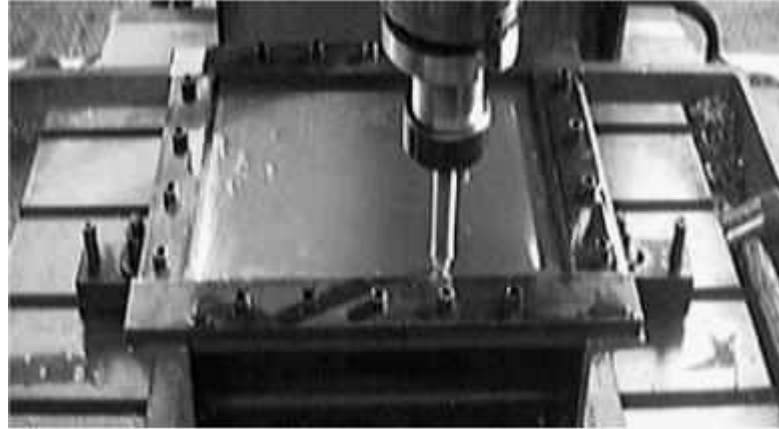


Figura 2.14 - Centro de usinagem CNC adaptado ao SPIF (FRATINI, 2004).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Com o propósito de realizar cinco ensaios de estampagem incremental, uma chapa metálica de aço inoxidável AISI 304 de dimensões 900x530mm foi cortada em seis chapas quadradas menores de dimensões 240x240 utilizando uma tesoura faca BOSCH-GSC28. Cinco chapas quadradas foram destinadas a realização de ensaios de estampagem incremental utilizando o óleo mineral SAE 90 API GL5 variando a rotação da ferramenta de conformação em 0 rpm, 500 rpm, 500 rpm com adição de grafite mech (40 μ m) ao óleo mineral lubrificante na proporção de 10% em peso, 1000 rpm e 2000 rpm. Já a sexta chapa quadrada foi destinada à fabricação de três corpos de prova, obtidos a 0°(longitudinal), 45° e 90°(transversal), de dimensões de acordo com a norma ABNT NBR 6152 cortados utilizando jato d'água.

Para conformar as cinco chapas metálicas do aço inoxidável AISI 304 foi utilizado um centro de usinagem CNC *Romi Bridgeport Discovery 760*, disponibilizado pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), adaptado ao processo de estampagem incremental através do desenvolvimento de um suporte fixador de chapas metálicas, desenvolvimento de uma ferramenta semiesférica para a conformação da chapa e seleção de um *software* CAD/CAM para gerar a trajetória da ferramenta.

O suporte fixador de chapas apresenta uma geometria semelhante à de um cubo e é capaz de conformar chapas de 240x240mm. A Fig. 3.1 mostra o suporte fixador de chapas desenvolvido pelo LEPU.



Figura 3.1 - Suporte fixador de chapas metálicas.

A ferramenta desenvolvida para a estampagem da chapa foi fabricada em aço AISI 52100, apresentando uma ponta semiesférica de diâmetro 5,5 mm. A Fig. 3.2 apresenta a geometria da ferramenta de estampagem fabricada.

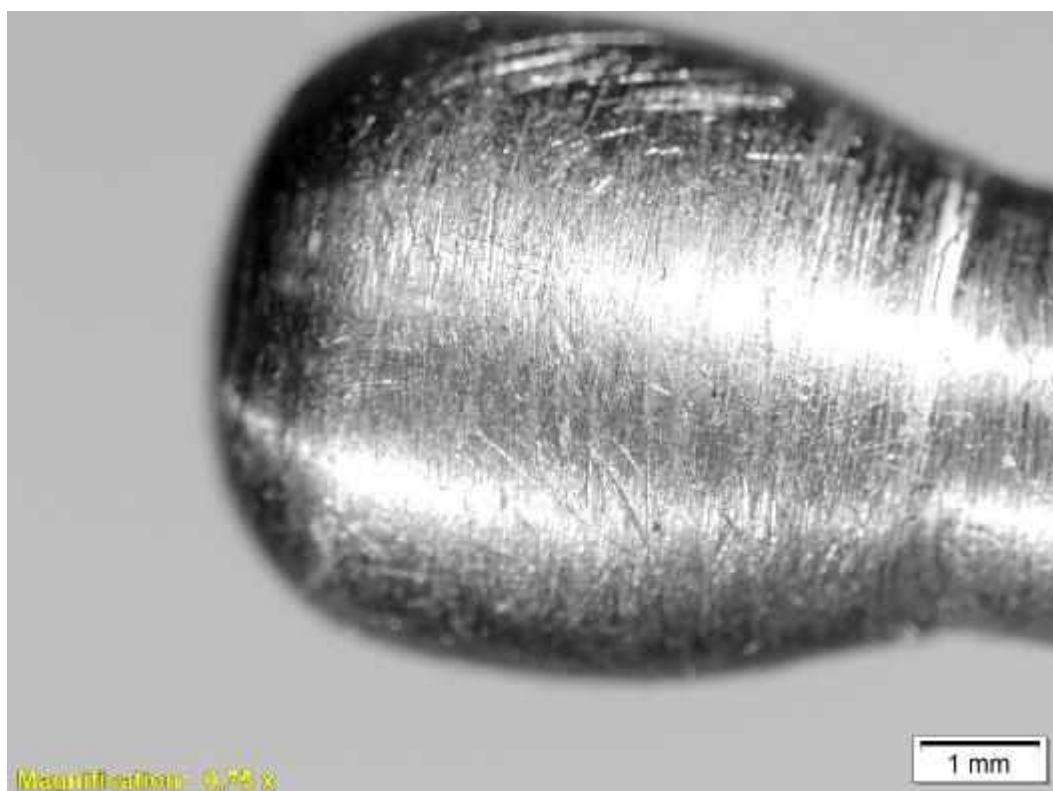


Figura 3.2 - Ferramenta de estampagem de ponta semiesférica de diâmetro 5,5 mm fabricada em aço AISI 52100.

O *software* CAD/CAM selecionado para o desenvolvimento da trajetória da ferramenta foi o Fusion 360 ® da empresa Autodesk, que fornece chaves gratuitas para instituições acadêmicas, estudantes e professores. Esse programa é uma plataforma de desenvolvimento baseado em nuvem com ferramentas CAD, CAM e CAE utilizado para o desenvolvimento de processos e produtos.

A geometria selecionada para a realização da estampagem incremental de ponto único foi um tronco de cone. A Fig. 4.3 ilustra as dimensões utilizadas para a estampagem do mesmo.

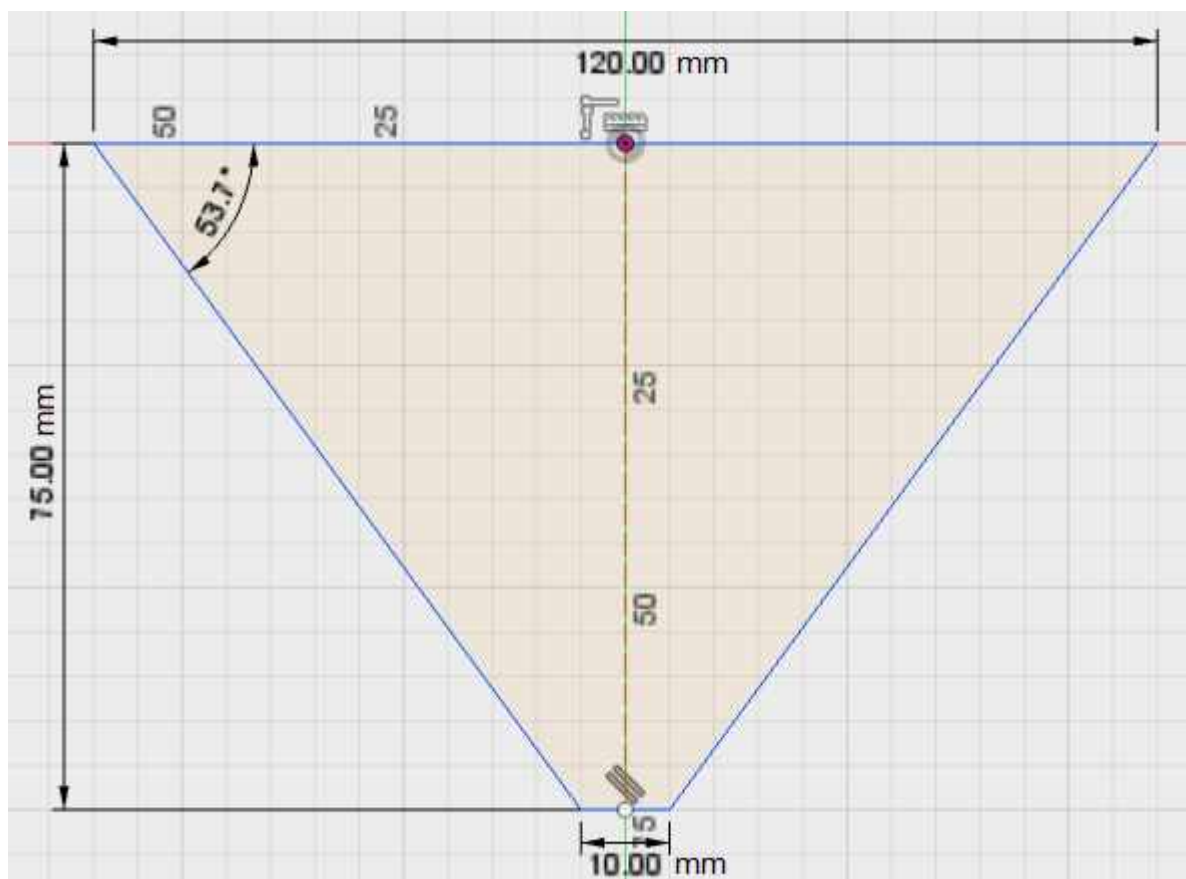


Figura 3.3 - Dimensões do tronco de cone utilizado na estampagem.

Observe que a geometria adotada, representada pela Fig. 4.3, apresenta um ângulo de parede de aproximadamente 54°.

O centro de usinagem CNC utilizado possui comando5 SINUMERIK 810D. Sendo assim, utilizando o *software* Fusion 360 ® com o pós processador adequado foram geradas as trajetórias para cinco troncos de cone, com passo vertical ΔZ (incremento vertical) de 0,5 mm, velocidade de avanço v de 250mm/min, variando somente a rotação nos valores de 0, 500, 1000 e 2000 rpm. A Fig. 3.4 apresenta os parâmetros utilizados para o ensaio realizado na rotação de 1000 rpm.

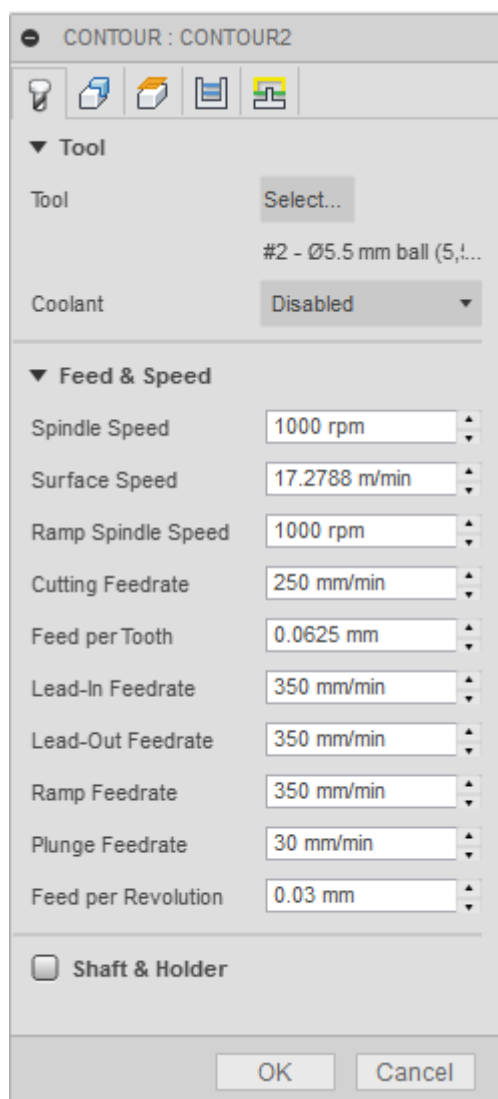


Figura 3.4 - Parâmetros de estampagem para o tronco de cone utilizando 1000rpm.

Observe na Fig. 3.4 que o código foi gerado utilizando uma ferramenta de fresagem de ponta esférica *Ball End Mill* de diâmetro 5,5 mm, pois o *software* não disponibiliza a ferramenta fabricada para ensaio. Nesse sentido, como a ferramenta fabricada e a selecionada para geração do código apresentam a mesma geometria e o mesmo diâmetro o processo não sofreria alteração. A única influência é o aparecimento de alguns parâmetros como *Feed per Tooth* ou Avanço por Dente, como pode ser visto na Fig. 3.4, que não apresentam nenhum significado para o processo de estampagem incremental.

Com o programa gerado, o *software* disponibiliza a trajetória da ferramenta visualmente, além da possibilidade de simulação do processo e estimação do tempo de conformação da mesma. A Fig. 3.5 apresenta a trajetória da ferramenta.

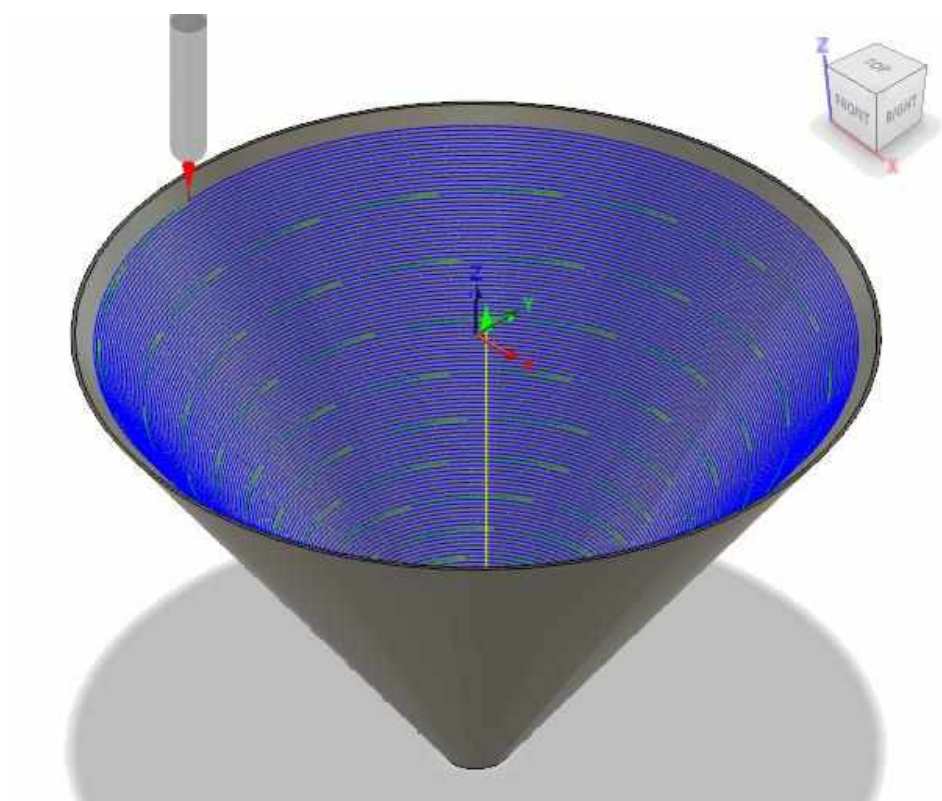


Figura 3.5 - Trajetória da ferramenta a estampar o tronco de cone proposto.

Observando a Fig. 3.5 é possível observar a trajetória da ferramenta por meio das linhas azuis, sendo os arcos de circunferência em verde responsáveis por realizar o incremento vertical no formato de uma espiral, variando as coordenadas x , y e z . A Fig. 3.6 apresenta uma foto de uma das chapas quadradas de aço inoxidável AISI 304 sendo conformada a 1000 rpm.

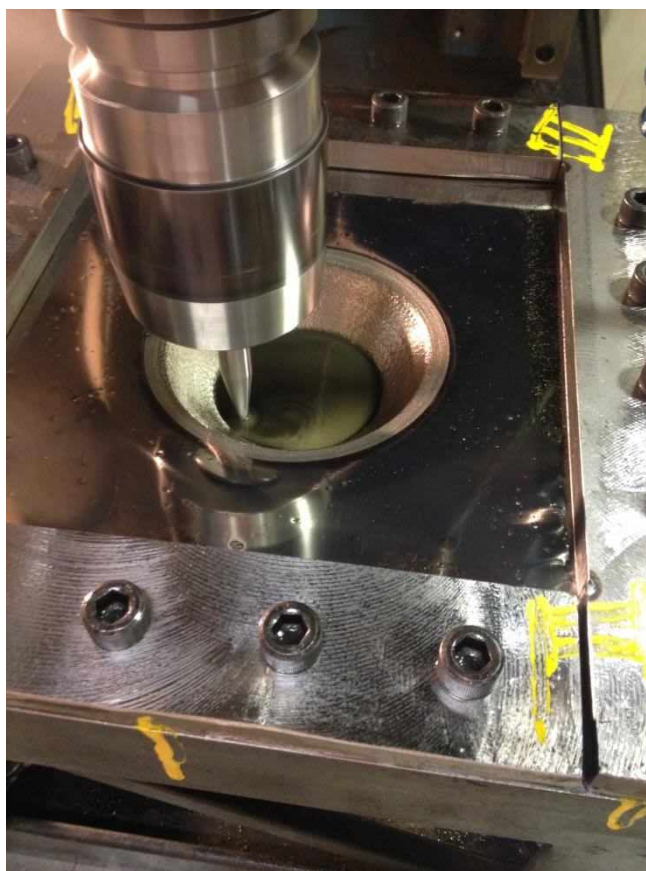


Figura 3.6 -Foto do ensaio de estampagem de chapa de aço inoxidável AISI 304 a 1000 rpm.

Após a estampagem das cinco chapas, foram cortadas amostras radiais a dez milímetros do ponto de início do processo, uma por chapa, conforme a Fig. 3.7.

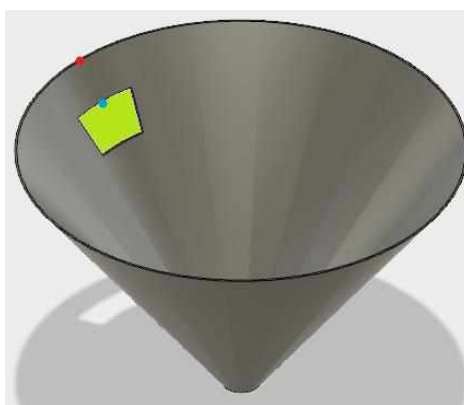


Figura 3.7 – Amostras retiradas para análise.

A Fig. 3.7 ilustra as amostras retiradas (em verde) de dimensão 15x10mm que foram cortadas utilizando uma tesoura corta chapas. O ponto vermelho representa o início do

processo de conformação e o ponto azul, a dez milímetros do ponto vermelho, representa a orientação em que as amostras foram embutidas utilizando uma máquina Fortel EFD 30.

Após o embutimento, as cinco amostras foram desbastadas com lixas 100, 200, 400, 800, 1000 e 1200, logo após foram polidas com óxido de cromo ($5\mu\text{m}$) e atacadas quimicamente com água régia (mistura homogênea de três partes de ácido clorídrico para uma de ácido nítrico). As amostras foram levadas a um microscópio óptico TIM108 a fim de observar a microestrutura resultante do processo de estampagem. Para fins de comparação, também foram embutidas e visualizados no microscópio dois pedaços da chapa laminada de AISI 304, uma na vertical e outra na horizontal, que passaram pelo mesmo processo de desbastamento e ataque.

Para complementar, após cada ensaio de estampagem a ferramenta foi levada ao microscópio onde foram obtidas imagens com o objetivo de evidenciar o desgaste da ferramenta associado com a rotação da mesma.

O programa fornecido pelo *software* Fusion 360 ® utilizado para a estampagem das chapas se encontra anexado a este documento de forma resumida, pois o mesmo apresenta aproximadamente 86 mil linhas. O programa apresenta um número elevado de linhas devido a uma enorme quantidade de pontos gerados para a realização da estampagem do tronco de cone proposto. Sendo assim, o programa em anexo apresenta somente a parte inicial (32 linhas) seguido da parte final, em que a estampagem é finalizada. Vale ressaltar que o programa dos cinco ensaios realizados difere somente do parâmetro da rotação, que é definido como o termo S1000 para 1000 rpm, S500 para 500 rpm e assim por diante. Nesse sentido, será disponibilizado em anexo somente o código para 1000 rpm.

Utilizando um taçador de altura digital Mitutoyo 570-310 foram medidas as profundidades estampadas, como pode ser visto na Fig. 3.8.



Figura 3.8 - Medição da profundidade do cone de aço inoxidável AISI 304 estampado incrementalmente por ponto único a 2000 rpm.

Buscando evidenciar o efeito da rotação sobre a qualidade superficial da superfície estampada, com o auxílio de um rugosímetro eletrônico portátil Starrett SR400, foram mensurados os parâmetros Ra e Rz das cinco superfícies cônicas estampadas, por meio da medição de cinco valores de rugosidade por ensaio.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma das formas de diferenciar os processos de estampagem incremental de ponto único (SPIF) é alterar a forma que a ferramenta se move durante a conformação da chapa. Existem três formas de se fazer isso: 1) a ferramenta se movimenta sem rotação, 2) a ferramenta movimenta girando a diferentes velocidades e 3) a ferramenta gira livremente devido a força de atrito.

A ferramenta de conformação apresenta um formato esférico, que é pressionado contra a chapa para causar a deformação.

A maior fonte de calor nesse processo é o atrito. A ferramenta caminha pela superfície da chapa com um certo número de rotações por minuto. Se a ferramenta está parada, a mesma deslizará ao longo do material. Se a ferramenta está a alta rotação, a superfície da mesma irá deslizar sobre a chapa muito mais frequentemente e haverá calor excessivo. Sendo assim, o movimento relativo da superfície da ferramenta em relação a superfície da chapa é diretamente proporcional ao calor gerado pelo atrito de deslize. Nesse sentido, se o movimento relativo entre a superfície da ferramenta e a superfície da chapa for pequeno (ferramenta rolando e não deslizando) o calor gerado pelo processo é reduzido.

Analisando a Fig. 4.1, é possível observar a influência desse processo no desgaste da ferramenta de conformação. Visualmente é notável que quanto maior a rotação, maior o desgaste. Observe também na Fig. 22(b) e (c) a influência do fluido lubrificante no processo, demonstrando que o uso do grafite mech ($40\mu\text{m}$) em uma solução de 10% em massa com o óleo mineral utilizado reduz o desgaste da ferramenta.

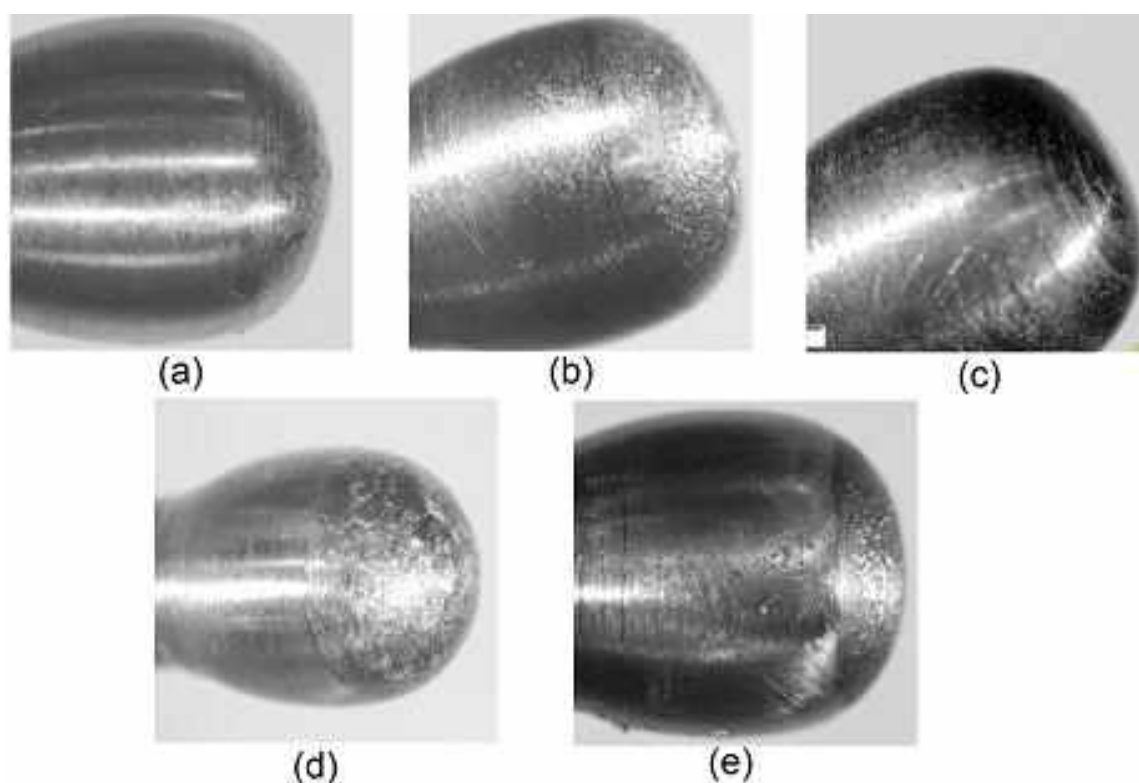


Figura 4.1 - Desgaste da ferramenta associado à rotação no SPIF.

Legenda: (a) Desgaste da ferramenta a 0 rpm; (b) Desgaste da ferramenta a 500 rpm; (c) Desgaste da ferramenta a 500 rpm com adição de grafite ao lubrificante; (d) Desgaste da ferramenta a 1000 rpm; (e) Desgaste da ferramenta a 2000 rpm.

Segundo Jeswiet (2005), buscando produzir o mínimo calor no processo de estampagem a ferramenta deve rolar sobre a superfície enquanto a chapa é deformada. Para obter esse resultado é necessário que a velocidade de avanço v seja equivalente à circunferência média em contato com a ferramenta multiplicada pela velocidade de rotação w . A Fig. 4.2 ilustra essa demonstração matematicamente.

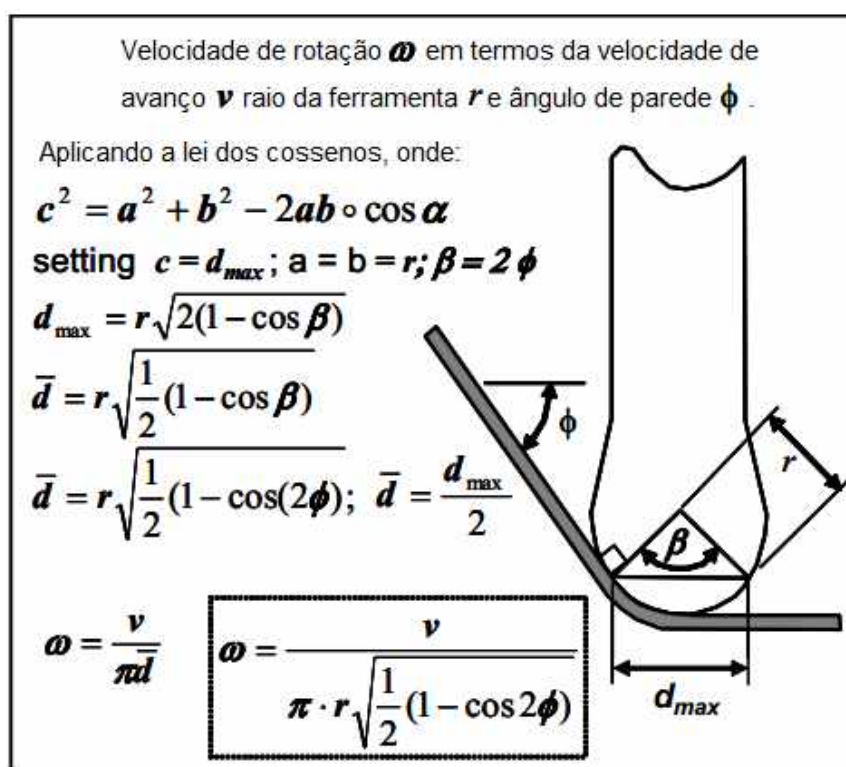


Figura 4.2 - Geometria da ferramenta e velocidade de rotação (JESWIET, 2005).

Aplicando os parâmetros usados para a conformação do tronco de cone proposto ($v = 250$ mm/min, $\phi = 54^\circ$ e $r = 2,75$ mm) a equação demonstrada na Fig. 4.2 obtemos um valor de rotação ω de aproximadamente 36 rpm.

Como é possível observar na Fig. 4.2 esse valor é condizente com os resultados obtidos na prática, em que rotações próximas a 36 rpm, no caso 0 rpm, apresentam menor desgaste da ferramenta. É possível observar também que, assim como previsto pela equação o desgaste se limita ao diâmetro médio da ferramenta.

Assim como houve desgaste da ferramenta é esperado que o que estava em contato com a mesma também se desgaste. Toda a lógica de geração de calor e aumento de atrito também se aplica a chapa a se conformar. Sendo assim, é esperado que quanto maior a rotação nas estampagens realizadas, maior será o desgaste da chapa e consequentemente maior será o calor gerado nesse processo. A Fig. 4.3 apresenta as estampagens SPIF realizadas em aço inoxidável AISI 304 alterando somente a rotação.

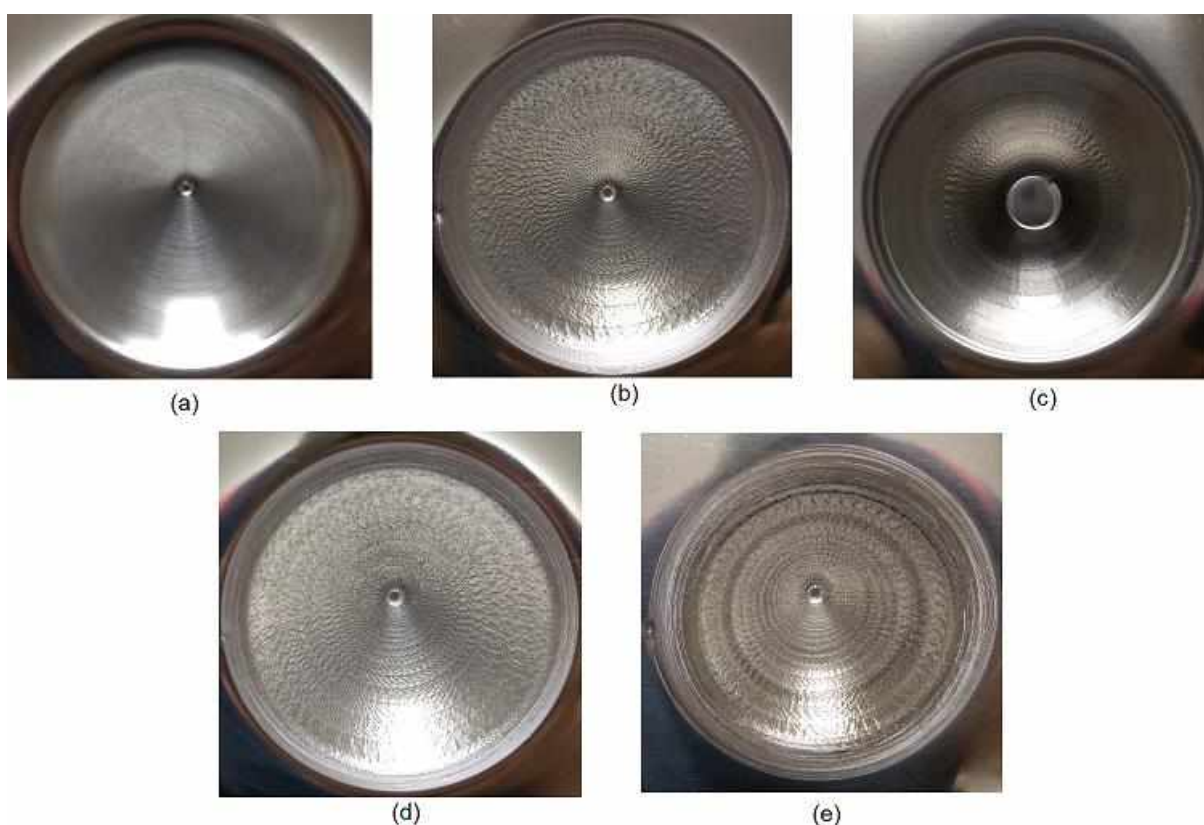


Figura 4.3 - Chapas de aço inoxidável AISI 304 estampadas a diferentes rotações no SPIF.

Legenda: (a) Estampagem SPIF a 0rpm; (b) Estampagem SPIF a 500rpm; (c) Estampagem SPIF a 500 rpm com adição de grafite ao lubrificante; (d) Estampagem SPIF a 1000rpm; (e) Estampagem SPIF a 2000rpm.

Como esperado, na Fig. 4.3, visivelmente é possível observar uma qualidade superficial melhor associada a rotações próximas a 36rpm. Novamente é possível observar a influência do lubrificante no processo, tanto a estampagem da Fig. 4.3 (b) e 4.3 (c) foram realizadas com os mesmos parâmetros, diferindo somente pela presença de grafite no óleo lubrificante em (c), que claramente melhorou a qualidade superficial, seja minimizando o contato entre ferramenta e chapa ou otimizando a transferência de calor entre os componentes envolvidos.

Após a estampagem de todas as chapas, foi observado a existência de pequenas concavidades ao longo da superfície estampada exceto para a chapa estampada a 0rpm. Tais concavidades foram originadas pelo mau funcionamento do código G 64, que é responsável pelo movimento contínuo e constante da ferramenta ao longo da chapa.

Como o mesmo não estava funcionando de maneira adequada, a ferramenta realizava o movimento de um segmento de reta e enquanto o centro de usinagem CNC se

preparava para a realização do segmento de reta seguinte a ferramenta ficava girando em contato com um ponto fixo da chapa. A Fig. 4.4 demonstra a textura, semelhante a uma casca de casca de laranja, encontrada durante a estampagem de uma chapa de aço inoxidável AISI 304 a 1000 rpm.



Figura 4.4 - Textura encontrada durante a estampagem SPIF de aço inoxidável AISI 304.

Como pode ser visto na Fig. 4.4, o óleo utilizado que normalmente tem uma aparência amarelada translúcida, apresenta uma aparência negra e opaca, sendo resultado da mistura de pequenas partículas que foram retiradas tanto da chapa quanto da ferramenta. Nesse sentido, o movimento intermitente da ferramenta combinado com a rotação da ferramenta ocasionou em vários pontos da superfície estampada a retirada de material, apresentando uma textura semelhante a uma casca de laranja. Essa textura pode ser explicada pelo aumento do atrito de deslizamento, aumentando a energia associada ao processo, que foi evidenciado pelo aumento de temperatura, observado visualmente pelo aumento da fluidez do óleo lubrificante.

Vale ressaltar que a presença de partículas metálicas no óleo lubrificante causa o que é conhecido como "efeito cascata", acelerando o desgaste proporcionalmente à quantidade de partículas presentes no mesmo.

Tendo em vista o que foi exposto anteriormente, a qualidade superficial que normalmente é associada com o incremento vertical ΔZ , também pode ser associada à

velocidade de rotação da ferramenta ω . Foi observado que quanto mais a rotação da ferramenta se distancia da rotação de rolamento, maior é a retirada de partículas e maior é o calor associado ao processo, resultando em uma superfície mais rugosa. A Fig. 4.5 apresenta um gráfico comparativo que relaciona a rugosidade Ra e Rz com a rotação da ferramenta.

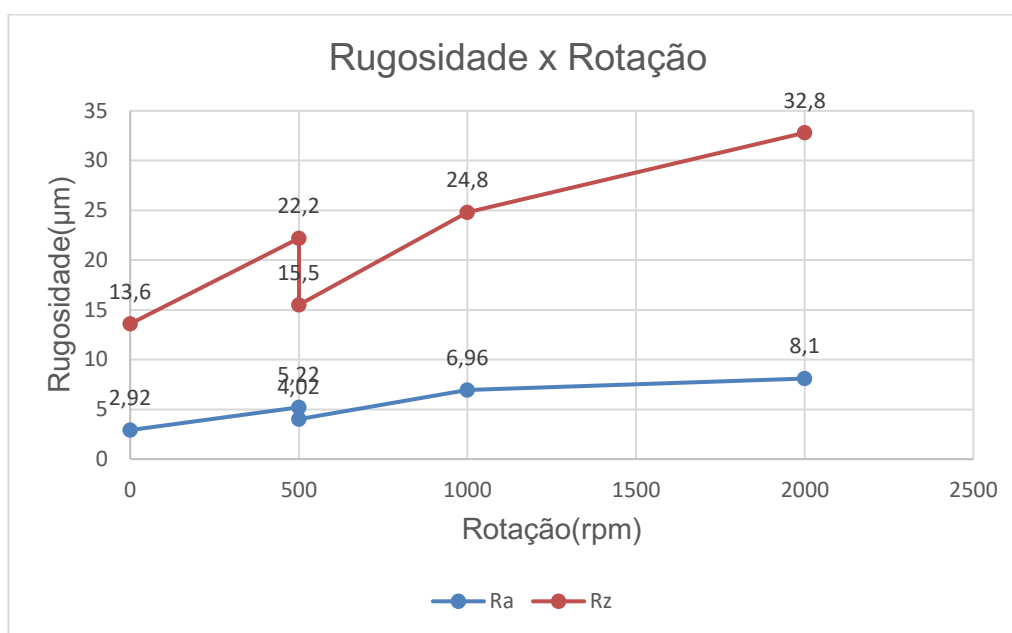


Figura 4.5 – Gráfico Rotação x Rugosidade.

Analisando a Fig. 4.5 é possível comprovar o comportamento esperado através dos valores médios dos parâmetros Ra e Rz, em que o aumento de rugosidade é diretamente proporcional ao aumento da rotação da ferramenta. Observe que quanto maior a rotação maior foi o parâmetro de medição Ra, exceto no caso de adição de grafite ao óleo mineral, que resultou na diminuição de rugosidade quando comparado ao ensaio equivalente sem a adição do mesmo. A tabela presente no apêndice II apresenta todos os valores de rugosidade, valores médios e desvios padrões obtidos.

Após os ensaios de estampagem SPIF foi observado uma variação de profundidade nos cones estampados. Vale ressaltar que pela dimensão mostrada na Fig. 3.3 a profundidade a ser estampada era de 75mm, contudo devido a recuperação mecânica do processo foram encontradas profundidades menores que as impostas pelo programa. A Fig. 4.6 apresenta o gráfico de rotação (rpm) por profundidade estampada (mm)

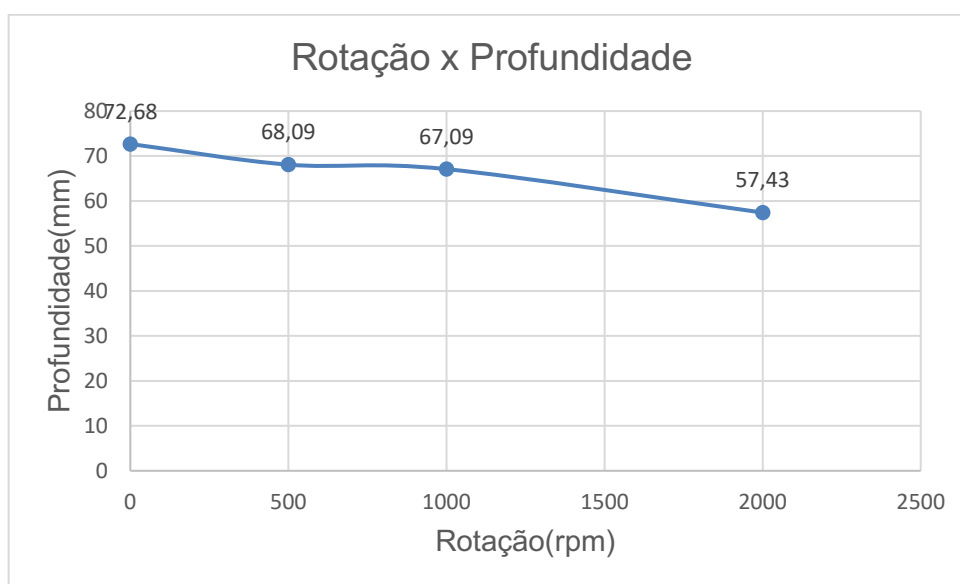


Figura 4.6 - Gráfico rotação x Profundidade.

Observe que na Fig. 4.6 não há a profundidade do ensaio realizado com grafite, pois o mesmo foi interrompido antes do término do ensaio devido ao corte súbito linha de ar comprimido, impossibilitando assim a obtenção da informação do impacto do fluido lubrificante na profundidade estampada.

Esse processo de redução de profundidade também pode ser explicado pelo aumento de temperatura associada com o aumento da rotação. Metais quando deformados plasticamente encroam e se submetidos a temperaturas de aproximadas de 1/3 a 1/2 do ponto de fusão por longos períodos recristalizam, recuperando parcialmente as deformações provocadas. Como os ensaios de estampagem SPIF demoraram por volta de quatro horas cada, a elevada rotação fez com que a temperatura da chapa se elevasse, podendo ocasionar a recristalização da chapa metálica, provocando a redução da profundidade estampada.

Buscando identificar o impacto da estampagem na microestrutura do material, analisando a microestrutura obtida utilizando o microscópio, serão feitas explicações que buscam compreender o resultado desse processo. A Fig. 4.7 apresenta a microestrutura das chapas conformadas no processo de estampagem de ponto único a diferentes rotações.

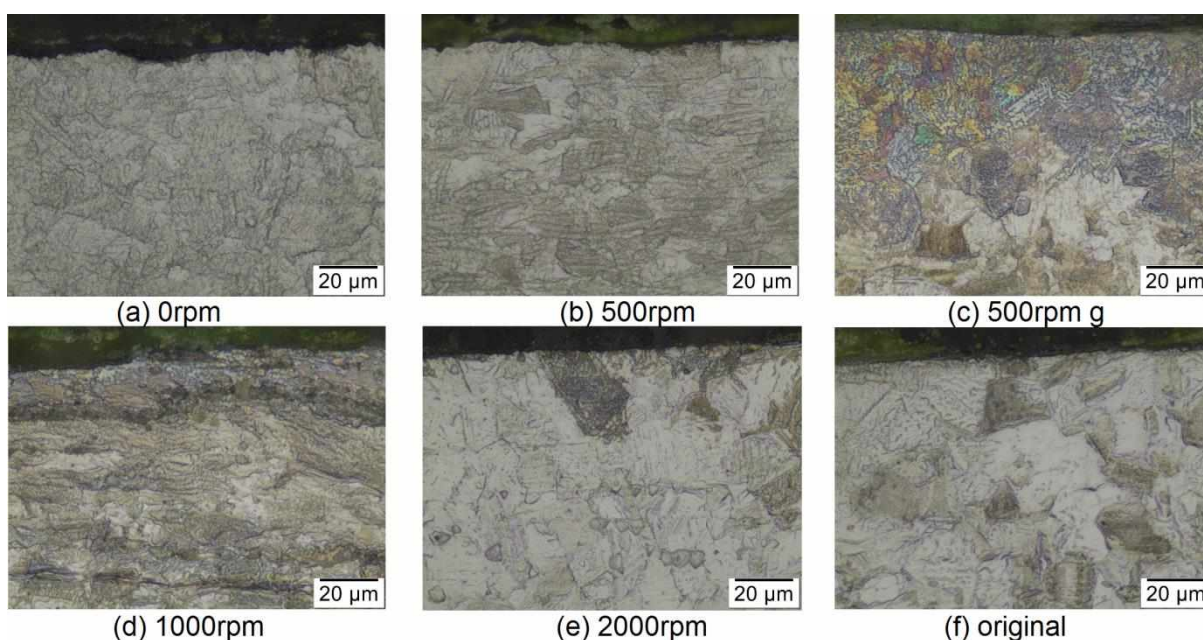


Figura 4.7 - Microestrutura de chapa metálica AISI 304 estampada em ponto único a diferentes rotações.

Legenda: (a) Estampagem com a ferramenta parada ou 0 rpm; (b) Estampagem a 500 rpm; (c) Estampagem a 500 rpm com adição de grafite ao óleo lubrificante; (d) Estampagem a 1000 rpm, (e) Estampagem a 2000 rpm; (f) Microestrutura da chapa antes de ser estampada.

Analisando a Fig. 4.7 é possível observar a proporcionalidade da zona deformada a rotação da ferramenta. As imagens da Fig. 4.7 (a), 4.7 (b) e 4.7 (d), evidenciam essa proporção mostrando o aumento da zona deformada com o aumento da rotação. Já na Fig. 4.7 (e) temos uma zona deformada menor, resultado de uma rotação tão alta capaz de usinar parte da zona deformada. Por outro lado, na Fig. 4.7 (c) temos uma coloração diferenciada quando comparado com os outros ensaios, que pode ser resultado da difusão do carbono no material devido ao calor, pressão e deformação impostos à chapa.

Aumentando a escala das microestruturas obtidas na Fig. 4.7 (e) e 4.7 (f), ou seja, comparando a microestrutura da estampagem a 2000 rpm com a chapa original é possível comprovar o que foi anteriormente proposto. A Fig. 4.8 realiza essa comparação.

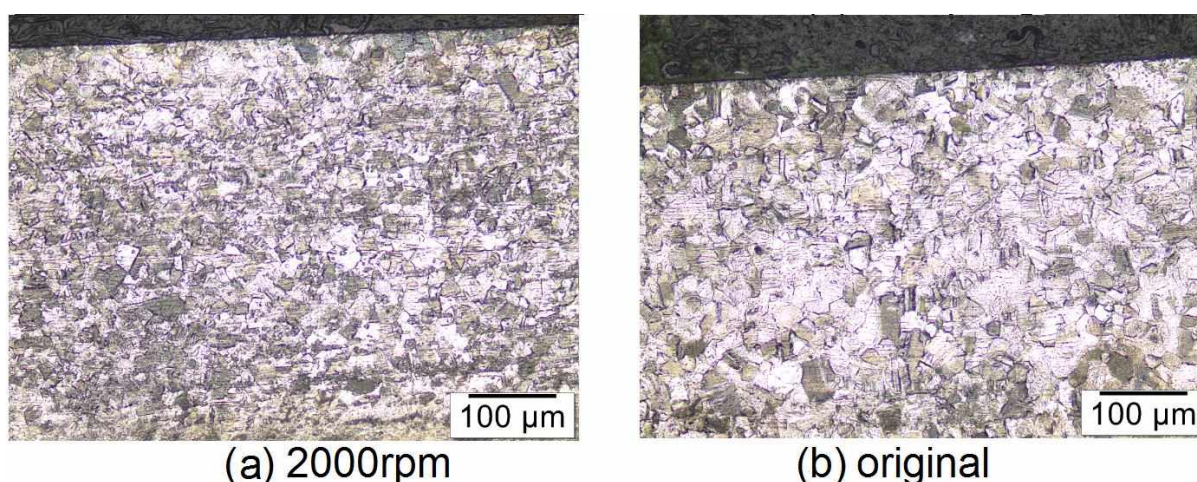


Figura 4.8 - Comparação da microestrutura estampada a 2000rpm com a microestrutura original para chapas metálicas de AISI 304.

Legenda: (a) Microestrutura estampada a 2000 rpm e (b) Microestrutura original.

Assim como já explicado, o aumento de rotação é proporcional ao calor gerado no processo, somando-se a característica do elevado tempo de estampagem de ponto único, resulta numa exposição maior dos pontos estampados inicialmente ao calor gerado gradativamente durante a estampagem. Nesse sentido, pontos inicialmente conformados tendem a apresentar uma recuperação mecânica maior que pontos estampados por último. Observando a Fig. 4.8 (a) é possível notar que houve o aparecimento de novos grãos devido ao efeito da temperatura em um longo tempo.

Assim como mostrado no subcapítulo 2.3 deste documento, o ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos a ser realizado buscando obter propriedades do material estampado. Buscando evidenciar tais propriedades, foi elaborado um gráfico de tensão σ por deformação ε . A Fig. 4.9 apresenta o gráfico $\sigma \times \varepsilon$ obtido do corpo de prova retirado a 0° (longitudinal) da chapa de AISI 304.

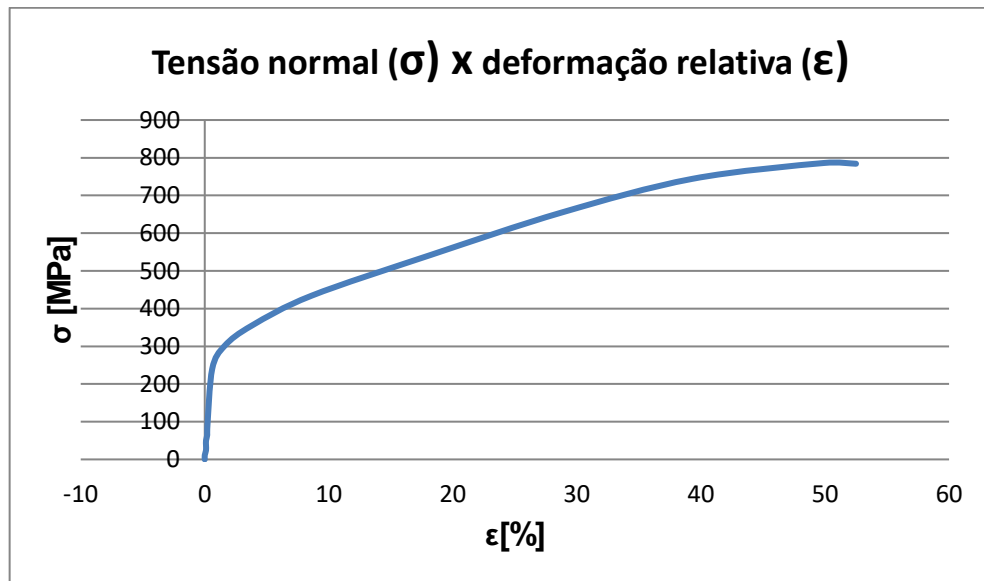


Figura 4.9 - Gráfico de tensão normal (σ) por deformação relativa (ϵ) na direção longitudinal.

O mesmo processo foi realizado na direção de 90° (transversal) e a 45° . A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 obtidas pelo ensaio de tração realizado em três direções.

Direção	σ_e [MPa]	R_m [MPa]	ϵ [%]
0°	258	785	53
45°	238	723	59
90°	245	723	58

Segundo a empresa Sid aço inox ®, o limite de resistência R_m do aço inoxidável AISI 304 pode variar entre 530 a 770 MPa, o limite de escoamento σ_e de 240 a 350MPa e o alongamento ϵ de 50 a 65%. Todos os valores obtidos estão presentes pelas faixas de valores fornecidos pela a empresa, exceto o limite de resistência para 0° .

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

A Estampagem Incremental de Chapas é um processo viável e tem um grande potencial como uma ferramenta no processo de desenvolvimento de produto, podendo ser realizado em um centro de usinagem CNC comum.

Em todos os ensaios de Estampagem Incremental para o aço inoxidável austenítico AISI 304 a profundidade total projetada para a peça era de 75 mm. Devido a variação de profundidade observada após os ensaios, observou-se a relação entre atrito da ferramenta e a geração de calor, em que quanto maior a rotação maior foi o calor gerado e, portanto, maior foi a recuperação mecânica do material. Tal atrito foi potencializado pelo movimento intermitente da ferramenta, originando uma textura resultante do contato temporário da ferramenta girante com o mesmo ponto por um intervalo de tempo (casca de laranja). Como resultado, a energia associada ao processo em forma de calor foi aumentada, podendo causar a recristalização e o crescimento de novos grãos nas regiões de menor profundidade dos cones.

O aparecimento dessa textura resultou na variação da qualidade superficial das superfícies estampadas, que foram mensuradas utilizando rugosímetro através dos

parâmetros Ra e Rz. A rugosidade encontrada foi proporcional a rotação, apresentando a melhor qualidade superficial para o ensaio realizado com a ferramenta parada.

Adicionando-se grafite mech ($40\mu\text{m}$) em solução de 10% ao óleo mineral SAE 90 API GL5, foi observado uma melhoria da qualidade superficial da chapa estampada, como também um aumento de profundidade relativo de profundidade. Analisando as micrografias encontradas foi possível observar a difusão do carbono grafite na microestrutura da chapa estampada, resultado da pressão, calor e deformação impostos a chapa.

Também foi observado que existe uma relação entre a zona deformada e a rotação da ferramenta, tal zona aumenta com o aumento de rotação, como observado na Fig. 28. Caso a rotação imposta seja muito alta, a zona deformada passa a ser reduzida devido a retirada de material pela ferramenta.

O trabalho mostra também as propriedades obtidas do aço inoxidável austenítico AISI 304 obtidas através da realização de ensaios de tração em diferentes direções do material, que mostraram de acordo com os dados fornecidos pela empresa Sid aço inox®.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR. 6152. Materiais metálicos–Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

Allwood, J.; Jackson, K. An introduction to incremental sheet forming in Cambridge. In: CMI workshop on sandwich sheets, 21st June. 2005.

BET, Luciano et al. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999.

Carrino, L.; Giuliano, G.; Strano, M. The effect of the punch radius in dieless incremental forming. In: Proceedings of the 2nd IPROMS Virtual International Conference. 2011. p. 204-209.

CASTELAN, Jovani. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro à aplicação em implante craniano. 2010.

CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304L. 2010.

CERRO, Itsasne et al. Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, n. 1-3, p. 404-408, 2006.

Filice, L.; Fratini, L.; Micari, F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP annals-Manufacturing technology*, v. 51, n. 1, p. 199-202, 2002.

Fratini, L. et al. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 207-210, 2004.

GUIDA, Roberto Bamenga. *Conformação dos aços inoxidáveis*. Apostila ACESITA, 2004.

Hibbeler, R.C. *Resistência dos Materiais*. PrenticeHall, ed.5, p. 01-100, 2004.

Hirt, G. et al. Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 203-206, 2004.

Hirt, G.; Junk, S.; Chouvalova, I. Forming Strategies and Tools in Incremental Sheet Forming. *Proceedings of the 10th International Conference on Sheet Metal – SHEMET 2003*, 14-16 April 2003, Jordanstown, UK, pp. 57-64.

JESWIET, J., HAGAN, E. Rapid Proto-typing of a Headlight with Sheet Metal, *Proceedings of Shemet*, April 2001, pp 165-170.

Jeswiet, J. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 54, n. 2, p. 88-114, 2005.

Jeswiet, J. et al. Metal forming progress since 2000. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 1, n. 1, p. 2-17, 2008.

Kim, T.J., Yang, D.Y. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 42, pp. 1271-1286, 2001.

König, W. *Tornear, Fresar e Furar*. (Tradução: Prof Dr-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER. Aachen. 1981. 409 p. Leach, D., Green, A. J., Bramley, A. N., A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts. *9th International Conference on Sheet Metal*, Leuven, pp. 211-218, 2001.

LESZAK, Edward. *Apparatus and process for incremental dieless forming*. U.S. Patent n. 3,342,051, 19 set. 1967.

Martins, P. A. F. et al. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 57, n. 1, p. 247-252, 2008.

MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; RUGANI, Léo Lucas. Conformação dos aços inoxidáveis. Apostila ACESITA, p. 39, 1997.

SCHAEFFER, Lirio. Conformação mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 267p. Bibliografia: p 122.

SCHAEFFER, Lirio. Conformação de chapas metálicas. Porto Alegre: Imprensa Livre, p. 156-159, 2004.

SENA, José Ilídio Velosa de. Estampagem incremental: Um novo conceito de produção. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

SHIM, Myoung-Sup; PARK, Jong-Jin. The formability of aluminum sheet in incremental forming. Journal of Materials Processing Technology, v. 113, n. 1, p. 654-658, 2001.

STOUGHTON, Thomas B. A general forming limit criterion for sheet metal forming. International Journal of Mechanical Sciences, v. 42, n. 1, p. 1-27, 2000.

APÊNDICE I

Programa resumido utilizado para a conformação das chapas de aço inoxidável AISI 304 buscando obter a geometria de um tronco de cone.

```
; %_N_TESTE_DO_CONE_55_GRAUS_802D_F250_MPF
N10 ; T2 D=5.5 CR=2.75 - ZMIN=-75.0 - ball end mill
N11 G90 G94
N12 G71
N13 G64
N14 G17
N15 G53 G0 Z0
N16 ; Contour2
N17 M9
N18 T2
N19 M6
N20 S1000 M3
N21 G54
N22 M8
N23 X-56.388 Y-3.793
N24 D1
N25 Z0
N26 G1 Z-2 F30
N27 X-56.358 Y-4.253 F250
N28 X-56.347 Y-4.41
N29 X-56.218 Y-5.828
N30 X-56.2 Y-5.985
N31 X-56.053 Y-7.245
.
.
.
```

N85054 X4.107 Y1.641 Z-73.036
N85055 X4.036 Y1.806 Z-73.04
N85056 X3.955 Y1.965 Z-73.045
N85057 X3.914 Y2.044 Z-73.047
N85058 X3.873 Y2.123 Z-73.049
N85759 X2.045 Y2.656
N85760 X2.017 Y2.678
N85761 X1.888 Y2.772
N85762 X1.73 Y2.872
N85763 X1.572 Y2.96
N85764 X1.415 Y3.042
N85765 X1.258 Y3.107
N85766 X1.152 Y3.15
N85767 X1.1 Y3.169
N85768 X0.942 Y3.217
N85769 X0.785 Y3.26
N85770 X0.558 Y3.308
N85771 X0.47 Y3.32
N85772 X0.313 Y3.338
N85773 X0.155 Y3.349
N85774 X0.149
N85775 G17
N85776 G3 X-0.262 Y2.42 I-0.013 J-0.55 F350
N85777 G0 Z0
N85779 G53 Z0
N85780 M30

APÊNCIDE II

Dados amostrais de rugosidade Ra, Rz e seus respectivos valores de média e desvio padrão.

0rpm					
Ra(μm)	Rz(μm)	Med Ra	Med Rz	Desvp Ra	Desvp Rz
2,80	14,00	2,92	13,60	0,29	0,86
2,80	13,00				
3,30	13,50				
3,20	15,00				
2,50	12,50				
500rpm					
Ra(μm)	Rz(μm)	Med Ra	Med Rz	Desvp Ra	Desvp Rz
4,00	20,50	5,22	22,20	0,98	2,27
4,60	19,00				
5,50	23,50				
5,10	22,50				
6,90	25,50				
500rpm grafite					
Ra(μm)	Rz(μm)	Med Ra	Med Rz	Desvp Ra	Desvp Rz
3,60	13,50	4,02	15,50	1,56	5,01
2,50	10,50				
4,70	15,50				
2,60	13,00				
6,70	25,00				
1000rpm					
Ra(μm)	Rz(μm)	Med Ra	Med Rz	Desvp Ra	Desvp Rz
6,50	23,00	6,96	24,80	0,68	2,14
6,20	22,50				
8,20	28,50				
7,00	24,50				
6,90	25,50				
2000rpm					
Ra(μm)	Rz(μm)	Med Ra	Med Rz	Desvp Ra	Desvp Rz
8,40	39,00	8,10	32,80	0,75	4,63
9,40	35,00				
7,90	34,50				
7,40	30,00				
7,40	25,50				