

JULIANO FERREIRA CARDOSO

**USO DE CHAPA DE ZINCO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL VARIANDO O FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA
2017

JULIANO FERREIRA CARDOSO

**USO DE CHAPA DE ZINCO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM
INCREMENTAL VARIANDO O FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de
Fabricação

Orientador: Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA- MG

2017

JULIANO FERREIRA CARDOSO

**USO DE CHAPA DE ZINCO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL
VARIANDO O FLUIDO LUBRI-REFRIGERANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica.

Uberlândia, 23 de novembro de 2017

Banca Examinadora

Prof. Dr. Wisley Falco Sales
Orientador

Prof. Dr. Éder Silva Costa
Membro da Banca

Prof. M.Sc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva
Membro da Banca

Uberlândia – MG

2017

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elaine, e meu pai, Daniel, pelo carinho e incentivo que me levaram a cursar engenharia, pelos esforços para uma educação de qualidade e que tornou possível a minha formação como engenheiro mecânico.

Ao Professor Wisley Falco Sales e aluno de doutorado Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, pela orientação, ensino, incentivo e oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realização deste curso e obtenção de conhecimento necessário para obtenção do título de engenheiro mecânico.

Aos bolsistas do laboratório de ensino e pesquisa em usinagem – LEPU.

Aos colegas e aos amigos pelo convívio e apoio durante esta etapa da minha vida.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de chapas de zinco para o processo de estampagem incremental com ponto simples sob quatro diferentes lubri-refrigerantes. Essa técnica de estampagem tem ganhado destaque por possibilitar a conformação em centros de usinagem CNC, sem a necessidade de um ferramental especializado, o que permite a conformação a um custo relativamente baixo. A realização dos testes primeiramente se deu pela criação da geometria em um software CAD/CAM e posteriormente a execução da estampagem em uma máquina CNC. Os resultados apontaram o zinco como um material de boa formabilidade. Testes de rugosidade foram realizados e foi observada uma qualidade superficial ligeiramente melhor para a lubrificação com grafite.

Palavras-chave: estampagem incremental, zinco, fluido lubri-refrigerante.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the behavior of zinc sheets for the single point incremental sheet forming process under four different lubricants. This stamping technique has gained prominence because it allows forming in CNC machining centers, without the need of a specialized tooling, which allows the process of sheet forming at a relatively low cost. The tests were first carried out by the design of the geometry in a CAD / CAM software and later the execution of the sheet forming in a CNC machine. The results indicated zinc as a material of good formability. Roughness tests were conducted to evaluate surface quality, a slightly better surface quality has been observed for graphite lubrication.

Keywords: Incremental sheet forming, zinc, lubricant fluid

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corpo de prova ensaio de tração.....	2
Figura 2. Curva tensão x deformação convencional.....	3
Figura 3. Desenho esquemático para deformações principais.....	6
Figura 4. Ensaio Erichsen.....	7
Figura 5. Diferentes configurações de estampagem incremental	10
Figura 6. Curva CLC comparativa entre estampagem convencional e estampagem incremental.....	11
Figura 7. Rugosidade média.....	13
Figura 8. Rugosidade total.....	14
Figura 9. Centro de usinagem CNC utilizada na confecção das geometrias.....	15
Figura 10. Geometria gerada no software CAM.....	15
Figura 11. Dimensões padronizadas do corpo de prova.....	17
Figura 12. Curva tensão x deformação para 0°.....	18
Figura 13. Curva tensão x deformação para 45°.....	19
Figura 14. Curva tensão x deformação para 90°.....	19
Figura 15. Curva tensão x deformação de engenharia e real	20
Figura 16. Curva de escoamento para o teste realizado a 0°.....	21
Figura 17. Curva tensão x deformação de engenharia e real para 45° e 90°.....	21
Figura 18. Vista superior e lateral da chapa após conformação	24
Figura 19. (a) MEV da superfície (b) Espectro EDS para a região analisada	24
Figura 20. (a) MEV da superfície (b) Espectro EDS para a região analisada.....	25
Figura 21. Valores obtidos de Ra.....	26
Figura 22. Valores obtidos de Rq.....	26
Figura 23. Valores obtidos de Rz.....	27
Figura 24. Chapa de zinco anterior aos testes.....	28
Figura 25. Chapa de zinco após o teste com óleo 10w30.....	29
Figura 26. Chapa de zinco após o teste com óleo 90.....	29
Figura 27. Chapa de zinco após o teste com MQL	29
Figura 28. Chapa de zinco após o teste com grafite.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos coeficientes de encruamento (n) e de resistência (k) para diversos materiais – GARCIA et al, 2000.....	22
Tabela 2. Propriedades extraídas da curva tensão x deformação.....	22
Tabela 3. Dimensões finais e deformações dos corpos de prova.....	22
Tabela 4. Valores típicos do índice de anisotropia – SOUZA, 1982.....	23
Tabela 5. Porcentagem de metais presentes na região analisada.....	25
Tabela 6. Porcentagem de metais presentes na região analisada.....	25

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Caracterização do material	2
2.2	Testes de conformação	8
2.3	Estampagem incremental	9
2.4	Lubrificação	11
2.5	Zinco	12
2.6	Rugosidade	13
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	ensaios de estampagem incremental	15
3.2	Preparação de amostras	16
3.3	Teste de Tração	16
3.4	Medição de rugosidade	17
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1	Teste de tração	18
4.2	Coeficiente de anisotropia	22
4.3	Ensaio de conformação incremental	24
4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)	24
4.5	Rugosidade	26
4.6	Análise Metalográfica	28
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica são aqueles que visam alterar a forma de um corpo metálico para uma outra forma definida, sendo, portanto, processos em que há a presença de deformação plástica, mantendo constante a massa e o volume, mas alterando as dimensões e propriedades do material (BRESCIANI, 2011). Dentre estes processos estão o dobramento, laminação, forjamento, trefilação, estampagem e etc. que podem diferenciar quanto ao tipo de esforço aplicado e quanto à temperatura de trabalho.

Entre esses processos de fabricação, a conformação de chapas metálicas ou estampagem apresenta um destaque na indústria automobilística, naval, doméstica, eletroeletrônicos e etc.. No entanto, grande parte desses processos são destinados à produção de grandes e médios lotes, através do uso de prensas, que permite uma produção a um custo e tempo relativamente para grandes produções. Para casos em que um produto está sendo desenvolvido e é necessário um protótipo ou quando a quantidade a ser produzida é em pequenos lotes, o custo do ferramental de fabricação por estampagem convencional ocasionaria um alto custo do produto final (TIBURI, 2007). Uma alternativa é a estampagem incremental ou *Incremental Sheet Forming*, que permite obter geometrias complexas a partir de uma máquina CNC, amplamente usada na usinagem de metais.

O processo de estampagem incremental não é uma técnica nova, sendo vasta a literatura sobre o processo e aplicações em diversas condições, não apenas em metais, mas também em polímeros. Além da comprovada vantagem econômica em certas condições como pequenos lotes, quando comparadas com a estampagem convencional (SILVA, 2011). Este trabalho apresenta um estudo dessa técnica aplicada em chapas de zinco sob diferentes condições de lubrificação.

O presente trabalho tem como finalidade estudar o processo de estampagem incremental em chapas de zinco com 0,5 mm de espessura com o uso de diferentes lubrificantes, visando obter conhecimento sobre o processo, dados relativos ao material e à qualidade superficial obtida. Estes dados serão obtidos através da construção de curvas tensão x deformação, caracterização química do material, pelos coeficientes de anisotropia e avaliação da influência do fluido lubrificante no processo.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico é apresentada uma revisão da literatura de conceitos fundamentais relativos à caracterização do material, processo de estampagem e rugosidade da superfície da chapa.

2.1 Caracterização do material

A fim de analisar os processos de conformação é necessário o conhecimento de propriedades dos materiais que permitam descrever adequadamente seu comportamento durante as solicitações impostas. Um dos métodos mais comuns e simples para se determinar tais propriedades é através do ensaio de tração.

De acordo com a ABNT 6152 (1992), o ensaio de tração consiste em solicitar um corpo de prova com formato padronizado sob esforço de tração, geralmente até a ruptura com o objetivo de se determinar propriedades mecânicas do material. A máquina utilizada possui uma garra fixa e outra móvel e é equipada com sensores que permitem extrair força [N] e o aumento do comprimento [l -l₀] como dados.

A Fig. 3.1 mostra o desenho esquemático do corpo de provas utilizado nos ensaios de tração.

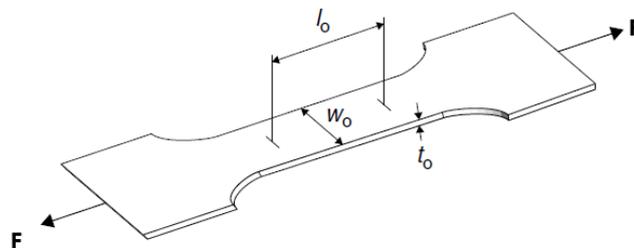


Figura 1. Corpo de prova ensaio de tração

A partir desses dados é possível obter a tensão convencional σ , que é razão entre a força e a área de seção transversal inicial $w_0 \times t_0$ [A_0], como mostra a Eq. 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

e a tensão relativa ε , como uma relação entre a variação do comprimento pelo comprimento inicial, como mostra a Eq. 2.2.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

De posse desses dados, é possível construir curvas tensão x deformação e assim obter propriedades que caracterizam o comportamento do material, entre elas o módulo de elasticidade, limite de resistência e limite de escoamento, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência.

A Fig. 2 mostra uma curva típica obtida em um ensaio de tração.

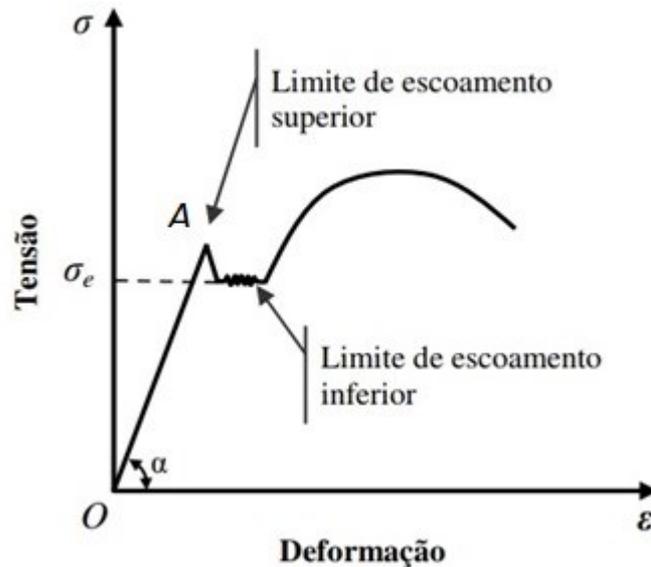


Figura 2. Curvas tensão x deformação convencional (TEÓFILO, 2017)

A partir da curva tensão deformação convencional, é possível distinguir duas regiões de comportamento distinto:

- Região de comportamento elástico
Representada na curva pela região OA e pode ser representado pela equação que corresponde à lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

A constante E, chamada de módulo de elasticidade é um indicativo da rigidez do material e depende fundamentalmente das ligações interatômicas.

Essa região ainda pode ser caracterizada pelo limite de proporcionalidade σ_p , ponto acima do qual o material não mais obedece à lei de Hooke e, portanto, perde-se a linearidade. Em alguns casos esse limite pode não ser determinada com precisão. Como consequência, foi estabelecida uma convenção de adotar uma linha reta paralela à

porção elástica, com deformação de 0,002. A tensão correspondente à interseção dessa linha com a curva tensão-deformação é definida como limite de escoamento. Alguns materiais apresentam uma transição elastoplástica muito bem definida e ocorre de forma abrupta, como mostrado na Fig. 2. A fase plástica é iniciada com uma diminuição na tensão seguida de uma flutuação em torno de um valor constante, chamado limite de escoamento inferior. Por ser uma região bem definida, o limite de escoamento inferior, nesses casos, é tomado como o limite de escoamento (CALLISTER, 2011).

- Região de comportamento plástico

A partir da região de transição, o material entra na região plástica, com deformações permanentes no corpo. Para materiais dúcteis, o diagrama apresenta variações relativamente pequenas na tensão, mas grandes variações na deformação. Nessa região é possível determinar uma série de características como o ponto de máxima carga atingida durante o ensaio (limite de resistência à tração), a última tensão suportada pelo material antes da fratura (limite de ruptura) e também o alongamento, sendo a diferença entre o comprimento final e o inicial (GARCIA, 2000).

Esse tipo de curva considera uma seção constante do corpo de prova. No entanto, na conformação plástica dos metais é utilizada uma condição instantânea de deformação, mais apropriada para grandes deformações, uma vez que a deformação relativa não descreve corretamente sequencias de deformações nem diferencia tração e compressão. Quando as curvas tensão x deformação são avaliadas na região plástica são denominadas curvas de escoamento.

Ao traçar o diagrama tensão x deformação real, utiliza-se a tensão verdadeira, dada pela Eq. 2.4:

$$kf = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Onde A corresponde à área da seção deformada ou área verdadeira, sendo obtida a partir da lei de constância de volume, conforme Eq 2.5:

$$V_o = V$$

$$A_o \cdot l_o = A \cdot l$$

$$A = \frac{A_0 \cdot l_0}{l} = \frac{A_0}{1 + \varepsilon} \quad (2.5)$$

Das equações 2.4 e 2.5, chega-se à:

$$k_f = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.6)$$

Já a deformação verdadeira (ou deformação logarítmica), que é a soma dos elementos incrementais dividido pelo incremento de referência (SHIGLEY, 2011).

$$d\varphi = \frac{dl}{l} \rightarrow \varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \rightarrow \varphi = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.7)$$

Como função da deformação relativa, a deformação logarítmica pode ser escrita como:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.8)$$

Uma forma usual de descrever a região plástica da curva tensão-deformação real é através da equação de Hollomon, dada por:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (2.9)$$

Onde:

k_f é a tensão de escoamento

C é o coeficiente de resistência dependente do material

n é o índice de encruamento que varia entre 0 e 1

φ é a deformação verdadeira

De acordo com SCHAEFFER (2007), os dados necessários para a determinação algébrica da curva de escoamento são:

- A deformação relativa no instante da deformação máxima.
- Para o instante da tensão máxima, tem-se que a deformação φ é igual ao coeficiente de encruamento n .
- A tensão verdadeira (k_f) no instante da deformação máxima.

Quando a deformação φ é medida de acordo com os eixos principais de deformação, estas são denominadas deformações principais. No caso de uma chapa de comprimento inicial l_0 e comprimento final l_1 , como ilustrado pela Fig. 2.3, a deformação principal maior φ_1 será dada conforme equação 2.10.

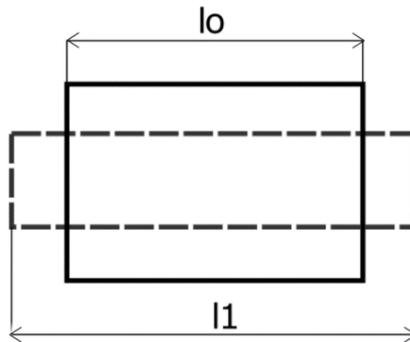


Figura 3. Desenho esquemático para deformações principais

$$\varphi_1 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (2.10)$$

De modo semelhante, as deformações para a largura e espessura serão dadas por φ_2 e φ_3 respectivamente.

De acordo com a lei da constância de volume. (SCHAEFFER, 2007),

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.11)$$

Apesar de o teste de tração ser o mais usual e simples, este se mostra inconveniente ao apresentar um estado de tensão uniaxial. Em um processo de estampagem convencional, os elementos se deformam sob duas tensões principais (σ_1, σ_2) no plano da chapa. A tensão perpendicular ao plano da chapa geralmente é muito pequena quando comparada às outras duas, já que a pressão de contato entre a chapa e a ferramenta é muito menor do que o limite de escoamento do material. Portanto, é assumido um caso de tensão plana (BASTOS, 2009).

Uma alternativa para avaliar a facilidade de deformação plástica de um material sob condições de tensão plana é através do ensaio Erichsen. Este ensaio submete a peça a um estiramento biaxial e é feito pressionando um punção com extremidade esférica de diâmetro 20 mm, contra a chapa metálica fixada entre a matriz e o anel de fixação com carga de 1000 kgf, a ser testada até o surgimento de uma ruptura (LOBÃO, 2003). O resultado do teste é apresentado como número de Erichsen (IE), sendo descrito como a distância, em milímetros, percorrido pelo punção desde o contato com a chapa até o surgimento da trinca. A Fig. 4 ilustra a configuração de um ensaio Erichsen.

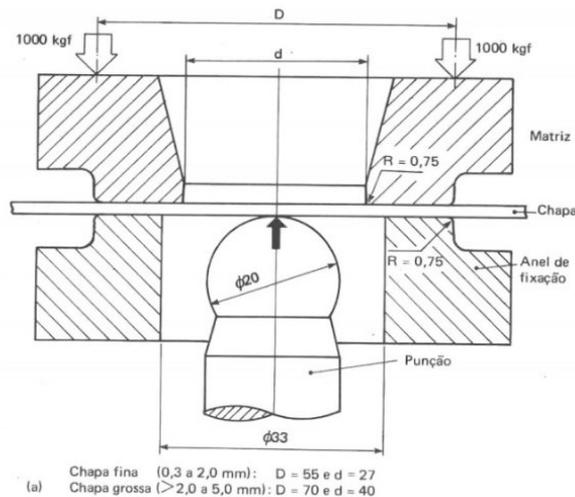


Figura 4. Ensaio Erichsen (WATFE, 2009)

Um dos inconvenientes apresentados pelo ensaio Erichsen é que a área de deformação é muito pequena para representar qualquer processo industrial além de sofrer influência da espessura da chapa. Singh e Choubey, mostraram em testes com alumínio que chapas mais finas possuem menor índice de Erichsen.

Uma variação do ensaio Erichsen é o ensaio Olsen, que difere deste apenas na dimensão do estampo, que possui 7/8 polegadas de diâmetro e o corpo de prova tem forma de disco e é fixado entre matrizes com 1 polegada de diâmetro interno.

Anisotropia

Um material isotrópico é aquele que possui as mesmas propriedades físicas independente da direção em que é medida. Para um material policristalino, essa propriedade indica que os grãos possuem orientações cristalográficas aleatórias. No entanto, o processo de fabricação de chapas introduz deformações plásticas no metal que resulta em uma orientação preferencial dos grãos, ou seja, o processo de fabricação faz com que o material apresente propriedades que são dependentes da direção de laminação.

Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformada plasticamente é por meio do coeficiente de anisotropia. Esse coeficiente é obtido por meio de ensaios de tração em corpos de prova a 0°, 45° e 90° do sentido de laminação, segundo a norma ASTM E517-00, e é dado como a razão entre a deformação verdadeira na largura (φ_2) e a deformação verdadeira na espessura (φ_3).

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (2.12)$$

Um material ideal para a estampagem seria aquele em que o coeficiente de anisotropia tendesse ao infinito, ou seja, com deformação apenas na largura e no comprimento.

A anisotropia pode ser média ou planar. A anisotropia média é um indicativo da habilidade da chapa metálica de resistir a diminuição na espessura ao ser tracionada e pode ser calculada pela Eq. 3.13:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.13)$$

Quando apresenta um valor igual a 1, há igualdade entre a resistência a deformação na largura e na espessura. Quando maior que 1, a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura.

Já a anisotropia planar é um indicativo da variação do coeficiente de anisotropia entre as direções longitudinal e transversal da laminação.

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_{0^\circ} - 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.14)$$

Para conformações profundas, é interessante que o material apresente um elevado valor de r_m , a fim de que deforme no plano da chapa e não na espessura. É recomendado também que a chapa apresente um Δr próximo a zero, pois assim evita-se o aparecimento de “orelhas” no material. (MELCONIAN, 2014).

2.2 Testes de conformação

Um problema fundamental em conformação de chapas é o rompimento. Cada tipo de chapa metálica pode ser deformado até um certo nível para que ocorra a estricção localizada e a fratura. Este nível depende principalmente da combinação de deformações impostas, ou seja, da relação entre as deformações principais, maior e menor. Um dos métodos mais utilizados para determinar se uma peça pode ser estampada sem ocorrer falhas é através da curva-limite de conformação (CLC). Essa curva estabelece as possíveis combinações de deformação que levam a ruptura baseado em dados obtidos em ensaios que caracterizam o comportamento mecânico diante das solicitações envolvidas no processo de conformação. Uma vez que a soma das três deformações principais é igual a zero, apenas duas são necessárias para especificar o estado de deformação de um corpo (EMMENS, 2011; NETO, 2004).

Um dos ensaios mais utilizados para construir a curva CLC é o ensaio Nakazima. Este ensaio é utilizado corpos de prova com tiras entalhadas. Esses entalhes, além de forçar a estricção na região central do corpo-de-prova, também aumenta a deformação no sentido da largura. De acordo com Folle, et al., (2008), o tipo de deformação do corpo-de-prova é alterado conforme a variação da largura útil, isto é, o corpo de prova com menor largura sofre deformação de embutimento profundo e com a maior largura ocorre deformação de estiramento biaxial. Assim, na medida em que é aumentada a largura útil, a deformação passa por embutimento profundo, embutimento, tração, deformação plana, estiramento e até estiramento biaxial.

A construção dessas curvas é feita através da marcação dos corpos de provas extraído das chapas metálicas com uma grade circular, seguida pelo posicionamento na matriz enquanto o punção é forçado perpendicularmente, similar ao ensaio Erichsen. Este procedimento deforma os círculos gerando elipses. Posteriormente são obtidas as medidas dos diâmetros maiores e menores e calculado o logaritmo da razão dos diâmetros final e inicial e assim obter as deformações. Na ordenada está a deformação principal φ_1 no sentido do comprimento e no eixo das abcissas, a deformação principal φ_2 , correspondente à largura (NETTO, 2004). A curva originada estabelece uma região crítica de deformações, em que um estado de deformação acima caracteriza falha do material, enquanto um estado abaixo da curva caracteriza como própria para conformação.

O nível mais baixo de deformações ocorre no estado plano de deformações ou próximo dele, isto é, quando a deformação principal menor é zero.

2.3 Estampagem incremental

Estampagem incremental é um processo de conformação no qual uma chapa metálica sofre deformações sucessivas por meio de uma ferramenta. Esse processo tem a vantagem de não ser necessária um ferramental especial, sendo realizada em um centro de usinagem CNC, o que torna o processo atraente para pequenas produções. Além do mais, há que se mencionar um gasto menor de energia e dimensões menores dos equipamentos em relação aos equipamentos tradicionais de conformação.

É possível distinguir quatro configurações diferentes para o processo. Essas divisões são baseadas nos pontos de apoio posicionados sob a chapa e no uso de matrizes positivas ou negativas responsáveis por dar forma ao produto final. Essas configurações estão apresentadas na Fig. 5.

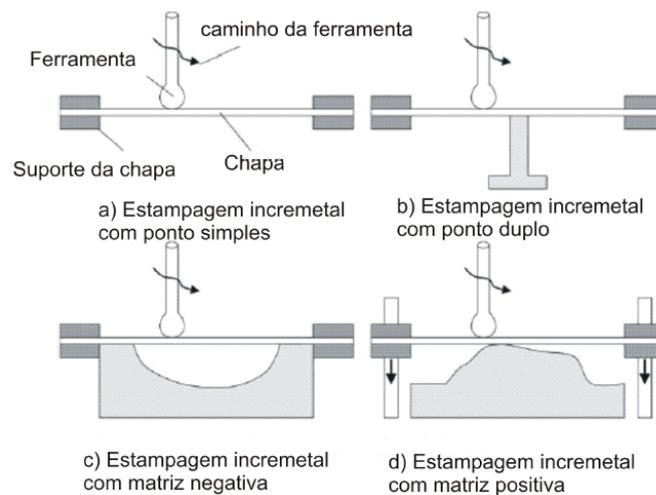


Figura 5. Diferentes configurações de estampagem incremental (CASTELAN, 2007)

O modo mais usual é a estampagem incremental de ponto simples e é feito fixando a chapa para evitar que esta se movimente durante o processo de deformação plástica. Essa deformação é causada por uma ferramenta rotativa esférica ou semi hemisférica que executa movimentos de rotação e translação. Neste processo, a forma geométrica é gerada apenas pela ferramenta. Na estampagem incremental com ponto duplo há uma matriz positiva colocada em baixo da chapa que auxilia na forma final da peça. Existem ainda processos que fazem uso de matriz positiva ou negativa.

Por outro lado, o processo em si é relativamente lento quando comparado aos processos tradicionais de estampagem, além de não possuir capacidade de formar paredes com ângulos muito íngremes e apresenta problemas com precisão dimensional.

A formabilidade através da estampagem incremental é maior do que os métodos convencionais. Os pontos na curva CLC para estampagem incremental se encontram no lado direito do diagrama formando uma inclinação negativa. EMMENS (2011), explica essa maior formabilidade pelo curto tempo que há para que o “empescoamento” se desenvolva, uma vez que a zona de formação rapidamente se desloca para outro ponto. LOPES (2013), destaca que devido à natureza dos mecanismos de conformação na estampagem incremental, em que há zonas de deformação plástica muito pequenas, gerando forças de conformação inferiores, consegue-se atingir deformações muito mais elevadas. A Fig. 6 ilustra uma curva CLC comparativa entre o processo de estampagem incremental (ISF) e os processos de conformação convencionais.

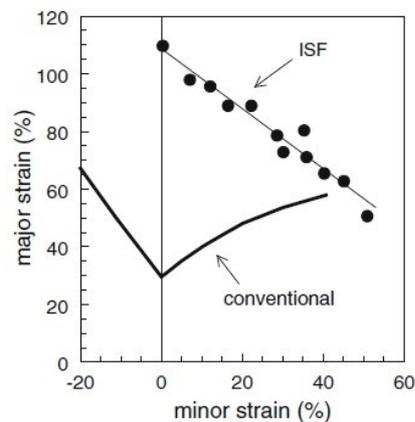


Figura 6. Curva CLC comparativa entre estampagem convencional e estampagem incremental (EMMENS,2011)

2.4 Lubrificação

Atualmente podem ser encontrados óleos minerais, sintéticos e semissintético. Os óleos minerais são feitos diretamente a partir do refino do petróleo e possuem uma viscosidade adotada para uma temperatura de funcionamento do motor. É o tipo mais barato presente no mercado. Com o surgimento de motores mais potentes, os óleos minerais passaram a não atender às necessidades de manter uma viscosidade em alta temperatura. Os óleos sintéticos surgiram para preencher essa lacuna. Estes são feitos em laboratório, com outros elementos químicos não presentes no petróleo, de modo a manter uma curva de viscosidade mais constante, independente da temperatura de atuação. Os óleos semissintéticos é uma composição do óleo mineral com o sintético.

A classificação mais usual e conhecida para óleos lubrificantes é fornecida pela *Society of automotive engineers* (SAE). Baseia-se única e exclusivamente na viscosidade, não considerando, fatores de qualidade ou desempenho. Nessa classificação, há basicamente dois grupos: os monoviscosos (Por exemplo, “30” ou “30w”) e os multiviscosos (por exemplo “10w30”). Os multiviscosos são assim denominados por serem capazes de apresentar fluidez diferentes de acordo com a temperatura do motor, podendo atender a dois graus de viscosidade. O primeiro número indica a viscosidade em baixas temperaturas. O segundo indica a viscosidade em uma temperatura de 100°C. As viscosidades cinemáticas em centistokes (cSt) a 100°C são determinadas de acordo com o método ASTM D-445, utilizando o Viscosímetro Cinemático. Assim, segundo a SAE, quanto maior for o número maior será a viscosidade a 100°C, ou seja, um óleo SAE 30 é mais viscoso que um SAE 20.

Uma alternativa mais ecológica e econômica é a lubrificação MQL. No processo MQL, tem-se a aplicação precisa de um lubrificante adequado (óleo de éster, álcoois e etc) diretamente no local ativo da ferramenta. Somente alguns mililitros de lubrificantes são gastos por hora. O óleo evapora quase que totalmente de modo que o cavaco, peça e ferramenta permanecem praticamente secos.

Já os lubrificantes sólidos, também chamados de lubrificantes a seco, são capazes de proporcionar lubrificação no estado sólido. Este tipo de lubrificação é particularmente vantajoso quando se deseja operar em temperaturas mais elevadas, em condições mais severas como vácuo, radiação, pressão de contato severa ou quando se deseja um lubrificante mais estável quimicamente do que os lubrificantes líquidos (JUSTE, 2012). Grafite e sulfeto de molibdênio (MoS_2) são os materiais predominantemente utilizados. Estes materiais são aditivos lubrificantes eficazes devido à sua estrutura lamelar, que mesmo entre superfícies estacionárias altamente carregadas a estrutura lamelar é capaz de impedir o contato. Na direção do movimento, as lamelas são facilmente cortadas uma sobre a outra, resultando num baixo atrito. (MOURA, 2014)

A aplicação de lubrificante é uma forma de reduzir as forças presentes no processo. O lubrificante cria uma camada fina na superfície que previne o contato metal-metal. Isso não só reduz o desgaste como também cria uma distribuição mais uniforme de tensões. (EMMENS, 2011).

2.5 Zinco

O zinco é um material com estrutura cristalina hexagonal compacta, com relativo baixo ponto de fusão, boa fundibilidade e pode ser facilmente deformado a frio e a quente, podendo ser encontrado na forma de placas, lingotes, chapas, arames, grãos e pó. Possui ponto de fusão de $419,5^{\circ}C$ e densidade $7,14\text{ g/cm}^3$. As chapas de são caracterizadas por terem um excelente aspecto superficial, maleáveis e recicláveis. O zinco também é naturalmente resistente à corrosão, durável e não requer uma manutenção dispendiosa. Essas qualidades tornam as chapas de zinco adequadas para uma grande variedade de usos na indústria. Pode ser visto em telhados, fachadas, sistemas de águas pluviais e múltiplos usos, em particular onde as condições climáticas são severas (SCHLOSSER, 2017). No entanto, sua aplicação na estampagem ainda se encontra limitada, com poucas referências na literatura.

2.6 Rugosidade

O acabamento de superfície, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades que tendem a criar um padrão, ou seja, uma textura na superfície. (MACHADO, 2009)

A rugosidade média, R_a , é o conceito mais utilizado em rugosidade, devido à facilidade de cálculo. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil da linha média sobre um comprimento medido, dado pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação à linha média dentro do percurso de medição. Esse parâmetro tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado, ou seja, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grandes alterações e o defeito será ocultado. A Fig. 7 ilustra o conceito quantitativo de rugosidade média.

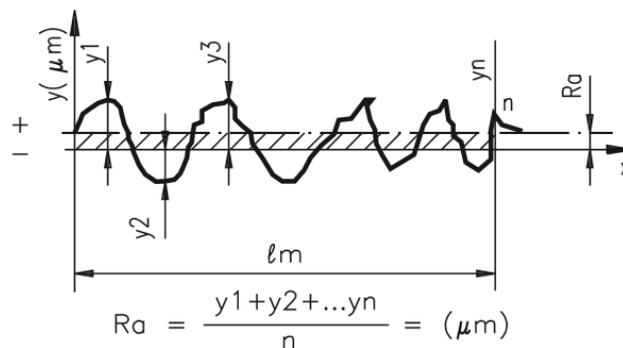


Figura 7 – Rugosidade média

Outro parâmetro de rugosidade utilizado é a rugosidade quadrática média (R_q). Representa o desvio padrão das medidas dos picos e vales. Este parâmetro é mais sensível que a rugosidade média. Um único grande pico ou vale afetará o valor de R_q mais que R_a .

Por fim, outro parâmetro comum na descrição da rugosidade é a rugosidade total (R_z). Corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos dos pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média existente em um comprimento de amostragem (l). Esse parâmetro é mais sensível a elevados picos e vales do que R_a . (MACHADO, 2009).

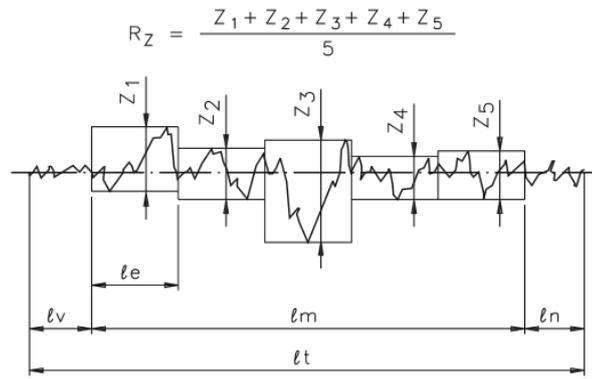


Figura 8 – Rugosidade total

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ensaios de estampagem incremental

Os ensaios de conformabilidade incremental foram realizados sobre chapas de zinco de 240 x 240 mm e 0,5 mm de espessura com o intuito de verificar o comportamento e o resultado final, variando o sistema lubri-refrigerante. No processo foi utilizada uma ferramenta de 12 mm de diâmetro, velocidade de avanço da ferramenta de 250 mm/min e rotação de 1000 rpm. Todos os ensaios de conformação incremental foram realizados em uma máquina CNC ROMI Discovery 760, presente nas instalações do laboratório de ensino e pesquisa em usinagem (LEPU). A Fig. 9 mostra o centro de usinagem utilizados nos ensaios.

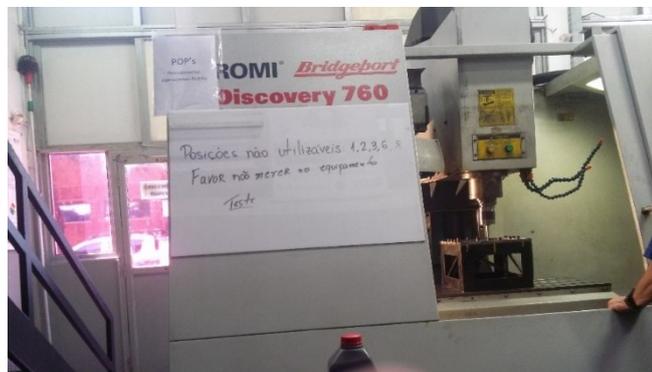


Figura 9. Centro de usinagem CNC utilizada na confecção das geometrias

Inicialmente, a geometria foi gerada em software CAM, sendo um tronco de cone com inclinação de 45°, como mostra a figura a seguir:

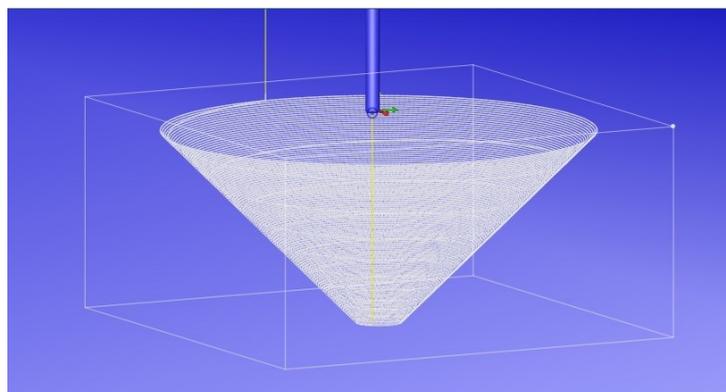


Figura 10. Geometria gerada no software CAM

Foram utilizados quatro lubrificantes diferentes: O óleo multiviscoso SAE 10w30 semissintético com viscosidade de 4,1 mm²/s em temperaturas frias e de 9,3 a 12,5 mm²/s à 100°C e densidade 0,882 g/cm³. Óleo monoviscoso para cambio SAE 90, com viscosidade entre

13,5 e 24 mm²/s e densidade 0,89 g/cm³. Estes são óleos utilizados na indústria automotiva. A escolha destes óleos e não de fluidos de corte, usualmente utilizados em processos de usinagem, se deve ao fato de que os ensaios de estampagem não geram cavacos e, portanto, não há necessidade de remoção do material, o que é uma das funções do fluido de corte. Além do mais os óleos automotivos comerciais são dotados de aditivos de extrema pressão (EP), condição presente durante a estampagem incremental. Como lubrificante sólido foi utilizado o grafite na proporção de 10g de grafite para 90ml de óleo SAE 90. Por fim, foi realizado um teste com uma quantidade mínima de lubrificante (MQL) com vazão de 50 ml por hora.

3.2 Preparação de amostras

Após os ensaios de conformação incremental, as peças foram cortadas com um disco abrasivo e em seguida embutidas em baquelite a fim de facilitar o manuseio.

Posteriormente foram submetidas ao lixamento manual, que consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria 120, 250 e 300, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Por fim, foram polidas em uma politriz.

A análise metalográfica foi realizada em um microscópio ótico. O ataque foi feito com água régia por um período de 1 minuto. Foram analisadas quatro amostras correspondendo à cada teste e duas referentes à chapa sem conformação.

A análise da composição química foi feita em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca HITACHI, modelo TM 3000.

3.3 Teste de Tração

Os ensaios foram feitos no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem, em uma máquina de ensaios de tração SHIMADZU com célula de carga com capacidade de 300 kN. Foram realizados três ensaios de tração, cada um para uma direção de laminação (0°, 45°, 90°). Os corpos de prova foram retirados da chapa sem teste de conformação. As dimensões estão detalhadas na Fig.11:

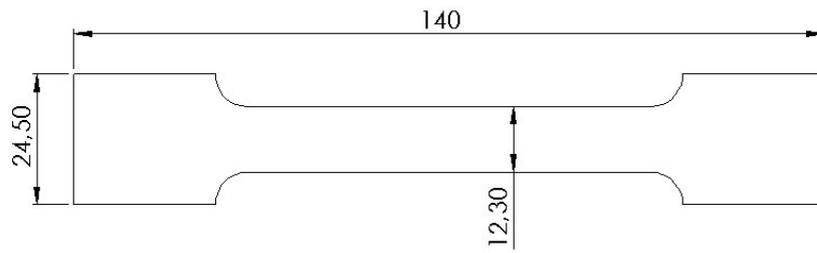


Figura 11. Dimensões padronizadas corpo de prova

3.4. Medição de rugosidade

Os testes de rugosidade foram realizados em um rugosímetro digital com cut -off de 0,8 micrometros e comprimento de medição de 4mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teste de tração

Os dados obtidos com os testes tração na chapa de zinco foram tensão (N/mm^2) e deslocamento (mm). Através do deslocamento e das medidas iniciais, pode-se calcular a deformação relativa (ϵ) pela Eq. 2.2 e assim obter a curva tensão de engenharia x deformação.

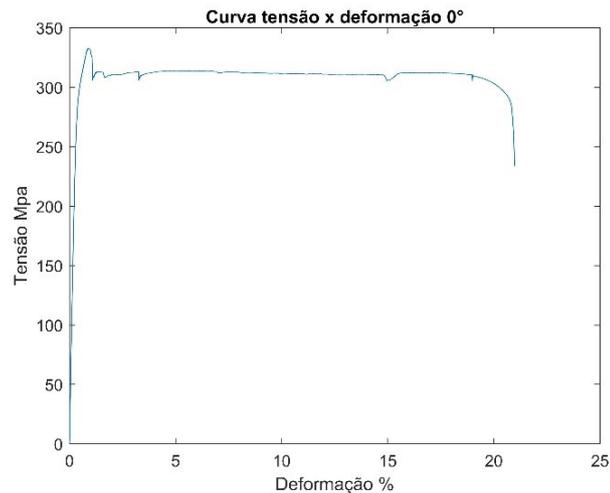


Figura 12. Curva tensão deformação para 0°

A partir da figura 12, é possível observar uma transição elastoplástica bem definida e ocorre de forma abrupta, marcada por um limite de escoamento superior e inferior. A deformação plástica inicia na tensão limite de escoamento superior e, com uma diminuição na tensão, a deformação oscila levemente em torno de uma tensão constante (limite de escoamento inferior). Após a transição, a deformação segue em um valor de tensão praticamente constante, com tendência a uma reta. Para o teste à 45° não se nota uma transição bem nítida como primeiro caso. No entanto, é possível observar a flutuação característica do limite de escoamento inferior, presente na deformação em até 5% aproximadamente. Seguida de um aumento da tensão com a deformação, como mostra a Fig. 13.

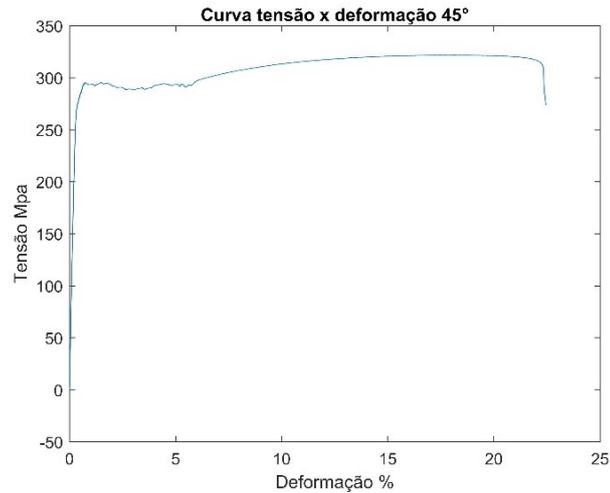


Figura 13. Curva tensão deformação para 45°

Com um comportamento semelhante ao anterior, no teste à 90°, mostrado na Fig. 14, é possível notar a flutuação característica do limite de escoamento inferior até uma deformação de 5%, seguida de um aumento da tensão conforme a deformação aumenta.

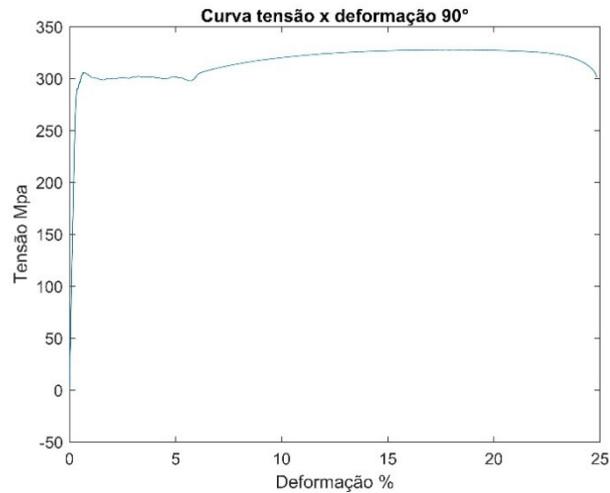


Figura 14. Curva tensão deformação para 45°

A curva de escoamento na região plástica é melhor descrita pela curva real. A partir da equação 2.6 é possível obter os valores de K_f e da equação 2.8 os valores de ϕ , e assim obter a curva tensão x deformação real, como mostrado na Fig. 15:

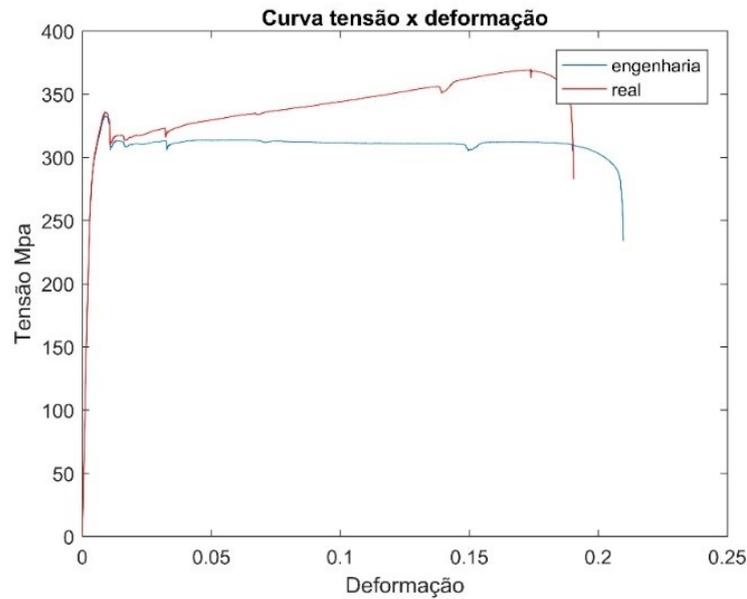


Figura 15. Curva tensão x deformação de engenharia e real para 0°

De acordo com SCHAEFFER (2007), o coeficiente de encruamento, n , corresponde à deformação real no ponto máximo da carga, ou seja:

$$n = \varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.8)$$

$$n = \ln(1 + 0,18) = 0,165$$

E a tensão verdadeira máxima pode ser obtida por:

$$k_{f_{max}} = \sigma_{max} * (1 + \varepsilon) \quad (2.6)$$

$$k_{f_{max}} = 311,8 * (1 + 0,18) = 367,92 \text{ Mpa}$$

Dessa forma, obtém-se a constante C :

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (2.9)$$

$$367,92 = C \cdot 0,18^{0,18}$$

$$C = 495,3 \text{ Mpa}$$

Portanto, a equação que descreve o comportamento plástico é:

$$k_f = 495,3 \cdot \varphi^{0,165} \quad (4.1)$$

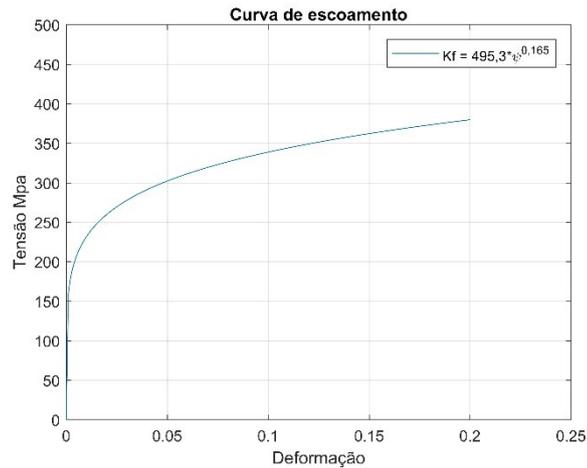


Figura 16. Curva de escoamento para o teste realizado a 0°

De modo semelhante, para o teste a 45°, a equação que representa o comportamento plástico será:

$$k_f = 533,22 \cdot \varphi^{0,2025} \quad (4.2)$$

E para o ensaio a 90°:

$$k_f = 584,08 \varphi^{0,20} \quad (4.3)$$

As curvas tensão x deformação são mostradas na Fig. 17:

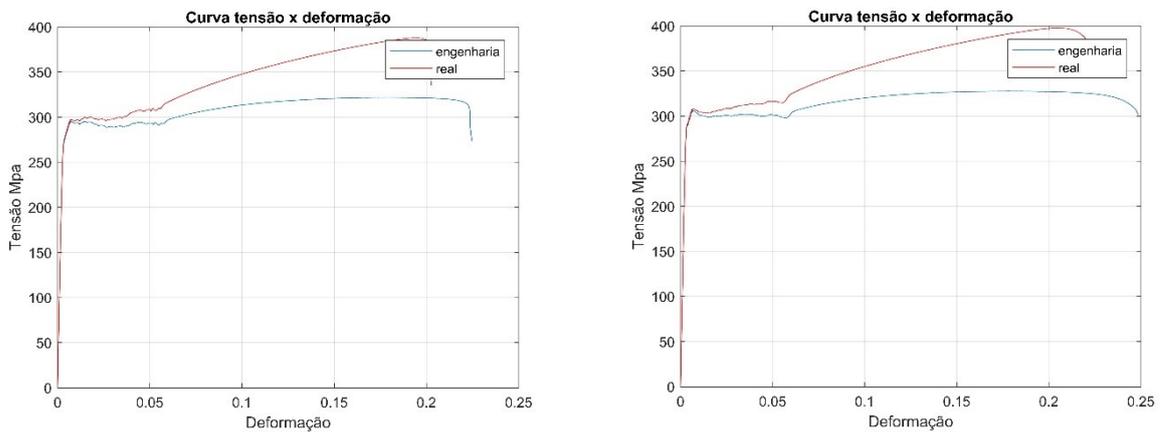


Figura 17. Curva tensão x deformação de engenharia e real para 45° e 90°, respectivamente.

O índice de encruamento do material representa o endurecimento do material devido a alterações em sua rede cristalina originadas a partir da zona plástica de deformação (CASTELAN, 2010) A seguir é apresentada uma tabela com valores do coeficiente de encruamento para diferentes materiais para fins de comparação.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de encruamento (n) e de resistência (k) para diversos materiais – GARCIA et al, 2000.

Material	n	k (MPa)
Aço baixo carbono recozido	0,261	539
Aço 4340 – recozido	0,150	651
Aço inoxidável – recozido	0,229	1001
Alumínio - recozido	0,211	391
Liga de alumínio tratada	0,160	690
Cobre – recozido	0,540	325
Latão 70/30 – recozido	0,490	910
Titânio	0,170	-

As propriedades do material estão resumidas na tabela abaixo:

Tabela 2. Propriedades extraídas da curva tensão x deformação

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
<i>Tensão de escoamento convencional (σ_E)</i>	308,3 Mpa
<i>Modulo de elasticidade (E)</i>	81,86 Gpa
<i>Alongamento (δ)</i>	18,25 mm
<i>Deformação relativa (ε)</i>	20,8%
<i>Tensão máxima (σ_u)</i>	311,8 Mpa
<i>Equação da curva de escoamento 0°</i>	$k_f = 495,3 \cdot \varphi^{0,165}$
<i>Equação da curva de escoamento 45°</i>	$k_f = 533,22 \cdot \varphi^{0,2025}$
<i>Equação da curva de escoamento 90°</i>	$k_f = 584,08 \varphi^{0,20}$

As curvas geradas e os cálculos foram realizados utilizando o Software *Matlab 2016a*.

4.2 Coeficiente de anisotropia

Para avaliar grau de anisotropia, foram realizadas medidas dos corpos de provas após o teste de tração e em seguida calculado as deformações no comprimento (φ_1), largura (φ_2) e espessura (φ_3) e para serem comparadas com o valor anterior ao teste. Os valores estão em mm.

Tabela 3. Dimensões finais e deformações dos corpos de prova

	<i>Comprimento(l)</i>	<i>Largura(b)</i>	<i>Espessura(t)</i>	φ_1	φ_2	φ_3
0°	157,00	9,83	0,43	0,11	-0,22	-0,15
45°	160,20	10,17	0,48	0,14	-0,19	-0,04
90°	163,50	10,08	0,41	0,16	-0,20	-0,20

De acordo com a Eq. 2.12:

$$r_o = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{9,83}{12,30}}{\ln \frac{0,43}{0,5}} = 1,46$$

$$r_{45} = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{10,17}{12,30}}{\ln \frac{0,48}{0,5}} = 4,75$$

$$r_{90} = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{10,08}{12,30}}{\ln \frac{0,41}{0,5}} = 1$$

E de acordo com a Eq. 2.13, a anisotropia media será:

$$r_m = \frac{1}{4}(1,46 + 2 * 4,75 + 1) = 2,99$$

Como o valor apresenta acima de 1, pode-se concluir que a chapa apresenta uma maior resistência a deformação plástica na espessura, sendo deformado principalmente no comprimento e na largura (MELCONIAN, 2014). A fim de comparação, a Tab. 4 apresenta alguns valores típicos de anisotropia para diversos metais:

Tabela 4. Valores típicos do índice de anisotropia – SOUZA, 1982

Material	r
Aço normalizado	1,0
Aço efervescente	1,0-1,35
Aço acalmado com alumínio	1,35-2,0
Cobre e latão	0,8-1,0
Chumbo	0,2
Metais HC	3,0-6,0

E a anisotropia planar, de acordo com a Eq. 2.14:

$$\Delta r = \frac{1}{2}(1,46 - 2 * 4,75 + 1) = -3,5$$

A anisotropia planar encontrada indica que há uma grande variação de r_m entre as direções longitudinais e transversais.

4.3 Ensaio de conformação incremental

A Fig. 18 mostra as vistas lateral e superior das geometrias geradas após os testes de estampagem incremental. A marcação superior e inferior se refere ao local de início, região mais externa, e à região ao final do processo, mais interna, respectivamente.

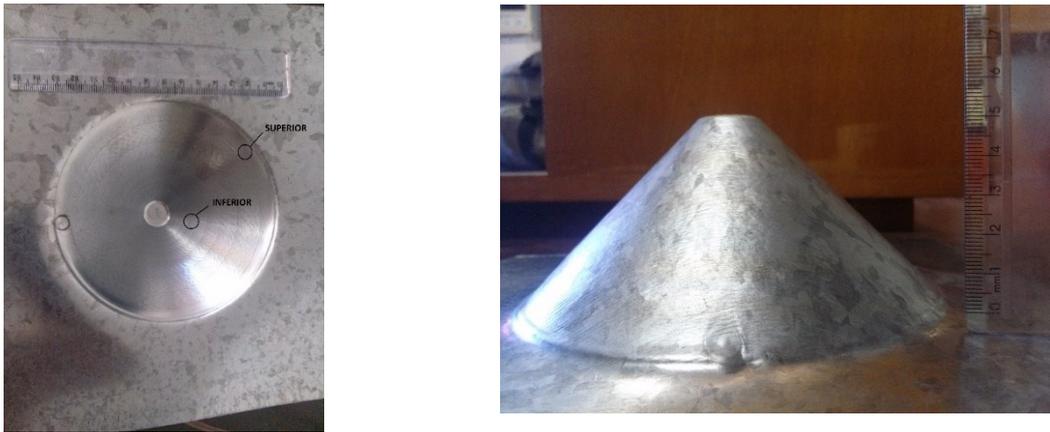


Figura 18. Vista superior e lateral da chapa após conformação

4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Para caracterizar as superfícies com relação a suas propriedades e composição, foram realizadas as técnicas de MEV e EDS:

A Fig. 19 mostra a microestrutura da chapa com o repetitivo espectro da composição química no ponto indicado. A Tab. 5. mostra os resultados quantitativamente.

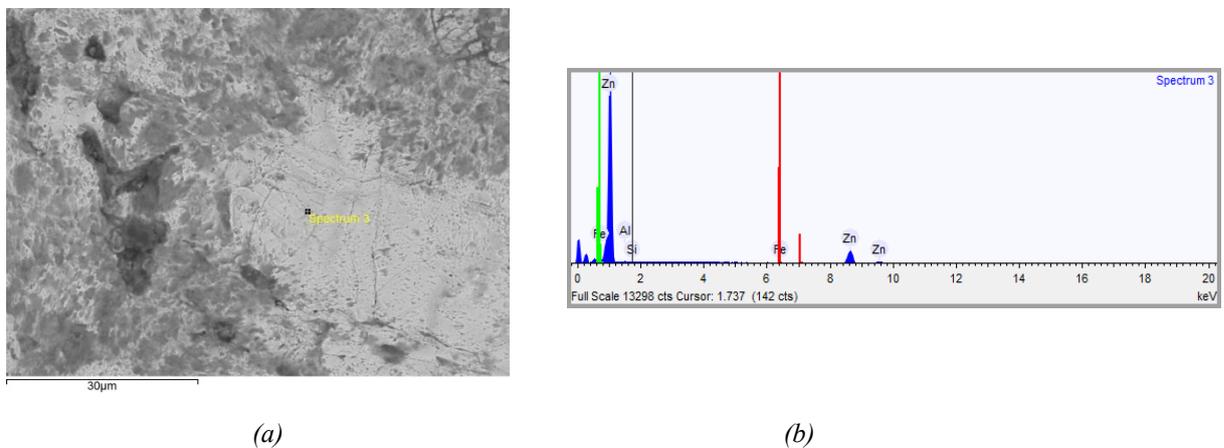


Figura 19. (a) MEV da superfície (b) Espectro EDS para a região analisada

Tabela 5. Porcentagem de metais presentes na região analisada

Elemento	% peso
Zinco	97,772
Ferro	1,507
Silício	0,127
Alumínio	0,594

Outro local analisado foi uma região de coloração mais escura, conforme indicado na Fig. 20. A composição encontrada está indicada na Tab.6.

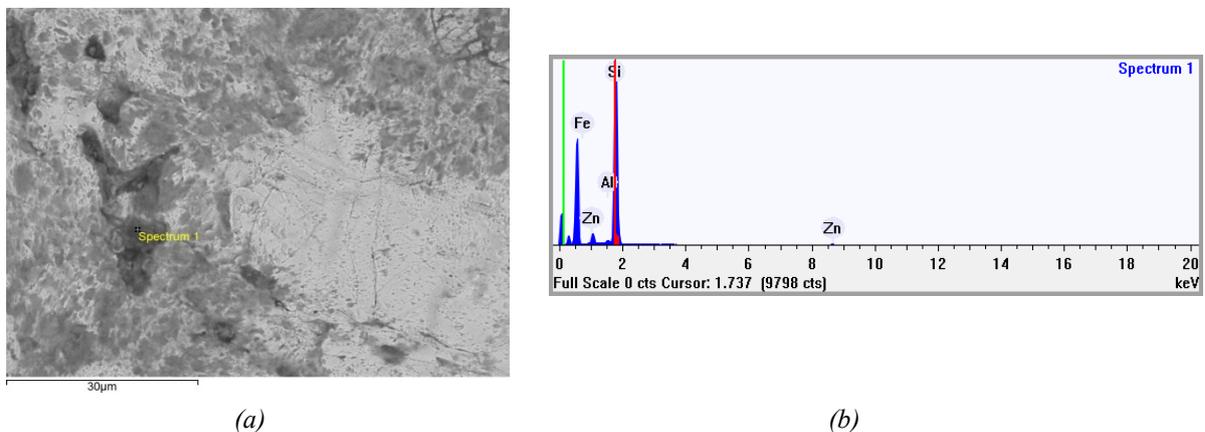


Figura 20. (a) MEV da superfície (b)Espectro EDS para a região analisada

Tabela 6. Porcentagem de metais presentes na região analisada

Elemento	% peso
Zinco	8,738
Ferro	0,987
Silício	89,567
Alumínio	0,708

Do exposto, é possível concluir que a chapa de zinco apresenta uma vasta região (região mais clara) composta predominantemente do zinco com algumas regiões isoladas (regiões mais escuras) com predominância do elemento silício. Para o presente trabalho foi considerado um material composto puramente por zinco.

4.5 Rugosidade

Os testes de rugosidade foram realizados levando em conta três parâmetros: R_a , R_q e R_z . Os resultados para cada teste, bem como para a chapa, são mostrados nas imagens abaixo:

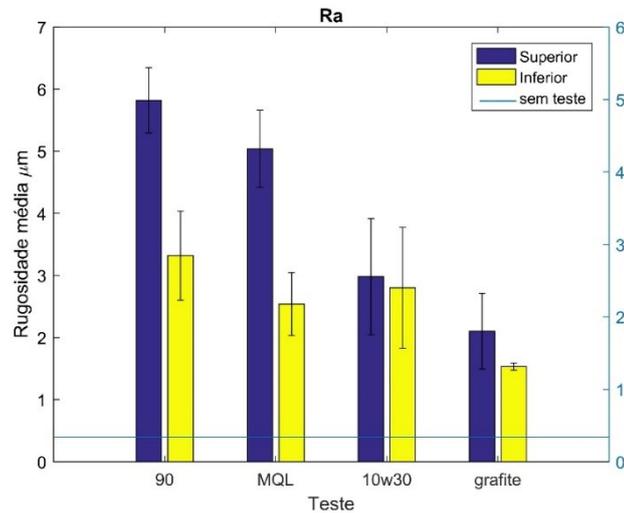


Figura 21. Valores obtidos de R_a

A partir da Fig. 21 é possível notar uma grande alteração da qualidade superficial em relação à chapa antes do teste. Porém, o parâmetro R_a não permite definir a forma das irregularidades do perfil.

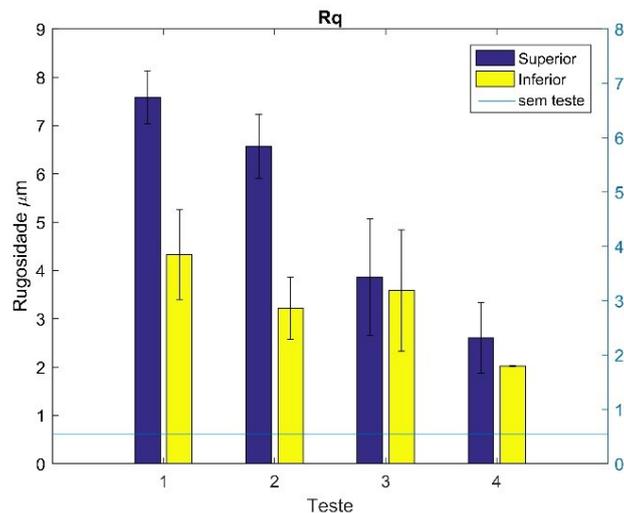


Figura 22. Valores obtidos de R_q

Como esperado, os valores de R_q apresentaram mais elevados do que R_a , pois este se mostra mais sensível a um valor elevado de um pico ou vale, ou seja, o parâmetro R_q acentua os valores que se afastam da média.

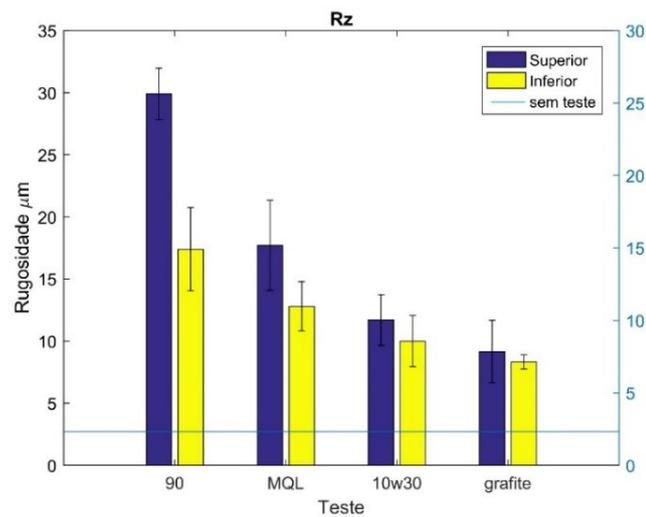


Figura 23. Valores obtidos de R_z

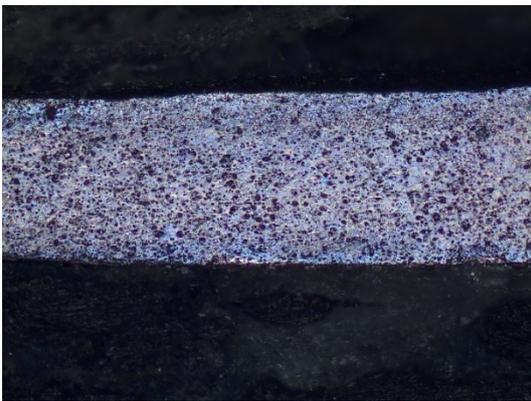
Os elevados valores de R_z indicam uma rugosidade acentuada, maior que a rugosidade média. Isso porque esse parâmetro é mais sensível a mudanças no acabamento do que R_a , pois leva em conta apenas as alturas máximas de perfis.

Quando a velocidade de avanço supera a capacidade de transmissão de dados, observa-se solavancos na máquina com descontinuidade na movimentação, e como resultado há perda da interpolação por polinômio de segundo e terceiro grau (funções G02 e G03) para uma interpolação por seguimentos de retas (função G01) como consequência de uma maior velocidade do avanço do que de transmissão de dados, resultando em um acabamento de qualidade indesejável, com estrias nas paredes verticais (SOUZA, 2008).

Outra causa para a queda na qualidade do acabamento é a alteração da temperatura do fluido lubri-refrigerante e a consequente alteração de suas propriedades. Há também a presença de particulados que se desprendem da chapa durante o processo de conformação e ficam retidos no fluido.

4.6 Análise Metalográfica

A Fig. 24 (a) mostra a seção transversal da chapa sem teste. Sua coloração azulada indica uma grande quantidade de energia concentrada como resultado da deformação plástica ocorrida durante o corte. Já a Fig. 24 (b) mostra a parte superior da chapa também sem teste. Neste caso, não se nota a presença de deformação plástica, apenas a microestrutura de zinco com pontos mais escuros compostos por silicatos.



(a)



(b)

Figura 24. Chapa de zinco anterior aos testes

- (a) Vista Corte
- (b) Vista superior

As imagens a seguir apresentam as microestruturas resultante após os testes de estampagem incremental com os quatro diferentes lubrificantes.

A Fig. 25 mostra a microestrutura da amostra lubrificada com óleo SAE 10w30. A partir da imagem é possível observar uma região (superior) mais deformada, em que houve maior concentração de energia como resultado do ensaio de estampagem e, portanto, mais atacada pelo reagente e uma microestrutura composta por zinco e silicatos (região mais escura). A região deformada possui um comprimento de aproximadamente 90 micrometros.

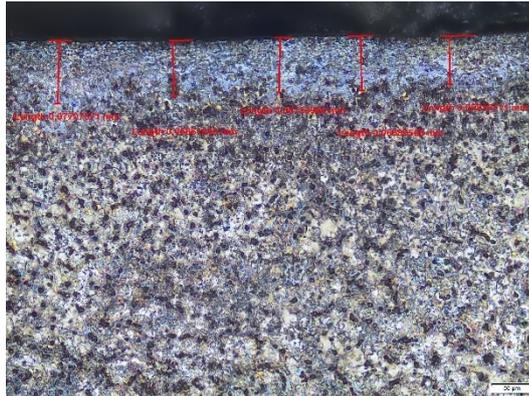


Figura 25. Chapa de zinco após teste com 10w30

A figura a seguir mostra a microestrutura para o teste com óleo lubrificante SAE 90. A profundidade da deformação encontrada foi de aproximadamente 70 micrometros. Considerando a viscosidade do fluido como uma resistência ao cisalhamento interno, o óleo 90, fluido mais viscoso que o 10w30, foi capaz de absorver mais deformação, resultando em uma deformação menor na chapa.

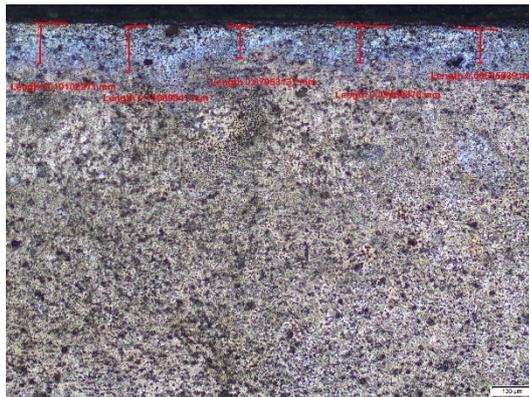


Figura 26. Chapa de zinco após teste com óleo 90

A Fig. 27 mostra a micrografia para o teste com MQL. Neste teste, a camada deformada apresentou uma profundidade um pouco menor que os óleos automotivos comerciais, com 55 micrometros.

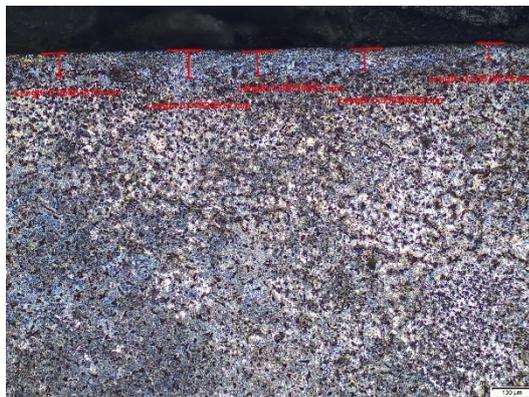


Figura 27. Chapa de zinco após teste com MQL

Por fim, a Fig. 28 mostra o resultado para o teste com lubrificante sólido. Este resultado apresentou uma deformação com a menor profundidade. Uma hipótese para este resultado é que a presença do grafite é um componente adicional, responsável por absorver parte da energia através da deformação por meio do cisalhamento de sua estrutura lamelar, devido às suas fracas ligações de Van der Waals (JUSTE, 2012)

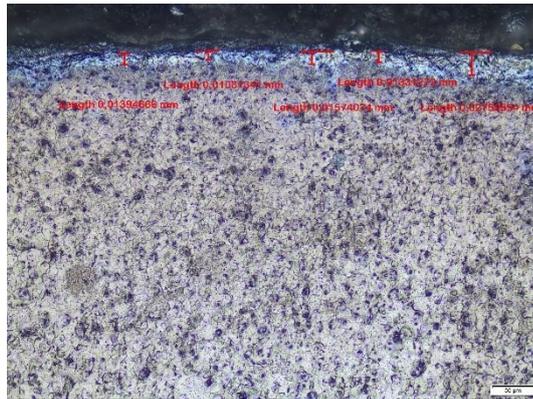


Figura 28. Chapa de zinco após teste com Grafite

5 CONCLUSÃO

Por meio da realização de experimentos práticos foi possível demonstrar que é possível adaptar recursos utilizados na usinagem, como um centro de usinagem CNC, ferramentas e softwares para a produção de geometrias por meio da estampagem incremental em zinco.

O zinco apresentou um comportamento adequado para estampagem, com grande ductilidade e alongação, porém apresenta uma baixa resistência mecânica quando comparado com outros metais como o aço, por exemplo.

Dentre os quatro experimentos realizados a lubrificação com grafite apresentou uma ligeira melhor qualidade superficial do que os demais. A lubrificação por MQL se mostrou adequada, com resultados próximos aos demais, comprovando sua eficácia como meio lubrificante. Levando em conta a pouca quantidade utilizada, esta opção se mostra vantajosa quando analisada sob o ponto de vista econômico. Em relação aos óleos comerciais, o lubrificante menos viscoso resultou em um melhor acabamento superficial, pois possui uma melhor capacidade de “molhar” a superfície e estabelecer um bom contato térmico, apesar de os testes apontarem para uma região deformada mais profunda.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR-6152 – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 22p. 1992.

ASTM E517-00: Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. 2010.

BASTOS, Alexandre Lundgren. Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação, dezembro. 2009. 148 f. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BRESCIANI FILHO, E. Conformação Plástica dos Metais. Volumes 1 e 2. Campinas: UNICAMP

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2011.

CASTELAN, Jovani. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano. 2010. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

EMMENS, W., C. 2011. Formability: A Review of parameters and Processes that Control Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, Chap. 3.

FOLLE, L. F. et al. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva-limite de conformação. Corte e Conformação dos Metais, Rio Grande do Sul, p.64-76, maio 2008.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 260 p.

JUSTE, Karyne Ramos de Campos. Caracterização tribológica da lubrificação sólida. 2012. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

LOBÃO, Mauricio Centeno. Determinação de curvas limite de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampagem. 2003. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

LOPES, T. F. S. Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotula. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Dissertação de Mestrado

MACHADO, Alisson Rocha; SILVA, Marcio Bacci da; COELHO, Reginaldo Teixeira. Teoria Da Usinagem Dos Materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MELCONIAN, Marcos Vinícius. Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos: São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

MOURA, Ricardo Ribeiro; SILVA, Márcio Bacci da. Desempenho do grafite como lubrificante sólido no torneamento da liga TI-6AL-4V. Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, p. 00-00. nov. 2014.

NETTO, Sergio Eglan Silveira. Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação. 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SCHLOSSER, Fernando et al. Crystallographic Texture Evolution of a Zinc Sheet Subjected to Different Strain Paths. The Minerals, Metals & Materials Society. p. 1-10.2017.

SCHAEFFER. L. e A. Rocha. Conformação mecânica – Cálculos aplicados em processos de Fabricação. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SHIGLEY, J. E; Mishke, C. R.; Projeto de Engenharia Mecânica, Bookman, 7ª edição, 2005.

SILVA, Pablo Josué da. Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço abnt 1008 e abnt 304.2011. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SINGHA, Monika; CHOUBEYB, Ajay Kumar. Formability Analysis of Aluminium Alloy by Erichsen Cupping Test Method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF MATERIALS PROCESSING AND CHARACTERIZATION, 5., 2016.

SOUZA, Adriano Fagali de. Usinagem de formas complexas:do CAD/CAM ao CNC. 2008. Disponível em: <<http://www.mundocnc.com.br/avan9.php>>. Acesso em: 20 out. 2017.

TEÓFILO, Jorge. Estrutura e Propriedades dos Materiais. 2017. Disponível em: <<https://jorgeteofilo.wordpress.com/>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

WATFE, Rodrigo Hudson. REDESENHO DE RODAS ESTAMPADAS EM AÇO. 2007. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2007.