

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

NAYARA CAMPOS BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

BELO HORIZONTE

2016

NAYARA CAMPOS BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2016

NAYARA CAMPOS BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Prof. Carlos Eduardo dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Ernane Rodrigues da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Aderci de Freitas Filho

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

À minha família e ao Gustavo, pelo apoio durante os anos de estudos e em especial durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Eduardo dos Santos pelo suporte e orientação.

Ao Ítalo técnico-administrativo, responsável pelo laboratório de Conformação Mecânica da Instituição PUC Minas, onde realizei os ensaios, pelo auxílio durante a realização dos testes de Estampagem Incremental.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação da influência dos diversos parâmetros de rugosidade no processo de Estampagem Incremental de Chapas (ISF – *Incremental Sheet Forming*), por meio de análises bibliográficas e experimentos realizados. Os experimentos baseiam-se na variante da Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF – *Single Point Incremental Forming*), em que foi avaliada a influência do lubrificante pastoso (vaselina), óleo mineral (SAE 68), confrontando de forma comparativa com o processo a seco. Basicamente para a realização dos testes a estrutura empregada foi um dispositivo para fixação da chapa, um centro de usinagem vertical (CNC) e um *software* de CAD/CAM. Foram avaliados os parâmetros superficiais de rugosidade Ra, Rp, Rt, Rq, Rdc, Rv, Rz e Rc. Foram avaliados ainda os parâmetros topográficos Rsk, Rku, Rmr e plotada a curva de Abbott Firestone, para avaliação do parâmetro Rk. O melhor acabamento da superfície conformada medido por meio dos parâmetros citados foi alcançado utilizando-se o óleo mineral (SAE 68) como lubrificante em comparação ao processo sem lubrificação. O processo a seco possui limitação durante a fabricação por efeitos tribológicos.

Palavras-chave: Estampagem Incremental; parâmetros de rugosidade; variação da lubrificação.

ABSTRACT

This study aims to carry out the assessment of the influence of different roughness parameters in the process of Sheet Metal Stamping Incremental (ISF - Incremental Sheet Forming) through bibliographical analysis and experiments. The experiments are based on the variant Incremental Stamping Single Point (SPIF - Single Point Incremental Forming), in which we evaluated the influence of viscous lubricant (Vaseline), mineral oil (SAE 68), in comparison with the dry process. Basically for the realization of the experiments the structure used was a device for plate fixation, a vertical machining center (CNC) and a CAD / CAM software. We evaluated the surface roughness parameters of Ra, Rp, Rt, Rq, Rdc, Rv, Rz and Rc. They were also evaluated topographic parameters Rsk, Rku, Rmr and plotted the Abbott Firestone curve for the evaluation of Rk parameter. The best finish surface shaped measured by parameters was achieved using mineral oil (SAE 68) as a lubricant compared to the process without lubrication. The dry process has limitation during manufacturing by tribological effects.

Key words: Incremental Stamping; roughness parameters; lubrication variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estampagem Incremental por conformação negativa e positiva	11
Figura 2 - Processo de estampagem incremental em chapas.....	14
Figura 3 - Diferentes configurações de ISF.....	16
Figura 4 - Estampagem Incremental em um Centro de Usinagem CNC	18
Figura 5 - Esquematização de uma estampagem incremental de “ponto duplo”	19
Figura 6 - Esquema representando a variação dos pontos de apoio em um processo ISF	20
Figura 7 - Variáveis do processo a serem parametrizadas	21
Figura 8 – Esquema mostrando a redução da espessura da parede	22
Figura 9 – Representação do ângulo de parede e a espessura da chapa	23
Figura 10 – Ferramenta executando um ciclo de estampagem, utilizando graxa como lubrificante.....	26
Figura 11 - Tipos de ferramentas com ponta de metal duro, e outra com ponta de plástico (à direita)	27
Figura 12 – Rugosidade Rz sob condições de estampagem incremental	29
Figura 13 – Rugosidade média Ra	31
Figura 14 – Parâmetro Rt	32
Figura 15 – Parâmetro Rc.....	32
Figura 17 – Parâmetro Rv	33
Figura 16 - Gráfico do parâmetro Rp.....	33
Figura 18 – Parâmetro Rz.....	34
Figura 19 – Caracterização de Rku	35
Figura 20 – Representação do Parâmetro Rdc	35
Figura 21 – Parâmetro Rsk.....	36
Figura 22 – Parâmetro Rmr	37
Figura 23 – Curva de Abbott-Firestone e parâmetros da série Rk	38
Figura 24 – Representação gráfica de Rk.....	39
Figura 25 – Dispositivo de Estampagem Incremental.....	41
Figura 26 – Geometria da peça estampada.....	42
Figura 27 – a) Parâmetro de rotação lateral e b) Parâmetro de avanço, respectivamente.	43
Figura 28 - Medição da rugosidade utilizando rugosímetro eletrônico.....	44
Figura 29 – Regiões da chapa após a conformação.....	45
Figura 30– Amostras 2 e 3 conformadas na condição a seco.....	46
Figura 31 – Amostras 2 e 3 conformadas na condição a seco.....	47
Figura 32 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição a seco.....	48
Figura 33 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição a seco	49
Figura 34 - Parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da condição com vaselina	50
Figura 35 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição com vaselina.....	51
Figura 36 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição com vaselina	52
Figura 37 - Parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da condição a óleo	53
Figura 38 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição a óleo.....	54
Figura 39 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição a óleo.....	55
Figura 40 – Gráficos das amostras nas condições utilizando óleo como lubrificante, Vaselina e sem lubrificação (a seco) respectivamente.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das chapas de Alumínio.....	40
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem.....	43
Tabela 3 - Resultados do ensaio.....	46
Tabela 4 - Média dos parâmetros de rugosidade para cada condição de lubrificação.....	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO.....	12
2.1 Objetivos Específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Estampagem Incremental	15
3.1.1 Aplicações e características.....	15
3.1.2 Descrição do método.....	17
3.3.1 Limitações do Processo Devido à Geometria das Peças	21
3.3.2 Velocidade de Avanço	24
3.3.3 Rotação da Ferramenta	25
3.3.4 Lubrificação	25
3.3.5 Tipos de Ferramentas para Estampagem Incremental de Chapas	27
3.3.6 Profundidade do Passe Vertical.....	28
3.4 Influência da Rugosidade em Processos de Estampagem Incremental.....	28
3.4.1 Filtro Gaussiano	30
3.4.2 Principais Parâmetros de Rugosidade.....	30
3.4.3 Curva de Abbott – Firestone	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Materiais.....	40
4.2 Metodologia dos Ensaios	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6. CONCLUSÃO	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

A indústria começou a fabricar chapas estampadas em prensas, como forma de atender às demandas do alto volume de produção, e considerando-se ainda custos menores e tempos mínimos de fabricação. Entretanto, uma desvantagem foi evidenciada, pois para cada produto a ser estampado era necessário uma ferramenta (matriz) dedicada para tal função. Tal fato elevava os custos do processo, pois era preciso conceber uma nova ferramenta a cada novo produto produzido (KOPAC e KAMPUS, 2005).

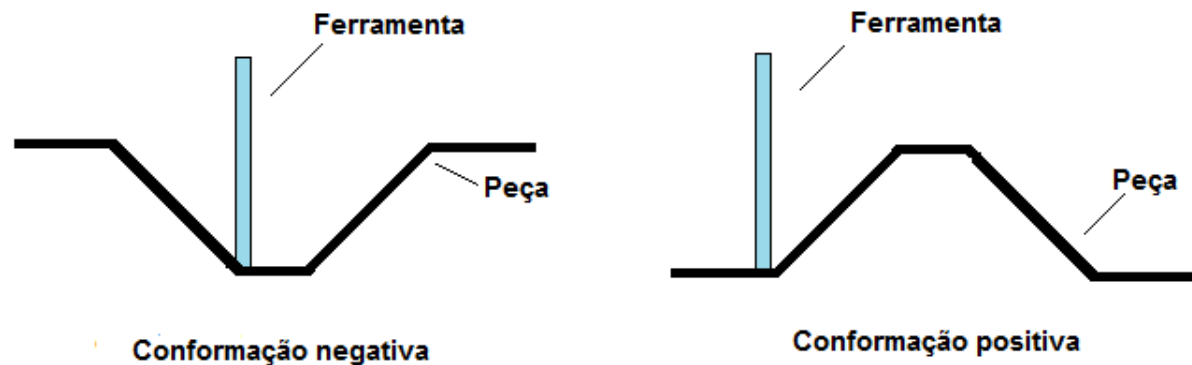
A estampagem em ferramentas dedicadas era então apropriada apenas para grandes volumes de produção. No entanto, existem algumas situações em que é necessária a produção de pequenos lotes de peças. Uma delas está vinculada a incessante produção de novos produtos pela indústria, que possui uma necessidade constante de desenvolvimento de protótipos. Protótipos são construídos com o intuito de experimentar uma nova peça ou a sua funcionalidade (KOPAC e KAMPUS, 2005). A outra situação é quando a fabricação é feita sob encomenda e/ou a quantidade não justifica a produção de um ferramental completo, em que o custo do produto final seja muito elevado, inviável economicamente falando (PARK e JI, 2003).

Uma alternativa que surgiu com o objetivo de minimizar o uso de ferramentas dedicadas para a estampagem de chapas na fabricação de pequenos lotes de peças ou em peças de modelo único, foi a Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming – ISF*) que é considerada uma inovação tecnológica nessa área.

A Estampagem Incremental em chapas foi patenteada em 1967 por Edward Leszak. Seu nome deriva-se do fato de que apenas uma parte do produto está sendo realmente conformado a cada momento, e que a área deformada localmente está movendo-se sobre o produto inteiro. Tal definição engloba outros processos, como por exemplo, a laminação (EMMENS e BOOGAARD, 2009).

No processo de estampagem incremental uma ferramenta de geometria simples realiza a conformação de uma chapa metálica por meio de sucessivas deformações aplicadas de forma localizada (PARK e JI, 2003). Na ISF, por exemplo, existem dois tipos possíveis de conformação, a negativa e a positiva, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Estampagem Incremental por conformação negativa e positiva



Fonte: Adaptado (Park e Ji,2003).

A Estampagem Incremental positiva é aquela em que a peça conformada forma uma superfície convexa no lado em que houve o contato com a ferramenta. Já a Estampagem Incremental negativa tem como característica a produção de uma peça com geométrica côncava, no lado em que ocorreu o contato com a ferramenta (PARK e JI, 2003).

De acordo com Tuomi e Lamminen (2004), o processo de Estampagem Incremental apresenta-se como uma alternativa economicamente viável por não utilizar um ferramental constituído de materiais extremamente resistentes e com alto número de componentes móveis, uma vez que, tais elementos requerem processos de fabricação com custos mais elevados.

Estudos realizados indicam que a Estampagem Incremental possui um custo médio na ordem de 5 a 10% do custo total da Estampagem Convencional. A composição do custo possibilita a estipulação da quantidade máxima e mínima de peças a serem produzidas para a viabilização econômica da utilização do ISF (PAUNOIU e VICOARA, 2006).

Considerada um processo promissor, a Estampagem Incremental, não só no que diz respeito a conformação plástica de chapas metálicas, mas também de outras matérias. E estudos recentes feitos, por exemplo, por Franzen et al. (2009), mostram a ISF sendo utilizada na conformação de materiais poliméricos.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo realizar a avaliação da influência dos diferentes parâmetros de rugosidade no processo de Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming –ISF*).

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do lubrificante pastoso (vaselina), óleo mineral (SAE 68), confrontando com o processo a seco;
- Avaliar os parâmetros superficiais de rugosidade R_a , R_p , R_t , R_q , R_{dc} , R_v , R_z , R_c ;
- Avaliar os parâmetros topográficos R_{sk} , R_{ku} e R_{mv} ;
- Plotar a curva de Abbott Firestone;
- Comparar as superfícies por meio da rugosidade central (R_k).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Processos de conformação por deformação plástica são especificados e classificados conforme suas características técnicas e aplicações. São exemplos de tais processos o forjamento, a extrusão, trefilação, laminação, calandragem, perfilagem e estampagem. A estampagem possui dois ramos de grande aplicação, a indústria automobilística e a indústria aeronáutica. Entretanto, há diversos outros tipos de produtos que também podem ser produzidos por meio deste processo. Aplicações em produtos da indústria naval, de eletrônicos, hospitalar e até utensílios domésticos utilizam a estampagem como principal processo de fabricação (SILVA, 2011)

Segundo Emmens (2010), no ano de 1994, *Matsubara* introduziu o conceito de estampagem incremental (*ISF*) como método de prototipagem e fabricação de pequenas séries de produtos em chapa metálica, no ramo automóvel no Japão.

O termo ‘estampagem’ é utilizado para generalizar várias operações de manufatura, em geral, todas que são realizadas em chapas metálicas, e que ocorrem alterações em sua forma geométrica, com produção de dobras, cavidades, saliências, cunhas e furos. Essas deformações ocorrem no material em estado sólido, e o mesmo é escoado em regime plástico. Um grande aproveitamento da matéria-prima acontece na estampagem, o que reduz o desperdício e a geração de sobras de materiais, o que a difere de outros processos, como por exemplo, a usinagem (RODRIGUES e MARTINS, 2005).

O processo de estampagem convencional utilizado para a produção de pequenos lotes e peças especiais é um procedimento que requer um investimento financeiro elevado e tempo, pois necessita da fabricação de matrizes macho e fêmea em aço especial, além do uso de maquinário pesado em processos que foram primeiramente planejados para fabricação em larga escala (SILVA, 2011).

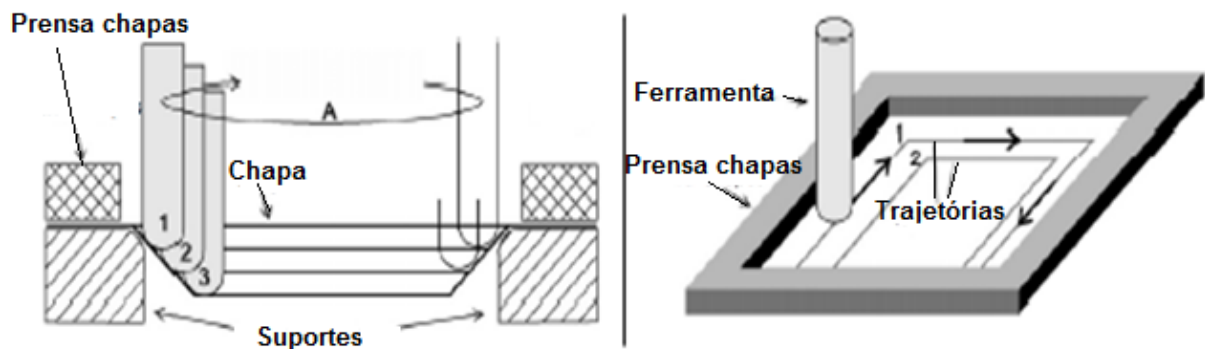
O desenvolvimento de novos processos que têm por objetivo fabricar peças com qualidade e em um menor espaço de tempo, como por exemplo, na prototipagem rápida, é algo que evoluindo de forma crescente. Em casos como este vem ganhando destaque os processos de conformação por Estampagem Incremental, devido a seu baixo custo e maior agilidade de fabricação, além de poder ser utilizado em projetos especiais, peças com geometria complexa

e produtos de pequenos lotes. Porém, ainda faltam estudos mais aprofundados para a utilização deste processo com plena confiança, agilidade e otimização (SILVA, 2011).

O processo de conformação associado à estampagem incremental pode ocorrer por meio de duas configurações distintas, caracterizado por dois tipos gerais de conformação, a conformação negativa e a conformação positiva, que configuram os dois métodos de execução do ISF: o processo de estampagem incremental de único ponto – *Single Point Incremental (SPIF)* – e o processo de estampagem incremental de dois pontos – *Two Point Incremental Forming (TPIF)* – respectivamente (JESWIET et al., 2005).

O desenvolvimento do processo ISF foi otimizado pela introdução de centros de comando computadorizados – *Computer Numerical Control (CNC)* – e do projeto assistido por computador – *Computer-Aided Design (CAD)*, que consiste na conformação de uma geratriz, com razoável precisão, a partir de arquivos CAD, que são convertidos em arquivos tridimensionais – *Computer Aided manufacturing (CAM)* – de Manufatura Assistida por Computador. O centro *CNC* permite a materialização de uma imagem tridimensional por meio de uma fresadora e de uma mesa onde encontra-se fixo o suporte da chapa. Acontece então o movimento relativo entre a ferramenta e a chapa que acontece, sobretudo, de fora para dentro, seguindo uma trajetória pré-definida e provocando, de forma incremental, deformações plásticas localizadas, obtendo como resultado a geometria pretendida. A fixação da chapa é feita por meio de um suporte prensa-chapas e o contato da chapa-ferramenta, acontece em uma pequena região que se move conforme a trajetória imposta, como pode ser visto na Figura 2 (EMMENS e BOOGAARD, 2010).

Figura 2 - Processo de estampagem incremental em chapas



Fonte: Adaptado (Emmens e Boogaard., 2010).

Por meio de uma deformação formada gradualmente consegue-se uma maior formabilidade e moldabilidade da chapa se comparada aos processos de estampagem convencionais, não havendo necessidade de um molde configurado, de acordo com a geometria desejada para a peça final (MARTINS et al., 2008).

Segundo Kopac e Kampus (2005) um dos grandes empecilhos à aplicação industrial as ISF está quanto à exatidão entre o modelo proposto e a peça real, devido a deformações elásticas que acontecem durante o processo. Como forma de compensar estes efeitos, dependendo da complexidade geométrica do produto, existem recursos que podem variar muito, sendo necessários sua correção e ajuste. Entretanto, sistemas de ISF que utilizam ferramenta inferior (como cavidade ou saliência), seu formato já inclui a correção necessária para as deformações elásticas que ocorrem durante a estampagem.

De acordo com estudos realizados recentemente, que avaliaram a viabilidade técnico-comercial do processo, a tolerância dimensional do produto final tem se mostrado como um importante fator limitante desta tecnologia de conformação. Sendo assim, devem ser realizadas futuras pesquisas neste sentido (HIRT et al., 2005).

3.1 Estampagem Incremental

3.1.1 Aplicações e características

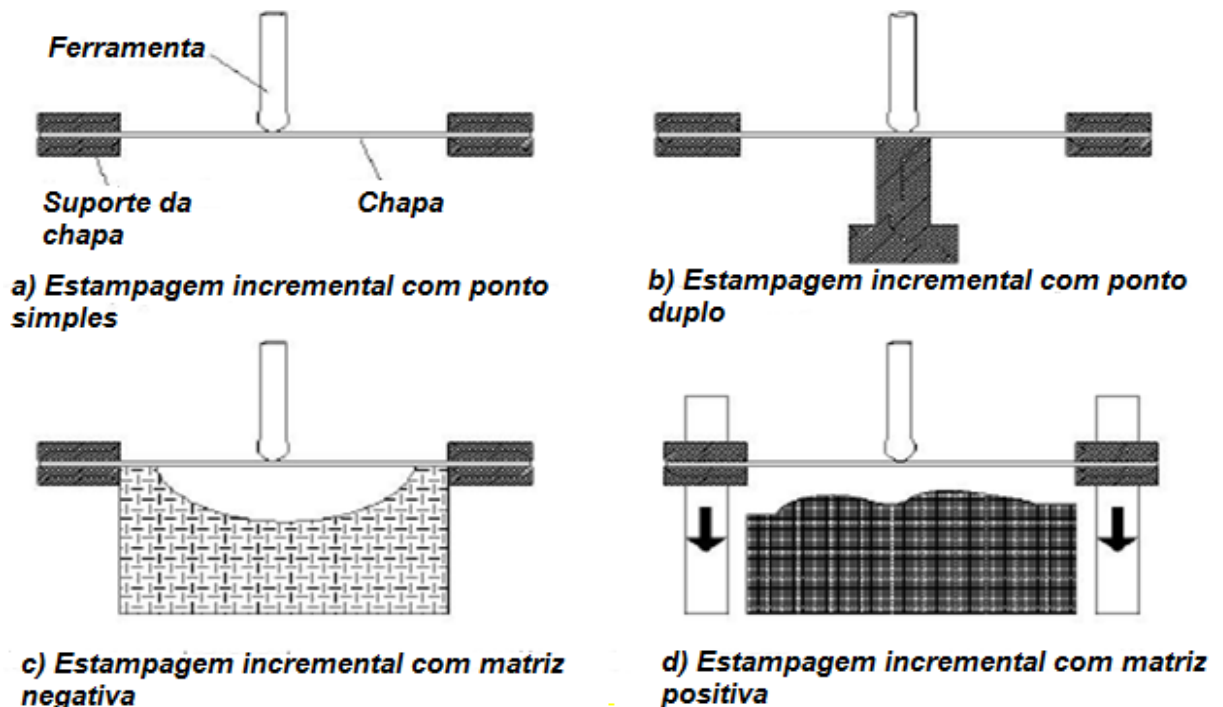
Devido à flexibilidade da ISF, torna-se viável sua aplicabilidade a pequenos lotes de produção e lotes de peças únicas, uma vez que o custo do ferramental necessário na estampagem incremental é bem inferior ao que é normalmente utilizado nos processos de estampagem convencionais. Levando-se em conta que a estampagem pode ser realizada em uma matriz bastante simplificada ou até mesmo sem matriz, com apenas uma única ferramenta de conformação (SPIF – *Single Point Incremental Forming*- Estampagem de Ponto Simples), o processo também torna-se viável para prototipagem rápida e também para trabalhos artísticos, compostos geralmente por peças únicas (KOPAC e KAMPUS, 2005).

As máquinas para ISF (para centros de usinagens adaptados ou para equipamentos originais) apresentam outras vantagens que vão além da flexibilidade e baixo custo do ferramental.

Como tais máquinas têm dimensões inferiores em relação aos equipamentos normalmente usados para estampagem, realizar alterações no *layout* fabril tornam-se mais fáceis de serem feitas, assim como o transporte de tais equipamentos para locais mais distantes. Além disso, a estampagem incremental de ponto simples proporciona menor consumo de energia, se comparado ao consumo de outras máquinas comumente utilizadas na estampagem (KOPAC e KAMPUS, 2005).

A variabilidade dos processos de estampagem incremental está baseada na quantidade de pontos de apoio ou nas ferramentas utilizadas. Além da estampagem incremental de ponto simples, que faz uso de uma ferramenta que executa alguns movimentos de translação e rotação, existe outro tipo de estampagem que utiliza uma ferramenta de forma geométrica mais simples e estacionária, que fica posicionada sob a chapa. Existem ainda outros processos que fazem uso de uma matriz positiva ou negativa, que ficam posicionadas do mesmo modo sob a chapa, e que darão forma ao produto final, conforme mostrado na Figura 3 (ALLWOOD et al., 2005).

Figura 3 - Diferentes configurações de ISF



Fonte: ALLWOOD et al., 2005, adaptado pelo autor.

Duas famílias distintas de processo podem ser destacadas no processo de estampagem incremental, são elas estampagem incremental de ponto simples (SPIF – *Single Point Incremental Forming*), e a de ponto duplo (TPIF – *Two Points Incremental Forming*), sendo elas diferenciadas não só pelo número de pontos de contato entre a ferramenta e a chapa, mas também pela folha, e matriz (quando presente) (ATTANASIO et al., 2006).

Entretanto, para alcançar formas mais precisas na estampagem incremental, faz-se uso de um suporte inferior específico no formato desejado, suporte este que pode possuir uma simetria axial ou ser assimétrico, e que é indicado para fabricação de superfícies complexas e orgânicas. Este suporte pode ter a forma de um ressalto ou de uma cavidade (HIRT et al., 2005).

Em suma a estampagem incremental é um processo em que:

- Existe a conformação incremental de chapas metálicas;
- A ferramenta é sólida e possui pequeno tamanho;
- Não necessita grandes matrizes;
- A ferramenta mantém um contato contínuo com a chapa metálica;
- A ferramenta é movimentada de modo controlado num espaço tridimensional (HIRT et al., 2005).

3.1.2 Descrição do método

Na estampagem incremental, o método é descrito em suma pela deformação da chapa que acontece pelo contato da ferramenta na mesma, sendo aumentada conforme ocorre o incremento da ferramenta (CASTELAN, 2010).

No processo deve existir uma chapa (*blank*) a ser conformada cuja espessura deve variar de 0,7 a 1,5 mm, segundo HIRT (2005), dependendo do tipo de material e suas propriedades mecânicas. Esta chapa deve ser presa a um dispositivo móvel, que irá deslizar paralelamente ao eixo Z de um sistema CNC (eixo vertical). Elementos de fixação irão evitar que a chapa movimente-se enquanto a estampagem estiver sendo realizada e a deformação plástica da chapa estiver acontecendo. Essa deformação plástica na chapa é produzida por uma ferramenta rotativa, que está acoplada ao eixo árvore do dispositivo CNC (HIRT et al., 2005).

A ferramenta utilizada no processo possui uma ponta esférica ou semi-esférica, com a qual é iniciada a ISF deslizando sobre a superfície da chapa e, gradativamente, por meio de incrementos verticais negativos, realiza a conformação. Tal processo é conhecido como sendo de “ponto simples”, e esse ponto é determinado pela ferramenta rotativa de conformação (HIRT et al.,2005).

Podem ser utilizadas máquinas CNC de Centros de Usinagem para se realizar a estampagem incremental em suas diversas modalidades, embora existam máquinas específicas para a execução da ISF. Como mostra a Figura 4, um exemplo dessa utilização de um Centro de Usinagem para a estampagem de chapas, pois se trata de um equipamento de fácil utilização e baixo custo de processamento.

Figura 4 - Estampagem Incremental em um Centro de Usinagem CNC

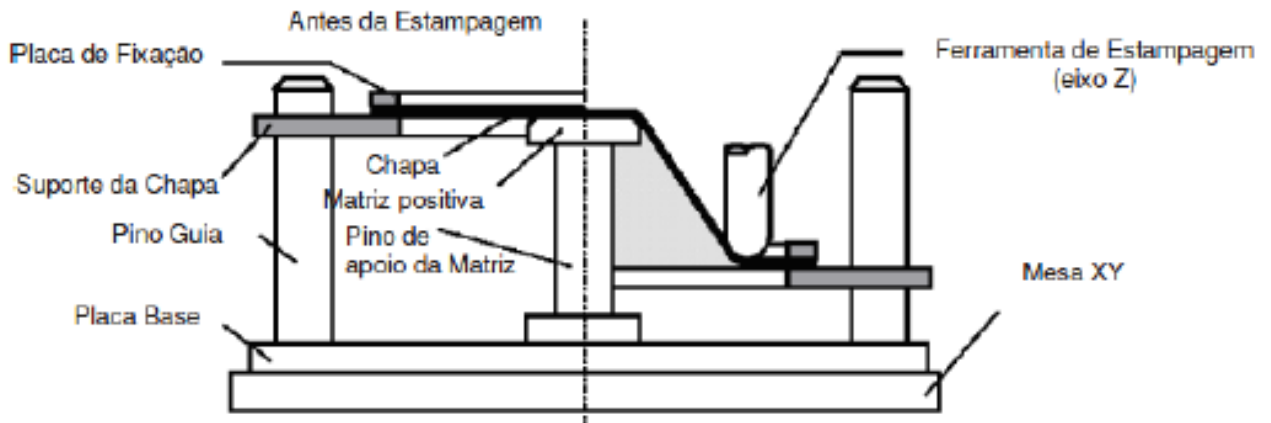


Fonte: Próprio autor.

Outro método de estampagem é o chamado “ponto duplo”, constituído por um ponto de apoio (Figura 5) que é colocado em oposição ao sentido da ferramenta. Em processos como este a forma final do produto produzido se dá através do movimento sincronizado, chamado

interpolação linear, do incremento vertical, no eixo Z, da ferramenta que realiza movimentos nos eixos X-Y da mesa do equipamento de CNC (KOPAC et al., 2005).

Figura 5 - Esquemática de uma estampagem incremental de “ponto duplo”



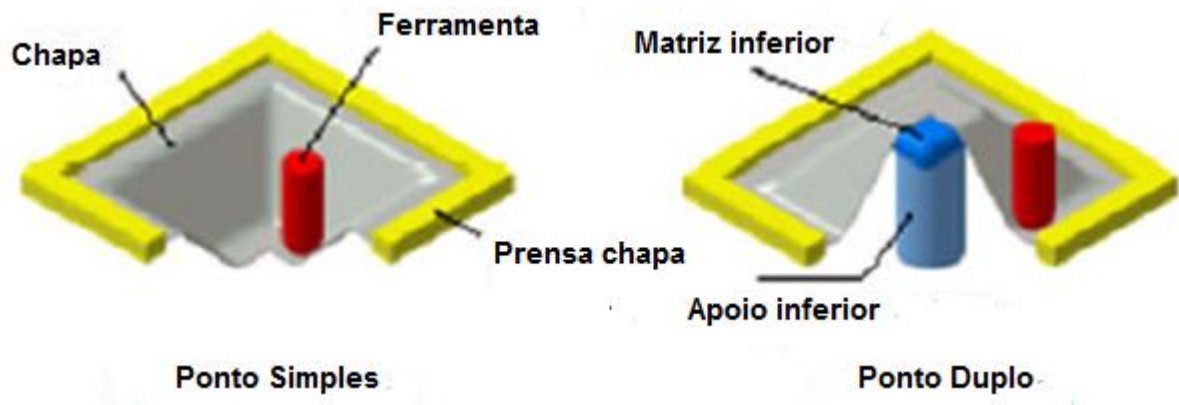
Fonte: Hirt et al., 2005.

A estampagem incremental com dois pontos de apoio utiliza além da ferramenta de conformação, localizado sob a chapa um rígido suporte. Tal suporte é utilizado para expandir as possibilidades geométricas, além de melhorar a acuidade das peças, que está relacionada com a correspondência entre peça virtual e peça real. Para geometrias assimétricas a utilização do suporte inferior é particularmente importante (ALLWOOD et al., 2005).

Em uma estampagem utilizando ponto simples, ocorre o contato da ferramenta com a parte interna da chapa, o que gera a partir do incremento realizado uma cavidade cônica. Em processos como este, a geometria é obtida exclusivamente pela trajetória feita pela ferramenta, o que gera os produtos com formas simétricas. Enquanto na estampagem com ponto duplo, a matriz com cavidade positiva, posicionada abaixo da chapa, também é responsável pela determinação da geometria final da chapa, o que pode ser observado na Figura 6 (HIRT et al., 2005).

A vantagem do suporte negativo é a de tornar o dispositivo mais simples de ser produzido e utilizado, além de não possuir partes móveis. Em contraponto, a conformação positiva apresenta um menor retorno elástico do material (ALLWOOD et al., 2005).

Figura 6 - Esquema representando a variação dos pontos de apoio em um processo ISF

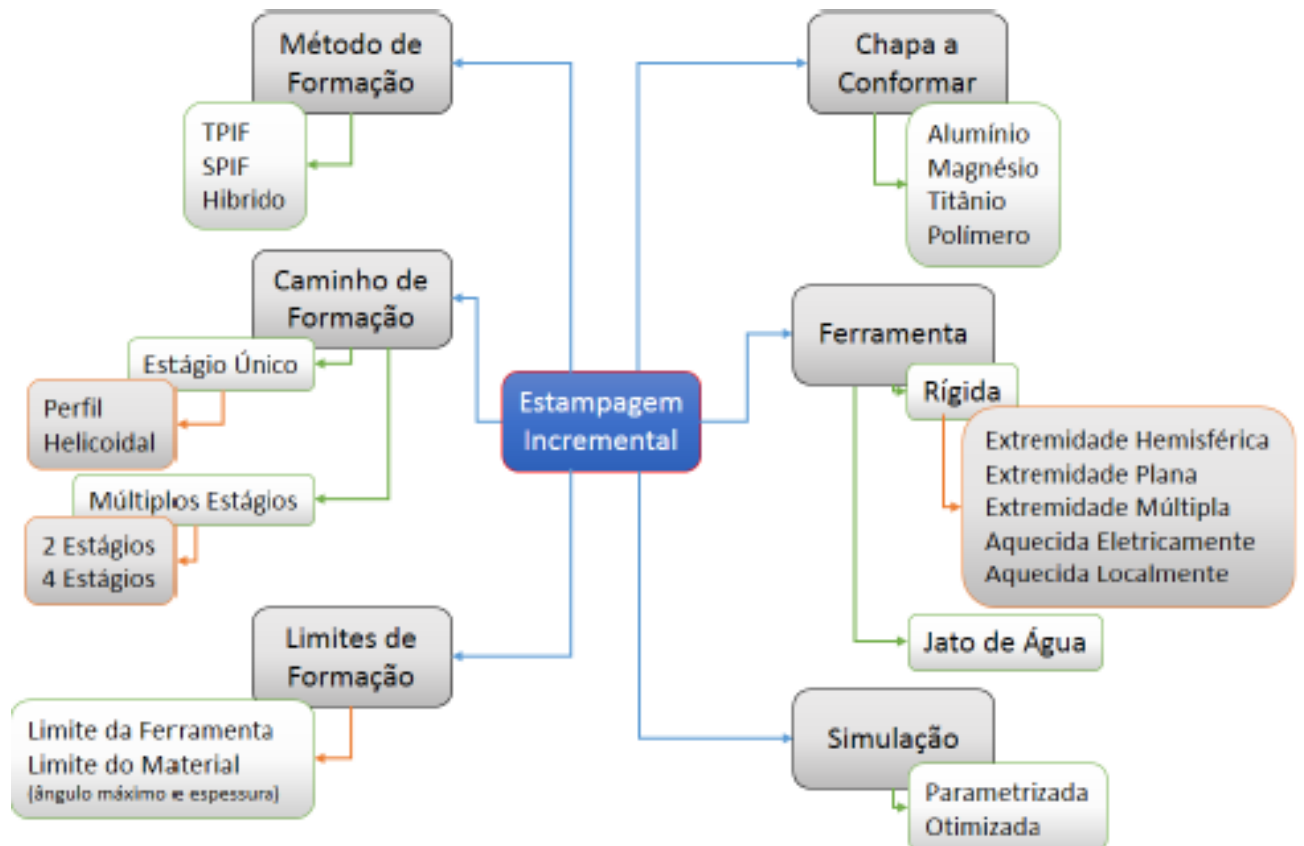


Fonte: Hirt et al., 2005.

A estampagem incremental de ponto simples pelo fato de não utilizar suporte inferior, também é comumente conhecida como *dieless* – que quer dizer “sem ferramenta”, como previsto por Leszak em 1967. Devido a essa característica de conformação “*dieless*”, os autores Hussain et al.(2009) e Duflou et al.(2008) relatam em seus trabalhos, que tal modalidade tem de forma significativa um potencial para reduzir o custo da produção de pequenos lotes e protótipos, tendo em vista que pode ser evitado o tempo de espera e o custo das ferramentas.

O esquema apresentado na Figura 7 mostra as diferentes dimensões em nível analítico, considerando-se o processo de conformação incremental, as diversas variáveis a serem parametrizadas.

Figura 7 - Variáveis do processo a serem parametrizadas



Fonte: Echrif e Hrairi., 2011.

3.3.1 Limitações do Processo Devido à Geometria das Peças

Como acontece em outros processos de conformação (forjamento e estampagem convencional), valores máximos de ângulos existem para definir certas regiões das peças, para tornar possível sua manufatura. Considerando a ISF, é apontado um ângulo máximo de parede da chapa de 65°, segundo estudos recentes. Caso seja ultrapassado esse valor, torna-se muito frequente a ruptura da peça, ou pelo menos uma diminuição drástica da espessura da chapa, o que causa uma baixa resistência mecânica no local (KOPAC e KAMPUS, 2005).

O volume e sua constância levam a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede (Figura 8), que tem sido comumente denominado como “lei do seno” e que leva a um afinamento excessivo da chapa, ou sua falha considerando-se a aplicação de grandes ângulos em um único passe (HIRT et al.,2005)

Na estampagem o ângulo máximo é determinado por meio de uma relação que envolve a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, que é dada pela Equação 1 da lei dos senos:

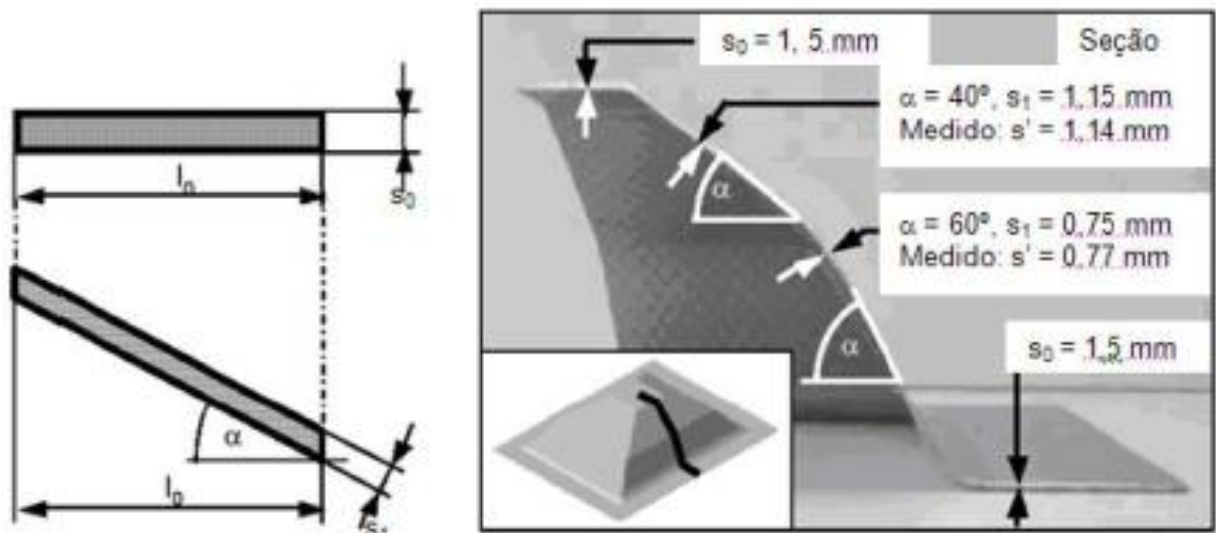
$$s_1 = s_0 * \text{sen} (90-\alpha)$$

Equação 1

Fonte: Hirt et al., 2005.

Em que t_0 corresponde a espessura original da chapa, t_1 é a espessura da chapa medida durante uma determinada etapa do processo de conformação e α diz respeito ao ângulo de inclinação da chapa neste mesmo ponto. Contudo, não é previsto pela lei dos senos como ocorre a variação da espessura ao longo do processo de estampagem (HIRT et al.,2005).

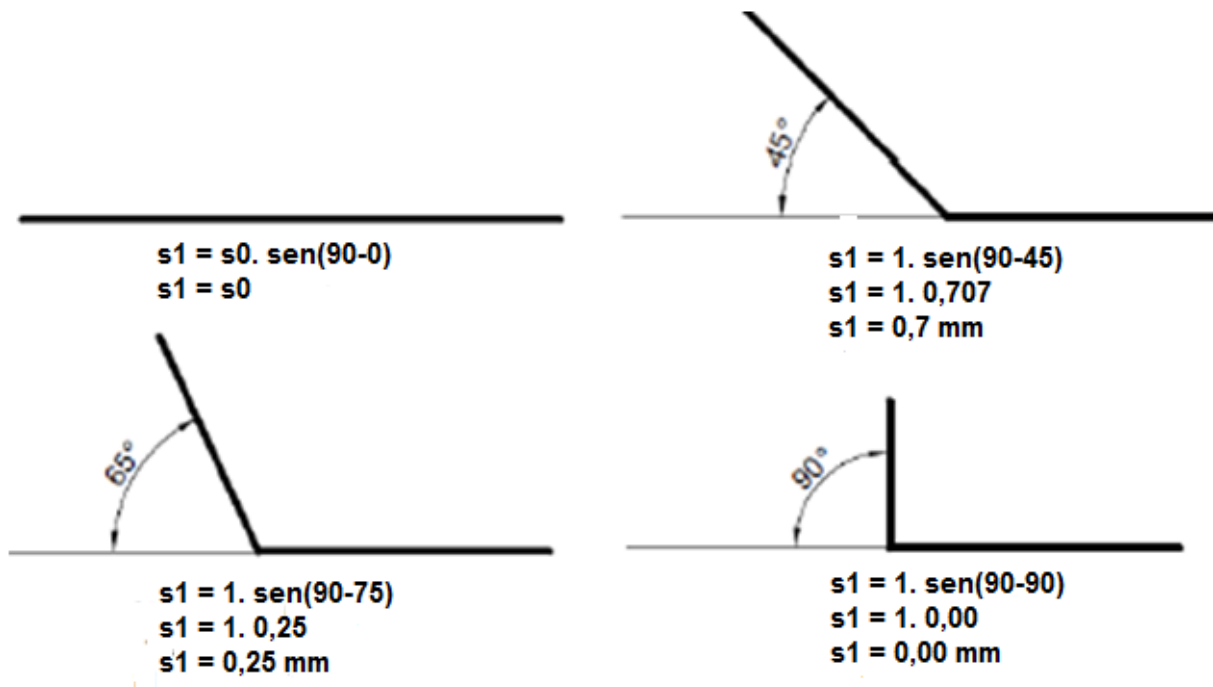
Figura 8 – Esquema mostrando a redução da espessura da parede



Fonte: Hirt et al., 2005.

Na Figura 9 é possível perceber pela demonstração o comportamento da chapa, em relação ao ângulo de inclinação da parede (65°) e seu vínculo com a diminuição de espessura. Para um ângulo de 45°, ele representa uma inclinação que a maioria dos materiais pode ser submetida na conformação sem que aconteça um afinamento extremo da chapa. Já em relação a ângulos de parede próximos de 90°, se considerado um estágio único de estampagem, ele tende a gerar seções extremamente finas, que obviamente se configuram como um problema a ser evitado (KOPAC e KAMPUS, 2005).

Figura 9 – Representação do ângulo de parede e a espessura da chapa



Fonte: Attanasio et al., 2008.

Novos processos foram desenvolvidos para possibilitar ângulos de conformação finais superiores a 65°, devido a limitações de geometria, que originalmente eram aplicados em estampagem convencional de peças com geometrias complexas (DUFLOU et al., 2005).

Segundo Hussain (2009), em estudos realizados a respeito do limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas na indústria automobilística, dois parâmetros foram analisados: limite de espessura (*thinning limit*) e o ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*). Por meio da análise dos resultados, foi verificado que variando-se a inclinação da chapa ao

longo da profundidade consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante.

De acordo com Duflou et al.(2005), uma característica dos processos de estampagem em geral, que também está presente na ISF, por exemplo, e é responsável por determinar limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, acontecem discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo original correspondente em CAD, devido a deformação elástica que ocorre no material.

É utilizado o método de elementos finitos (*Finit Elements Method* – FEM) para auxiliar no desenvolvimento de um algoritmo de correção da malha que possa diminuir ou excluir totalmente o desvio que é gerado pelo retorno elástico da peça, considerando-se o valor teórico e o real. O algoritmo de correção recebe dados de uma máquina que realiza medições por coordenadas, que é utilizada para medir a primeira peça produzida de cada lote. Os dados fornecidos são comparados com os dados geométricos do modelo confeccionado em CAD 3D e assim então é feito o ajuste de coordenadas, que irá gerar uma malha (superfície) corrigida. O *software* de CAM automaticamente atualiza os dados da trajetória das ferramentas. Com um novo arquivo gerado a peça subsequente é fabricada, já com as devidas atualizações (DUFLOU et al., 2005).

3.3.2 Velocidade de Avanço

Os valores correspondentes a velocidade de avanço da ferramenta (V_{fh}) que foram encontrados na literatura variam na faixa de 500 a 2000 mm/min (DUFLOU, 2008 e ATTANASIO, 2006).

Segundo Castelan (2010), foi comprovado que quanto maior a velocidade de avanço (V_{fh}), maior será o retorno elástico causado (erro de profundidade) na chapa conformada, em relação ao modelo original proveniente do projeto da peça no CAD.

A velocidade de avanço da ferramenta (V_{fh}) é uma medida relacionada diretamente ao atrito entre a ferramenta e a chapa (quantificação do estado de tensões aplicado localizadamente em uma região da chapa) e possui importante influência sobre a conformabilidade da mesma (CASTELAN, 2010).

3.3.3 Rotação da Ferramenta

Segundo Jeswiet (2005), Dentre os parâmetros que estão envolvidos na estampagem incremental é ressaltada uma importante diferença na forma como a ferramenta se movimenta quando há deformação na chapa.

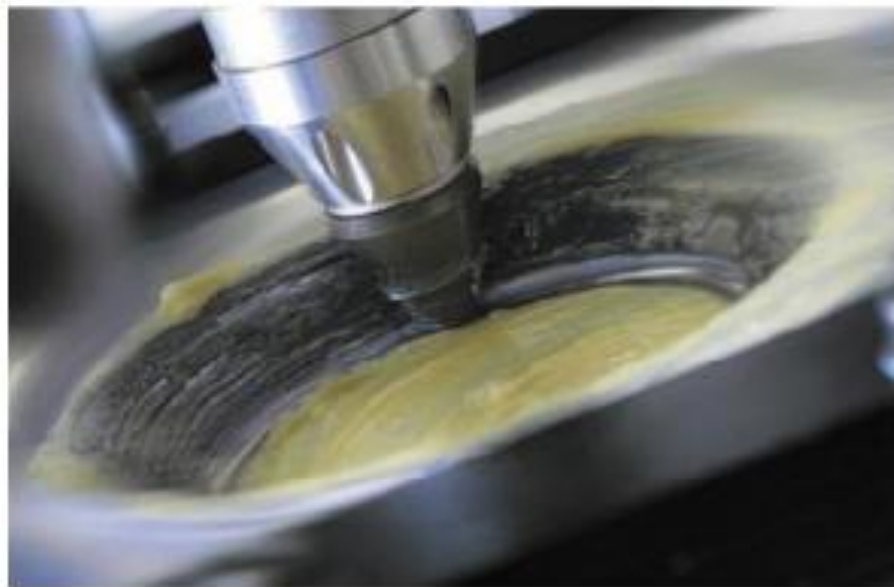
- Deslocamento da ferramenta sem rotação do eixo da árvore;
- Deslocamento da ferramenta considerando a rotação do eixo da árvore, variando-se a velocidade da ferramenta (V_c). Controlando-se a velocidade da ferramenta é possível que seja controlado o aquecimento da chapa durante a deformação. Aumentando-se a temperatura da chapa, por meio do atrito da ferramenta com a chapa, é possível que se aumente a conformabilidade da chapa. Entretanto, o aumento da velocidade de rotação da ferramenta ocasiona um maior desgaste das superfícies, interferindo na rugosidade da chapa, além de provocar queima do lubrificante usado, o que pode ocasionar problemas ambientais (JESWIET et al., 2005).
- Deslocamento da ferramenta considerando a rotação do eixo da árvore livre, foi estudado em um estudo de caso da fabricação de uma cavidade do forno solar (JESWIET et al., 2005). Nesse caso, a ferramenta rotacionava de acordo com que esta tocava a superfície da chapa, o que proporcionava um menor atrito entre as partes. Equipamentos dedicados à estampagem incremental utilizam este método.

3.3.4 Lubrificação

Segundo Cavaler (2010), o processo de estampagem necessita de lubrificação na superfície da chapa, pois isso diminui a fricção entre a ferramenta e a chapa, além de ser capaz de absorver parte do calor gerado pela deformação. A quantidade do lubrificante varia dependendo do material e da espessura da chapa. Na Figura 10, é mostrada a ponta de uma ferramenta de estampar em funcionamento, em que foi utilizada graxa convencional como lubrificante.

Com o intuito de melhorar o acabamento superficial, o autor Attanasio et al.(2006), utilizou como lubrificante graxa convencional. O autor Allwood et al.(2009) empregou como lubrificante um tipo de graxa para alta pressão do tipo, Castrol SpheroL LEP2. Já o autor Hussain et al.(2009) fez uso de óleo mineral como lubrificante.

Figura 10 – Ferramenta executando um ciclo de estampagem, utilizando graxa como lubrificante



Fonte: Cavaler, 2010.

A lubrificação deve ser levada em consideração, mesmo sendo considerado um fator adicional, independente do lubrificante. Alguma forma de lubrificação é utilizada em todos os casos citados, e de maneira geral, o tipo de lubrificante não parece ser um fator preponderante no acabamento superficial, mas sim sua aplicação ou não (JESWIET et al., 2005).

Segundo Allwood et al.(2005), em seu trabalho durante os experimentos iniciais da máquina dedicada a estampagem incremental construída por eles, foi observado que com a ausência de lubrificação, danos superficiais apareciam logo após o início da deformação. Já com o uso da graxa convencional para lubrificação entre a ferramenta e a superfície da chapa, tais danos não eram observados.

3.3.5 Tipos de Ferramentas para Estampagem Incremental de Chapas

Normalmente utiliza-se uma ferramenta com a ponta semi-esférica que é produzida em aço-ferramenta. A ferramenta deve deslizar sobre uma superfície de chapa estampada e causar estiramento e dobramento da chapa (CAVALER, 2010).

Geralmente é concebida e fabricada pelo usuário a ferramenta, tendo em vista que não são disponibilizadas para venda no mercado. Com a ponta da ferramenta sendo semi-esférica, como mostra a figura 11, pode se assegurar um ponto de contato contínuo entre a chapa e a ferramenta de estampagem (JESWIET et al., 2005).

Figura 11 - Tipos de ferramentas com ponta de metal duro, e outra com ponta de plástico (à direita)



Fonte: Jeswiet et al., 2005.

Para reduzir o atrito durante a estampagem, e ainda aumentar a vida útil da ferramenta, além de aumentar a qualidade superficial da chapa produzida, a ferramenta pode ser fabricada de metal duro ou ter revestimento em sua superfície esférica (JESWIET et al., 2005).

O raio da ponta da ferramenta (R_T) interfere na qualidade da superfície e grandes raios R_T resultam em superfícies mais lisas, e em marcas das ferramentas menores.

O uso de raios da ponta da ferramenta (R_T) menores provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, que estão localizadas abaixo da ferramenta. Raios (R_T) maiores tendem a distribuir a tensão sobre uma área maior. Como consequência, diminuir o raio da ponta da ferramenta tenderá a aumentar o limite de estampagem da chapa. Contudo, a diminuição do raio (R_T) a tornará mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação (CASTELAN, 2010).

3.3.6 Profundidade do Passe Vertical

No processo de estampagem incremental, a cada volta dada, a ferramenta avança no sentido negativo do eixo Z, em pequenos passos (Δ_z). O tamanho do passo vertical (Δ_z) influencia negativamente sobre a rugosidade da superfície e sobre sua conformabilidade. Com o aumento do (Δ_z) o *blank* sofre deformações sob condições mais elevadas, o que faz com que a conformabilidade do *blank* diminua com o tamanho crescente do incremento de passo (Δ_z), provocando maiores discrepâncias geométricas como modelo original em CAD. Este aumento influencia também o aumento das forças verticais aplicadas (JESWIET et al., 2005).

Entretanto, se o passo (Δ_z) for menor que 0,01 mm, o material é estampado várias vezes no mesmo lugar, o que aumenta a possibilidade do material sofrer encruamento, o que ocasionaria o rompimento da chapa (ATTANASIO et al., 2006).

O uso de um passo (Δ_z) constante em uma peça com perfil de calota, gera uma maior rugosidade superficial e reduz a conformidade geométrica, se comparado com a utilização de um passo (Δ_z) variável, de acordo com a curvatura da chapa, que melhora o processo nestes dois aspectos (ATTANASIO et al., 2006).

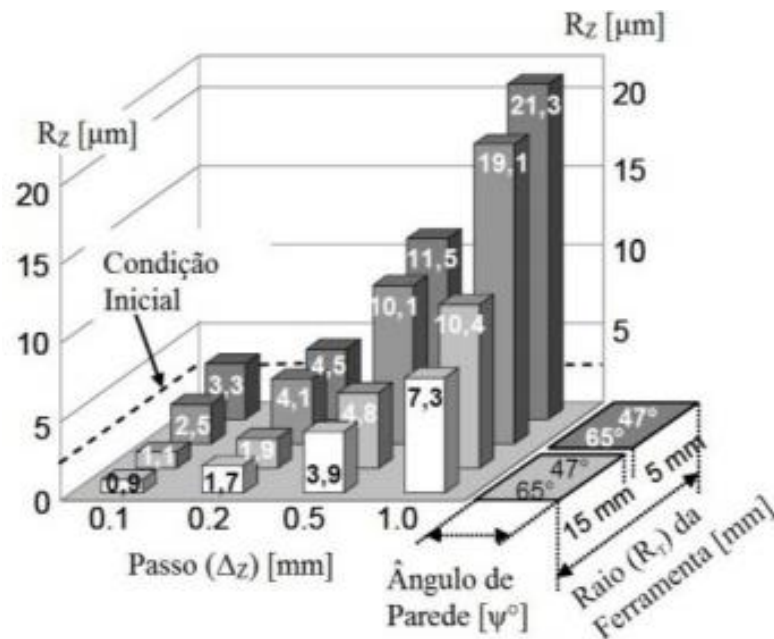
3.4 Influência da Rugosidade em Processos de Estampagem Incremental

O acabamento superficial no processo de estampagem incremental é o resultado de uma combinação de grandes ondulações provenientes da trajetória da ferramenta e pequena escala

de rugosidade que é resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta. A ferramenta que trabalha no eixo Z provoca marcas sobre a superfície estampada a cada volta de estampagem. Os três principais parâmetros de usinagem que irão influenciar na rugosidade são: o ângulo de parede (ψ), o passo em Z (Δ_z) e o raio da ferramenta (R_T) (JESWIET et al., 2005).

Tanto a rugosidade resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta, quanto as ondulações resultantes da trajetória da ferramenta, são possíveis de serem amenizadas usando uma ferramenta de maior diâmetro e reduzindo-se o passo de estampagem (Δ_z), como mostra a Figura 12. Entretanto, pequenos passos (Δ_z) requerem maior tempo de estampagem. O que faz com que haja uma relação entre o tempo de produção e a qualidade de superfície (ATTANASIO et al., 2006).

Figura 12 – Rugosidade R_z sob condições de estampagem incremental



Fonte: Jeswiet et al., 2005.

Entretanto, segundo Hirt et al.(2005), passos muito pequenos, combinados a estratégia de múltiplos estágios utilizando ferramentas sem rotação provocam o desprendimento de filamentos de chapa metálica, o que aumenta a rugosidade superficial.

O autor Jeswiet et al.(2005), apresenta os valores de R_z médios variando na faixa de 4-12 μm da rugosidade considerando os produtos provenientes do processo de estampagem incremental, determinando um ponto fraco em relação aos processos convencionais. Além disso, considera o padrão de rugosidade resultante de tensões de atrito da superfície com a ferramenta a medida mais importante. Já o autor Ambrogio (2012), além do padrão de rugosidade R_z , avaliou também a rugosidade média (R_a) e a altura máxima de pico a vale (R_{max}).

Com relação ao processo de estampagem incremental de chapas, os autores Ambrogio et al. (2012), relatam que com o aumento da temperatura empregada no processo, aumenta a chance de ocorrer oxidação da chapa, o que compromete a qualidade do acabamento superficial. Além disso, eles citam que o aumento do ângulo de parede (ψ), aumenta a área de contato da ferramenta de estampar e a chapa, o que causaria maiores danos na qualidade da superfície.

3.4.1 Filtro Gaussiano

De acordo com Whitehouse (1994) é apresentado um comportamento diferenciado entre um Filtro Gaussiano em relação a um filtro eletrônico. Seu comportamento se apresenta como uma função matemática aplicada aos dados do perfil. A filtragem gaussiana pode ser descrita como uma média ponderada do perfil, em que os valores se distribuem em uma distribuição normal (gaussiana). Este filtro possui uma função que interpola e que ameniza a amplitude do sinal dando maior suavidade aos contornos da superfície.

Em um Filtro Gaussiano uma das principais propriedades é a possibilidade de levar em consideração os dados antes e depois da posição efetiva da ponta do apalpador. A filtragem gaussiana diminui em 50% a amplitude máxima da transmissão dentro da banda.

3.4.2 Principais Parâmetros de Rugosidade

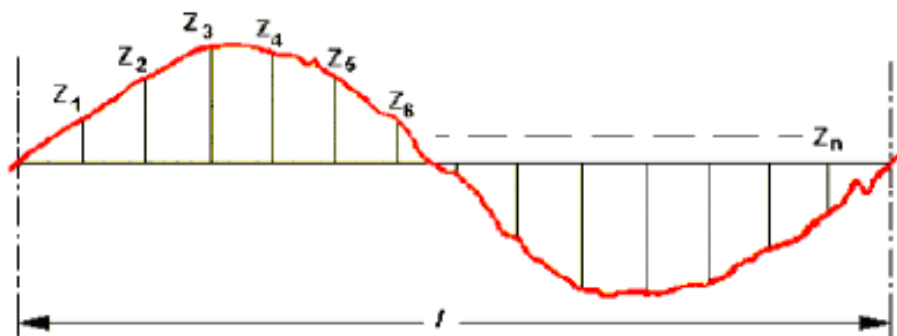
Segundo Whitehouse (1994), a avaliação da textura de uma superfície pode ser dividida em: análise sem filtragem (perfil P), análise de rugosidade (perfil R), análise de ondulação (perfil W) e análise de forma. Sendo o perfil P composto de rugosidade, ondulação

e forma. O perfil R apenas de rugosidade e o perfil W de ondulação. A forma pode ser considerada como uma avaliação macrogeométrica e é avaliada separadamente. Segundo a classificação de Whitehouse (1994), os principais parâmetros estão descritos a seguir.

- **Ra - Média aritmética dos desvios da superfície**

Dentre todos os parâmetros o mais utilizado para avaliação de rugosidade é o Ra, e também é o mais conhecido. Calcula-se tal parâmetro a partir da média aritmética dos desvios do perfil, tomando como referência a linha média e é definido sobre um comprimento l de amostragem, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Rugosidade média Ra



Fonte: Whitehouse, 1994.

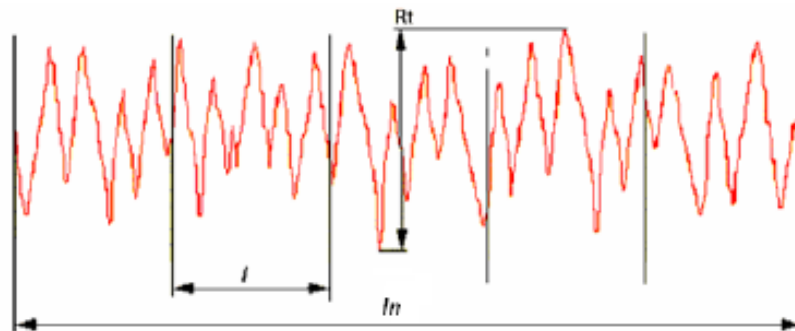
- **Rq - Raiz quadrada das médias dos quadrados**

Rq é o parâmetro descrito como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil R em relação à linha média em um comprimento l de avaliação, o gráfico de análise Rq é similar ao gráfico de Ra mostrado na Figura 13.

- **Rt – Altura máxima de rugosidade**

O parâmetro R_t é caracterizado como a altura máxima de um pico a um vale no comprimento de avaliação de perfil, em outras palavras é descrito como a amplitude máxima entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Parâmetro R_t



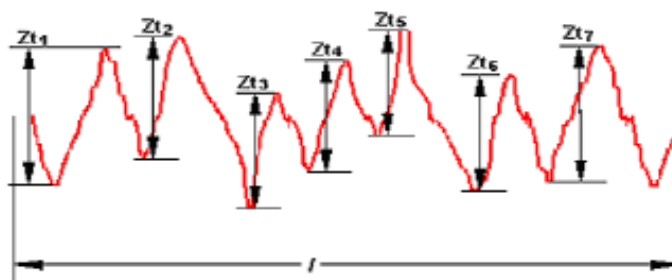
Fonte: Hobson, 2000.

Onde: ln = comprimento de avaliação e l = comprimento de amostragem.

- **Rc – Média das amplitudes contidas no perfil**

O parâmetro R_c considera todas as amplitudes de picos e vales da análise realizando uma média aritmética de todos os resultados encontrados, a Figura 15 representa a análise deste parâmetro.

Figura 15 – Parâmetro R_c

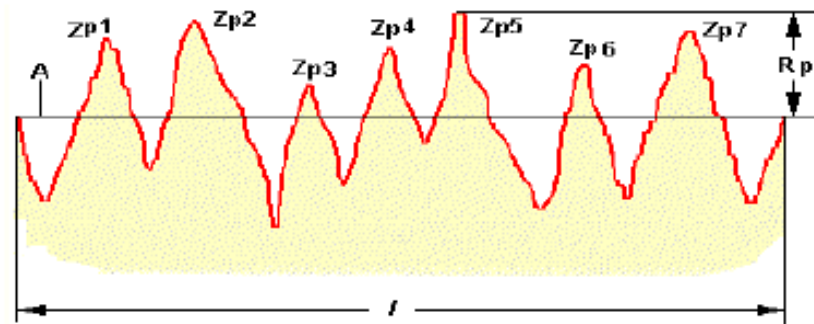


Fonte: Hobson, 2000.

- **R_p – Altura máxima de pico a linha média**

O parâmetro R_p diz respeito ao maior pico avaliado em relação a uma linha média. Este parâmetro pode ser considerado de maior estabilidade se comparado ao R_t. Sua análise é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico do parâmetro R_p



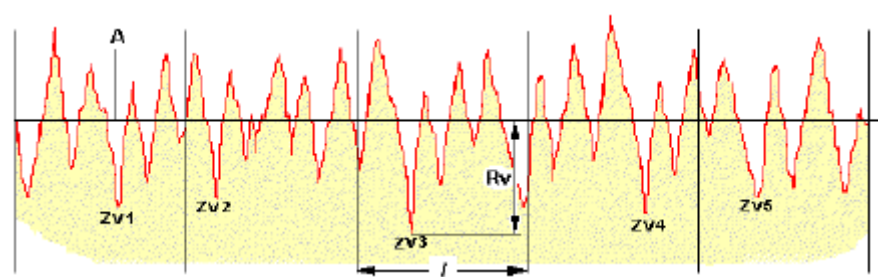
Fonte: Hobson, 2000.

Onde: A = linha média e l = comprimento de amostragem.

- **R_v – Profundidade máxima de vale em relação ao perfil primário**

O parâmetro R_v tem como referência a linha média do perfil e avalia o vale mais profundo em relação à mesma, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Parâmetro R_v



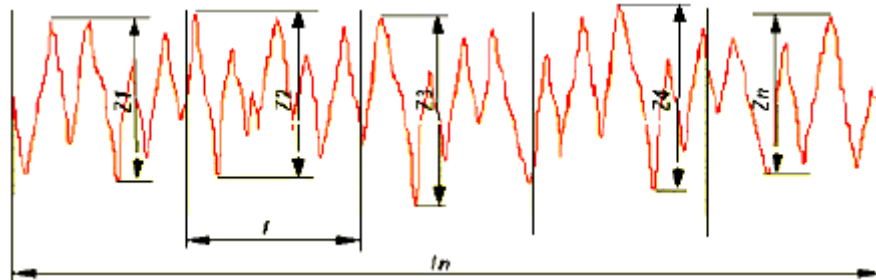
Fonte: Hobson, 2000.

Onde: A = linha média e l = comprimento de amostragem.

- **Rz – Média das amplitudes dos maiores picos e vales nos cut-offs**

Rz é descrito como a média de todos os valores Z no comprimento de avaliação, em que Z é a altura máxima no comprimento de amostragem, como mostra Figura 18.

Figura 18 – Parâmetro Rz



Fonte: Hobson, 2000.

Onde: ln = comprimento de avaliação, l = comprimento de amostragem.

- **Rku – Distribuição e forma dos picos na superfície**

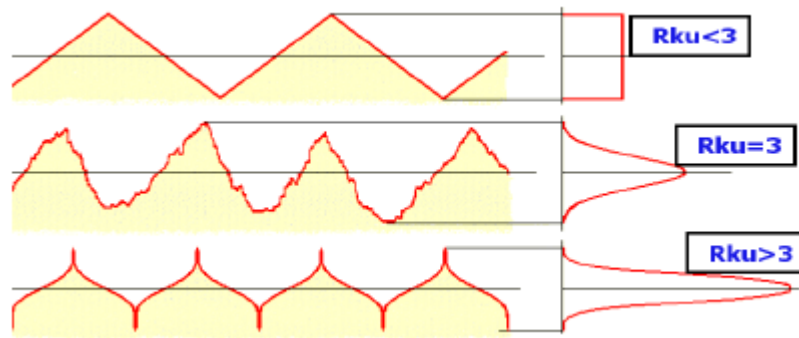
O parâmetro está associado estatisticamente à distribuição de picos ao longo do perfil. Ele considera que se os picos que estão na superfície estão homogeneamente distribuídos, e sua agudez está definida de forma aleatória, a análise de Rku desta superfície irá gerar um valor de referência igual a três, $Rku = 3$.

Se a avaliação do parâmetro Rku gerar um valor inferior a três, a superfície tem indicativo de possuir picos irregulares e mais achatados, $Rku < 3$.

Já se a avaliação de Rku mostrar um valor superior a três, indica que a superfície possui picos mais agudos e com pouco achatamento, $Rku > 3$.

A figura 19 mostra uma esquematização dos possíveis perfis gerados em relação ao parâmetro Rku.

Figura 19 – Caracterização de Rku

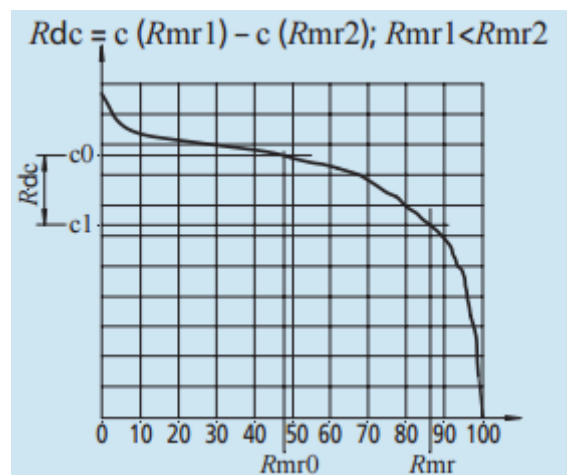


Fonte: Hobson, 2000.

- **Rdc – Diferença da altura de seção do perfil de rugosidade**

O parâmetro Rdc é descrito como uma medida da diferença vertical entre os níveis de seção de uma proporção dada de material, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Representação do Parâmetro Rdc

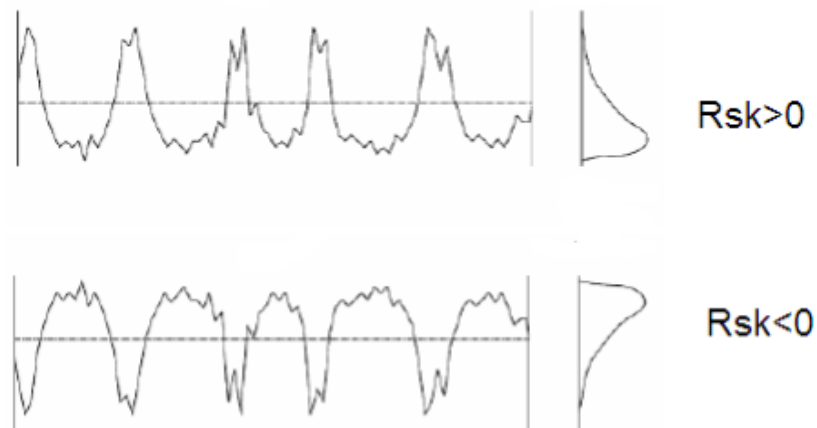


Fonte: Tavares, 2012.

- **Rsk - Orientação do perfil de rugosidade**

O parâmetro Rsk é uma medida da orientação do perfil de rugosidade e é também chamado de fator de simetria, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Parâmetro Rsk



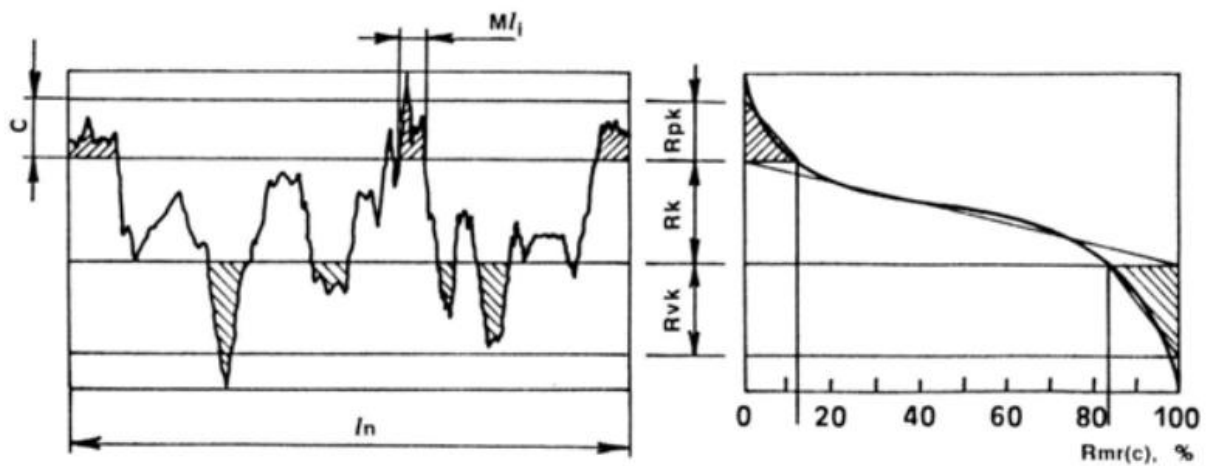
Fonte: Hobson, 2000.

- **Rmr – Proporção de material do perfil de rugosidade**

O parâmetro Rmr é representativo da proporção do material determinada em um nível de secção do perfil Rdc (ou Pdc ou Wdc), relacionada ao nível de secção de referência c, ou seja, é a razão entre o comprimento de sustentação do perfil de rugosidade a um dado nível de corte c, e o comprimento de avaliação.

A Figura 22, mostra o gráfico para avaliação do parâmetro Rmr.

Figura 22 – Parâmetro Rmr



Fonte: Tavares, 2012.

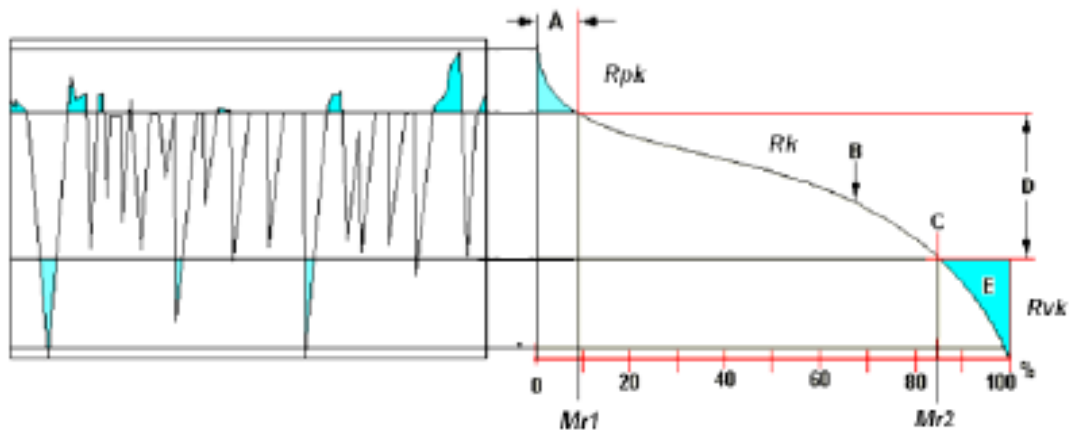
3.4.3 Curva de Abbott – Firestone

De acordo com Hobson (2000) a curva de Abbott-Firestone pode ser obtida a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade. Ela possui os limites entre 0% e 100%.

A curva é composta por uma série de parâmetros (série Rk) que podem ser localizados ao longo do esboço da curva.

A Figura 23 mostra um gráfico esquematizando todos os parâmetros R_k envolvidos na análise da curva.

Figura 23 – Curva de Abbott-Firestone e parâmetros da série R_k



Fonte: Hobson, 2000.

Cada parâmetro dentro da curva destaca informações particulares, que são referentes à região de análise da superfície.

- **R_{pk} - Região de pico**

É o parâmetro associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies em contato.

- **R_{vk} – Região de vale**

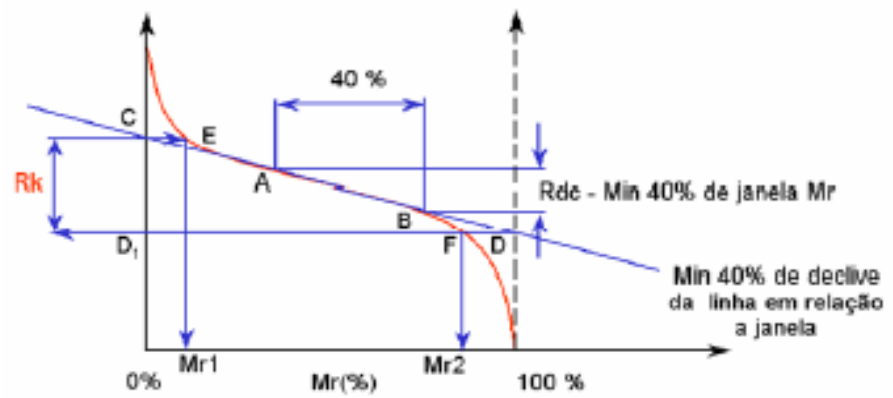
É o parâmetro que relaciona os sulcos que estão presentes na superfície.

- **R_k – Região de máximo contato**

É o parâmetro associado à parte intermediária da rugosidade e que influencia no desempenho de certas superfícies. Este parâmetro quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato.

A Figura 24 mostra como é feita a análise do parâmetro R_k .

Figura 24 – Representação gráfica de R_k



Fonte: Hobson, 2000.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para a realização dos testes, o material escolhido para a estampagem foram chapas de Alumínio, na dimensão de 200 mm x 200 mm e espessura de 1 mm. A tabela 1 abaixo apresenta a composição química da liga de Alumínio utilizada para a confecção das chapas.

Tabela 1 – Composição das chapas de Alumínio

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA (%)

Si + Fe	1,00	Mg	0,05
Cu	0,05	Zn	0,10
Mn	0,05	Cr	0,05
Al	Diferença		

Fonte: Certificado fornecido pela BELMETAL.

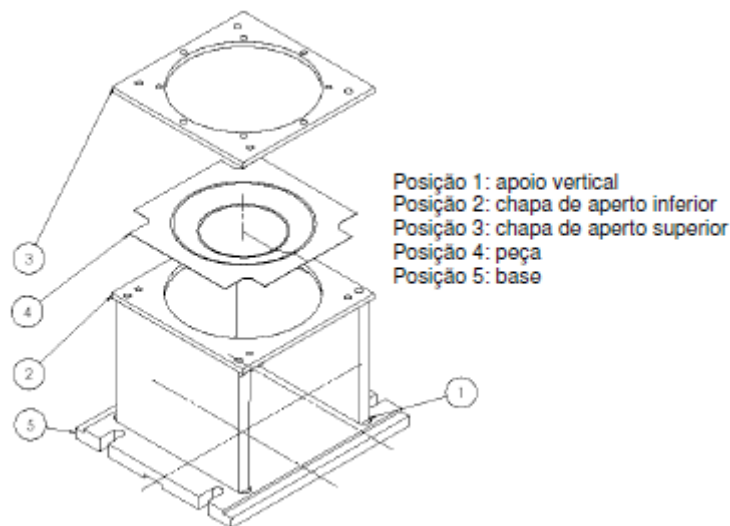
Foi utilizada para a realização da estampagem incremental uma máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC), Discovery 560 (BridgePort), fabricado pela empresa ROMI. O motivo da escolha deve-se a: disponibilidade desta máquina, fácil programação, fácil manuseio, tamanho da peça, capacidade do comando. Foi realizada a programação da máquina utilizando os comandos do *software* EdgeCAM, que apresenta ciclos avançados de usinagem permitindo trabalhar desde a geometria mais simples a mais complexa. O programa gerado no *software* foi transferido via online para a memória da máquina de usinagem. O Laboratório de Processos de Fabricação Mecânica da Universidade PUC-MG dispõe um centro de usinagem com características adequadas para a realização de estampagem incremental, por esse motivo foi o local escolhido para a realização dos testes deste trabalho.

Conforme a literatura técnica há uma variedade de tipos e materiais utilizados em ferramentas de estampar. Optou-se neste trabalho utilizar uma ferramenta de aço inoxidável 304 com a ponta semi-esférica de diâmetro 12 mm e comprimento útil de 100 mm. O acabamento

superficial da ferramenta utilizada nos testes de estampagem foi feito em um torno CNC. A ferramenta de estampar foi presa em um dispositivo chamado mandril, usado para fixar ferramentas em centros de usinagem CNC.

Foi utilizado ainda um dispositivo chamado de Prensa Chapas, que é usado para prender a chapa de alumínio durante o processo de estampagem sobre a mesa da máquina CNC, ele é formado por uma base, um apoio vertical, uma chapa de aperto superior e outra inferior, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Dispositivo de Estampagem Incremental



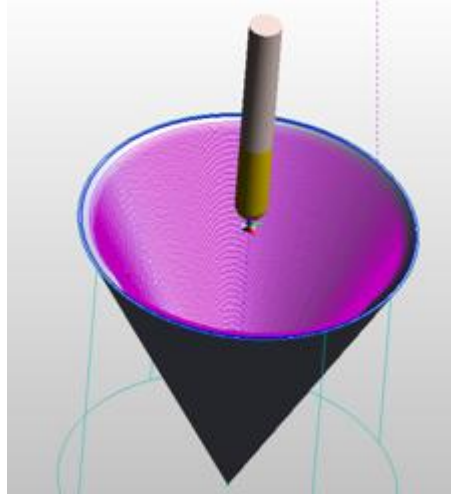
Fonte: Cavaler, 2010.

O dispositivo foi preso na mesa da máquina de usinar por quatro parafusos prisioneiros encaixados na base e fixados por meio de porcas. E a chapa foi fixada ao dispositivo por oito parafusos sextavados encaixados nos furos em torno das duas chapas de aperto, que são móveis o que garante a flexibilidade do dispositivo. Tal configuração permite somente a estampagem de superfícies de revolução, porém, trocando-se as referidas chapas de aperto pode-se também realizar a estampagem de superfícies que tenham outra forma de contorno, quadrada ou retangular por exemplo.

Foi determinado que a geometria escolhida para a estampagem fosse um cone com ângulo de parede de 60°. A geometria da peça conformada pelo processo de Estampagem Incremental,

conforme Figura 26, foi escolhida devido à facilidade de fabricação do dispositivo de fixação e da trajetória da ferramenta.

Figura 26 – Geometria da peça estampada



Fonte: Próprio autor.

Como parte dos equipamentos auxiliares utilizou-se para a medição da rugosidade um rugosímetro portátil, modelo Surtronic S-128, da marca Taylor Hobson/Ametek.

4.2 Metodologia dos Ensaiois

A metodologia empregada nos ensaios foi baseada no processo de Estampagem Incremental SPIF (*Single Point Incremental Forming*) ou Estampagem Incremental com Ponto Simples. Neste tipo de sistema tem-se a ferramenta com movimentação na direção Z e o *blank* movimenta-se simultaneamente nas direções X e Y sem apoio pela sua face inferior.

Para a geração da peça em forma de cone foi empregada uma estratégia de usinagem denominada helicoidal cônica por meio do *software* EdgeCAM. Neste tipo de estratégia a ferramenta executa uma trajetória helicoidal cônica e está sempre em contato com o *blank*.

Os parâmetros de usinagem utilizados na máquina CNC foram descritos na Tabela 2.

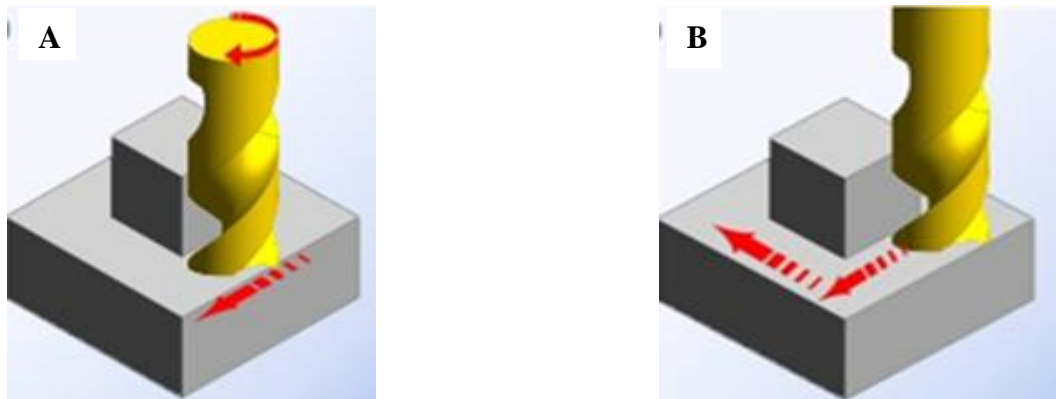
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem

Tolerância	0,01 mm
Avanço vertical	1200 mm/min
Avanço lateral	2000 mm/min
Diâmetro da ferramenta	12 mm
Velocidade da ferramenta ou rotação do fuso mestre	30 rpm
Incremento ou profundidade de corte	0,5 mm
Raio de canto da ferramenta	6 mm

Fonte: Próprio autor.

As Figuras 27, a e b, representam alguns desses parâmetros.

Figura 27 – a) Parâmetro de rotação lateral e b) Parâmetro de avanço, respectivamente.



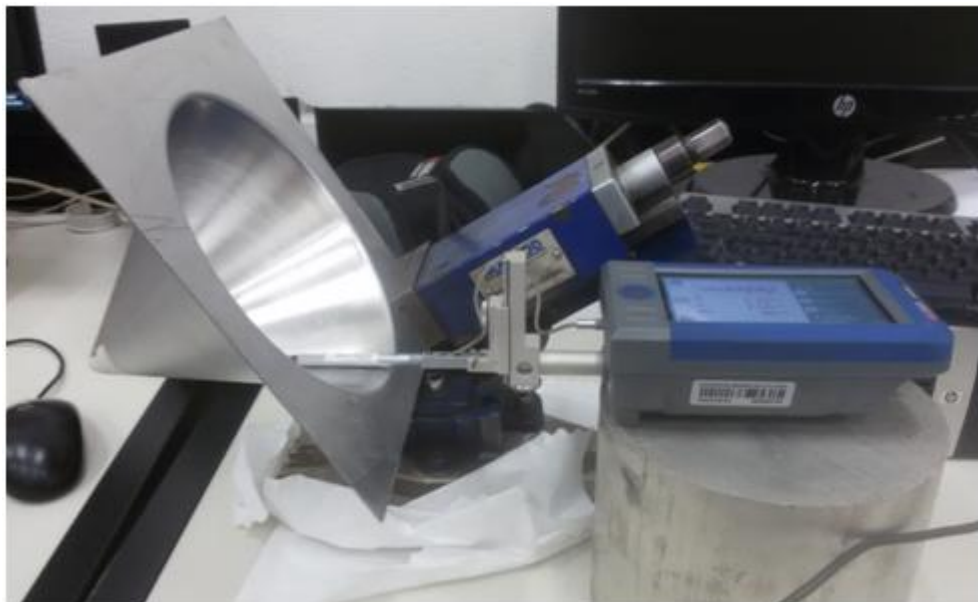
Fonte: Programa CNC/ Siemens.

Os testes de Estampagem Incremental foram realizados variando-se o tipo de lubrificação utilizado, sendo realizados testes sem utilização de lubrificante, teste a seco, em três amostras de chapas de alumínio, em seguida foram conformadas mais três amostras de chapas de alumínio, porém, com uso de lubrificante do tipo vaselina sólida, da marca Jerba Comercial, apresentando como característica ser uma pasta à base de parafinas e óleos minerais, com aspecto sólido e inodoro em temperatura ambiente, e por último foram realizados os testes de estampagem em três chapas de alumínio utilizando-se como lubrificação óleo CGLP 68R, da marca Southquim, com características de óleo mineral parafínico fornecido na viscosidade

ISO 68. Tais variações foram realizadas com o objetivo de avaliar a rugosidade gerada na superfície da peça conformada por meio de Estampagem Incremental utilizando-se diferentes formas de lubrificação. Entre cada ensaio realizado a ferramenta de estampar foi retirada da máquina CNC e polida como uma lixa, a fim de se eliminar qualquer material que estivesse aderido a ponta da ferramenta, como forma de prevenir que as demais peças conformadas sofressem danos devido ao contato tribológico inadequado.

Depois de realizados os testes de Estampagem Incremental as peças de alumínio conformadas foram submetidas ao teste com o rugosímetro eletrônico para determinação dos parâmetros de rugosidade, necessários para comparar as diferentes superfícies das amostras estampadas. As chapas, uma a uma, foram apoiadas em um suporte para que as chapas ficassem niveladas com o apalpador do rugosímetro, conforme Figura 28, que devia ficar o mais paralelo possível com a superfície interior das peças, e então as medições foram realizadas e os gráficos foram gerados em computador pelo *software* Talyprofile vinculado ao rugosímetro. Os parâmetros para medir a rugosidade foram: cut-off de $0,8\ \mu\text{m}$, comprimento de amostragem de 4 mm e filtro gaussiano 2C.

Figura 28 - Medição da rugosidade utilizando rugosímetro eletrônico

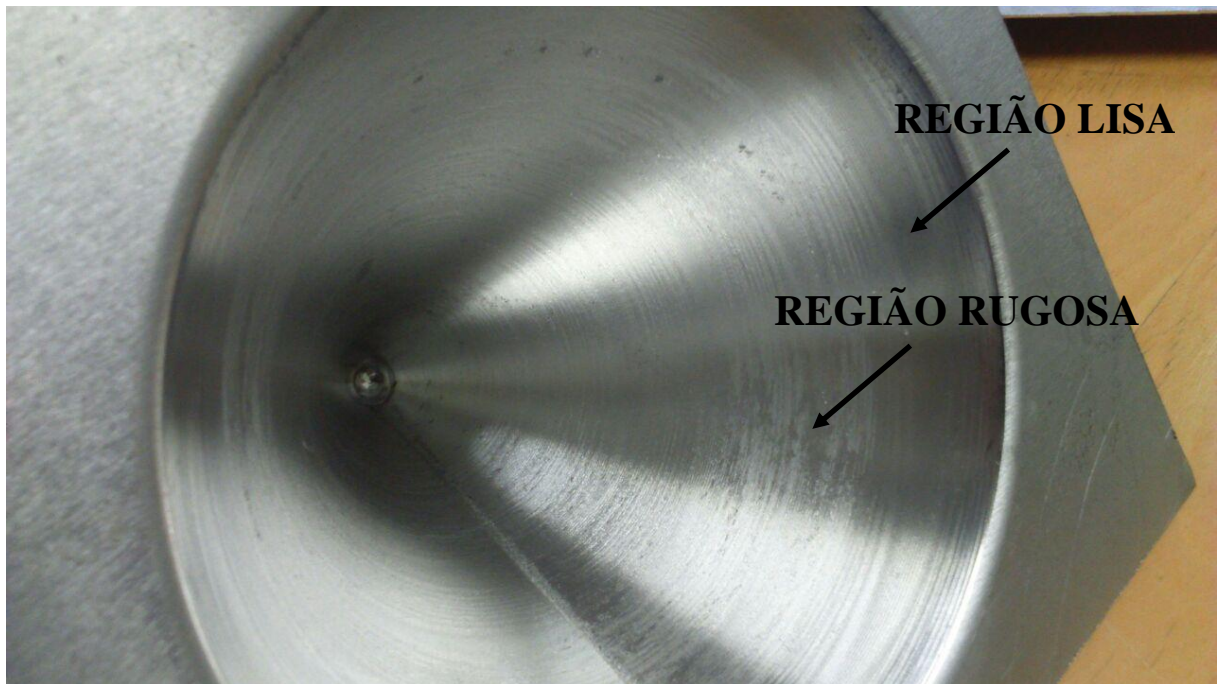


Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados em uma chapa de alumínio laminado com espessura de 1mm, não foi definido o sentido da laminação, uma vez que iria ocorrer estiramento na superfície central da chapa. Nota-se conforme a figura 28, que aparecem duas regiões bem definidas e de aspecto visual divergente, porém não houve alteração significativa nos parâmetros de rugosidade avaliados, e não foi foco no objeto de estudo, podendo talvez atribuir a tal fato alguma variável de direção de laminação.

Figura 29 – Regiões da chapa após a conformação



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos nos ensaios das amostras para cada condição estão listados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Resultados do ensaio

Condição de lubrificação	Número de amostras estampadas	Número de amostras obtidas
A seco	3	1
Vaselina	3	3
Óleo mineral	3	3

Fonte: Próprio autor.

Na condição inicial a seco, na primeira amostra foi possível realizar o ensaio completo cujo tempo foi de 31 minutos, sendo que as 3 medições dos parâmetros de rugosidade que deram origem aos gráficos das Figuras 30, 31, 32 foram coletados nesta amostra. Durante o ensaio nas outras 2 amostras houve um aumento brusco da textura, analisando visualmente, onde ocorreu remoção de material que foi aderido pela ferramenta, ocasionando um desgaste adesivo. A partir deste momento o contato tribológico passou a ser alumínio x alumínio, aumentando o atrito e causando fissuras na chapa, levando ao colapso após 7 minutos de ensaio, conforme ilustrado na Figura 33.

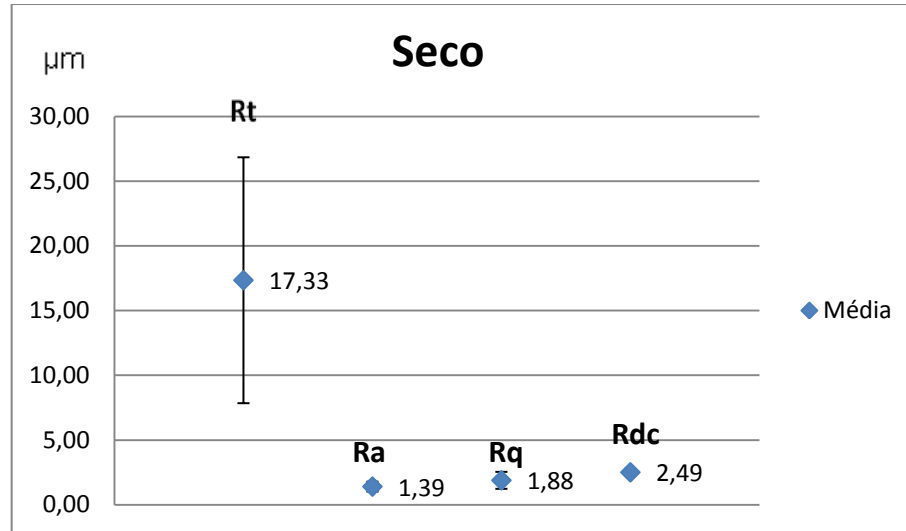
Figura 30– Amostras 2 e 3 conformadas na condição a seco



Fonte: Próprio autor.

A figura 30, apresenta as características dos parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da amostra a seco.

Figura 31 – Amostras 2 e 3 conformadas na condição a seco

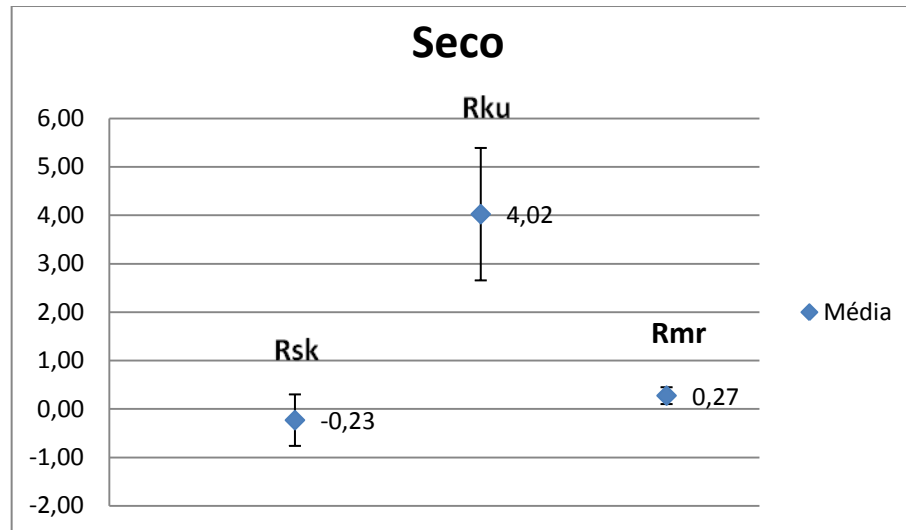


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro de rugosidade média - Ra - apresentou um valor médio de 1,39 μm e desvio padrão médio de 27%, tendo pequena variação dos resultados, podendo atribuir uma homogeneidade dos parâmetros de conformação durante o ensaio. O Rq apresentou um valor médio de 1,88 μm , com desvio padrão de 34%, sendo este valor superior a Ra, o que demonstra a existência de picos ou vales acentuados esporadicamente durante o perfil, podendo ser comprovado pelo valor de Rt, com média de 17,33 μm e desvio padrão de 54% , apresentando uma dispersão de picos e vales, o que pode ser atribuído a pequenos movimentos de *stick slip* durante a conformação. O valor de Rdc realiza uma média de todos os picos e vales, como neste caso foi superior a Ra, tendo média de 2,49 μm e desvio padrão de 10%, evidencia mais uma vez a presença de picos ou vales acentuados.

A figura 31 representa os parâmetros de Rsk, Rku e Rmr da condição a seco.

Figura 32 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição a seco

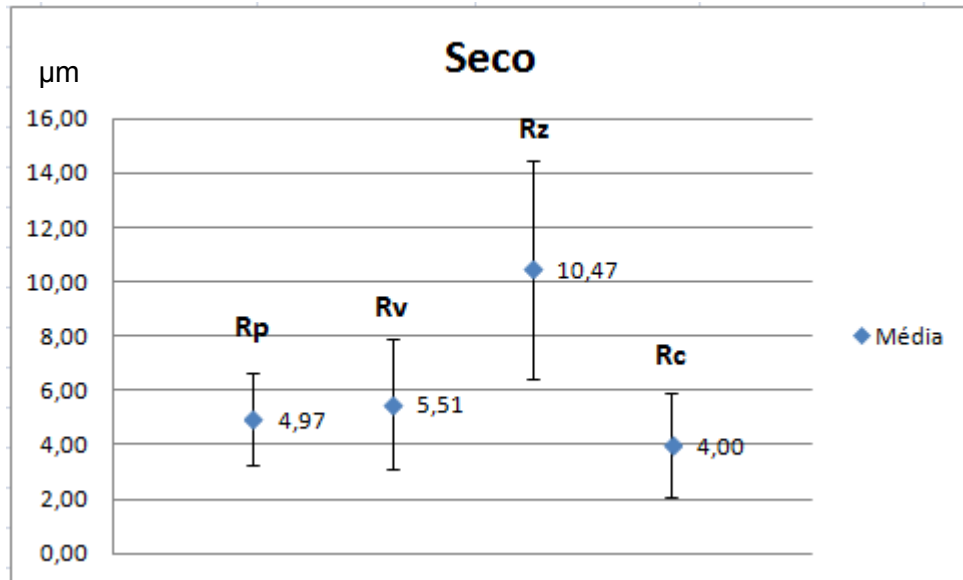


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro Rmr com valor médio de 0,27 e desvio padrão de 64% indica a porção de material a uma profundidade “c”, não identificada pelo rugosímetro utilizado, que indica que a superfície possui pouco material de apoio, sendo uma superfície propensa a desgaste em intervalos menores que as demais superfícies analisadas neste trabalho. Como o valor de Rku fornecido foi de 4,02 e desvio padrão de 34% indica que a superfície possui picos mais agudos e com pouco achatamento, pois foi encontrado um valor com $Rku > 3$, que é tomado como um valor de referência, quando os picos na superfície estão igualmente distribuídos e com agudez aleatória. Já em relação ao valor de Rsk igual a -0,23 indica que o valor negativo observado para Rsk aponta que as irregularidades da superfície possuem um formato da distribuição distorcida para cima, ou seja, caracterizada por sulcos que servem como depósito para lubrificantes. Este valor negativo também indica que as superfícies são menos susceptíveis ao desgaste prematuro.

A figura 32 representa os parâmetros de Rp, Rv, Rz e Rc da condição a seco.

Figura 33 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição a seco



Fonte: Próprio autor.

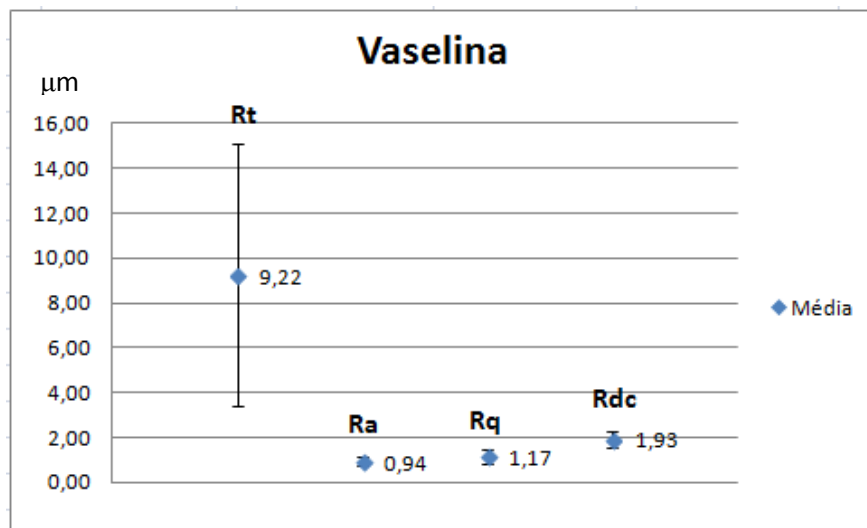
Ainda para a condição inicial a seco o valor de 4,97 μm e desvio padrão de 34% encontrado para o parâmetro Rp indica a altura máxima do maior pico do perfil, ou seja, a distância do pico máximo à linha média. O parâmetro Rv com valor encontrado de 5,51 μm com desvio padrão de 44% indica em contrapartida a distância máxima do vale mais profundo do perfil em relação à linha média. O valor de 10,47 μm e desvio padrão 38% para Rz indica a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos do perfil dentro de um comprimento medido, e um valor alto para esse parâmetro se mostra como mais uma evidência para a discrepância entre picos e vales da superfície. Rz, isoladamente pode ser considerado mais sensível a mudanças no acabamento superficial que Ra, por exemplo, isso porque somente alturas máximas de perfis, e não suas médias são comparadas e analisadas. Já o parâmetro Rc com valor de 4,00 μm e desvio padrão de 48% toma todas as amplitudes de picos e vales da análise e indica uma média aritmética de todos os resultados.

Para condição com lubrificação de vaselina, foi possível realizar o ensaio completo para as três amostras sem que houvesse ruptura da chapa em um tempo médio de 28 minutos, sendo

os valores dos gráficos, Figuras 33, 34 e 35, encontrados para os parâmetros de rugosidade uma média das medidas das três amostras.

A figura 33, apresenta as características dos parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da amostra com vaselina.

Figura 34 - Parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da condição com vaselina

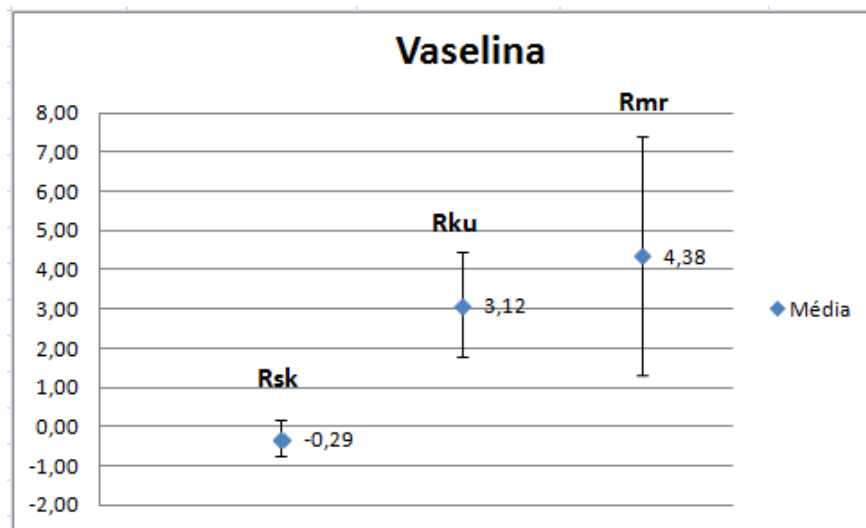


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro de rugosidade média - Ra - apresentou um valor médio de 0,94 µm e desvio padrão médio de 24%, tendo pequena variação dos resultados, podendo atribuir uma homogeneidade dos parâmetros de conformação durante o ensaio. O Rq apresentou um valor médio de 1,17 µm, com desvio padrão de 29%, sendo este valor superior a Ra, o que demonstra a existência de picos ou vales acentuados esporadicamente durante o perfil, podendo ser comprovado pelo valor de Rt, com média de 9,22 µm e desvio padrão de 63% , apresentando uma dispersão de picos e vales, o que pode ser atribuído a pequenos movimentos de *stick slip* durante a conformação. O valor de Rdc realiza uma média de todos os picos e vales, como neste caso foi superior a Ra, tendo média de 1,93 µm e desvio padrão de 20%, evidencia mais uma vez a presença de picos ou vales acentuados.

A figura 34 representa os parâmetros de Rsk, Rku e Rmr da condição com lubrificação de vaselina.

Figura 35 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição com vaselina.

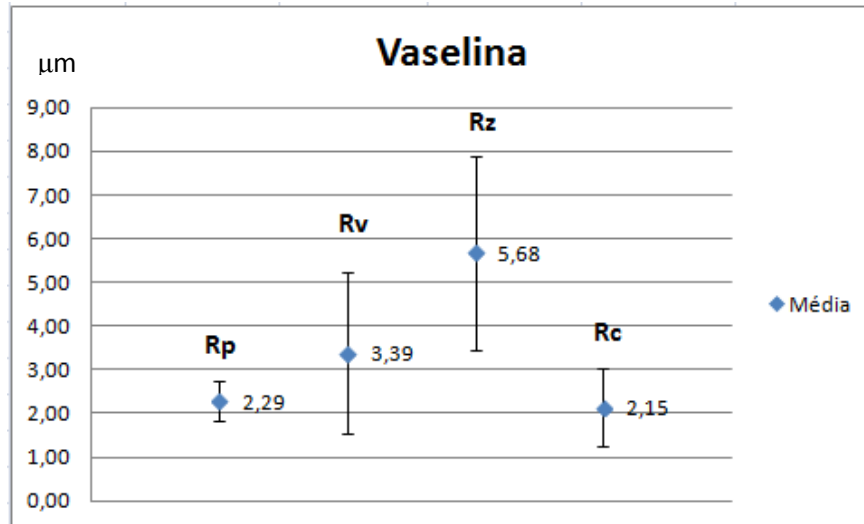


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro Rmr com valor médio de 4,38 e desvio padrão de 69% indica a porção de material a uma profundidade “c”, não identificada pelo rugosímetro utilizado, que indica que a superfície possui relativamente grande quantidade de material de apoio, sendo comparativamente uma superfície menos propensa a desgaste em relação à análise da superfície da condição anterior, a seco. Como o valor de Rku fornecido foi de 3,12 e desvio padrão de 42% indica que a superfície possui picos agudos e com pouco achatamento, mas em menor quantidade, pois foi encontrado um valor para Rku pouco maior do que 3, que é tomado como um valor de referência conforme indicado por Whitehouse (1994). Já em relação ao valor de Rsk igual a -0,29 indica que o valor negativo observado para Rsk aponta que as irregularidades da superfície possuem um formato da distribuição distorcida para cima, ou seja, caracterizada por sulcos que servem como depósito para lubrificantes.

A figura 35 representa os parâmetros de Rp, Rv, Rz e Rc da condição de vaselina como lubrificante.

Figura 36 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição com vaselina



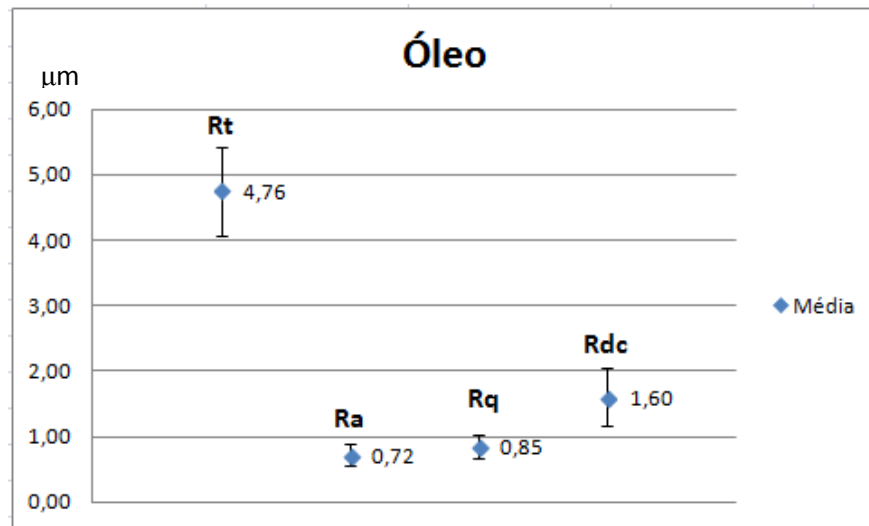
Fonte: Próprio autor.

Ainda ao se analisar a condição utilizando vaselina como lubrificante o valor de 2,29 µm e desvio padrão de 20% encontrado para o parâmetro Rp indica a altura máxima do maior pico do perfil, ou seja, a distância do pico máximo à linha média. O parâmetro Rv com valor encontrado de 3,39 µm com desvio padrão de 54% indica em contrapartida a distância máxima do vale mais profundo do perfil em relação à linha média. O valor de 5,68 µm e desvio padrão 39% para Rz indica a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos do perfil dentro de um comprimento medido, e o valor encontrado é comparativamente menor que o da condição de ensaio anterior e se mostra como uma evidência para uma relativamente menor discrepância entre picos e vales da superfície. Já o parâmetro Rc com valor de 2,15 µm e desvio padrão de 42% toma todas as amplitudes de picos e vales da análise e indica uma média aritmética de todos os resultados.

Para última condição analisada com lubrificação a óleo, também foi possível realizar o ensaio completo para as três amostras sem que houvesse ruptura da chapa em um tempo médio aproximado de 27 minutos, sendo os valores dos gráficos obtidos- Figuras 36, 37 e 38 -para os parâmetros de rugosidade, uma média das medidas para as três amostras.

A figura 36, apresenta as características dos parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da amostra com o lubrificante óleo.

Figura 37 - Parâmetros Ra, Rt, Rq e Rdc da condição a óleo

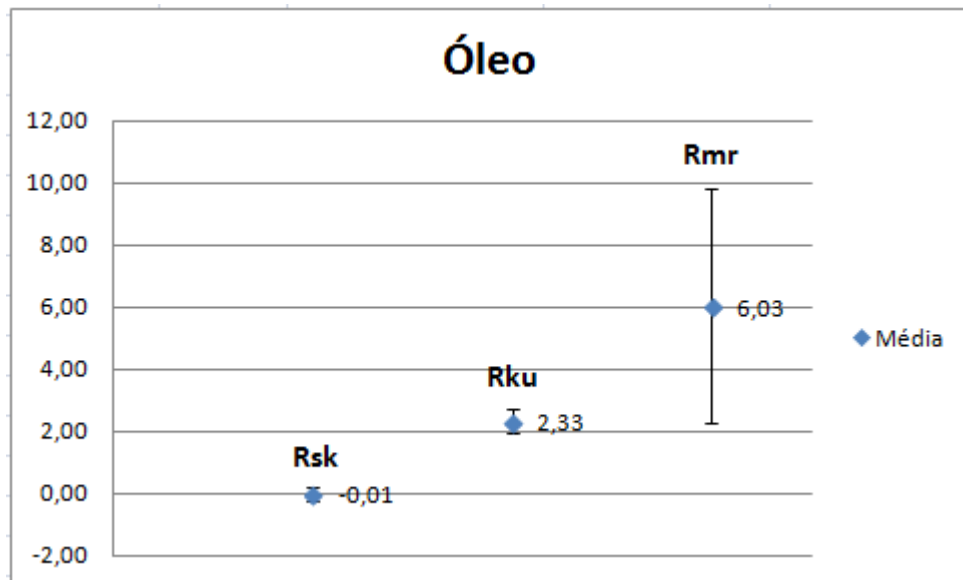


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro Ra, que representa a rugosidade média, apresentou um valor médio de 0,72 μm e desvio padrão médio de 23%, tendo pequena variação dos resultados, podendo atribuir uma homogeneidade dos parâmetros de conformação durante o ensaio. O parâmetro Rq apresentou um valor médio de 0,85 μm , com desvio padrão de 20%, sendo este valor muito próximo do valor de Ra, o que demonstra que há uma menor quantidade de picos ou vales com valores do perfil que se afastam da média, sendo estes distribuídos de forma mais homogênea, quando comparado aos demais ensaios. Podendo ser comprovado ainda pelo valor de Rt, com média de 4,76 μm e desvio padrão de 15%, apresentando uma menor dispersão de picos e vales, o que pode ser atribuído a movimentos de *stick slip* mais suaves durante a conformação. O valor de Rdc realiza uma média de todos os picos e vales, como neste caso foi, comparativamente, superior a Ra, mas com um valor menor que os demais métodos, tendo média de 1,60 μm e desvio padrão de 27%, evidencia mais uma vez a presença de picos ou vales distribuídos de forma mais homogênea.

A figura 37 representa os parâmetros de Rsk, Rku e Rmr da condição com lubrificação utilizando óleo.

Figura 38 – Parâmetros Rsk, Rku e Rmr da condição a óleo

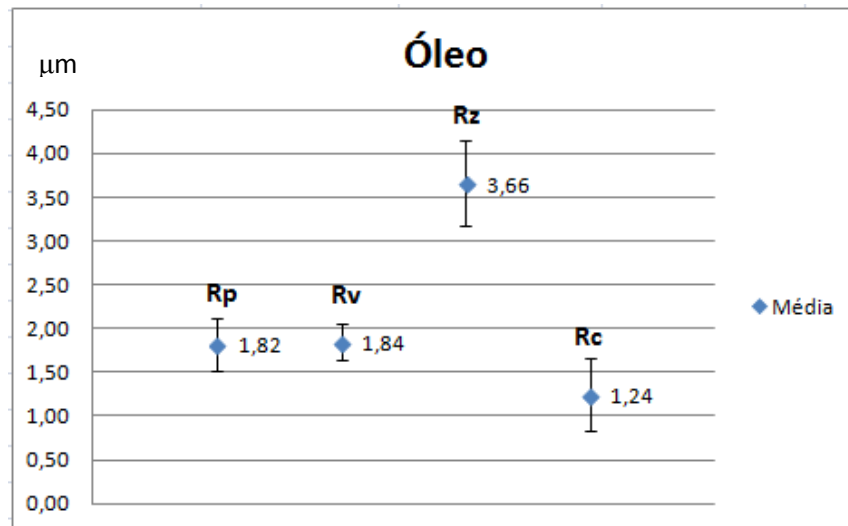


Fonte: Próprio autor.

O parâmetro Rmr com valor médio de 6,03 e desvio padrão de 63% indica a porção de material a uma profundidade “c”, não identificada pelo rugosímetro utilizado, que indica que a superfície possui comparativamente com os outros ensaios uma maior quantidade de material de apoio, sendo assim uma superfície menos propensa a desgaste em relação à análise das superfícies das condições anteriores. Como o valor de Rku fornecido foi de 2,33 e desvio padrão de 17% indica que a superfície possui picos irregulares e mais achatados, pois foi encontrado um valor para Rku < 3, considerado um valor de referência conforme Whitehouse (1994). Já em relação ao valor de Rsk igual a -0,01 indica que o valor observado para Rsk, é negativo, mas se considerarmos o desvio padrão esse valor pode ser definido como sendo muito próximo de zero indica aponta que as irregularidades da superfície possuem um formato de distribuição mais simétrico, com o perfil distorcido para cima e para baixo na mesma proporção, característica de uma superfície mais homogênea como indica também os demais parâmetros.

A figura 38 representa os parâmetros de Rp, Rv, Rz e Rc da condição de óleo como lubrificante.

Figura 39 – Parâmetros Rp, Rv, Rz e Rc da condição a óleo



Fonte: Próprio autor.

Por fim ao se analisar os últimos parâmetros para a condição de óleo como lubrificante o valor de 1,82 µm e desvio padrão de 16% encontrado para o parâmetro Rp indica a altura máxima do maior pico do perfil, e mostra a distância do pico máximo à linha média como inferior as demais condições. O parâmetro Rv com o valor de 1,84 µm com desvio padrão de 11% indica em contrapartida a distância máxima do vale mais profundo do perfil em relação à linha média, e mais uma vez o valor encontrado é menor se comparado aos ensaios anteriores, o que indica novamente a homogeneidade do perfil. O valor de 3,66 µm e desvio padrão 13% para Rz indica a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos do perfil dentro de um comprimento medido, e o valor encontrado é comparativamente muito menor que o das condições de ensaio anteriores e se mostra como mais uma evidência para uma menor discrepância entre picos e vales da superfície. Somando a isso, o parâmetro Rc com valor de 1,24 µm e desvio padrão de 33% toma todas as amplitudes de picos e vales da análise e indica uma média aritmética de todos os resultados muito menor que a encontrada para os ensaios anteriores, e confirma os indícios de que as chapas conformadas utilizando óleo como lubrificante possuem um perfil de rugosidade mais homogêneo dentre todas as condições analisadas.

Para melhor visualização dos resultados obtidos os parâmetros médios encontrados durante os ensaios foram listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Média dos parâmetros de rugosidade para cada condição de lubrificação

	Condição a seco	Vaselina	Óleo
Rmr	0,27	4,38	6,03
Rku	4,02	3,12	2,33
Rsk	-0,23	-0,29	-0,01

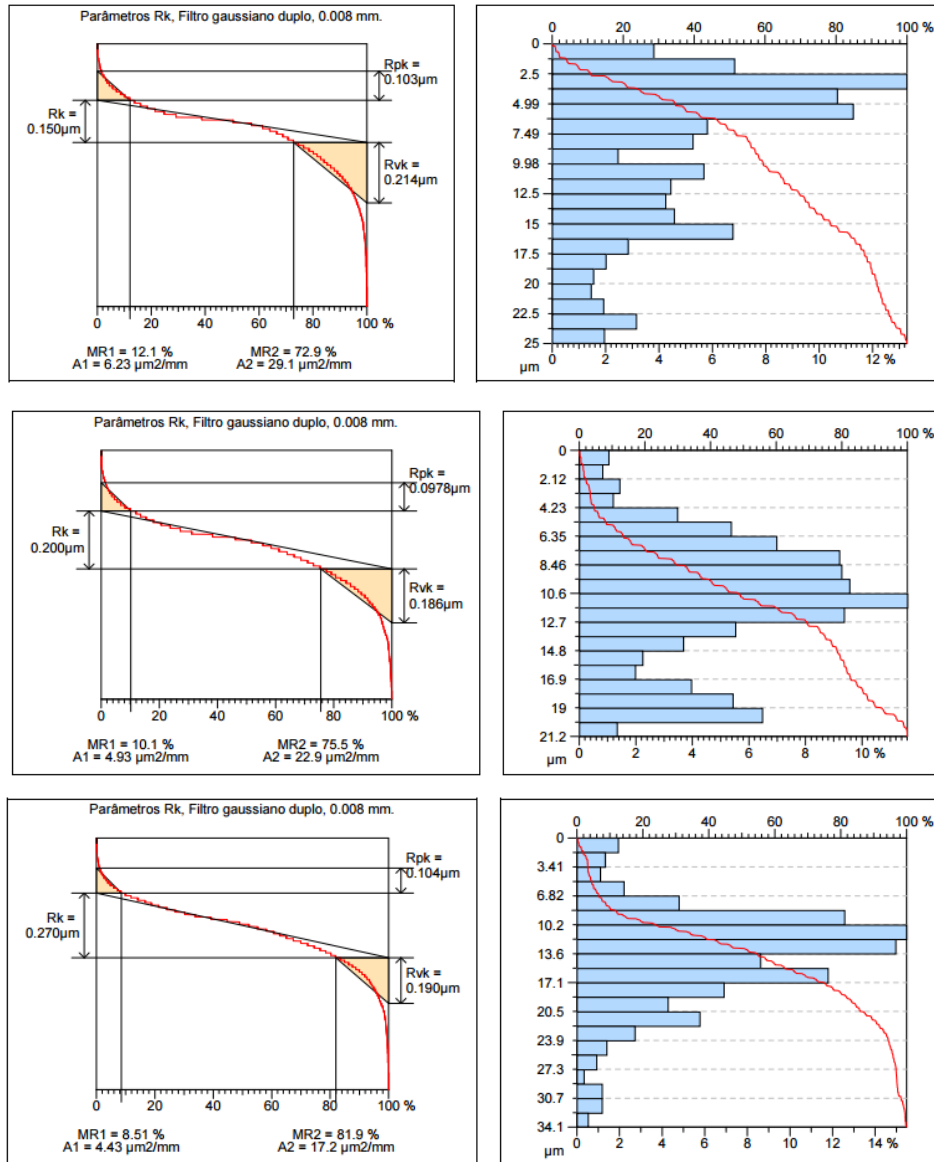
	Condição a seco	Vaselina	Óleo
Ra (μm)	1,39	0,94	0,72
Rq (μm)	1,88	1,17	0,85
Rt (μm)	17,33	9,22	4,76
Rdc (μm)	2,49	1,93	1,60

	Condição a seco	Vaselina	Óleo
Rp (μm)	4,97	2,29	1,82
Rv (μm)	5,51	3,39	1,84
Rz (μm)	10,47	5,68	3,66
Rc (μm)	4,00	2,15	1,24

Fonte: Próprio autor.

Como última análise dos parâmetros de rugosidade, foi gerada uma Curva de Abbott Firestone para cada amostra em cada condição de lubrificação e uma curva média foi considerada para as amostras a seco, com vaselina e óleo. Analisando os parâmetros de superfície e considerando utilizar esta técnica na fabricação de peças conformadas que irão trabalhar em contato durante suas atividades em serviço, foram analisadas as curvas médias de Abbott Firestone. Observou-se que a rugosidade central R_k na amostra utilizando óleo como lubrificante obteve em média um valor de $0.150 \mu\text{m}$, comparado com a amostra lubrificada com vaselina que possui R_k médio de $0.200 \mu\text{m}$ e a condição a seco com valor médio de $0.270 \mu\text{m}$. Os gráficos da Figura 39 representam a curva de Abbott Firestone das condições ensaiadas.

Figura 40 – Gráficos das amostras nas condições utilizando óleo como lubrificante, Vaselina e sem lubrificação (a seco) respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

O parâmetro Rk é definido como sendo a parcela central da banda de rugosidade. Para a determinação deste parâmetro é traçada uma secante de menor inclinação possível sobre a curva de Abbott-Firestone, cuja componente horizontal corresponde a 40%. O parâmetro Rk representa a diferença de altura entre a intersecção desta reta com o eixo de 100% e o eixo de 0% e os pontos $Mr1$ e $Mr2$ (%) correspondem à intersecção entre o perfil de referência e as retas paralelas ao eixo de % definindo o parâmetro Rk . Por isso, Rk é considerado o valor da rugosidade do núcleo do perfil. Dessa forma, um menor valor para Rk é indicativo de uma superfície mais homogênea, com um perfil de rugosidade mais uniforme. Considerando os

valores encontrados para cada condição, mais uma vez as chapas conformadas com o lubrificante óleo, valor de R_k igual $0,150 \mu\text{m}$, se mostram como as que apresentam uma homogeneidade superficial maior em relação às condições sem lubrificação (a seco) e com vaselina como lubrificante.

6. CONCLUSÃO

O processo de Estampagem Incremental exige uma avaliação do contato entre peça e ferramenta visando garantir a eficiência do processo. Os lubrificantes analisados apresentaram pequena diferença nos parâmetros avaliados. O óleo mineral (SAE 68) obteve um pouco mais de eficiência em relação à vaselina. A condição a seco foi limitada por questões tribológicas ocorrendo adesividade severa entre ferramenta e peça.

Os parâmetros superficiais Ra, Rt, e Rz mantiveram uma faixa de proporcionalidade, sendo que a condição mais eficiente, utilizando óleo mineral, apresentou Ra de 0,72 μm e a condição menos eficiente a seco apresentou Ra de 1,39 μm . A variação dos resultados de rugosidade do lubrificante óleo e vaselina se manteve na ordem de 23%. A condição a seco obteve o maior Rt, sendo 3 vezes superior ao da condição a óleo, o mesmo ocorreu para o parâmetro Rz.

Os demais parâmetros Rp, Rdc, Rc e Rv comprovaram a mesma relação dos parâmetros Ra, Rt e Rz, sendo que a condição a óleo obteve os melhores valores, seguidos do ensaio utilizando vaselina e do ensaio sem lubrificação, este, que foi interrompido pelo rompimento da chapa, em duas das três amostras estampadas.

Com base no parâmetro Rsk, a condição lubrificada com óleo obteve um perfil simétrico com vales e picos distribuídos uniformemente. Avaliando o parâmetro Rku foi observado que a condição a óleo possui picos irregulares e mais achatados, as chapas lubrificadas com vaselina e a seco apresentaram picos mais agudos e com pouco achatamento. Ao avaliar o parâmetro Rmr a condição a óleo apresentou novamente o melhor resultado, Enquanto nos perfis obtidos na chapa sem lubrificação, devido à predominância de picos agudos, quase não houve porção de material significativa para suportar o período de amaciamento da superfície, ou seja, apresentaria desgaste prematuro.

As curvas de Abbott Firestone dos ensaios realizados auxiliaram na avaliação dos resultados e demonstraram novamente que a condição lubrificada a óleo foi mais eficiente em situações em que as peças fabricadas no processo de Estampagem Incremental fossem utilizadas trabalhando em contato com outros componentes. Considerando que as peças fabricadas não tivessem contato tribológico durante sua aplicação em serviço a condição lubrificada a óleo e com vaselina atendem ao processo de fabricação proposto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLWOOD, J. M., BRAMLEY, A. N., Ridgman, T. W., MILEHAM, A. R. **A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005: 323-327p.

AMBROGIO, G et al. **Formability of lightweight alloys by hot incremental sheer forming.** Materials and Design, Rende (CS), Italy, p.501-508, 2012.

ATTANASIO, A; CERETTI, E; GIARDINI, C. **Optimization of tool path in two points incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 409-412, 2006.

CASTELAN, J. **Utilização das Tecnologias CAD/CAM para Estampagem Incremental do alumínio Série 1000.** Porto alegre. 2007. Dissertação de Mestrado.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano.** UFRGS. Porto alegre. 2010. Tese de Doutorado.

CAVALER, L.C.D.C. **Parâmetros de conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto alegre, p.74.2010. Tese de Doutorado.

CERETTI, E; GIARDINI, C; ATTANASIO, A. **Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines.** Journal of Materials Processing Technology, Brescia, Italy, p 176-184, 2004.

DUFLOU, J.R et al. **Process window enhancement for single point incrememntal forming through multi-step tool paths.** CIRP Annals- Manufacturing Technology, p.253-256, 2008.

ECHRIF, S.B.M. and M. Hrairi. **Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes.** Materials and Manufacturing Processes, 2011. p. 1404-1414.

EMMENS, W.C.; BOOGAARD, A.H.V.D. **An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming.** Journal of Materials Processing Technology, p. 3688-3695, 2009.

FRANZEN, V., KWIATKOWSKI, L., MARTINS, P.A.F., TEKKAYA, A.E.. **Single point incremental forming of PVC**. Journal of Materials processing technology, 2009: 462-469p.

HIRT, G., JUNK, S., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I., AMES, J. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), 2005: 12p.

HOBSON, T.P. **Guide to surface Texture Parameters**.2000.

HUSSAIN, G., GAO, L., HAYAT, N., ZIRANA, X. **A new formability indicator in single point incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology, 2009: 4237–4242p

JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFLOU, J., ALLWOOD, J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. Katholieke Universiteit Leuven, 2005: 27p.

KOPAC, J; KAMPUS,Z. **Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool**. Journal of materials Processing Technology, p. 622-628, 2005.

LAMMINEN, L. et al. **Incremental Sheet forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their effect on Component Design**. Trans Tech Publications – TTP, p. 457-464, 2005.

MARTINS, P. A. F., KWIATKOWSKI, L., FRANZEN, V., TEKKAYA, A. E., KLEINER, M. **Single point incremental forming of polymers**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008: 229-232p.

MCLOUGHLIN, K. <http://www.irishscientist.ie>. Institute of technology Tallaght., 2005.

PAUNOIU, V. e NICOARA, V. **Simulation of friction in deep drawing process**. National Tribologi Conference. University “Dunarea de Joss” Galati. 2006.

PARK, J.J. e Ji, Y.H. **Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature**. Journal of Materials Processing Technology, 2003. **201**(1–3): p. 354-358.

RODRIGUES, J.:MARTINS,P. **Tecnologia Mecânica**. [S.l.]:Escolar,2005.

SILVA, P.J.D. **Estampagem Incremental Utilizada para Prototipagem de Carenagem de aerogerados**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 113. 2011. Dissertação de Mestrado.

TAVARES, J.M.R.S. **CFAC: Indicação dos Estados de Superfície**. Universidade do Porto. Portugal, Porto, p. 47.

Tuomi J., Lamminen L. **Incremental Sheet Forming as a Method for Sheet Metal Component prototyping and Manufacturing**. 10^o Assises Europeennes de Prototypage Rapide, 2004.

WHITEHOUSE, David J. **Handbook of Surface Metrology**. Leicester – England, 1994.