PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel Miranda Horta

ANÁLISE DO ESTADO LIMITE DO AÇO AISI 304 CONFORMADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO INCREMENTAL DE CONTATO ÚNICO

> Belo Horizonte 2015

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel Miranda Horta

ANÁLISE DO ESTADO LIMITE DO AÇO AISI 304 CONFORMADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO INCREMENTAL DE CONTATO ÚNICO

> Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jánes Landre Júnior

Belo Horizonte 2015

FICHA CATALOGRÁFICA Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

H821a	Horta, Daniel Miranda Análise do estado limite do aço AISI 304 conformado através do processo de conformação incremental de contato único / Daniel Miranda Horta. Belo Horizonte, 2015. 88 f. : il.
	Orientador: Janes Landre Júnior Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
	 Conformação de metais. 2. Aço inoxidável. 3. Dureza. 4. Metais – Fratura. Estampagem (Metais). 6. Aspereza de superfície. I. Landre Júnior, Janes. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título. SIB PUC MINAS
	CDU: 621.7.04

Daniel Miranda Horta

ANÁLISE DO ESTADO LIMITE DO AÇO AISI 304 CONFORMADO ATRAVÉS DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO INCREMENTAL DE CONTATO ÚNICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Jánes Landre Júnior (Orientador) – PUC Minas

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC Minas

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior - PUC Minas

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício - CEFET MG

Belo Horizonte, 31 de Julho de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas que me ajudaram em todas as etapas deste trabalho;

À Minha família, meu pai Renato, minha mãe Graça e meus irmãos, pela ajuda, força e fé depositada em mim.

Ao Prof. Jánes Landre Júnior e ao Prof. Lúcio Flávio Santos Patrício, pelas orientações, oportunidade de convívio, integridade de caráter e pelos ensinamentos.

Ao Técnico Ítalo do laboratório de Engenharia Mecânica da PUC Minas, por me ajudar no desenvolvimento e execução dos experimentos.

Ao técnico Misael, do Laboratório de Ensaios do curso de Engenharia Civil da PUC Minas.

Ao professor Luís Henrique Maia pela orientação, ideias e auxílio nas diversas etapas deste trabalho.

À PUC Minas, pela cessão de seus laboratórios e de recursos humanos e de materiais.

RESUMO

O presente trabalho estuda a aplicação do processo de conformação incremental na conformação do aço inoxidável AISI 304. Foi realizado ensaios mecânicos do processo conformação de forma a definir as características e o comportamento do aço inox durante o processo de conformação incremental de contato único (SPIF – *Single Point Incremental Forming*). A caracterização do processo aconteceu através da variação do ângulo de conformação que permitirá a identificação do ângulo para o qual ocorre a fratura do material. A ferramenta utilizada nesse processo possui forma hemisférica de diâmetro de 12,1 mm e foi utilizada com rotação para a redução do atrito entre ela e a chapa a ser conformada. Os parâmetros estudados através dos ensaios foram: o intervalo útil do ângulo de conformação através da relação entre a dureza e a região analisada em cada ensaio, compreender que a espessura possui uma menor variação durante o processo de conformação durante o processo de semi-ângulo de 45°.

Palavras-chave: Conformação incremental de contato único. SPIF. Aço inoxidável AISI 304. Dureza. Espessura

ABSTRACT

This research studies uses the incremental forming process in the forming of staineless steel AISI 304. Mechanical tests was carried out of the forming process in order to define the characteristics and behavior of the stainless steel during the incremental forming process single contact (SPIF). The characterization of the process take place by varying the angle conformation allowing identification of the angle at which the fracture of the material occurs. The tool used in this process has hemispherical shape of 12.1 mm diameter and rotation was used to reduce friction between it and the plate to be shaped. The parameters that was studied through the tests were: the useful range of the angle forming, the roughening process applied in each angle and the hardness through the geometry formed during the tests. It was possible to determine the forming limit state by the relationship between the hardness and the area analyzed in each experiment, understood that the thickness has a smaller variation during the forming process of the half angle of 45 °.

Key-words: Incremental Forming Process Single Contact. SPIF. Staineless Steel AISI 304. Hardness. Thickness.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ferramenta de Estampagem	26
Figura 2 - Regiões peça após estampagem	28
Figura 3 - Elemento de volume infinitesimal definido numa peça de revolução	29
Figura 4 - Representação de elemento definido pelos planos π 1, π 2, π 3 e π 4	30
Figura 5 - Material sofrendo uma imperfeição devido a condição de tensão	32
Figura 6 - Diagrama convencional de limite de conformação	33
Figura 7 - Curva limite de conformação convencional	33
Figura 8 - Grade circular desenhada no corpo de prova	34
Figura 9 - Grade circular marcada no corpo de prova	35
Figura 10 - Representação da CLC e da FFL	35
Figura 11 - CLC de Materiais de Alta e Baixa Ductilidade	36
Figura 12 - Etapas do processo de conformação incremental	38
Figura 13 - Cone formado após conformação incremental	39
Figura 14 - Principais grandezas da conformação incremental	40
Figura 15 - Áreas de análise de tensões de cisalhamento	43
Figura 16 - Estado de tensões da SPIF	44
Figura 17 - Perfil de Rugosidade	55
Figura 18 - Fluxograma	60
Figura 19 - Início do ensaio de conformação incremental	63
Figura 20 - Final do ensaio de conformação incremental	63
Figura 21 - Cone conformado	64
Figura 22 - Demarcação das regiões de medição da rugosidade	65
Figura 23 - Evolução da rugosidade em função da profundidade do cone	71
Figura 24 - Comparativos entre dureza interna e dureza externa do cone conform	ado
com parede de 30º e 35º de inclinação	73
Figura 25 - Comparativos entre dureza interna e dureza externa do cone conform	ado
com parede de 40° e 45° de inclinação	74
Figura 26 - Comparativos entre durezas internas e durezas externas dos cones	75
Figura 27 - Comparação da evolução da espessura	77

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1 - Escala de dureza Rockwell	53
Tabela 2 - Características do aço inox 304	61
Tabela 3: Tensão e deformação máxima do aço inoxidável AISI 304	67
Tabela 4: Tensão de escoamento do aço inoxidável AISI 304	68
Tabela 5: Rugosidade por região cone de 30º	69
Tabela 6 - Rugosidade por região cone de 40º	70
Tabela 7 - Rugosidade por região cone de 35º	69
Tabela 8 - Rugosidade por região cone de 45º	70
Tabela 9 - Média das Rugosidades (Ra) por região de cada ângulo	71
Tabela 10 - Média das durezas por região de cada ângulo	72
Tabela 11 - Espessura da parede dos cones	76

LISTA DE NOMENCLATURAS

d _c	diâmetro do punção;	mm
d _m	diâmetro da matriz;	mm
j	folga radial entre punção e a matriz;	mm
r _{cc}	raio de canto do punção	mm
r _{cm}	raio de canto da matriz;	mm
F_{enc}	Força aplicada pelo prensa chapas	Ν
V	velocidade do punção	mm/s
π_1	Plano formado a partir da linha de revolução	
π_2	Plano formado a partir da linha de revolução	
π_3	Plano formado a partir da linha centroide	
Π_4	Plano formado a partir da linha centroide	
r	raio de interseção de um plano normal ao eixo de revolução	mm
r ₁	raio de curvatura da interseção pelo plano normal ao eixo de revolução;	mm
r ₂	raio de curvatura da interseção do plano médio normal à seção formada pelos planos P3 e P4.	mm
h	espessura;	mm
α	ângulo formado entre um plano normal e o eixo de revolução;	0
σ_{r}	tensão normal à face de interseção com o plano P4, a qual atua sobra a su- perfície;	Pa
σ_{θ}	tensão normal à face de interseção com os planos P1 e P2 a qual atua so- bre a superfície;	Pa
σ_{z}	reação normal a ação do punção	Ра
Ν	vetor normal da banda de imperfeição no estado de não deformação	Ν
θ	ângulo entre N e a força de carregamento de interesse	0
Av ₁	Incremento vertical da ferramenta	mm
t _o	espessura inicial;	mm
t1	espessura final;	mm
Ψ	ângulo de trabalho entre a superfície conformada e a configuração inicial da chapa;	0
λ	Semiângulo do cone a ser trabalhado;	0
ΔZ	passo para baixo da ferramenta.	mm
μ	Coeficiente de atrito	
t	espessurra	mm
3	Deformação	mm

LISTA DE ABREVIAÇÃO

CLC: Curva limite de conformação

FFL: Fracture forming limit line

ISF: Incremental Sheet Forming

CNC: Controle numérico computacional

SPIF: Conformação incremental de ponto único – Single Point Incremental Forming

TPIF: Conformação incremental de ponto duplo – Two Points Incremental Forming

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivo Geral	24
1.2 Objetivos Específicos	24
1.3 Escopo do trabalho	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Estampagem convencional	26
2.1.1 Estado de tensão e deformação	29
2.1.2 Curva limite de conformação	32
2.2 Conformação incremental	36
2.2.1 Fundamentos e características do processo	
2.2.1.1 Vantagens	41
2.2.1.2 Desvantagens	41
2.3 Estado de tensões e conformabilidade	42
2.3.1 Direção circunferencial	44
2.3.2 Direção da espessura	45
2.3.3 Direção meridional	46
2.3.4 Regiões A e B (região plana e em simetria de revolução)	46
2.3.5 Regiões C	48
2.4 Dureza	51
2.4.1 Ensaio de dureza Rockwell	52
2.5 Rugosidade	53
2.5.1 Parâmetros de rugosidade	55
2.6 Estado da Arte	57
3 METODOLOGIA	59
3.1 Descrição dos procedimentos	59

3.3 Ensaio de tração......65

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	.67
4.1 Ensaio de tração	.67
4.2 Rugosidade média	.68
4.3 Ensaio de dureza	.72
4.4 Espessura	.76
5 CONCLUSÕES	.79
5.1 Sugestão de trabalhos	.79
REFERÊNCIAS	.81
APÊNDICE A – GRÁFICOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	.85

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica são os que empregam deformação plástica da matéria-prima mantendo sua massa e sua integridade. A estampagem é o processo de fabricação de peças através da deformação de chapas em operações de prensa. É utilizado para fabricar peças de paredes finas.

AL-GHAMDI e HUSSAIN (2014) explicam que o processo de conformação incremental de contato único é um processo de conformação de uma chapa de metal em uma nova geometria em uma série de revoluções da ferramenta. O processo utiliza uma barra cilíndrica com ponta esférica como ferramenta. Devido a simplicidade e ao potencial econômico desse processo, ele tem sido foco de pesquisa por muito tempo.

A trajetória da ferramenta é gerada através de uma máquina de controle numérico computacional (CNC) e é utilizado para transformar uma chapa em uma geometria diferente. Durante o processo poderá não haver matriz em baixo da chapa.

A conformação incremental de ponto único (SPIF) foi patenteada em 1967 por Leszack e foi provada ser possível por Kitazawa através de uma conformação simétrica rotacional em chapas de alumínio. Mais tarde o estudo de capacidade de usar uma máquina CNC em vez de um aparelho de máquina-ferramenta especial foi executado por Jeswiet e por Felice, esse estudo foi o ponto de partida para o rápido desenvolvimento do processo.

Devido às vantagens desse processo (aplicabilidade para produção de produtos de alto valor e baixa produção, a facilidade de desenvolver geometrias complexas e a utilização de uma mesma ferramenta para a conformação de diferentes produtos) o estudo é feito em diferentes materiais para definir o comportamento das chapas durante o procedimento.

Esse trabalho vem analisar o processo de conformação incremental de contato único em chapas de aço inoxidável AISI 304, que até o presente momento possui poucos trabalhos. O estudo da dureza ao longo da geometria nas faces interna e externa após o processo SPIF vem complementar e indicar o processo como estado plano de tensão ou como estado plano de deformação.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é caracterizar a condição de estampagem do aço AISI 304 encontrando seu estado limite de conformação através da definição da dureza ao longo da superfície. Segundo CHIAVERINI (1986) pode-se esperar uma correlação entre a resistência mecânica e a dureza, pois, o limite de resistência à tração é dependente do limite de escoamento e da velocidade do encruamento do material.

VIEIRA (2015) identificou através do comportamento das tensões, que a conformação incremental não pode ser correlacionada a um estado plano de tensão. Uma das formas propostas para tal comprovação e objetivo deste trabalho é o uso da coleta de dureza nas faces interna e externa da peça, após o processo SPIF, que se mostrando diferente corrobora com o que foi observado no trabalho citado.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a condição de estampagem do aço AISI 304 encontrando seu estado limite de conformação através da dureza;
- b) Avaliar o intervalo angular no qual é possível obter a estampagem do material sem que haja ruptura;
- c) Avaliar a rugosidade do material após o processo de conformação incremental;

1.3 Escopo do trabalho

Em relação à distribuição de seus capítulos, a dissertação tem a seguinte estruturação:

(a) Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, contendo a literatura de interesse publicada sobre o tema, disposta, por assuntos correlatos, em ordem cronológica. Finaliza-se este capítulo com o Estado da Arte, com a citação dos últimos trabalhos publicados neste assunto;

24

(b) Capítulo 3: Metodologia. Neste capítulo é apresentado um fluxograma com o planejamento do Experimento, que vale como norte para o desenvolvimento da dissertação. Também aí é apresentado o aparato experimental, bem como demais os itens relevantes a serem considerados no desenvolvimento do experimento;

- (c) Capítulo 4: Apresentação e discussão dos resultados;
- (d) Capítulo 5: Conclusões e sugestões de novos trabalhos;
- (e) Referências Bibliográficas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estampagem é um processo tecnológico de fabricação de peças de diversas formas a partir de uma chapa plana. É um processo largamente utilizado na fabricação de produtos estampados em diversos setores tais como: automotivo, aeronáutico, eletrodomésticos, hospitalar e alimentar.

O processo de estampagem convencional é o que mais se assemelha ao processo de estampagem incremental. Para haver a comparação entre esses processos são abordados a seguir alguns aspectos da estampagem convencional.

2.1 Estampagem convencional

MARTINS (2005) define estampagem como um processo de transformação de chapa, no qual uma chapa plana de material metálico é forçada a escoar controladamente pela ação de um prensa chapas para o interior de uma matriz através da atuação de um punção, dando origem a uma peça oca. Através desse processo pode-se produzir peças de grande variedade de formas, desde as formas simples até formas complexas que possuem diversas curvas e formas. A configuração de uma ferramenta de estampagem está representada através da Figura 1.





26

Fonte: RODRIGUES; MARTINS, 2005, p. 437

tem-se:

d _c :	Diâmetro do punção	mm
d _m :	Diâmetro da matrize	mm
j:	Folga radial entre punção e matriz	mm
r _{cc} :	Raio de canto de punção	mm
r _{cm} :	Raio de canto de matriz	mm
F _{enc} :	Forca aplicada ao prensa chapas	Ν
V:	Velocidade do punção	mm/s

O funcionamento da estampagem convencional é descrito por duas fases:

A primeira fase é a fase elástica que é o início do processo de conformação. O processo inicia-se com a aplicação de força do prensa chapas, F_{enc}, fixando a chapa para que não haja escorregamento e também não ocorra rugas e dobramentos desgovernados. Em seguida aplica-se a velocidade ao punção, V, fazendo com que haja o contato entre o punção e a peça iniciando a solicitação no regime elástico gerando a diminuição localizada da espessura e geração da superfície na região de folga entre a matriz e o punção. Através do movimento progressivo do punção, há o aumento da solicitação da região da aba, quando a deformação atinge essa área a deformação plástica se inicia, finalizando a primeira fase.

A segunda fase inicia-se pela mudança de regime elástico para regime plástico na região da aba; região onde o prensa chapas fixa e não permite o escoamento de material; com o raio do canto da matriz. A estampagem é o resultado do final do processo que acontece quando todo o material submetido a conformação preenche toda a cavidade da matriz resultando na formação da peça final.

As regiões de constituição da peça formada pela estampagem convencional, são definidas como: zona da aba, formada pela ação do punção e do prensa chapas, zona de canto de matriz, área formada entre a aba e a região da zona cônica, que se torna a zona cilíndrica no progresso da conformação, zona do canto do cunho, região formada entre a zona cilíndrica e a zona do fundo de taça, que é a parte do fundo da peça formada. Essas regiões estão ilustradas através da Figura 2.



Figura 2 - Regiões peça após estampagem

1. Região da aba 2. Canto de Matriz 3. Região cônica 4. Região do canto do cunho Fonte: Ilustração do autor

2.1.1 Estado de tensão e deformação

Para efetuar as análises de tensão e deformação detalhadas do processo é necessário estabelecer as equações gerais de equilíbrio de uma porção elementar da chapa. Representado por uma região infinitesimal da parede da área de revolução formado por dois planos ($\pi_1 e \pi_2$) formados a partir da linha de revolução, e outros dois planos ($\pi_3 e \pi_4$) formados pela linha centroide da região a ser estudada.

Os planos π_1 e π_2 são axiais e formam um ângulo d θ entre si, enquanto os planos π_3 e π_4 fazem um ângulo d α entre si. A região infinitesimal está representada através da Figura 3, enquanto a representação das tensões se encontra na Figura 4.



Figura 3 - Elemento de volume infinitesimal definido numa peça de revolução

Fonte: RODRIGUES; MARTINS, 2005 p. 440



Figura 4 - Representação de elemento definido pelos planos π_1 , π_2 , π_3 e π_4

(a) Vista axial e planta (b) vista de detalhes Fonte: RODRIGUES; MARTINS, p. 440

tem-se:

r: raio de interseção de um plano normal ao eixo de revolução

r₁: raio de curvatura da interseção pelo plano normal ao eixo de revolução;

r₂: raio de curvatura da interseção do plano médio normal à seção formada pelos planos π_3 e π_4 . Considerando que a interseção possui pequenos ângulos, a relação entre os raios ficaria como: r = r₂ cos(α)

h: espessura;

α: ângulo formado entre um plano normal e o eixo de revolução;

 σ_r : tensão normal à face de interseção com o plano π₄, a qual atua sobra a superfície (r dθ h);

 σ_{θ} : tensão normal à face de interseção com os planos π_1 e π_2 a qual atua sobre a superfície (r₁ dα h);

 σ_z : reação normal a ação do punção sobre a chapa atuando sobre uma superfície (r dθ r₁ dα). Sob efeito do atrito a componente -µ σ_z é a ação tangencial do punção com µ sendo o coeficiente de atrito. O sentido colocado para esta força se

justifica pela ação da compressão da chapa (σ_z) somado com o fato de, sob esta ação, a tendência ser de aumento do raio.

Considerando a direção da espessura chega-se ao seguinte equilíbrio de forças, demonstrado na equação (1):

$$\sigma_{z} \cdot r \cdot d \,\theta \cdot r_{1} \,d \,\alpha + 2 \cdot \sigma_{r} \cdot r \,d \,\theta \cdot h \cdot \frac{d \,\alpha}{2} + 2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot r_{1} \cdot d \,\alpha \cdot h \cdot \frac{d \,\theta}{2} \cdot \cos(\alpha) = 0 \tag{1}$$

o qual após dividido por (h r d θ r₁ d α) e notando que r₂ =r/cos(α) pode se escrever esse equilíbrio como a equação (2):

$$\frac{\sigma_z}{h} + \frac{\sigma_r}{r_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_2} = 0$$
(2)

Na direção radial o equilíbrio se estabelece de acordo com a equação (3):

$$\left(\sigma_{r} + \frac{d\sigma_{r}}{dr} \cdot dr\right) \cdot (r + dr) \cdot d\theta \cdot \left(h + \frac{dh}{dr} \cdot dr\right) - \sigma_{r} \cdot r \cdot d\theta \cdot h + \mu \cdot \sigma_{z} \cdot r \cdot d\theta \cdot r_{1} \cdot d\alpha - 2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot \frac{d\theta}{2} \cdot r_{1} \cdot d\alpha \cdot h \cdot sen(\alpha) = 0$$
(3)

Simplificando e eliminando os infinitésimos de ordem superior, observando-se que dr=r1 d α sen(α) e dividindo a equação (3) por (dr r d θ h), obtem-se o equilíbrio reescrevendo como equação (4):

$$\frac{d\sigma_r}{d_r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} + \frac{\mu \cdot \sigma_z}{h \cdot sen(\alpha)} + \frac{\sigma_r}{h} \cdot \frac{dh}{dr} = 0$$
(4)

Após definir as relações de equilíbrio nas direções radiais e da espessura, definem-se as condições a serem satisfeitas pelas tensões e deformações pelo processo de estampagem. São eles:

•Critério da plasticidade a ser adotado como referência.

•Condições de compatibilidade de deslocamentos e deformações.

•Modelo constitutivo do material.

2.1.2 Curva limite de conformação

De acordo com Sing C. Tang no livro "Mechanics modeling of sheet metal forming" (2007), um material sob uma condição de tensão passa por uma imperfeição. Na Figura 5 **N** é o vetor normal da banda de imperfeição no estado de não deformação. A banda de imperfeição possui um ângulo θ , que representa a orientação da banda de imperfeição, é o ângulo entre a direção do vetor **N** e a força de carregamento de interesse que está aplicada na direção Y na mesma figura. A deformação homogênea dentro e fora da banda assume-se que ocorre em toda a história de deformação.



Figura 5 - Material sofrendo uma imperfeição devido a condição de tensão

Fonte: TANG; PAN, (2007), p. 86

Curva limite de conformação (CLC) é usada na análise de conformação de metais para determinar quão perto a chapa de metal está de fraturar em um processo de estampagem. (CHEN, 2007)

JULIAN M. Allwood e DANIEL R. Shouler (2009) explicam que as tensões superficiais, antes e depois da falha, de um processo particular, identificam a forma da CLC que será desenhada no diagrama. A CLC é a história de todos os estados de tensões que não falharam, a falha é considerada como o início da fase de estrangulamento. A vantagem das CLCs é que elas podem ser largamente utilizadas como uma propriedade do material, assim elas podem ser usadas para o mesmo material, deformado em diferentes processos. O diagrama convencional de limite de conformação está representada na Figura 6.



Figura 6 - Diagrama convencional de limite de conformação

Fonte: JULIAN M. Allwood e DANIEL R. Shouler (2009); com adaptações

A curva CLC e muitos métodos desenvolvidos para prevê-la para materiais particulares assumem que o processo de conformação da chapa ocorre para um carregamento que leva ao estado plano de tensões. A curva limite de conformação está representada na Figura 7.



Fonte: JULIAN M. Allwood e DANIEL R. Shouler (2009), com adaptações

S. B. KIM et al. (2011) a define como sendo o local geométrico dos pontos definidos onde ocorre o estrangulamento da amostra, ou a posição da fratura, onde ocorre as deformações $\epsilon_1 - \epsilon_2$, onde ϵ_1 ocorre ɛatravés da maior tensão e ϵ_2 ocorre através da menor tensão.

A CLC é afetada por vários fatores como; a velocidade de conformação, a condição de lubrificação, a espessura do material, o encruamento e a anisotropia do material. A velocidade influencia particularmente devido a resposta dinâmica do material ser diferente da resposta do material em condição estática. A lubrificação entre a peça e o punção reduz a força de atrito que melhora a distribuição de tensões e reduz o desgaste localizado. A anisotropia das chapas de metal é representado pelo valor de *r* que, de acordo com HILL (1950) citado por S. B. KIM et al. (2011), pode ser definido pela equação (5):

$$r = \frac{d \varepsilon_w}{d \varepsilon_l}, \quad \varepsilon_l = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)$$
(5)

Onde, ε_l , $\varepsilon_w \in \varepsilon_t$ são deformação longitudinal, deformação transversal e deformação de espessura, respectivamente. Estas deformações são obtidas através de uma marcação de grade na superfície da amostra, como mostrado na Figura 8.



Figura 8 - Grade circular desenhada no corpo de prova

Fonte: S. B. KIM et al. (2011); com adaptações

As deformações longitudinal, transversal e de espessura tomam a forma elíptica após a aplicação da tensão, Figura 9, e podem ser calculadas a partir da equação (6):





(a) diâmetros iniciais da grade
 (b) diâmetros finais adquiridos após aplicação da tensão
 Fonte: S. B. KIM et al. (2011)

$$\epsilon_l = \ln\left(\frac{d_{fl}}{d_{il}}\right), \quad \epsilon_w = \ln\left(\frac{d_{f2}}{d_{i2}}\right), \quad \epsilon_l = -(\epsilon_l + \epsilon_w)$$
 (6)

De acordo com PATRÍCIO (2011) há a presença da FFL (*Fracture Forming Limit Line*). A FFL é descrita como a que melhor explica o mecanismo de fratura na estampagem incremental. O exemplo das curvas CLC e FFL para aço e alumínio está representado na Figura 10.



Fonte: W.C. Emmens, A.H. van den Boogaard, (2009); com adaptações

CENTENO et al. (2013) afirmam que os materiais com alta ductilidade começam o processo de fratura na localização da trinca ao longo de uma faixa estreita iniciando o processo de estrangulamento. O material continua a deformar com o estrangulamento seguindo aproximadamente o estado plano de deformações. Para um material de baixa ductilidade a fratura acontece sem o processo de estrangulamento. A Figura 11 mostra os limites de formabilidade, representando a CLC para a formação do estrangulamento, e para a fratura, tanto para materiais de alta ductilidade e quanto para materiais de baixa ductilidade.



Fonte: CENTENO et. al (2013); com adaptações

2.2 Conformação incremental

B. LU et al. (2014) e BEHERA et al. (2013) explicam que a conformação incremental (ISF-*Incremental Sheet Forming*) é um atrativo pois é possível conformar peças complexas, possui excelente adaptabilidade com ferramentas de controle numérico (CNC) através do uso de um software CAD. Esse método minimiza o uso de ferramentas especializadas e prensas. O processo é muito utilizado em peças de alto valor, pequena produção e conformados de grande complexidade.

GUZMÁN et al. (2012) explicam que o processo de conformação incremental é um processo de deformação plástica que ocorre pela repetição do contato da chapa de metal com uma pequena ferramenta esférica. Após todas as repetições a chapa foi toda percorrida e a forma final está completa.

Um aspecto importante do método de conformação incremental é que a forma final é determinada apenas pelo movimento da ferramenta. Os perfis finais são desenvolvidos por software de CAD/CAM e para controlar a ferramenta são utilizados máquinas CNCs.

O procedimento executado pela conformação incremental da geometria de um cone segue a sequência: a ferramenta é posicionada na parte mais externa da chapa, recebe um incremento (ΔZ) representado na Figura 12 (b) gerando a deformação na chapa. A ferramenta possui um movimento circular em volta da matriz para a formação do cone, a trajetória da ferramenta em volta da matriz não necessariamente deve ser circular, ela pode ter a forma que melhor responde à geometria desejada. Após completar um ciclo a ferramenta ganha um incremento horizontal, representado na Figura 12 (c), e recomeça o ciclo tendo novamente o incremento ΔZ como início. A repetição acontece até que seja conformada toda a geometria desejada. O cone formado por todo um ciclo de conformação incremental está representado na Figura 13.



Figura 12 - Etapas do processo de conformação incremental

Fonte: GUZMÁN et al. (2012), com adaptações



Figura 13 - Cone formado após conformação incremental

Fonte: GUZMÁN et al. (2012), com adaptações

PATRÍCIO (2011) classifica o processo de conformação incremental como simétrico, quando a geometria final possui simetria, ou como assimétrico, quando a geometria final não possui simetria. A ferramenta para a conformação possui um perfil em haste cilíndrica ou cônica com ponta esférica ou semiesférica, produz uma deformação plástica localizada em uma pequena região da chapa. A realização da conformação incremental depende do controle de seus principais parâmetros: trajetória da ferramenta, incremento de deformação, ângulo de trabalho e espessura da chapa.

2.2.1 Fundamentos e características do processo

DONGKAI XU et al. (2013) descreve a conformação incremental de passo único (SPIF) como sendo o processo de conformação onde a chapa é fixada perifericamente e então é deformada localmente usando uma ferramenta genérica de ponta hemisférica se deslocando em trajetória predefinida. As deformações locais se acumulam tomando então a forma desejada.

Conforme MARTINS et al. (2008) as investigações na SPIF acontecem em quatro parâmetros principais: (i) espessura da chapa; (ii) tamanho do passo vertical para baixo (ΔZ) a cada revolução, (iii) velocidades de revolução e do passo vertical (iv) raio da ferramenta de conformação. Essas grandezas principais estão representadas pela Figura 14.

A espessura é comumente explicada pela lei dos senos. Para o passo vertical HAM e JESWIET (2006) mostraram que o tamanho do passo não influencia na estampabilidade. A velocidade da ferramenta é conhecida por influenciar na estampabilidade devido a influência do atrito com a peça. Quanto maior o raio da ferramenta tende-se a distribuir as tensões sobre uma área mais extensa fazendo o processo mais parecido com a conformação convencional.



Figura 14 - Principais grandezas da conformação incremental

Fonte: M. B. SILVA et al. (2008), com adaptações

Na Figura 14 tem-se:

t _o :	espessura inicial	[mm]
t₁:	Espessura final	[mm]
Ψ:	Angulo de trabalho entre superfície conformada e configuração inicial da chapa	[°]
λ:	Semiângulo do cone	[°]
ΔZ :	Passo para baixo da ferramenta	mm

40

As principais vantagens e desvantagens do processo de conformação incremental são descritas pelo trabalho de HAM e JESWIET (2006) e também pelo trabalho de DONGKAI XU et al. (2013) como sendo:

2.2.1.1 Vantagens

a) Conformação de peças simétricas e peças assimétricas

b) Peças finais podem ser obtidas através de uma interface CAD/CAM e usando um centro de usinagem CNC

c) Peças diferentes podem ser obtidas utilizando apenas uma única ferramenta

 d) Na maior parte das usinagens não é necessária a utilização de matrizes, o que reduz o custo das produções

e) Mudanças em partes específicas do projeto são facilmente implementadas

f) Fácil implantação em processos de prototipagem rápida

g) Acabamento superficial é comumente satisfatório

h) Operação relativamente silenciosa

i) O processo permite estampagens profundas

2.2.1.2 Desvantagens

a) tempo de conformação muito maior que no processo de estampagem profunda convencional.

 b) Conformação de ângulos retos não se dá em um único passo, mas sim em multiestágios

c) Há a presença do retorno elástico do material, o que compromete a precisão dimensional dos conformados.

2.3 Estado de tensões e conformabilidade

M. B. SILVA et al. (2008) no trabalho *"Single point incremental forming and formability-failure diagrams"* explica que investigações experimentais chegam à conclusão que a conformabilidade do processo pode ser definido nos termos de quatro parâmetros majoritários:

- (a) espessura da chapa
- (b) velocidade rotacional e velocidade de alimentação
- (c) raio da ferramenta de conformação

A influência da espessura e do tamanho do passo é comumente explicada pela lei dos senos, conforme a equação (7) e a equação (8), essa relação pode ser visualizada através da Figura 14:

$$t_1 = t_0 \cdot \sin(\lambda) \tag{7}$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \lambda \tag{8}$$

Tem-se, t_0 é a espessura inicial, t_1 é a espessura final e λ o ângulo do semicone, e Ψ que é o ângulo formado entre a chapa inicial e o ângulo do cone a ser formado.

A velocidade de conformação influencia devido a condição de atrito entre a ferramenta e a chapa. Em estudos sobre o raio da ferramenta é observado que a formabilidade melhora com ferramentas menores. JESWIET et al. (2005), citado por M. B. SILVA et al. (2008), afirma que ferramentas menores concentram as tensões nas zonas de deformação nas chapas sobre a ferramenta de conformação, enquanto ferramentas maiores tendem a distribuir as tensões em uma área mais extensa, fazendo o processo mais similar ao processo de conformação convencional.

MARTINS et al. (2008) no trabalho *"Theory of single point incremental forming"* demonstra que as forças normais, as tensões de cisalhamento e momentos

42

de flexão estão presentes na conformação desenvolvida pela ponta esférica da ferramenta e formando as áreas A, B e C demonstradas na Figura 15. Estas são as principais regiões de contato entre a ferramenta e a peça.

As regiões definidas explicam suas condições: região A é onde estão as superfícies planas sujeitas ao estado plano de deformações (estiramento); região B composta por superfícies formadas pela simetria de rotação sob ação dos planos de deformação, região C é a região dos cantos onde aparecem os estados equi-bi-axiais, que possuem tensões normais e tangenciais à aplicação da força.



Figura 15 - Áreas de análise de tensões de cisalhamento

Fonte: MARTINS et al. (2008)

A força resultante da força de atrito entre a ferramenta e a peça é constituída de duas componentes planares: a componente meridional $-\mu_{\phi} \cdot \sigma_t$ que é consequência da inclinação da parede e a componente circunferencial $-\mu_{\theta} \cdot \sigma_t$ que é consequência da ação do deslocamento e da rotação da ferramenta. Assim o coeficiente de atrito é dado por $\mu = \sqrt{\mu_{\phi}^2 + \mu_{\theta}^2}$.

A distribuição de tensões nas zonas de deformação plástica localizada, mencionadas anteriormente (A, B, C da Figura 15) são as três zonas típicas de deformação na SPIF, e são demonstradas na Figura 16. Em (a) está representado o elemento em perspectiva, em (b) a representação do elemento após ser cortado por um plano meridional axial, sendo visto do topo e em (c) detalhe da vista de (b) mostrando as tensões atuantes.

Figura 16 - Estado de tensões da SPIF



Fonte: MARTINS et al. (2008); com adaptações

PATRÍCIO (2011) descreve as principais tensões deste estado, obtidas do equilíbrio da membrana do estado de tensão, como sendo: a tensão circunferencial (σ_{θ}); a tensão meridional (σ_{Φ}) e a tensão ao longo da espessura (σ_{t}). Este estado de tensão é obtido do equilíbrio da membrana e o efeito de flexão é desconsiderado.

O equilíbrio de forças será apresentado a seguir nas três direções, para que se possa extrair os estados de tensão e deformação nas regiões assinaladas.

2.3.1 Direção circunferencial

M. B. SILVA et al. (2008) explica que em consequência do contato da ferramenta com a peça surge o termo de tensão ($\mu_{\theta}\sigma_{t}$) seu ponto de aplicação é considerado como sendo o centro do elemento e seu sinal depende da referência e do sentido da velocidade da ferramenta e da chapa.

O equilíbrio das forças na direção circunferencial é representada pela equação (9):

$$\sigma_{\theta} \cdot r_{1} \cdot d\alpha \cdot \left(t + \frac{dt}{2}\right) - \mu_{\theta} \cdot \sigma_{t} \cdot d\alpha \cdot \left(r + \frac{dr}{2}\right) \cdot d\theta = \left(\sigma_{\theta} + d\sigma_{\theta}\right) \cdot r_{1} \cdot d\alpha \cdot \left(t + \frac{dt}{2}\right)$$
(9)

Após desconsiderar os termos em alta ordem e assumir que $r d \theta = t$, a equação toma a forma da equação (10):

$$d \sigma_{\theta} = -\mu_{\theta} \cdot \sigma_t \cdot \frac{r \, d \, \theta}{t} \approx -\mu_{\theta} \cdot \sigma_t \tag{10}$$

Esta consideração é feita a partir da observação das micrografias da região deformada nesta direção, através do artigo de MARTINS et al. (2008), mostra que o comprimento da marca da fricção da ferramenta sobre a superfície é da ordem da espessura o que é fisicamente aceitável.

2.3.2 Direção da espessura

Resolvendo o equilíbrio de forças na direção da espessura na equação (1) obtêm-se a equação (11):

$$\sigma_{t} \cdot r \cdot d \, \theta \cdot r_{1} \cdot d \, \alpha + \sigma_{\phi} \cdot r \cdot d \, \theta \cdot t \cdot \sin\left(\frac{d \, \alpha}{2}\right) + (\sigma_{\phi} + d \, \sigma_{\phi}) \cdot (r + dr) \cdot d \, \theta \cdot (t + dt) \cdot \sin\left(\frac{d \, \alpha}{2}\right) + \dots$$

$$\dots + \sigma_{\theta} \cdot r_{1} \cdot d \, \alpha \cdot t \cdot \sin\left(\frac{d \, \theta}{2}\right) \cdot \cos(\alpha) + (\sigma_{\theta} + d \, \sigma_{\theta}) \cdot r_{1} \cdot d \, \alpha \cdot t \cdot \sin\left(\frac{d \, \theta}{2}\right) \cdot \cos(\alpha) = 0$$
(11)

Após desconsiderar os termos de ordem superior, lembrando que $d\Sigma_{\Theta} \approx -M_{\Theta} \cdot \Sigma_t$ e tomando $r_2 = r/\cos(\alpha)$, a simplificação da equação (11) teremos:

$$\sigma_t \cdot \left(\frac{1}{t} - \frac{\mu_{\theta}}{2 \cdot r_2}\right) + \frac{\sigma_{\phi}}{r_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_2} = 0$$
(12)

Pelo termo ser bem menor que 1/t, pois $r_2 >> t$, a equação admite o formato da equação (13):

$$\frac{\sigma_t}{t} + \frac{\sigma_{\phi}}{r_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_2} = 0$$
(13)
Em termos físicos a última simplificação implica que os efeitos do atrito na direção circunferencial são desprezados.

2.3.3 Direção meridional

O equilíbrio na direção meridional leva à equação (14):

$$(\sigma_{\phi} + d \sigma_{\phi}) \cdot (r + dr) \cdot d \theta \cdot (t + dt) - \sigma_{\phi} \cdot r \cdot d \theta \cdot t + \mu_{\phi} \cdot \sigma_{t} \cdot r \cdot \sigma_{\theta} \cdot r_{1} \cdot d \alpha - \dots$$

$$\dots - \sigma_{\theta} \cdot \frac{d \theta}{2} \cdot r_{1} \cdot d \alpha \cdot t \cdot \sin(\alpha) + (\sigma_{\theta} + d \sigma_{\theta}) \cdot \frac{d \theta}{2} \cdot r_{1} \cdot d \alpha \cdot t \cdot \sin(\alpha) = 0$$
 (14)

A tensão média meridional de atrito, representada por $\mu_{\phi} \sigma_t$, e o termo circunferencial representado por. Desconsiderando termos de ordem superior e sabendo que dr = r₁·d α ·sin(α), a equação se torna:

$$\frac{d\sigma_{\phi}}{dr} + \frac{\sigma_{\phi} + \sigma_{\theta}}{r} + \sigma_t \cdot \left(\frac{\mu_{\phi}}{t \cdot \sin(\alpha)} + \frac{\mu_{\theta}}{2 \cdot r}\right) + \frac{\sigma_{\phi}}{t} \cdot \frac{dt}{dr} = 0$$
(15)

Tomando que a equação se simplifica na equação (16):

$$\frac{d \sigma_{\phi}}{dr} + \frac{\sigma_{\phi} + \sigma_{\theta}}{r} + \frac{\sigma_{t} \cdot \mu_{\phi}}{t \cdot \sin(\alpha)} + \frac{\sigma_{\phi}}{t} \cdot \frac{dt}{dr} = 0$$
(16)

Em termos físicos estas considerações consideram que o atrito na direção circunferencial é anulado. A consequência é que o coeficiente de atrito possui apenas a parcela meridional, ou seja, $\mu \approx \mu_{\phi}$.

2.3.4 Regiões A e B (região plana e em simetria de revolução)

Nas regiões que experimentam um estado plano de deformação (estiramento), na direção da espessura, partindo da forma simplificada da equação (13) e observando que nessa região $r_2 >> r_1$ e $r_2 >> t$, e considerando que na equação (11) o termo $\sigma_{\theta}/r_2 \approx 0$, a equação ganha a forma:

$$\frac{\sigma_{\theta}}{t} + \frac{\sigma_{\phi}}{r_1} = 0 \tag{17}$$

Nesta circunstância, a relação entre a pressão de contato e $(p=-\sigma_t)$, a tensão meridional (σ_{ϕ}) , a espessura da chapa (t), e o raio da ferramenta r₁ = r_{ferr} se torna:

$$\sigma_t = -\left(\frac{t}{r_{ferr}}\right) \cdot \sigma_{\phi} \tag{18}$$

O trabalhos de JESWIET et al. (2005), FILICE, FANTINI E MICARI (2002) e HIRT et al. (2003), citados por PATRÍCIO (2011, p. 62), comprovaram que nestas regiões sujeitas à SPIF o estado de deformação é plano. O que quer dizer que:

$$d\varepsilon_{\Theta} = 0 \quad d\varepsilon_{\phi} = -d\varepsilon_{t} \tag{19}$$

Aplicando nas equações constitutivas de Levy-Misses para o estado de deformações:

$$d\varepsilon_{\theta} = 0 \rightarrow \sigma_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{t} + \sigma_{\phi})$$
(20)

E isto define as tensões principais como:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{1} > 0$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{2}$$

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} < 0$$
(21)

Através do critério de escoamento de Tresca, onde a quantidade $(\sigma_1 - \sigma_3)$ é constante e igual à tensão de escoamento do material (σ_{esc}) . Para material perfeitamente elástico a equação (17) pode ser reescrita para se calcular as tensões meridional no elemento de membrana:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_1 = \left(\frac{\sigma_{esc}}{1 + t/r_{ferr}}\right)$$
(22)

Fazendo as substituições adequadas na equação (21) teremos:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_2 = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_t + \sigma_{\phi})$$
(23)

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} = -\left(\frac{\sigma_{esc}}{1 + r_{ferr}/t}\right)$$
(24)

2.3.5 Regiões C

Dos trabalhos de JESWIET et al. (2005) e Hirt, Ames e Bambach (2006), citados por M. B. SILVA et al. (2008), estabeleceu-se que a chapa deforma plasticamente sob um estado equi-bi-axial de deformação, o que implica que:

$$d\varepsilon_{\theta} = d\varepsilon_{\phi} > 0; \ d\varepsilon_{t} < 0; \ \sigma_{\phi} = \sigma_{\theta}$$
(25)

Usando a forma simplificada da membrana de equilíbrio na equação (11) na direção da espessura e tendo em conta as condições geométricas em BC ($r_2=r_1$) termos que:

$$\frac{\sigma_{t}}{t} + 2 \cdot \frac{\sigma_{\phi}}{r_{1}} = 0$$
(26)

Sob essas circunstâncias, a relação normal da pressão de contato atuando na região da membrana, a tensão meridional σ_{ϕ} , a espessura t da chapa e o raio da ferramenta $r_1 = r_{ferr}$, teremos:

$$\sigma_{t} = -2 \cdot \sigma_{\phi} \cdot \frac{t}{r_{ferr}}$$
(27)

A caracterização do estado de tensão localizado na zona plástica de

48

deformação do canto da SPIF pode ser obtido levando-se em conta a igualdade com a condição estado bi-axial de alongamento como:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} = \sigma_{1} > 0$$

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} = 0$$
(28)

Onde $|\sigma_t| < |\sigma_{\phi}|$ devido ao $r_{ferr} > 2 \cdot t$.

Inserindo o critério de escoamento de Tresca, a quantidade $(\sigma_1 - \sigma_3)$ continua constante e igual à tensão de escoamento do material (σ_{esc}) , para material perfeitamente plástico a equação (26) torna-se:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} = \left(\frac{\sigma_{\text{esc}}}{1 + 2 \cdot t/r_{\text{ferr}}}\right)$$
(29)

Uma comparação entre os estados de conformação e estado de deformação entre a SPIF em superfícies planas e superfícies de simetria rotacional, onde a suposição é que haja um estado plano de deformação, a SPIF nos cantos, onde a suposição é que haja estiramento biaxial igual, e a estampagem convencional de superfícies simétricas rotacional, onde a suposição é que estiramento biaxial igual. Para estes estados teremos os seguintes estados de tensão e as tensões hidrostáticas representadas a seguir.

(f) Para SPIF em superfícies planas e superfícies de simetria rotacional:

Estado de deformação:

$$d\varepsilon_{\phi} = -d\varepsilon_t > 0; \ d\varepsilon_{\theta} = 0; \ \sigma_t < 0$$
(30)

Estado de tensão:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{1} = \left(\frac{\sigma_{esc}}{1 + t/r_{ferr}}\right) > 0$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{2} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{1} + \sigma_{3}) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{t} + \sigma_{\phi})$$

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} = -\left(\frac{\sigma_{esc}}{1 + r_{ferr}/t}\right) < 0$$
(31)

Tensão hidrostática:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{\sigma_{\rm esc}}{2} \cdot \left(\frac{r_{\rm ferr} - t}{r_{\rm ferr} + t} \right)$$
(32)

(g) Para SPIF nos cantos

Estado de deformação:

$$d\varepsilon_{\phi} = d\varepsilon_{\theta} > 0; \ d\varepsilon_{t} < 0$$
(33)

Estado de tensão:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} = \sigma_{1} = \frac{\sigma_{esc}}{1 + 2 \cdot t/r_{ferr}} > 0$$

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} = -2 \cdot \sigma_{esc} \left(\frac{t}{r_{ferr} + 2 \cdot t} \right) < 0$$
(34)

Tensão hidrostática:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{2 \cdot \sigma_{\rm esc}}{3} \cdot \frac{r_{\rm ferr} - t}{r_{\rm ferr} + 2 \cdot t}$$
(35)

(h) Para estampagem convencional em superfícies de simetria rotacional

Estado de deformação:

$$d\varepsilon_{\phi} = d\varepsilon_{\theta} > 0; \ d\varepsilon_{t} < 0 \tag{36}$$

Estado de tensão:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} = \sigma_{1} = \frac{\sigma_{esc}}{1 + t/r_{p}} > 0$$

$$\sigma_{t} = \sigma_{3} = -\sigma_{esc} \left(\frac{t}{r_{ferr} + t}\right) < 0$$
(37)

Tensão hidrostática:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{2 \cdot \sigma_{\rm esc}}{3} \cdot \left(\frac{r_{\rm ferr} - t/2}{r_{\rm ferr} + t} \right)$$
(38)

2.4 Dureza

Dureza de um material, segundo Vicente CHIAVERINI (1986), é um conceito relativamente complexo de se definir. Porém ele define a dureza como sendo a resistência à deformação permanente.

A determinação da dureza constitui um método rápido e não-destrutivo que permite avaliar a condição de fabricação e tratamento das ligas metálicas, a diferença estrutural e a influência dos elementos de liga. A dureza correlaciona-se com algumas propriedades mecânicas.

Essa correlação pode ser explicada através da impressão deixada no ensaio de dureza. A impressão deixada no corpo da peça ensaiada dependerá da tensão de escoamento e da velocidade de encruamento após o limite de escoamento ser ultrapassado. O limite de resistência à tração é depende do limite de escoamento como da velocidade do encruamento do metal, dessa forma pode-se esperar a

existência de uma correlação entre a resistência mecânica e a dureza.

A dureza é determinada pela resistência à penetração. Para isso é utilizado um penetrador na forma de uma esfera ou pirâmide, utilizando um metal duro ou diamante que é forçado a penetrar no material cuja dureza se quer medir pela aplicação de uma carga de natureza estática.

2.4.1 Ensaio de dureza Rockwell

CHIAVERINI (1986) descreve o ensaio de dureza rockwell como o processo mais utilizado devido a sua rapidez, facilidade de execução, isenção de erros pessoais, capacidades de distinguir pequenas variações de dureza e por apresentar pequenas dimensões nas impressões. O método possui penetrador com ponta de diamante, o que permite que ligas muito duras possam ser ensaiadas por esse método.

O processo de medição é feito através da aplicação de uma carga prédeterminada em um penetrador de formas e dimensões conhecidas sobre a superfície a qual se deseja ensaiar. O valor da dureza é obtido através da proporção da profundidade obtida pela penetração.

Existem três tipos principais de dureza utilizada nos processos industriais:

 Rockwell A: para materiais muito duros, o penetrador possui ponta de diamante com forma de cone com ângulo de 120° e a carga predefinida é de 60 kg.

 Rockwell B: para materiais de dureza média, o penetrador possui ponta de aço com forma de esfera de 1/16" de diâmetro e a carga predefinida é de 100 kg.

 Rockwell C: para materiais mais duros, o penetrador possui ponta de diamante com forma de cone com ângulo de 120º e a carga predefinida é de 150 kg.

O penetrador em forma de cone é conhecido como penetrador Brale.

A Tabela 1 mostra as combinações de cargas e de penetradores formando

52

dessa maneira as durezas e quais os materiais que são ensaiados por cada uma delas.

Escala Rockwell	Penetrador	Carga (kg)	Materiais ensaiados
A	Brale	60	Material duro e outros materiais muito duros, como aço endurecido superficialmente com pequena espessura de camada
В	Esfera 1/16"	100	Aços moles, ligas não ferrosas duras (de cobre e alumínio)
С	Brale	150	Aços de elevados limites de resistência à tração (acima de 60 kgf/mm ²); aços endurecidos superficialmente com camadas espessas
D	Brale	100	Materiais com camada superficial endurecida média, tais como aços cementados, ferro maleável perlítico.
E	Esfera 1/8"	100	Materiais moles, ligas de alumínio e magnésio; ligas para mancais; ferro fundido.
F	Esfera 1/16"	60	Ligas de cobre recozidas, chapas metálicas finas moles.
G	Esfera 1/16"	150	Bronze fosforoso. Ligas Cu-Be; ferro maleável
Н	Esfera 1/8"	60	Alumínio, chumbo, zinco

Tabela 1 - Escala de dureza Rockwell

Fonte: Tecnologia mecânica - Vicente Chiaverini - Vol I - 2ª edição pag. 142

2.5 Rugosidade

LUDEMA (1996) descreve a rugosidade como sendo uma superfície expressa como as alturas das irregularidades menores ou como asperidades na superfície. A rugosidade é descrita por BHUSHAN (2013), no livro *"Introduction to tribology"*, como sendo uma das componentes da textura da superfície, esta é definida como o desvio repetitivo ou aleatório da superfície nominal que forma a topografia tridimensional da superfície. A textura da superfície é formada pelos componentes: rugosidade (nano ou micro rugosidade),ondulação (macro rugosidade), defeitos.

As nano e microrrugosidades são formadas por flutuações na superfície de

ondas de comprimento de ondas curtas, caracterizadas por picos (local máximo) e vales (local mínimo) possuindo variações de amplitudes e espaçamentos. Ondulação é a irregularidade da superfície caracterizado por comprimento de ondas longas. Ondulação pode ser relacionado a fatores como máquina, desvio da peça, vibração, tratamento térmico ou tensões de deformação. Inclui todas as irregularidades as quais possuem espaços maiores que os espaços de uma rugosidade. Defeitos são não intencionais, inesperados e interrupções não esperadas na textura da superfície, são normalmente não consideradas partes da superfície.

A tipologia da superfície do sólido pode ser caracterizada como, homogênea ou não homogênea. As homogêneas podem ser determinadas ou aleatórias. As homogêneas aleatórias podem ser isotrópicas ou anisotrópicas. E por fim as homogêneas aleatórias isotrópicas podem sr gaussiana ou não gaussianas.

A maior parte das superfícies em engenharia são aleatórias, tanto isotrópicas quanto anisotrópicas, quanto Gaussiana ou não Gaussiana. Para definir as características da superfície é preciso saber a natureza do método do processo utilizado.

Superfícies que são formadas por processos acumulativos, nos quais ao final da formação da região é formado por processos acumulativos de um grande número de eventos locais aleatórios e discretos e independentemente do resultado de individual de cada evento, produzirá um efeito cumulativo que é governado pela forma Gaussiana.

BHUSHAN (2013), STACHOWIAK e BATCHELOR (2005), e KAILAS, SV; et al. (2013) explicam que a rugosidade mais utilizada para as análises de superfície é a rugosidade média. A rugosidade média é definida como sendo a variação da rugosidade em torno da linha de referência do plano. A caracterização da superfície deve ser feita através de duas ou mais alturas estatísticas. Podem ser R_a, ou CLA (linha central média) ou AA (média aritimética) e desvio padrão ou variância (σ), R_q ou média da raiz quadrada (RMS). Outras medidas de descrição da rugosidade são valor extremo de altura R_t (ou R_y, R_{max}, ou máximo valor entre pico e vale), R_p máximo valor do pico até a linha média, R_v máximo valor do vale até a linha média, R_z média dos valores entre pico e vale e R_{pm} valor médio do pico à linha média. As

54

principais rugosidades podem ser vistas na Figura 17.



Figura 17 - Perfil de Rugosidade

Fonte: Ilustração do autor

2.5.1 Parâmetros de rugosidade

KAILAS, SV et al. (2013) apresenta os parâmetros de rugosidade de forma matemática da seguinte maneira.

Rugosidade média (R_a): É definida como a média aritimética dos valores absolutos do desvio vertical da linha de centro. Esse parâmetro é definido de acordo com a seguinte equação:

$$R_{a} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} |z_{i} - z|$$
(39)

Onde;

n = quantidade de pontos analisados

z = valor da medidas do ponto

 \bar{z} = média de todos os pontos

Desvio padrão (R_q): É definido como a raiz quadrada do quadrado da distância do desvio vertical para a linha média. A variância é definida a seguir:

$$R_{q} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} (z_{i} - \overline{z})^{2}}$$
(40)

Onde;

n = quantidade de pontos analisados

z = valor da medidas do ponto

Assimetria (R_{sk}): É usado para medir a simetria da amostra em relação a linha média. A assimetria pode ser usada para diferenciar superfícies diferentes que possuem mesma rugosidade média.

$$R_{sk} = \frac{1}{n \cdot R_{g}^{3}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(z_{i} - \overline{z} \right)^{3}$$
(41)

Assimetria é similar a rugosidade média cúbica. Pontos distantes da linha média quando elevados a 3 terão proporcionalmente mais peso que os pontos mais próximos a linha média. Desde que os picos e vales estão potencializados prioriza a integração mediana e mantém a polaridade da superfície. Assim, superfícies com predominância de vales terão assimetria positiva e superfícies com predominância de vales terão assimetria positiva e superfícies com predominância de picos terá assimetria negativa. O valor da Rsk quantifica a simetria da superfície e pode relacionar por aplicações como condutividade elétrica e retenção de lubrificante.

A distribuição da função para a maioria das superfícies reais possui a forma de sino e pode ser descrita como uma distribuição gaussiana. A superfície com distribuição gaussiana possui os valores de picos e vales distribuídos igualmente através da média.

Curtose (R_{ku}): é uma medida de dispersão que caracteriza o pico ou "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. Este parâmetro pode ser definido como:

$$R_{ku} = \frac{1}{n \cdot R_q^4} \cdot \sum_{i=1}^n \left(z_i - \overline{z} \right)^4$$
(42)

Superfícies muito pontiagudas possuem valores de curtose muito alto (R_{ku} >3), superfícies com muitos vales possuem curtose baixa (R_{ku} <3), enquanto superfícies perfeitamente aleatórias possuem curtose de valor 3. R_{ku} caracteriza as anomalias existentes na altura da superfície, em uma distribuição normal da superfície os valores a rugosidade de curtose deverá ser 3. Rku deve ser usado para identificar a presença de defeitos e desordenados picos e vales.

2.6 Estado da Arte

Nos últimos três anos o processo de estampagem incremental tem tido um grande número de pesquisas relacionadas ao entendimento do estado limite de conformação, da resposta de novos materiais ao processo e a validação de um processo através do método de elementos finitos.

O estado limite de conformação foi estudado por ZHEN CUI et al. (2013) utilizando um modelo analítico para distribuições de tensão com base na geometria da peça e caminhos de ferramenta, simulações numéricas de o processo de formação e validação experimental das previsões da utilizando a técnica de correlação de imagens digitais. Foi estudado três tipos de peças que incluem cone hiperbólica, cone de inclinação e cone elíptico e utilizados para o estudo.

O trabalho de GÓMEZ-LÓPEZ et al. (2013) propôs-se a avaliar com antecedência as tensões e deformações do existentes na chapa conformada e na ferramenta durante o processo SPIF utilizando os elementos finitos.

A simulação consistia de uma ferramenta hemisférica que deformou numa chapa de aço. A ferramenta descreve uma pirâmide com base quadrada. O processo foi simulado em um software CAD, tendo o projeto da matriz e do processo realizado através do mesmo. As tensões, deslocamentos e deformações na chapa de aço foram registrados durante a simulação. Por outro lado, as forças podem ser obtidas a qualquer nó específico ou pelo vértice, linha ou face de cada da simulação.

K. ISIK et al. (2014) verificaram em seu trabalho o limite de conformação utilizando o conceito fundamental da plasticidade, danos e fratura dúctil mecânica, através de um estudo da plasticidade aplicado aos caminhos de carga de tensão sobre o plano de tensões para analisar a linha limite de fratura de formação e introduzir uma linha limite de conformação da fratura de conformação.

Foi proposto um novo método para determinar os limites de conformação por fratura de uma chapa de metal conformada. Através do processo SPIF, torção e do ensaio do plano de cisalhamento para determinar os valores experimentais do plano de tensões no início da fratura.

3 METODOLOGIA

18.

Os ensaios foram conduzidos de forma a permitir que fosse possível levantar o estado limite de conformação através das durezas mensuradas no material e proporcionou o levantamento das características do aço e o intervalo usual do ângulo de conformação.

3.1 Descrição dos procedimentos

A escolha das variáveis serviram para direcionar esse trabalho de forma a permitir que os dados coletados possam ser considerados válidos. Sendo assim as escolhas dos parâmetros foram definidas da seguinte forma:

(a) Processo: Foi definido o método SPIF, simétrico, negativo e sem matriz. A escolha é justificada devido ao grande número de aplicações e trabalhos publicados nesta configuração.

(b) Material: O material definido para este ensaio foi o aço inox 304. Esse material foi escolhido para que possa vir a ser conhecida a sua estampabilidade utilizando o método de conformação incremental.

(c) Velocidade de trabalho: A velocidade foi definida como constante, variando de acordo com a potência do centro de usinagem.

(d) Geometria da ferramenta: A geometria foi definida como constante e hemisférica, definida como a maior parte dos trabalhos produzidos a respeito da conformação incremental.

(e) Geometria da peça: A geometria da peça foi definida conforme experimento feito por PATRÍCIO (2011), que define o limite máximo do ângulo de trabalho e a profundidade máxima de trabalho.

Após esta descrição, foi desenvolvido o fluxograma representado na Figura



Fonte: Elaborado pelo autor

a) Item Material:

O aço escolhido para esse trabalho foi o aço inox 304 de dimensões 200x200x0,8 mm. As características do aço estão representadas na Tabela 2.

% volume							
С	Mn	Si	Cr	Ni	Р	S	Outros
0,08	2,0	1,0	18-20	8-10,5	0,0045	0,03	-
Fonte: ASM Handbook "Volume 1 Properties and selections: Iron Steels and high							

Tabela 2 - Características	do aço	inox 304
----------------------------	--------	----------

performance alloys"

Para a determinação das características mecânicas foram feitos ensaios de tração. Os corpos de prova confeccionados de acordo com a norma ASTM E8, que designa o procedimento de ensaio para chapas de espessura fina.

b) Item Ferramenta:

A ferramenta foi definida como geometria hemisférica de diâmetro Ø12,1 mm, esse diâmetro foi escolhido por ser a ferramenta mais utilizada nos artigos sobre a conformação incremental. O material da ferramenta é o aço H13 que foi temperado e revenido para aumentar a dureza de forma a fazer com que ela possa suportar conformar o aço AISI 304.

c) Item Peça:

A geometria escolhida é a forma de tronco de cone, que possui Ø140 mm na base. Foram utilizados 4 inclinações, para definir como a conformação ocorre dentro desse intervalo definido. As 4 inclinações definidas através dos semi-ângulos, são de λ =30°, λ =35°, λ =40° e λ =45°. Esse intervalo foi definido devido a trabalhos anteriores que mostram que a conformação ocorre até o semi-ângulo de λ =30°.

d) Item SPIF:

De acordo com PATRÍCIO (2011), além dos parâmetros já citados, é importante serem acompanhados no SPIF:

- Espessura inicial da chapa;
- Espessura final da chapa;
- Angulo de trabalho (medido da Horizontal) ou semiângulo do cone de trabalho (medido a partir da vertical)
- Velocidade de rotação/deslocamento da ferramenta/mesa: a velocidade de trabalho da mesa foi definida como 1500 mm/min e a velocidade de rotação da ferramenta foi definida como 50 rpm. Valores usados extensamente na literatura.
- Tamanho do incremento utilizado foi de 0,1 mm/revolução

O critério de parada do ensaio é a detecção visível da ruptura da chapa. Visto que não se possui, no momento, métodos de detecção da iminência da ruptura.

3.2 Método de ensaio

Foram realizados ensaios de diferentes semi-ângulos do tronco de cone, para definir qual o intervalo angular útil para a conformação do aço AISI 304. Foram coletado a rugosidade interna do cone formado e a verificação da dureza superficial (interna e externa do cone).

Os ensaios para a definição do ângulo útil de conformação consistiram na confecção de cones, representada nas figuras 19 20 e 21, os quais teve o ângulo alterado até que durante o processo houvesse uma falha, ou seja, até que ocorresse uma fratura no material. Para cada ângulo foi confeccionado 3 cones.

Para a confecção dos cones foi utilizado o CNC da Romi, discovery 560 ao qual foi montado a matriz, e a conformação aconteceu até o final da altura do cone dependendo do seu semi-ângulo.

62



Figura 19 - Início do ensaio de conformação incremental

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 20 - Final do ensaio de conformação incremental

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 21 - Cone conformado

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da dureza foi executada em três regiões da peça conformada separando em áreas para que essas gerassem um perfil geral da região a ser estudada na parte interna. As regiões estudadas seguiram a rotação anti-horária em ângulos de 90° a partir da região do incremento, sendo feitas as medições nas regiões de 90°, 180° e 270°. Foram feitas até 5 medições em cada região conforme a representação da Figura 22.

A medição da dureza foram realizadas através do durômetro. Os cones foram cortados em partes menores e embutido para que pudessem ser realizadas as medições e a definição do estado limite de conformação do aço inoxidável AISI 304.



Figura 22 - Demarcação das regiões de medição da rugosidade

Fonte: ilustração do autor

3.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado com o intuito de saber qual a tensão máxima e a deformação máxima do material. Para isso foi estabelecido que seriam produzidos corpos de prova seguindo a direção de laminação da chapa. Os corpos de prova tiveram os seguintes ângulos em relação a direção de laminação, 0°, 45° e 90°.

Para realização dos ensaios de tração foi utilizada máquina universal de ensaios de tração e compressão, presente no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil do IPUC/PUC Minas, da marca EMIC modelo GR048 com capacidade máxima de 200kN, com sistema autotravante de alto desempenho, pré aperto por sistema pneumático. Garra inferior com abertura frontal e superior com sistema de deslizamento para recuo da garra, permitindo aumento do curso de ensaio da máquina.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os dados coletados após o ensaio de conformação incremental das chapas de aço inoxidável AISI 304. Será apresentado primeiro os dados coletados do ensaio de tração, em seguida os dados de rugosidade média e, por fim, os dados do ensaio de dureza.

4.1 Ensaio de tração

Os dados gerados através do ensaio de tração estão dispostos na Tabela 3. Através da média dos valores da tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e das médias deformações máximas ($\epsilon_{máx}$) é possível determinar a tensão média máxima e deformação média máxima das chapas de aço inoxidável AISI 304.

Angulo [°]	corpo de prova	$\sigma_{_{Máx}}$ [MPa]	ε _{Máx}	$\sigma_{_{Med}}$ [MPa]	٤ _{Med}	$\sigma_{_{Med}}$ [MPa]	٤ _{Med}
	1	789,96	0,56				
0	2	792,00	0,55	792,91	0,57		
	3	796,77	0,61				
	1	753,19	0,63				
45	2	729,35	0,61	742,52	0,62	768,70	0,61
	3	745,01	0,62				
	1	787,24	0,64				
90	2	753,19	0,61	770,67	0,63		
	3	771,57	0,64				

Tabela 3: Tensão e deformação máxima do aço inoxidável AISI 304

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa maneira foi determinada a tensão máxima e a deformação máxima do aço inoxidável AISI 304. A tensão máxima obteve o valor médio de 768,70 MPa e a deformação máxima obteve o valor médio de 0,61.

Através dos gráficos gerados através do ensaio de tração, representados No Apêndice A, foi possível determinar a tensão de escoamento do aço inoxidável AISI 304 traçando uma linha paralela a porção elástica da curva tensão x deformação a 0,2%. Desta forma foi possível obter a Tabela 4.

Angulo [°]	corpo de prova	$\sigma_{_{ESC}}$ [MPa]	$\sigma_{_{ESC}}$ [MPa]	$\sigma_{_{\text{EscMed}}}$ [MPa]
	1	365,00		
0	2	355,00	366,67	
	3	380,00		
	1	375,00		
45	2	355,00	355,00	352,22
	3	335,00		
	1	340,00		
90	2	335,00	335,00	
	3	330,00		

Tabela 4: Tensão de escoamento do aço inoxidável AISI 304

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa maneira foi determinado a tensão de escoamento do aço inoxidável AISI 304. O valor médio encontrado foi de 352,22MPa.

4.2 Rugosidade média

Os ensaios de rugosidade foram realizados nas regiões predefinidas de forma a permitir identificar qual a rugosidade deixada pelo processo SPIF no cone conformado. O rugosimetro utilizado nesse ensaio foi da marca Taylor Hobson modelo Surtronic S128, que possui como característica o de deslocamento máximo do apalpador de 0,25 a 25,5 mm, cut-off de 0.25, 0.80, e 2.5mm, filtros: 2CR ou Gaussiano, campo de medição: 10, 100 ou 400 Mícron e Resolução: 5, 10 ou 50 nm.

As rugosidades medidas e analisadas foram: cone de 30°, representado na Tabela 5; cone de 35°, representado na Tabela 7; cone de 40°, representado na Tabela 6; e cone de 45°, representado na Tabela 8.

30 <u>°</u>					
		90	180	270	
	1	2,40	2,34	1,59	
	2	2,95	2,63	1,66	
1	3	1,93	2,24	1,47	
	4	1,58	1,15	0,79	
	5	1,73	0,85	0,56	
	1	2,60	2,57	2,66	
	2	1,00	0,76	1,02	
2	3	1,38	1,38	0,64	
	4	1,09	0,96	0,73	
	5	0,58	0,79	0,73	
	1	2,94	0,81	1,69	
	2	0,91	1,86	1,23	
3	3	1,08	1,70	1,08	
	4	1,02	1,75	0,73	
	5	0,70	1,50	0,65	

Tabela 5: Rugosidade por região cone de 30°

Rugosidades medidas em μm Fonte: Elaborado pelo autor

	35º						
		90	180	270			
	1	0,89	0,68	0,62			
	2	0,70	0,57	0,42			
1	3	0,67	0,50	0,73			
	4	0,53	0,55	0,82			
	5	0,47	0,49	0,13			
	1	0,69	0,74	0,63			
	2	0,42	0,46	0,86			
2	3	0 <i>,</i> 85	0,80	0,73			
	4	0,61	0,59	0,68			
	5	0,54	0,71	0,21			
	1	1,85	0,63	0,69			
	2	0,70	0,76	0,79			
3	3	0,64	0,70	0,80			
	4	0,64	0,45	0,58			
	5	0,74	0,56	0,54			

Tabela 7 - Rugosidade por região cone de 35º

Rugosidades medidas em µm Fonte: Elaborado pelo autor

40⁰						
		90	180	270		
	1	0,53	0,36	0,53		
	2	0,45	0,57	0,45		
1	3	0,54	0,30	0,40		
	4	0,42	0,46	0,25		
	5	0,55	0,44	0,00		
	1	0,00	0,00	0,67		
	2	0,60	0,48	0,77		
2	3	0,44	0,80	0,64		
	4	0,50	0,58	0,65		
	5	0,60	0,70	0,00		
	1	0,47	0,64	0,56		
	2	0,57	0,53	0,51		
3	3	0,66	0,47	0,90		
	4	0,58	0,67	0,59		
	5	0,81	0,74	0,77		

Tabela 6 - Rugosidade por região cone de 40°

Rugosidades medidas em µm Fonte: Elaborado pelo autor

		-					
45⁰							
		90	180	270			
	1	0,41	0,54	0,51			
	2	0,42	0,41	0,45			
1	3	0,38	0,57	0,43			
	4	0,57	0,47	0,40			
	5	0,53	1,11	0,00			
	1	0,62	0,43	0,84			
	2	0,38	0,56	0,32			
2	3	0,60	0,43	0,31			
	4	0,37	0,41	0,51			
	5	0,62	0,43	0,00			
	1	0,55	0,49	0,57			
	2	0,60	0,48	0,55			
3	3	0,73	0,47	0,49			
	4	0,75	0,48	0,55			
	5	1,00	1,18	1,14			

Tabela 8 - Rugosidade por região cone de 45º

Rugosidades medidas em µm Fonte: Elaborado pelo autor

As médias das rugosidades demonstram qual o acabamento dos cones conformados. Dessa forma foi encontrado a média da rugosidade para cada região em cada conformação, representados na Tabela 9, e o desvio padrão, definido por MONTGOMERY e RUNGER (2003) como a dispersão dos valores coletados em relação à média.

	Tabela 9 - Media das Rugosidades (Ra) por região de cada angulo							
	30º		35º		40º		45º	
Ponto	Media região	Ponto	Media região	Ponto	Media região	Ponto	Media região	
1	2,18	1	0,82	1	0,42	1	0,55	
2	1,56	2	0,63	2	0,55	2	0,46	
3	1,43	3	0,71	3	0,57	3	0,49	
4	1,09	4	0,61	4	0,52	4	0,50	
5	0,90	5	0,49	5	0,51	5	0,67	
			D					

Tabela 9 - Média das Rugosidades (Ra) por região de cada ângulo

Rugosidades medidas em µm Fonte: Elaborado pelo autor

A evolução do acabamento superficial pode ser percebida através do gráfico representado na Figura 23.



Figura 23 - Evolução da rugosidade em função da profundidade do cone

Fonte: Elaborado pelo autor

A rugosidade do cone conformado de 30° possui um acabamento médio de 2,18 µm, caracterizando uma acabamento de classe N8, na região próxima a região da fratura. Conforme se aproxima da região mais externa do cone há uma melhora no acabamento chegando ao valor de 0,90 µm caracterizando um acabamento de classe N7.

Há um aumento significativo entre a rugosidade das chapas conformadas a 40° e as de 35°, sugerindo que a partir desse ângulo começa a caracterizar uma região onde poderá haver fratura do material.

O desvio padrão calculado demonstra que os dados estão bem distribuídos em torno da média, cone de 30° possui deviso padrão de 0,69 µm, 35° S=0,24 µm, 40° S=0,21 µm e 45° S=0,23 µm. A disparidade entre o desvio dos cones 30° e os demais sugere que há uma alteração que pode vir a indicar o processo onde ocorrerá a falha.

4.3 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado através do durômetro Rockwell WPM presente no laboratório de materiais do curso de engenharia mecânica do IPUC/PUC Minas, utilizando um penetrador de esfera de 1/16". Os dados coletados estão representados na Tabela 10.

Região	Dureza HRB					
Interna	Ensaio 30º	Ensaio 35º	Ensaio 40º	Ensaio 45º		
1	112,00	118,00	111,33	113,50		
2	115,00	112,50	104,00	129,00		
3	107,50	119,00	106,00	109,50		
4	119,00	130,00	97,00	114,50		
5	125,50	91,00	121,00	102,50		
6	118,00	107,00	123,00	104,50		
Externa	Ensaio 30º	Ensaio 35º	Ensaio 40º	Ensaio 45º		
1	103,67	108,67	119,00	114,50		
2	122,50	117,00	123,50	129,00		
3	104,00	118,00	124,67	109,50		
4	119,00	105,00	124,00	122,00		
5	120,00	108,50	114,00	113,50		
6	117,00	122,50	113,50	107,00		

Tabela 10 - Média das durezas por região de cada ângulo

Fonte: Elaborados pelo autor

Os gráficos comparativos entre as durezas das paredes internas e externas dos ensaios de conformação com inclinação de parede de 30° e 35°, e os ensaios de conformação com inclinação de 40° e 45° estão representados nas Figura 24 e Figura 25 respectivamente.







Fonte: Elaborados pelo autor

O gráfico da dureza do cone de 30º demonstra que ao iniciar a conformação as durezas permanecem em uma faixa entre 0,0 e 5,5 HRB, enquanto a região 2 a diferença alcança valor de 7,5 HRB, e a região 1 possui uma diferença de 8,3 HRB.

A dureza do cone de 35° possui diferenças entre o ponto 6 ao ponto 4 de valores entre 15,5 e 25 HRB, enquanto nos pontos 3 e 2 essa diferença não ultrapassa o valor de 5 HRB e já no ponto 1 a diferença alcança o valor de 9,3 HRB.







Fonte: Elaborados pelo autor

O gráfico representativo do cone de 40° a dureza na região inicial da conformação (região 6 e 5) as durezas da parede interna possuem maiores valores que os valores da parede interna. Na região 4 há uma alteração, ou seja, as durezas da parede interna passam a ter maiores valores que a as paredes internas. AS

diferenças das durezas varia entre 7 e 27 HRB.

O gráfico dos cones de 45° possuem diferenças de 2,5 até 11 HRB nas regiões 6, 5 e 4. Enquanto nas regiões 3,2 e 1 as diferenças chegam a 1 HRB. Demonstra uma similaridade no processo de conformação a 45° devido a possuir uma diferença pequena e até mesmo possuir mesma dureza tanto interna quanto externa.

Uma comparação entre as durezas internas de todos os ensaios, e das durezas externas foi também realizado e está representado na.



Figura 26 - Comparativos entre durezas internas e durezas externas dos

Fonte: Elaborados pelo autor

Através do gráfico comparativo entre as durezas internas é possível perceber que as durezas da parede interna da conformação de 30º possui valores que atuam em todos os outros ensaios, sugerindo que o ensaio de 30º possa ser o ensaio que melhor descreve a conformação da chapa de aço inoxidável AISI 304.

O gráfico das durezas das paredes externas sugere um padrão nas durezas medidas ao longo das regiões estudadas, exceto para o ensaio do cone de 40°, que possui a uma curva bem diferente das demais. O que sugere que esse ensaio possui uma continuidade nas durezas durante toda a conformação.

Através dos estudos de VIEIRA (2015), onde ele demonstra a variação das tensões durante o ensaio de conformação incremental, é possível compreender que as tensões dos pontos internos das geometrias possuem valores maiores que as tensões dos pontos externos.

Dessa forma poderia ser verificado que nos valores das durezas que as durezas internas deveriam possuir valores menores que as durezas externas. Dessa forma é possível notar que a dureza não seguiu essa regra.

Durante os ensaios a dureza nas regiões 5 e 4, que seriam as mesmas região analisada por VIEIRA (2015), há uma mudança das durezas em relação a parede externa e a parede interna. Por exemplo; na região 5 durante os ensaios com inclinação de 35° e de 45° a dureza externa é maior que a dureza interna, enquanto nos ensaios de inclinação 30° e 40° acontece o inverso.

4.4 Espessura

As medidas da espessura ao longo da parede do cone foi feita utilizando um paquímetro de capacidade de medida de 150 mm, graduação de 0,05 mm exatidão de 0,05 mm. Os dados coletados estão representados na Tabela 11.

Região		Espessura [mm]					
Interna	Ensaio 30º	Ensaio 35º	Ensaio 40º	Ensaio 45º			
1	0,30	0,55	0,60	0,65			
2	0,35	0,70	0,55	0,70			
3	0,70	0,50	0,45	0,70			
4	0,55	0,40	0,30	0,65			
5	0,55	0,35	0,40	0,60			
6	0,80	0,80	0,80	0,80			

Tabela 11 - Espessura da parede dos cones

Fonte: Elaborados pelo autor

76

Uma comparação do comportamento da espessura pode ser visto através do gráfico representado na Figura 27.



Figura 27 - Comparação da evolução da espessura

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a espessura possui comportamento similar entre as chapas conformadas nos cones de inclinação 35°, 40° e 45°. Enquanto no cone de 30° o comportamento se altera na ao passar do ponto 3 para o ponto 2. O cone de semiângulo de 45° possui a menor variação de espessura.

5 CONCLUSÕES

Analisando o objetivo geral do trabalho; que propõe a compreensão e aplicabilidade do processo de conformação incremental em material de aço inoxidável AISI 304 e compreender qual o seu comportamento, avaliando a rugosidade superficial e a dureza das paredes após o processo, pode se concluir:

O processo de estampagem incremental permite a conformação de peças em aço inoxidável AISI 304, em um intervalo variado de ângulos com um limite máximo entre 30° e 35°. A fratura da geometria aconteceu ao final da conformação do cone de 30°, o que permite compreender que há a fratura nesse. No entanto, o ensaio do cone de 35° não há a fratura, isso permite entender que a fratura acontece entre esses dois ângulos.

As rugosidades apresentadas demonstram que o processo possui um acabamento entre os valores de 0,5 μ m e 0,8 μ m entre o ângulo de 35° e o ângulo de 45°, o que caracteriza um acabamento para superfícies de alta exigência. Para o ângulo de conformação de 30° a rugosidade média alcançada é de 1,2 μ m garantindo ao processo uma exigência media. O intervalo de rugosidade da conformação incremental (0,5 μ m a 2,6 μ m) faz com que o acabamento dessa seja melhor que o processo de estampagem profunda (0,2 μ m a 6,3 μ m). O aumento da rugosidade na conformação do cone de 30° indica que pode haver relação entre a rugosidade e a fratura devido a grande diferença que ocorre nos valores das rugosidades das mesmas regiões durante os outros ensaios.

As durezas encontradas demonstram que o processo mantém uma proximidade dos valores alcançados independente do ângulo de conformação.

É possível concluir que a região da fratura acontece no momento em que a dureza externa for menor que a dureza interna, com espessura menor ou igual ao valor de 0,3 mm, e a rugosidade média possuir o valor maior ou igual a 2,5 µm.

5.1 Sugestão de trabalhos

(a) Variar o ângulo de inclinação da parede entre 30° e 35° para definir a partir de qual inclinação acontece a fratura. E analisando a variação de

dureza dentro do perfil conformados

(b) Impor um aquecimento para a conformação do aço inoxidável AISI 304 para definir se há uma melhora no processo de conformação ou se as propriedades da conformação não se alteram durante o processo

(c) Utilizar trajetória centro-periferia e comparar os resultados com o processo periferia-centro utilizado atualmente.

REFERÊNCIAS

Amar Kumar Behera, Johan Verbert, Bert Lauwers, Joost R. Duflou, Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate adaptive regression splines, **Computer-Aided Design**, Volume 45, Issue 3, March 2013, Pages 575-590

ASM Handbook "Volume 1 Properties and selections: Iron Steels and high performance alloys" – ASM International – 1993

ASTM International. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials: ASTM E8-E8M, 2013. 28 p.

B. Lu, Y. Fang, D.K. Xu, J. Chen, H. Ou, N.H. Moser, J. Cao, Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 85, October 2014, Pages 14-29

BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2013. xxv, 711 p. (Tribology series).

Carlos Felipe Guzmán, Jun Gu, Joost Duflou, Hans Vanhove, Paulo Flores, Anne Marie Habraken, Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations, **International Journal of Solids and Structures**, Volume 49, Issue 25, 1 December 2012, Pages 3594-3604

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: volume 1: estrutura e propriedades das ligas metálicas.2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 266p

Dongkai Xu, Weichao Wu, Rajiv Malhotra, Jun Chen, Bin Lu, Jian Cao, Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Volume 73, October 2013, Pages 37-46

G. Centeno, A.J. Martínez-Donaire, C. Valenciano, L. Martínez-Palmeth, D. Morales, C. Suntaxi, F.J. García-Lomas, Experimental Study on the Evaluation of Necking and Fracture Strains in Sheet Metal Forming Processes, **Procedia Engineering**, Volume 63, 2013, Pages 650-658

Julian M. Allwood, Daniel R. Shouler, Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states, **International Journal of Plasticity**, Volume 25, Issue 7, July 2009, Pages 1207-1230

K. Isik, M.B. Silva, A.E. Tekkaya, P.A.F. Martins, Formability limits by fracture in sheet metal forming, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 214, Issue 8, August 2014, Pages 1557-1565

Kailas, Satish Vasu; Lovell, Michael R.; Ingole, Sudeep Prabhakar; Menezes, Pradeep L.; Nosonovsky, Michael; **Tribology for Scientists and Engineers**: From Basics to Advanced Concepts, Springer, 2013. 948p.

L.M. Gómez-López, V. Miguel, A. Martínez, J. Coello, A. Calatayud, Simulation and Modeling of Single Point Incremental Forming Processes within a Solidworks Environment, **Procedia Engineering**, Volume 63, 2013, Pages 632-641

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication**: a textbook in tribology. Boca Raton: CRC Press, 1996. 257p.

M. B. Silva, M Skjoedt, A. G. Atkins, N. Bay, P. A. F. MARTINS, Single-point incremental forming and formability-failure diagrams, **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design** January 1, 2008 43: 15-35

M. HAM, J. JESWIET, Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Volume 55, Issue 1, 2006, Pages 241-244

M.H. Chen, L. Gao, D.W. Zuo, M. Wang, Application of the forming limit stress diagram to forming limit prediction for the multi-step forming of auto panels, **Journal of Materials Processing Technology**, Volumes 187–188, 12 June 2007, Pages 173-177

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2003. 463 p.

P.A.F. MARTINS, N. Bay, M. Skjoedt, M.B. Silva, Theory of single point incremental forming, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Volume 57, Issue 1, 2008, Pages 247-252

PATRÍCIO, Lúcio Flávio Santos. **Estampagem Incremental de Chapas**: Aplicação em Aço Comercial Automotivo. 2011. 252 p. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2011.

RODRIGUES, Jorge Manuel da Conceição; MARTINS, Paulo António Firme. **Tecnologia mecânica**: tecnologia da deformação plástica : vol II – aplicações industriais. Lisboa: Escolar Editora, 2005. xxv, 742 p.

S.B. Kim, H. Huh, H.H. Bok, M.B. Moon, Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 211, Issue 5, 1 May 2011, Pages 851-862

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 3rd ed. Amsterdam, NL: Elsevier, 2005. xxiv, 801 p

TANG, Sing C.; PAN, J. **Mechanics modeling of sheet metal forming**. Warrendale: SAE International, 2007. xii, 308 p.

VIEIRA, Alysson Lucas; **Estudo do campo de tensão e deformação em uma chapa fina durante o processo de conformação por estampagem incremental de ponto simples**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2015.

W.C. Emmens, A.H. van den BoogaardW.C. Emmens, A.H. van den Boogaard, An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming, **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 209, Issue 8, 21 April 2009, Pages 3688-3695

Zhen Cui, Z. Cedric Xia, Feng Ren, Vijitha Kiridena, Lin Gao, Modeling and validation of deformation process for incremental sheet forming, **Journal of Manufacturing Processes**, Volume 15, Issue 2, April 2013, Pages 236-241

APÊNDICE A – GRÁFICOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

				PUC I	Minas ATÓRIC)		
			I	Relatório o	le Ensa	io		
Máquina: Emic Programa: Tesc Ident. Amostra: >	DL20000 versão 3.0	Célula:])4 >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	rd 12 E	xtensômetro: -	Data: 11/	06/2015 Hora M ≫ Cliente: Danie	:: 14:50:00 T étodo de Ensaio: I Material: AI S	rabalho n° 0627 AISI 304 - DMH SI 304 - Lote: 0-1
Corpo de Com Prova	primento ba: (mr	se n)	Seção (mm2)	Força no Escoamento (kgf)	For Máxin (ça Tensão na Escoamen N) (MP	de Tens to Máxir a) (MP	ão Alongamento na na Ruptura 'a) (%
CP 1	50.0	00	10.20	*	8057.	60	* 789.	96 '
Número CPs Média Mediana Desv.Padrão Coef.Var.(%) Mínim o Máximo	50.0 50.0 50.0	1 00 00 * * 00 00	1 10.20 10.20 * * 10.20 10.20	0 * * * *	80) 80) 80) 80)	1 58 58 * * 58 58	0 + 790 + 790 + + + + 790	1 (0 .0 = = .0 = = .0 = = .0 = =
Tensão (MPa ^{800.0}	ı)							
640.0								
480.0								
320.0								
160.0								
0.0 0.00 <u>CP 1</u>	14.00 CP 2	28.00 CP 3	42.00 CP 4	56.00 CP 5	70.00	Deformação ((mm)	

PUC Minas LABORATÓRIO

ela	atór	io (de	Fn	sai	0

Relatório de Ensaio							
Máquina: Emic D Programa: Tesc v Ident, Amostra: >>	L20000 C ersão 3.04	élula: Trd 12	Extensômetro: -	Data: 11/06/	/2015 Hora: 1 Méto Cliente: Daniel	4:58:12 Traba do de Ensaio: AIS Material: AISI 3	lho n* 0628 SI 304 - DMH 04 Lote: 0-2
Corpo de Compr Prova	imento base (mm)	Seção (mm2)	Força no Escoamento (kgf)	Força Máxima (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
CP 1	50.00	10.20	•	8078.44	*	792.00	
Número CPs Média Mediana Desv.Padrão Coef.Var.(96) Mínim o Máximo	1 50.00 50.00 * * 50.00 50.00	1 10.20 10.20 * * 10.20 10.20	0 * * * *	1 8078 8078 * * 8078 8078	0 * * * *	1 792.0 792.0 * 792.0 792.0	0 * * * *
Tensão (MPa)							
640.0							
480.0							
320.0							
160.0							
0.0 0.00 14	4.00 28 CP 2	.00 42.00 CP 3 CF	56.00 4 CP 5	70.00 De	eformação (m	m)	
			PUC	Minas Atório			
--	---	--	---------------------------------	--	----------------------------------	---	------------------------------------
			Relatório	de Ensaio			
Máquina: Emic D Programa: Tesc v	L20000 c ersão 3.04	élula: Trd 12	Extensômetro: -	Data: 12/06 /	2015 Hora: 1 Méto	3:58:58 Traba ido de Ensaio: AIS	lho n° 0629 51 304 - DMH
Ident. Amostra: >>:	*****	>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	*****	»»»»»»»»»»»»»»»» (liente: Daniel	Material: AISI 3	04 Lote: 0-3
Corpo de Compr Prova	imento base (mm)	Seção (mm2)	Força no Escoamento (kof)	Força Máxima (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
CP 1	50.00	10.20	*	8127.06	*	796.77	*
Número CPs Média Mediana Desv.Padrão Coef.Var.(%) Mínim o Máximo	1 50.00 50.00 * * 50.00 50.00	1 10.20 10.20 * 10.20 10.20	0 * * * * *	1 8127 8127 * 8127 8127 8127	0 * * * * * *	1 796.8 796.8 * * 796.8 796.8	0 ** * * * *
Tensão (MPa) 800.0							
640.0							
480.0							
320.0							
160.0							
0.0 0.00 14	4.00 28 CP 2	.00 42.00 [<u>CP 3</u> [Ci) 56.00 P.4 CP.5	70.00 De	formação (m	m)	

PUC Minas LABORATÓRIO

Relatório de Ensaio

Máquina: E	mic DL	20000	Célula: 1	Frd 12	Exten	sômetro: -	Da	ta: 12/06 /	2015	Hora:	14:07:2	21 Tra	abalho	n° 0	630
Programa:	Tesc ver	são 3.04	•							Mé	odo de l	Ensaio: A	ISI	304 - 3	DMH
Ident. Amo	stra: >>>>	>>>>>>>	*****	*****	****	>>>>>>>>>	****	>>>> C	iente: D	aniel	Materia	: AISI	304	Lote	45-1
Corpo de Prova	Comprim	ento base (mm`		Seção (mm2)	Esc	Força no coamento (kof)		Força Máxima (N)	Te Eso	ensão de camento (MPa		Tensã Máxim (MPa	o / a	Nonga na Ri	mento uptura (%)
CP 1		50.00	,)	10.20		*		7682.50				753.1	9		*
Número CF Média Mediana	s	1 50.00 50.00)	1 10.20 10.20		0 * *		1 7683 7683		(*		753. 753.	1 2 2		0 * *
Desv.Padra	ão			*		*									*
Coef.Var.(9	%)	-0.00		10.20		*		=					•		
Minimo		50.00)	10.20		*		7683				753.	2		*
Maximo		50.00	,	10.20				/003				/55.	2		
Tensão (800.0	(MIPa)														
					_	_				_				_	_
640.0			1			_			_	+	$\left \right $		+	-	_
													+	+	-
480.0															_
320.0	-														
	+		_		_	_				_		_	_	_	
160.0	+	_	_		-	_				-		-	-	_	_
	+			\vdash	-	+				-		+	+	\neg	-
0.0	14.0	0	28.00	42.00		56.00	70.	00 De	forma	ıção (п	1m)				
CP 1		-F 2	CP 5	Ľ		CF 5									

			PUC LABOR	Minas atório			
			Relatório	de Ensaic)		
Máquina: Emic D Programa: Tesc v	L20000 c ersão 3.04	élula: Trd 12	Extensômetro: -	Data: 12/06	2015 Hora: 1 Méte	4:15:33 Traball	ho n° 0631 I 304 - DMH
Corpo de Compri	imento base	Seção	Força no	Força	Tensão de	Material: AISI 304 Tensão	Alongamento
Prova	(mm)	(mm2)	Escoamento (kgf)	Máxima (N)	Escoamento (MPa)	Máxima (MPa)	na Ruptura (%)
CP 1	50.00	10.20	*	7439.38	*	729.35	*
Número CPs Média Mediana Desv.Padrão	1 1 50.00 10.20 50.00 10.20 * *		0 * * *	1 7439 7439 *	0 * *	1 729.4 729.4 *	0 * *
Coef.Var.(%) Mínimo Máximo	* 50.00 50.00	* 10.20 10.20	* * *	* 7439 7439	*	* 729.4 729.4	* * *
Tensão (MPa) 800.0							
640.0							
480.0							
320.0							
160.0							
0.0 0.00 <u>CP 1</u>	L.00 28 CP 2	0.00 42.00 CP 3 C	0 56.00 P 4 CP 5	70.00 D	eformação (m	m)	

PUC Minas LABORATÓRIO

Relatório de Ensaio

			Relatorio	uc Ensuit								
Máquina: Emic D	L20000	Célula: Trd 12	Extensômetro: -	Data: 12/06	5/2015 Hora:	14:22:50 Traba	alho n° 0632					
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: AISI 304 - DM												
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>												
Corpo de Compr Prova	imento base	Seção	Força no Escoamento	Força Máxima	Tensão de	Tensão Máxima	Alongamento na Ruptura					
	(mm)	(mm2)	(kgf)	(N)) (MPa)	(MPa)	(%)					
CP 1	50.00	10.20	*	7599.1	*	745.01	*					
Número CPs	1	10.20	0	1	0	1	0					
Media	50.00	10.20	*	7595) *	745.0	*					
Mediana Dogu Dodužo	50.00	10.20	*	/35:		/45.0	*					
Coef Var (%)	*	*	*		: 4	*	*					
Mínimo	50.00	10.20	*	7599) *	745.0	*					
Máximo	50.00	10.20	*	7599) *	745.0	*					
Tensão (MPa)												
800.0												
						$\left \right $	+					
640.0												
480.0												
200												
320.0												
160.0												
0.0 1	4.00 2	28.00 42.0	0 56.00	70.00 D	eformação (n	ו ו נש)						
CP 1	CP 2	CP 3	<u>CP 5</u>		, » (1	-						

			PUC	Minas					
			LABOR	ATORIO					
			Relatório	de Ensaio					
Máquina: Emic D	L20000 Cé	élula: Trd 12	Extensômetro: -	Data: 11/06 /	/2015 Hora: 1	4:17:30 Trabal	ho n° 0624		
Programa: Tesc ve	ersão 3.04			_	Méte	odo de Ensaio: AIS	I 304 - DMH		
Ident. Amostra: >>>	******	******	******	>>>>>> C	liente: Daniel	Material: AISI 304	Lote: 90-1		
Corpo de Compri Prova	mento base	Seção	Força no Escoamento	Força Máxima	Tensão de Escoamento	Tensão Máxima	Alongamento na Ruptura		
	(mm)	(mm2)	(kgf)	(N)	(MPa)	(MPa)	(%)		
CP 1	50.00	10.20	*	8029.81	*	787.24	*		
Número CPs	1	1	0	1	0	1	0		
Média	50.00	10.20	*	8030	*	787.2	*		
Desv.Padrão	50.00	10.20	*	0000	*	/0/.2	*		
Coef.Var.(%)	*	*	*	*	*	*	*		
Mínim o	50.00	10.20	*	8030	*	787.2	*		
Maximo	50.00	10.20		0050		/0/.2			
Tensão (MPa)									
800.0									
640.0									
							+		
480.0							+		
/							$\left \right $		
320.0									
160.0									
100.0									
0.0 0.00 14	.00 28. CP 2	00 42.00 CP 3 CF	56.00 9.4 CP 5	70.00 De	eformação (m	m)			

PUC Minas LABORATÓRIO

Relatório de Ensaio

							1.00	ator	10										
Máquina: E	mic DI	.2000(rsão 3	D C	élula: 1	Frd 12	2	Exten	sômet	ro: -	Da	ta: 11 /	06/20	15 H	Hora: 1	14:43:	33 T	Trabali	10 n° () T 304	626
Filograma.		1540 3											-	men	uu ue	LIISalu		1004 -	DMI
Ident. Amos	tra: >>>	>>>>>>	****	>>>>>	*****	****	>>>>:	*****	>>>>	>>>>	*****	Clien	te: Dar	le	Materia	al: AIS	51 304	Lote	a: 90-3
Corpo de	Comprir	nento b	ase		Seçâ	io		Força	no		For	ça	Tens	são de		Ten	são	Alonga	amento
Prova		6			(mm ⁴	2)	Esc	oamei //	nto		Maxin	1a N)	Escoa	(MP=)		Maxi	ima P=\	na F	{uptura}
		-				-)			.gi)					(111 4)		(11)			(70)
CP 1		50	0.00		10.2	20		90.	.60		7870.	05		87.11		7/1	.57		-
Número CP	s		1			1			1			1		1			1		0
Média		50	0.00		10.2	20		90.	.60		78	70		87.11		77	1.6		*
Mediana		50	0.00		10.2	20		90.	.60		78	70		87.11		77	1.6		*
Desv.Padra	0		*			*			*			*		*			*		*
Mínim o	v	50	0.00		10 2	0		90	60		78	70		87 11		77	16		*
Máximo		50	0.00		10.2	20		90	.60		78	70		87.11		77	1.6		*
Tensão (1	MPa)																		
800.0						5													
						\square	+	_	\rightarrow						<u> </u>		<u> </u>	<u> </u>	\vdash
610.0																			
040.0																			
180.0																			
						Π													
320.0	-				-	┝┻	+	+	+				-		-	-	-	<u> </u>	\vdash
160.0																			\square
						\vdash	+	-	+	_			-					+	\vdash
0.0																			
0.00 CP 1	14.	CP 2	28	.00 CP 3	42	.00 CP 4	4	56.00 [Ci	P 5	70.	.00	Defo	rmaç	ão (m	I M)				