

LEVANTAMENTO DO ESTADO LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO AISI 304 ATRAVÉS DAS DUREZAS

Daniel Miranda Horta¹
Jánes Landre Júnior²

Resumo: O trabalho é uma pesquisa quantitativa, que tem por objetivo demonstrar o levantamento do estado limite de deformação através das durezas. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de matérias de construção mecânica de forma a permitir que fosse possível levantar o estado limite de conformação através das durezas mensuradas no material. E de acordo com os resultados obtidos verifica-se que 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°. As durezas encontradas demonstram 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.

218

Palavras Chaves: Conformação Incremental; SPIF; dureza.

Abstract - This paper is a quantitative research, which aims to demonstrate the survey of the limit state of deformation through the hardness. The tests were conducted in the mechanical materials laboratory in order to allow it to be possible to raise the limit state of conformation through the hardness measured in the material. And according to the results obtained it is verified that the incremental stamping process allows the forming parts of stainless steel AISI 304, in a varied range of angles with a maximum limit between 30° and 35°. The hardness found show that the fracture region occurs at the moment when the external hardness is smaller than the internal hardness, with a thickness less than or equal to 0.3 mm.

Keywords: Incremental Conformation; SPIF; hardness.

INTRODUÇÃO

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,

¹Bacharel em Engenharia Mecatrônica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Email: danielmh@gmail.com

²Bacharel em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Email: janesh@pucminas.br

pequena produção e conformados de grande complexidade (LU et al., 2014).

De acordo com Guzmán et al. (2012) 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.

O procedimento executado pela conformação incremental segue a sequência: a ferramenta é posicionada na parte mais externa da chapa, recebe um incremento (Δv_1) (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 outro incremento e recomeça o ciclo tendo novamente o incremento Δv_1 como início. A repetição acontece até que seja conformada toda a geometria desejada.

Conforme Martins et al. (2008) as investigações na conformação incremental de ponto único (SPIF) acontecem em quatro parâmetros principais: (i) espessura da chapa; (ii) tamanho do passo vertical para baixo a cada revolução, (iii) velocidades de revolução e do passo (iv) raio da ferramenta de conformação. Essas grandezas principais estão representadas pela Figura 1.

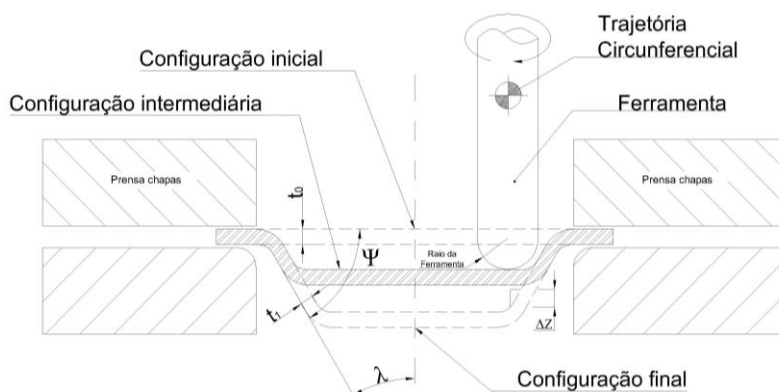


Figura 1. Principais grandezas da conformação incremental
Fonte: Adaptado de MARTINS et al. (2007).

A espessura é comumente explicada pela lei dos senos. Para o passo vertical Ham e Jeswiet 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.

A dureza de um material, segundo 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.

O processo de medição é feito através da aplicação de uma carga pré-determinada 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.

O trabalho é uma pesquisa quantitativa, ou seja, pretende demonstra que o aumento da dureza pode estar relacionado diretamente com a área do rompimento do cone. Tem como objetivo demonstrar o levantamento do estado limite através das durezas, o que torna esse trabalho uma pesquisa explicativa. De acordo com os procedimentos esse trabalho é uma pesquisa experimental devido as etapas e métodos de aquisição dos dados.

MATERIAIS E MÉTODOS

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.

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.

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 120° 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 dessa maneira as durezas e quais os materiais que são ensaiados por cada uma delas.

Tabela 1 - Escala de dureza Rockwell.

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
B	Esfera 1/16"	100	Aços moles, ligas não ferrosas duras (de cobre e alumínio)
C	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
H	Esfera 1/8"	60	Alumínio, chumbo, zinco

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

A escolha das variáveis serviu 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:

222

- (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.

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 2 - Características do aço inox 304

% Volume							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	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 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.

A ferramenta foi definida como geometria hemisférica de diâmetro $\varnothing 12,1$ 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.

A geometria escolhida é a forma de tronco de cone, que possui $\varnothing 140$ 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 $\lambda=30^\circ$, $\lambda=35^\circ$, $\lambda=40^\circ$ e $\lambda=45^\circ$. Esse intervalo foi definido devido a trabalhos anteriores que mostram que a conformação ocorre até o semi-ângulo de $\lambda=30^\circ$.

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

- Espessura inicial da chapa;
- Espessura final da chapa;
- Ângulo 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.

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 coletados 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 2 3 e 4, 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.

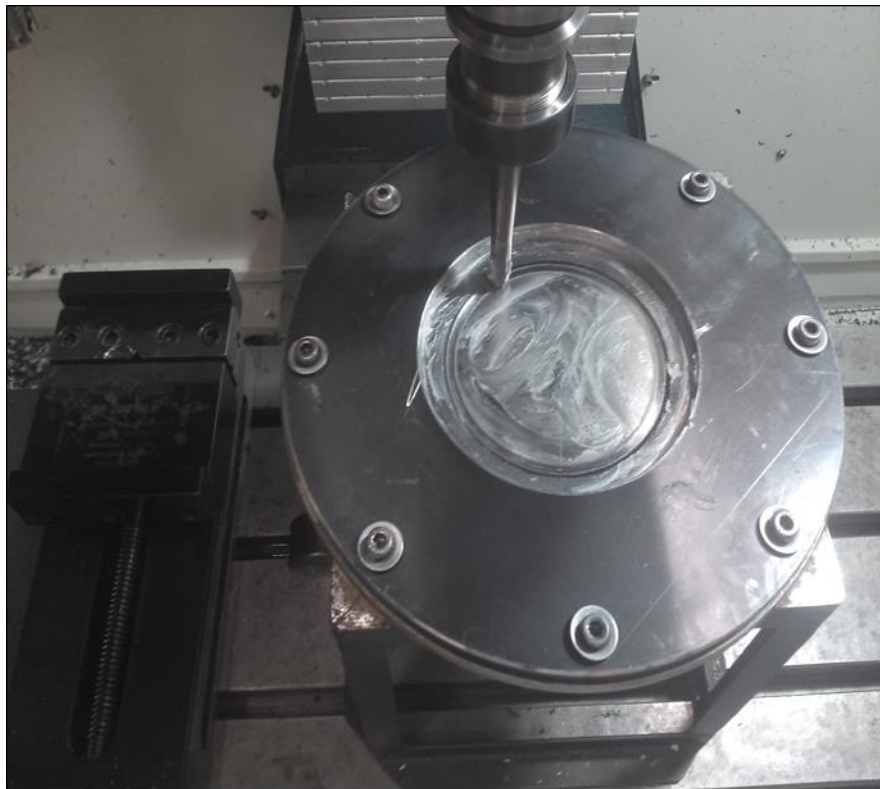


Figura 2. Início do ensaio de conformação incremental.
Fonte: O autor.



Figura 3. Final do ensaio de conformação incremental.
Fonte: O autor.

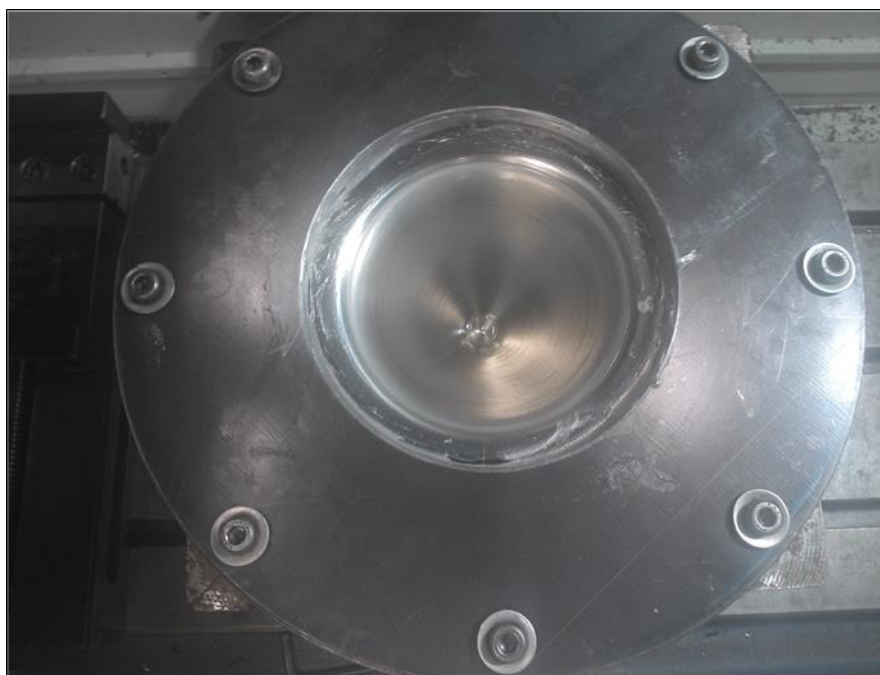


Figura 4. Cone conformado.
Fonte: O autor.

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 5.

A medição da dureza foi realizada 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.

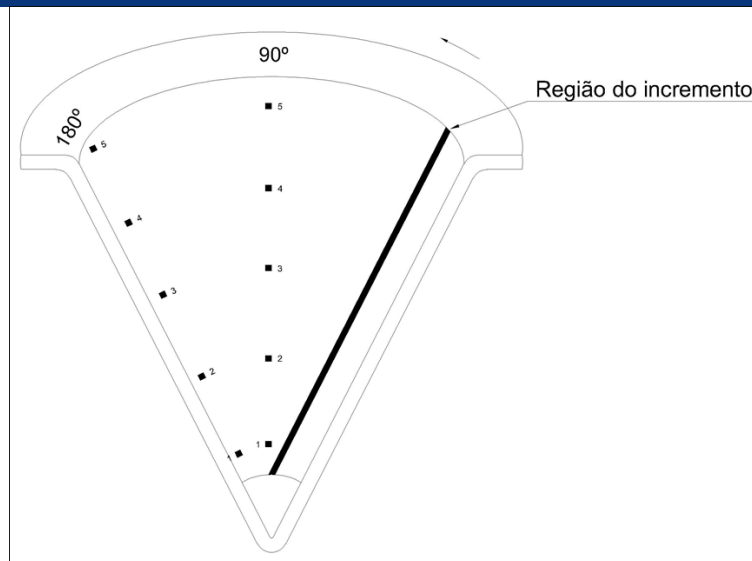


Figura 5. Demarcação das regiões de medição da rugosidade.

Fonte: O autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados após o ensaio de conformação incremental das chapas de aço inoxidável AISI 304 estão apresentados na Tabela 3. Estão apresentados primeiro os dados do ensaio de tração, em seguida os dados de rugosidade média e, por fim, os dados do ensaio de dureza.

As durezas foram obtidas e tratadas de maneira que pudesse representar a evolução em toda a região do cone, para que fosse possível identificar um padrão que indicasse a eminência da fratura. (Tabela 3).

Tabela 3. Dados de dureza HRB.

Região		Dureza HRB			
Interna	Ensaio 30°	Ensaio 35°	Ensaio 40°	Ensaio 45°	
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 30°	Ensaio 35°	Ensaio 40°	Ensaio 45°	
1	103,67	108,67	119,00	114,50	
2	122,50	117,00	123,50	129,00	

Região	Dureza HRB			
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

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

CONCLUSÃO

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.

REFERÊNCIAS

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

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

GUZMÁN C. F., GU, J.; DUFLOU, J.; VANHOVE, H.; FLORES, P.; HABRAKEN, A. M. Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations, *International Journal of Solids and Structures*. v.49, n. 25, dec. 2012, p. 3594-3604.

High-Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels, Properties and selections: Iron Steels and High-Performance alloys. v. 1, *ASM Handbook*, ASM International, 1990.

LU, B.; FANG, Y.; XU, D. K; CHEN, J.; OU, H.; MOSER, N. H.; CAO, J. 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*, v. 85, oct. 2014, p. 14-29.

MARTINS, P.A.F.; BAY, N., SKJOEDT, M., SILVA, M. B. Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. v. 57, n. 1, 2008, p. 247-252

PATRÍCIO, L. F. S. *Estampagem Incremental de Chapas: Aplicação em Aço Comercial Automotivo*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 252 p