

CONFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 409 PARA FABRICAÇÃO DE PÁS DE VENTILADORES

F. D. Foroni

L. A. Moreira Filho

fernandoforoni@rocketmail.com

lindolfo@ita.br

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, IEM

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – S. J. Campos, Brasil – CEP 1228-900

M. A. Menezes

miguelm@ita.br, miguel@dem.feis.unesp.br

UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, DEM

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira – SP, Brasil – CEP 15385-000

Abstract. Com a crescente preocupação de exaustão de gases dentro de túneis após o acidente com o túnel Mont Blanc na Itália e França com 41 mortos e mais de 100 ventiladores em operação, houve a necessidade de adaptação dos modelos existentes de ventiladores a condições de alta temperatura. No entanto, as soluções existentes possuem desvantagens aerodinâmicas ou não resistem a temperaturas elevadas. O presente trabalho fornece uma alternativa aos ventiladores existentes no mercado através de uma nova tecnologia de fabricação de pás para ventiladores a nível comercial. Essa nova tecnologia introduz o uso do aço inoxidável AISI 409 devido à sua boa susceptibilidade a temperaturas de exaustão de gases em túneis sob condição de incêndio. A inovação é centrada no processo de estampagem de chapas metálicas visando obter as formas aerodinâmicas para o rendimento máximo do ventilador. Através da impressão de círculos na chapa antes da conformação, é mostrado, experimentalmente, que, durante o processo de estampagem, as regiões mais deformadas do painel da pá não atingem as deformações limites do material utilizado.

Palavras-Chave: *Perfis Aeronáuticos, Pás de Ventiladores, Estampagem, Instabilidade Plástica, Curvas Limites de Conformação.*

1. INTRODUÇÃO

No projeto de ventiladores, as pás se constituem nos elementos mais importantes de um ventilador, pois determinam sua eficiência, nível de ruído, durabilidade e estética. Dessa forma, um processo de fabricação alternativo para fabricação de ventiladores, particularmente das pás, pode compreender um processo de conformação de uma chapa, seguido de suas fixações por soldagem, como considerado nesse trabalho. Sendo assim, o processo de fabricação é de vital importância, porque pode definir limitações tanto no custo quanto nos aspectos técnicos.

Nos processos de conformação de chapas o conhecimento da mecânica da deformação, da falha das chapas (estricção ou fratura), e da distribuição final das deformações são importantes na otimização desses processos. A distribuição final das deformações em componentes metálicos de chapas é mostrada ser influenciada por propriedades dos materiais, tal como: índice de encruamento, n , índice de sensibilidade à taxa de deformação, m , coeficiente de anisotropia plástica normal, R e a deformação na fratura, ϵ_f , embora as deformações sejam mais influenciadas pelo atrito, por variações na pressão de sujeição e/ou pela espessura inicial da chapa. Assim, de maneira a controlar o sucesso do processo de deformação com óbvias implicações econômicas é essencial o conhecimento do comportamento plástico da chapa metálica sob as condições particulares do processo.

Tradicionalmente, há alguns métodos de cálculos, analíticos e numéricos para determinação das tensões e deformações na conformação de chapas metálicas, tais como o método da energia uniforme, o método dos blocos (*slab*), o método do campo das linhas de deslizamento, o método das diferenças finitas, assim como o método dos elementos finitos. Todos esses métodos fornecem soluções aproximadas e rápidas para os cálculos, e podem ajudar no projeto dos componentes estampados. Nesse trabalho, de modo a verificar se as deformações máximas alcançadas, especialmente nas áreas mais solicitadas durante o processo de conformação das pás atingem as deformações limites, são empregadas as teorias clássicas de instabilidades e a teoria da propriedade do ângulo da estricção. Assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar usando algumas teorias existentes, com o emprego das curvas limites de conformação, se as deformações máximas alcançadas nas áreas mais solicitadas durante um processo de estampagem das pás atingem as deformações limites.

2. PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Os principais problemas, mais comuns, em um processo de estampagem são: presença de rugas nas regiões estampadas, rompimento das chapas, estricção demasiada em uma região localizada da pá, número de estágios necessários para conformação total e, por fim, a força necessária para a estampagem de maneira a selecionar uma prensa. Para evitar tais problemas, foram utilizados os seguintes cuidados: utilização de processo de estampagem com estiramento, com a existência de um prensa-chapa inicial para evitar rugas, adoção de espessura de dois milímetros de chapa, uma conformação lenta para evitar o rompimento e estricção demasiada da chapa e, por fim, a adoção de um sistema de prensagem com capacidade superior à estimada em aproximadamente 50%.

Na seqüência, é descrita a preparação, bem como os resultados de cada um dos testes de estampabilidade de modo a se estabelecer um patamar confiável da viabilidade do processo de estampagem.

2.1. Teste inicial com aço SAE 1020

Para o primeiro teste foi utilizada uma chapa de material aço carbono ABNT 1020 visando à diminuição dos custos de projeto. Com isso, também se abriu a possibilidade de comparar os testes em aço carbono com os de aço inoxidável AISI 409.

Uma chapa de dois milímetros de aço carbono foi estampada utilizando-se toda a área de atrito possível entre o sujeitador e a base da matriz. Com isso, obteve-se uma posição mais conservadora sobre o escorregamento da chapa entre o sujeitador e a matriz.

Na estampagem da chapa, utilizou-se também a marcação de uma grade quadriculada de 50 x 50 mm de modo a permitir a visualização das regiões mais afetadas pela estricção. Uma chapa assim preparada para prensagem pode ser vista na Fig. 1.



Figura 1. Chapa preparada para prensagem – Teste 01. Foroni (2005)

Nesta etapa, é descrito passo a passo o processo de forma a detalhar o procedimento. Nos testes posteriores, por outro lado, foram suprimidas algumas etapas de modo a ser mais objetivo, focando-se principalmente nos resultados das estampagens.

A Fig. 2. ilustra o posicionamento da chapa na matriz através fixação do sujeitador.

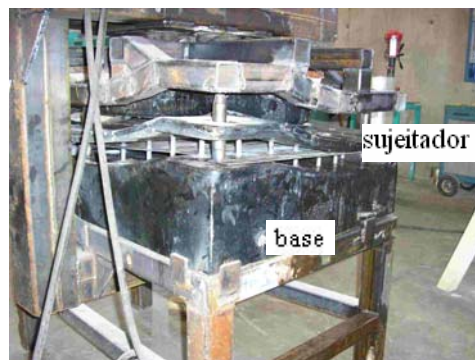


Figura 2. Chapa 1 posicionada entre a base da matriz e o sujeitador. Foroni (2005)

Como pode ser observado na Fig. 2, a matriz não constitui uma superfície plana para o apoio da chapa. Deste modo, para baixar o sujeitador, é adicionada uma força de forma a provocar uma deformação inicial na chapa. Esta força é exercida por aproximadamente 20 parafusos M12 e suas respectivas porcas, de modo a fazer o sujeitador e a chapa tocar toda a superfície da base da matriz, exceto à parte do punção. A deformação provocada pelo sujeitador pode ser vista na Fig. 3.

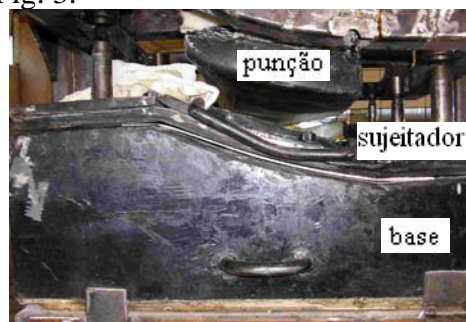


Figura 3. Conformação da Chapa 1 por força do sujeitador na matriz- Detalhes. Foroni (2005)

Após a conformação inicial pelo sujeitador, se pode garantir a existência de um pré-tensionamento da chapa inicial. O passo seguinte consiste na utilização do punção, via cilindro hidráulico, conforme mostrado na Fig. 4.



Figura 4. Conformação da Chapa 1 pelo Punção. Foroni (2005)

Após a conformação inicial, o punção foi suspenso de maneira a permitir a confecção de um furo na superfície da chapa. A geração do furo possibilitou avaliar se a estampagem profunda da pá ocorreu de forma completa. Foi constatado que a força empregada não foi suficiente para determinar a forma desejada. Não obstante, pode ser observada a conformação parcial da chapa, na forma de um perfil aeronáutico, conforme apresentado pela Fig. 5.

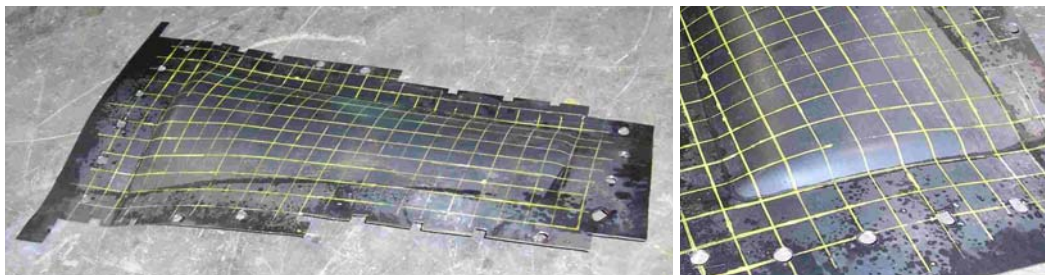


Figura 5 Chapa 1 após conformação e detalhe da região crítica. Foroni (2005)

A Fig. 5 indica que a chapa conformada, mesmo em sua região crítica, ou seja, de maior conformação, não apresentou o fenômeno de enrugamento da chapa, o que denota que a pressão e o atrito entre a chapa e base da matriz e chapa e sujeitador foram suficientes para impedirem o enrugamento da chapa. Além disso, não houve deformações localizadas acentuadas. Desse modo, pode-se eliminar parte da superfície de contato sujeitador-chapa-base da matriz de modo a facilitar a preparação do experimento.

2.2. Aumento da força e diminuição do atrito

Para o segundo teste, conforme conclusões obtidas pelo primeiro, foi utilizado uma área de atrito menor, facilitando a preparação, como mostrado na Fig. 6, assim como foi aumentada a força utilizada para o limite do dispositivo, ou seja, 75 toneladas, agora 50% maior que o valor calculado, apesar da chapa ser de aço carbono.



Figura 6. Chapa 2 conformada depois da retirada do punção. Foroni (2005)

O procedimento adotado foi o mesmo do item 2.1, de onde se obteve deformações mais acentuadas, conforme mostra a Fig. 7 (estampagem mais profunda).

Para verificar se a deformação foi completa, foi realizado um furo no momento representado pela Fig. 7, que acusou, que mesmo na carga máxima o sistema não conseguiu conformar completamente a chapa de aço 1020. No entanto, a deformação foi bem mais acentuada que na primeira conformação, como pode ser visto na Fig. 7a.

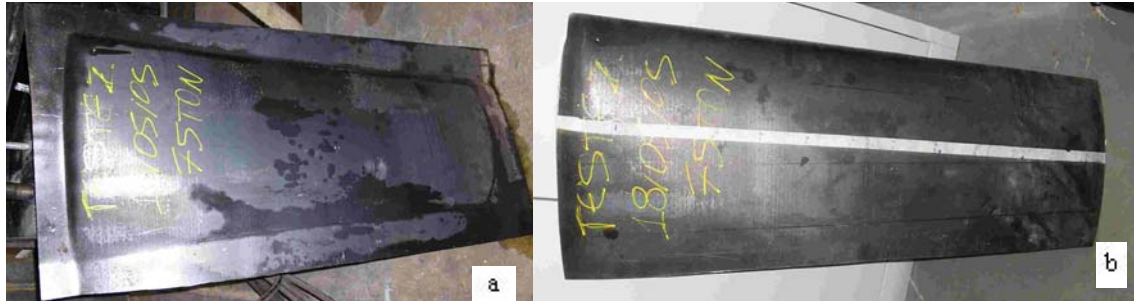


Figura 7. Chapa 2 após conformação (a) e cortada para medição dimensional. Foroni (2005)

Para medição dimensional das peças, a chapa foi cortada na região onde se iniciava a conformação, raiz da pá, de forma a se manter somente a parte útil da chapa do produto final. A Fig. 7b, que representa este corte, dá uma visão muito próxima do formato final da pá.

2.3. Mudança de Material

Em virtude da chegada no limite de força do sistema prensa-chapa, foi necessária a finalização dos testes em aço carbono e a adoção de testes em material mais dúctil e no qual o sistema foi realmente projetado, o aço inox 409. Com isso, o mesmo procedimento do item 2.2. foi realizado agora com a mudança do material. O resultado pode ser visto nas Figs. 8 e 9.

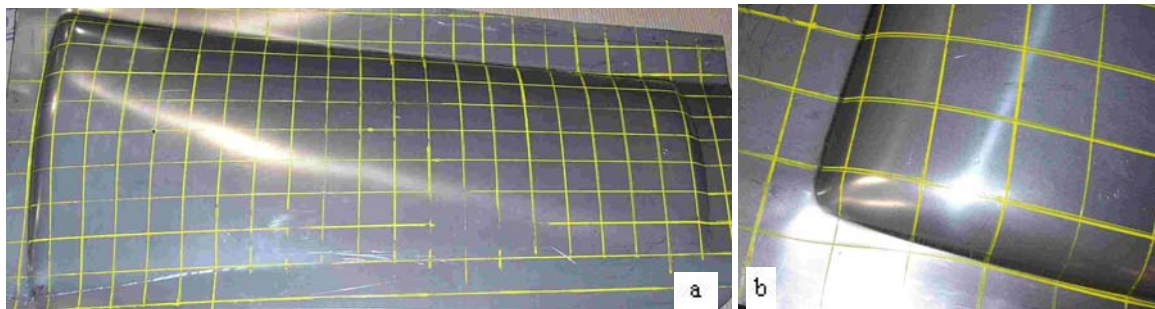


Figura 8. Chapa 4 após conformação (a) e detalhe da seção crítica (b). Foroni (2005)

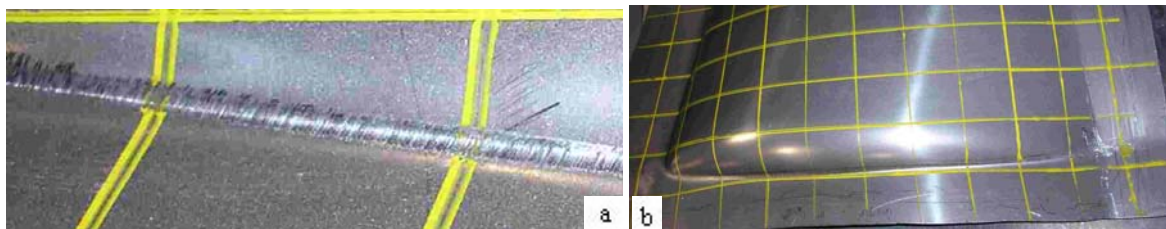


Figura 9. Detalhe da estrição localizada (a) e raiz da pá (b). Foroni (2005)

As Figs. 8 e 9 indicam que a chapa conformada, mesmo em sua região crítica, ou seja, de maior conformação, não apresentou o fenômeno de enrugamento da chapa, o que denota que a pressão e o atrito entre a chapa e base da matriz, e da chapa e o sujeitador foram suficientes para impedir o enrugamento da chapa. Além disso, não houve deformações

localizadas acentuadas. Entretanto, pela distorção da grade utilizada após a deformação e ao tamanho das grades empregadas, não haveria confiabilidade nos níveis de deformações medidos, que efetivamente estariam presentes no plano da chapa sob deformação. Isto porque, os gradientes de deformações, de ponto para ponto da chapa, efetivamente não estariam sendo medidos, sobretudo nas regiões mais deformadas. Devido a esse fato, foi necessário e imperativo um outro tipo de grade, o que implicou em um novo teste.

3. OBTENÇÃO DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Na literatura, existem teorias de instabilidade clássicas e não clássicas de modo a prever os limites de deformações de chapas. No entanto, o processo empregado até aqui na medição das deformações limites no plano da chapa, não se mostrou capaz de fornecer dados para comparações com essas teorias. Devido a isso, um novo tipo de grade, mais refinada, na forma de círculos bem menores que os quadrados da grade anterior foi empregado, de maneira a retratar os gradientes de deformações no plano da chapa. A medição precisa das deformações limites no plano da chapa possibilita avaliar a confiabilidade do processo de estampagem do extradorso e do intradorso da pá, porque a comparação das deformações limites medidas com as deformações limites calculadas teoricamente, utilizando as teorias de Dorn (1948), Hill (1948), Swift (1952) e Menezes (1999) com a TPAE (Teoria da Propriedade do Ângulo da Estricção), indica com segurança, se há ou não falha durante a estampagem. Tal segurança é garantida quando se observa que as deformações medidas no plano da chapa são inferiores àquelas teoricamente calculadas a partir das condições de instabilidades clássicas e a TPAE. Essas teorias empregadas permitem definir as deformações limites da chapa de Aço AISI 409 inoxidável, a partir de propriedades plásticas, como por exemplo, o índice de encruamento n , o coeficiente de anisotropia plástica normal R e o encruamento inicial da chapa ε_0 . Dessa forma, o plano chapa foi marcado através de um processo eletrolítico de impressão de círculos, na forma de uma grade, de modo a permitir as medições das deformações limites sobre toda a superfície da pá, e absorver os gradientes de deformações, sobretudo nas áreas mais deformadas. Os círculos da grade foram impressos com diâmetros iniciais de 8 mm. Após o processo de impressão da grade no plano da chapa houve a posterior prensagem, conforme realizado nos testes experimentais anteriores. A impressão inicial da grade na chapa não deformada e na chapa conformada é também mostrado na Fig. 10.

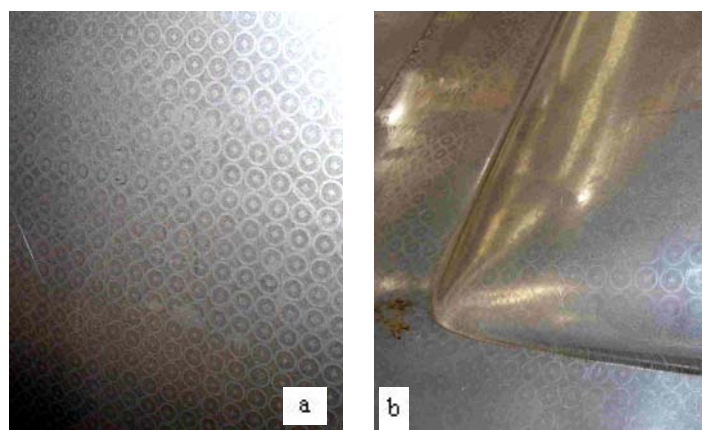


Figura 10. Chapa 5 com marcação refinada (a) não deformada (b) conformada. Foroni (2005)

A deformação é calculada pela relação entre os diâmetros finais da elipse e os diâmetros iniciais do círculo, em escala logarítmica. Assim, as deformações localizadas foram medidas em posições onde as deformações eram maiores (preferencialmente na raiz da pá),

como mostra a Fig. 11. Estas foram comparadas com as deformações limites calculadas, obtidas através das teorias de instabilidades clássicas e a TPAE, na forma de uma curva limite de conformação, como é demonstrado na Fig. 12, considerando o material anisotrópico, com ($R=1,2$); ou anisotrópico com comportamento mecânico equivalente a um material isotrópico, com ($R=1,0$), com o encruamento inicial $\varepsilon_0 = 0$ e o índice de encruamento do material da chapa, $n=0,22$.



Figura 11. Pontos de medição das deformações e alguns valores encontrados. Feroni (2005)

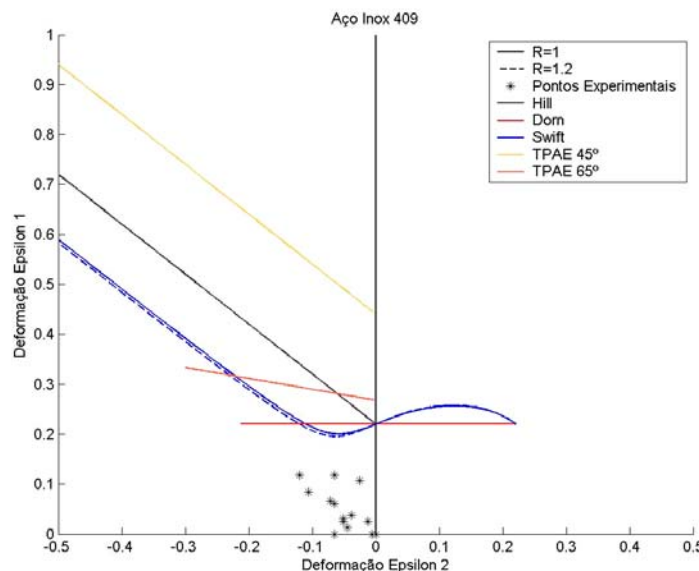


Figura 12. Curvas limites de conformação teóricas com pontos experimentais medidos. Feroni (2005).

Como pode ser observado na Fig. 12, os pontos experimentais representativos das maiores deformações se encontram na região de estampagem da curva limite de conformação, ou seja, o lado esquerdo da curva, razão pela qual não foi necessário considerar outras teorias que definem as deformações limites, sobretudo para a região de estiramento. Caso se obtivesse pontos no lado direito do gráfico, estaria caracterizada sobre a curva limite de conformação, as condições predominantes de estiramento. Neste caso, as teorias de Bressan e Williams (1983), Marciniak e Kuczyński (1967) e Menezes e Al-Qureshi (1987), por exemplo, poderiam ser também consideradas.

Sendo assim, verifica-se da curva limite de conformação mostrada na Fig. 12, que as deformações nas regiões mais deformadas, na região da raiz da chapa da pá, não atingiram as deformações limites associadas às chapas de aço inoxidável, o que implicaria na não ocorrência de falha dessas chapas durante o processo de estampagem. Dessa forma, se considera seguro o processo de estampagem e assim como concluída a fase de testes experimentais, necessária para uma análise mais precisa.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na seqüência, serão feitas algumas considerações com relação a: possibilidade de falha da pá em função dos processos de fabricação empregados, influência da anisotropia com relação à possibilidade de ocorrência da estrição ou afinamento da chapa, o papel das variações geométricas da pá em função dos parâmetros do processo de estampagem que podem acarretar em perdas de eficiência do ventilador, assim como serão feitas algumas ponderações sobre a necessidade de melhorias do processo de estampagem empregado.

4.1. Análise da possibilidade de ocorrência de falha da pá

Verificou-se através dos testes experimentais realizados que o processo de estampagem para a confecção da pá, se mostrou viável e seguro, na medida que as deformações nas regiões mais deformadas, da raiz da chapa da pá onde ocorre o maior grau de afinamento, não atingiram as deformações limites do aço inoxidável AISI 409 previstas, o que implicou na não ocorrência de falha durante o processo de estampagem. Além disso, nestas regiões mais deformadas, locais da chapa onde ocorre o corte prévio ao processo de soldagem, e são as regiões que devido à soldagem, naturalmente serão reforçadas pelo acoplamento do berço sólido do painel da pá e o metal de adição da soldagem TIG; não é a região crítica de operação do ventilador. Tal região ocorre onde a chapa não é mais apoiada pelo berço metálico, como indicado na Fig.13, a qual, nas medições efetuadas experimentalmente, como demonstrado na Fig. 11, não sofre deformações excessivas.

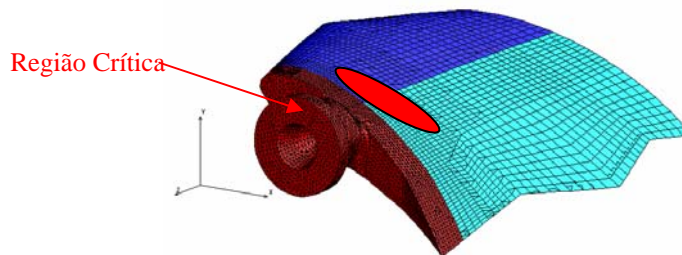


Figura 13. Região crítica da pá em operação. Foroni (2005)

4.2. Análise da influência da anisotropia no processo de estampagem

Pode ser também observado, da Fig. 12, o efeito da anisotropia plástica da chapa sobre as estricções difusa e localizada no plano da chapa da pá. Verifica-se que para um material de chapa que não apresenta encruamento inicial ($\varepsilon_0=0$), que a influência da anisotropia plástica normal só é significativa para as deformações limites previstas pela teoria de Swift (estricção difusa), sendo esta influência mais acentuada para a região de estampagem da curva limite de conformação.

Todavia, a teoria de Hill (estricção localizada) e a teoria de Dorn (1948) (estricção difusa) não se mostraram influenciadas pela anisotropia plástica normal da chapa, o que contraria os resultados obtidos por Keller (1968) e Bressan e Williams (1983), que, por sua vez, concluíram que a influência da anisotropia é mais significativa sobre a estrição localizada do que sobre a estrição difusa. Por outro lado, diferentemente de Hill (estricção localizada) que mostra que a capacidade de deformação diminui com o aumento da anisotropia, para um material que apresenta encruamento inicial ($\varepsilon_0 \neq 0$), a teoria da propriedade do ângulo da estrição (TPAE), para determinação das deformações limites, mostra que a capacidade de deformação aumenta com o aumento da anisotropia. Este fato foi observado por Menezes e Hartley (2000) e Itikava (2002). Entretanto, como mostra a curva limite de conformação, Fig. 12, para um material que não apresenta encruamento inicial ($\varepsilon_0=0$), tanto a teoria de Hill como a TPAE mostraram variações desprezíveis do efeito da

anisotropia. Embora, o efeito da capacidade de deformação da chapa cresça com o aumento da anisotropia como atualmente já demonstrado por Menezes (1999), Menezes e Hartley (2000) e Itikava (2002). Esse fato é verificado, quando na análise das deformações limites, considera-se ainda que muito pequeno, o encruamento inicial da chapa. Isso é realístico na medida em que a anisotropia acontece como resultado do encruamento, o que ocorre durante o processo de estampagem.

5. CONCLUSÃO

Verificou-se através de testes experimentais realizados, que o processo de estampagem para a confecção da pá mostrou-se viável e seguro, na medida que as deformações nas regiões mais deformadas, na raiz da chapa da pá, onde ocorre o maior grau de afinamento, não atingiram as deformações limites do aço inoxidável AISI 409 previstas; o que implicou na não ocorrência de falha durante o processo de estampagem. Além disso, nestas regiões mais deformadas, locais da chapa onde ocorre o corte prévio ao processo de soldagem, e são as regiões que devido à soldagem naturalmente serão reforçadas conforme projeto do painel da pá; não é a região crítica de operação do ventilador.

O processo de conformação da pá (estampagem com estiramento) possui as características de promover quase que totalmente a eliminação da recuperação elástica (*spring back*), dificultar a formação de rugas na chapa deformada, gerar gradientes de tensões relativamente uniformes e limitar grandes deformações a apenas materiais muito duteis devido à predominância de tensões de tração.

Pode ser também observado, da Fig 12 o efeito da anisotropia plástica da chapa sobre as estricções difusa e localizada no plano da chapa da pá. Verifica-se que para um material de chapa que não apresenta encruamento inicial ($\varepsilon_0=0$), que a influência da anisotropia plástica normal só é significativa para as deformações limites previstas pela teoria de Swift (estricção difusa), sendo esta influência mais acentuada para a região de estampagem da curva limite de conformação. Além disso, quanto maior o encruamento inicial da chapa ε_0 , maior será a anisotropia induzida na chapa (textura bem definida), razão pela qual o papel da anisotropia é mais evidente como uma função do encruamento inicial da chapa ε_0 . A TPAE demonstra claramente, que a anisotropia do material da chapa aumenta a capacidade de deformação dos materiais das chapas, para ambas as regiões da CLC, estampagem e estiramento, no caso particular do aço inoxidável AISI 409, foi considerado apenas a região de estampagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRESSAN, J. D.; WILLIAMS, J. A. 1983. The Use of a Shear Instability Criterion to Predict Local Necking in Sheet Metal Deformation. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 25, p. 155-68, 1983.
- DORN, J. E. 1948. Stress-Strain Rate Relations for Anisotropic Plastic Flow. Berkeley: *University of California*.
- FORONI, F.D., 2005. Desenvolvimento de Processo de Conformação de Pás Metálicas de Alto Desempenho para Aplicação em Sistemas de Metrô e Túneis Rodoviários. *Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica*.
- HILL, R. 1948. A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proc. Roy. Soc. London*, v.193A, p. 281-97.

- ITIKAVA, R. K..2002. Análise da Instabilidade Plástica de Chapas Metálicas Anisotrópicas Utilizando a Teoria da Propriedade do Ângulo da Estricção. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP.*
- KEELER, S.P. 1968. Circular Grid System: a Valuable Aid for Evaluating Sheet Metal Formability. In: SAE AUTOMOTIVE ENGINEERING CONGRESS, 1968, Detroit. *Proceedings...* Detroit: SAE. (Tech. Paper 680092)
- MARCINIAK, Z.; KUCZYŃSKI, K.1967. Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 9, p. 609-20.
- MENEZES, M. A., 1999. A New Theory to Assess Strain Limits of Anisotropic Sheet Metals, 2nd ESAFORMING-Conference on Material Forming, Guimarães-Portugal, pp. 141-146.
- MENEZES, M. A, AL-QRESHI, H. 1987. Análise da Instabilidade Plástica em Chapas Metálicas Anisotrópicas Utilizando Novo Critério de Escoamento. 175p. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica-Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP.*
- MENEZES, M.; A.;HARTLEY, P.2000; A Re-Interpretation of the Role of Strain-Rate and Anisotropy Effects in the Failure of Anisotropic Sheet Metals, In: 3rd ESAFORMING 2000, *Proceedings...* Stuttgart, Germany, v. VI, p.50-55.
- SWIFT, H.W.1952, Plastic Instability Under Plane Stress. *Journal Mechanics and Physics Solids*, v. 1, p.1-18.

THE FORMING OF AISI 409 SHEETS FOR FAN BLADE MANUFACTURING

Foroni, F. D.

Moreira Filho, L. A.

fernandoforoni@rocketmail.com

lindolfo@ita.br

ITA – Aeronautic Technological Institute, IEM

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – S. J. Campos, Brazil – CEP 1228-900

Menezes, M. A.

miguelm@ita.br, miguel@dem.feis.unesp.br

UNESP – São Paulo State University, Ilha Solteira Engineering Faculty, DEM

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira – SP, Brasil – CEP 15385-000

The necessity of adapting the standardized fan models to conditions of higher temperature has emerged due to the growth of concern referring to the consequences of the gas expelling after the Mont Blanc tunnel accident in Italy and France, where even though, with 100 fans in operation, 41 people died. The objective of this work is to present an alternative to the market standard fans considering a new technology in constructing blades.

This new technology introduces the use of the stainless steel AISI 409 due to its good to temperatures of gas exhaust from tunnels in fire situation. The innovation is centered in the process of a deep drawing of metallic shells in order to keep the ideal aerodynamic superficies for the fan ideal performance. Through the impression of circles on the plate plane it is shown, experimentally, that, during the pressing process, the more deformed regions on the plate plane of the blade can't reach the limits of deformations of the utilized plate material.

Keywords: Aeronautic profiles, Fan blades, Deep-drawing, Plastic instability, Limit Drawing Curve.