

# PROJETO E ANÁLISE DE FALHA PARA FABRICAÇÃO DE PÁS PARA VENTILADORES<sup>1</sup>

*Fernando D'Alessio Foroni<sup>2</sup>*

*Miguel Angelo Menezes<sup>3</sup>*

*Lindolfo Moreira Filho<sup>4</sup>*

## Resumo

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. A inovação é centrada no processo de estampagem de cascas metálicas e posterior soldagem mantendo as superfícies aerodinâmicas ideais tendo em vista a boa performance do ventilador. A partir disso, o método de elementos finitos, através do *software* elasto-plástico COSMOS, permitiu a verificação da estabilidade estrutural da pá em função dos esforços aerodinâmicos estabelecidos no projeto. Adicionalmente, são analisados os resultados e é desaconselhada a fabricação de pás com variações de espessuras localizadas, ou seja, não uniformes, em razão da concentração de tensões, discutida a influencia da anisotropia no processo e verificados quais as regiões críticas de trabalho da pá assim como quais os esforços admissíveis para o projeto.

**Palavras-Chave:** Estampagem; Pás; Falha em pás; Cascas metálicas

## PROJECT AND FAILURE ANALYSIS IN FAN BLADE MANUFACTURING

### Abstract

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. However, since then, the defied solutions have pointed to aerodynamic disadvantages or have seemed non-appropriate in these conditions. 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 process of a deep drawing of metallic shells and posterior welding, in order to keep the ideal aerodynamic superficies for the fan ideal performance and the cast of a metallic base in which the shells will be assembled and will be connected to the fan hub. The element finite method, by using the *software* elasto-plastic COSMOS, allow to verify the structural stability of the blade considering the aerodynamic project loads. Analyzing the results, the manufacturing of blades with variation on thickness is not advisable, due to the stress concentration. It was also pointed the influence of anisotropy in process and verified the critical regions of the blade, as much as, the admissible loads for the project.

**Key words:** Deep-drawing; Fan blades; Blade failure; Mettalic shells.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *ITA – Mestre em Ciências, fernandoforoni@rocketmail.com*

<sup>3</sup> *UNESP – Doutor em Ciências, miguel@dem.feis.unesp.br*

<sup>4</sup> *ITA – Doutor em Ciências, lindolfo@ita.br*

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento das cidades, surgiu a diminuição da área disponível por habitante caracterizando a falta de espaço aliada com a necessidade de transporte de um maior volume de pessoas e com maior rapidez e segurança. Assim, a Engenharia tem desenvolvido novos meios de disponibilização de espaço através da verticalização das cidades. Essa verticalização resolveu o problema de acomodação das pessoas, porém não seu transporte.

A partir do acidente com o Túnel Mont Blanc, de aproximadamente 12km de extensão, que divide a França e a Itália, em que um caminhão pegou fogo em seu interior causando a morte de 41 pessoas por intoxicação por fumaça, segundo Landroverclub,<sup>(1)</sup> em um túnel com mais de 100 ventiladores, os conceitos de construção de túneis foram rediscutidos, sobretudo com relação às saídas de emergência e aos sistemas de exaustão dos gases em situação de emergência. Para esse último, gerou-se a norma européia CEN: EN 12101-3,<sup>(2)</sup> que especifica as classes e os requisitos para exaustores de fumaça dentro dos túneis. Um requisito a ser considerado como requisito a esse trabalho é a condição de trabalho de 400°C por um período de duas horas.

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,  $\epsilon_f$ , embora as deformações sejam mais influenciadas pelo atrito, por variações na pressão de sujeição e/ou pela espessura inicial da chapa conforme Menezes.<sup>(3)</sup> 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.

Por outro lado, a conformação de chapas metálicas consiste na mudança da chapa de uma forma simples para outra mais complicada, onde na maioria dos casos práticos, contando que a chapa não fracture ou enrugue, e contando que o

afinamento não seja excessivo, o resultado final é julgado por critérios geométricos e pela aparência. Assim, é também essencial descrever superfícies e suas deformações.

Portanto o uso do método dos elementos finitos integrados com sistemas gráficos computacionais é uma ferramenta essencial e ajuda a entender o comportamento mecânico das chapas metálicas anisotrópicas, a predição da trajetória de deformação entre a chapa plana e a forma final, e oferece a possibilidade de descrever superfícies e suas deformações, durante o funcionamento dos ventiladores. É claro que no projeto de ventiladores, o escoamento plástico das pás nunca é esperado em trabalho, mas uma formulação de elementos finitos elasto-plástica deveria indicar, por exemplo, os deslocamentos e os níveis de tensões observados nas pás. Neste trabalho, em particular é empregado o programa de elementos finitos “Cosmos” buscando em um primeiro momento determinar a espessura mínima das pás, simular seus deslocamentos e os níveis de tensões observados, assim como verificar a estabilidade da solda das pás decorrentes do acionamento dos ventiladores.

## **2 LIMITE DE DEFORMAÇÃO NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS**

Na prática industrial, o critério que determina a falha nos processos de conformação de chapas é o aparecimento da estrição localizada ou fratura. Esses fenômenos estão vinculados ao estado final de tensões e deformações. A Curva Limite de Conformação expõe o grau de afinamento que uma chapa metálica pode apresentar em pontos diferentes de uma peça fabricada, dessa forma permite identificar mais facilmente as causas da falha no processo e, freqüentemente, eliminá-las, sendo então valiosa na verificação da praticabilidade dos componentes de um projeto proposto, ou na determinação dos parâmetros de materiais mais adequados a um dado processo. Para um certo material, a Curva Limite de Conformação pode representar regiões diferentes de acordo com o processo de deformação imposto, estiramento, deformação plana e estampagem. Portanto, essas regiões permitem a caracterização do comportamento ao escoamento plástico das chapas metálicas para trajetórias importantes de deformações, associadas às deformações limites avaliadas.

## **3 MODELAGEM NUMÉRICA NO PROJETO DE PÁS**

O programa utilizado para a simulação foi o programa Cosmos, como destacado anteriormente, e a simulação foi realizada cujos cálculos, assim como as condições de contorno. O programa se limitou ao comportamento elástico da pá considerando no projeto apenas as deformações elásticas e ainda o nível de esforços bem abaixo das tensões de escoamento do material (60% do limite de escoamento do material). A simulação do produto final por elementos finitos através dos esforços admissíveis do produto final propicia a definição de parâmetros como: espessura da chapa do painel, rotação máxima admissível, vida em fadiga e a estabilidade estrutural das pás durante o funcionamento do ventilador.

Foi elaborado um modelo de pá em que o punho e raiz foram representados com elementos sólidos (Tetra4 – com quatro nós cada), e o extradorso, intradorso e longarina central representados com elementos de casca (Shell4 – com 4 nós cada).

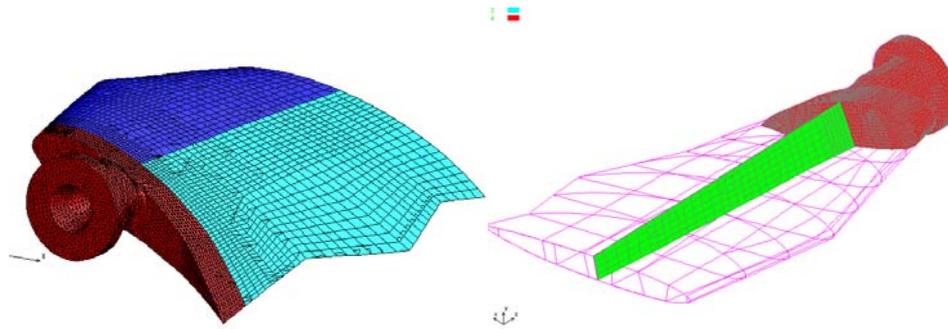


Figura 1. Pá para ventilador proposta, Cemef.<sup>(4)</sup>

A Figura 1 mostra o modelo de elementos finitos com um berço sólido na região da raiz representado pela cor marrom e os painéis da pá em cor azul. Por necessidade de refinamento de malhas, foi determinada uma distinção entre os painéis azul claro e escuro, o que não se justifica fisicamente.

No entanto, devido ao Momento de Arfagem da pá, é necessária a adoção de uma longarina de suporte de forma a evitar o dobramento das chapas dos painéis na interface com o berço sólido. A longarina será fixada nos painéis por processo de soldagem em uma das cascas e sendo que o processo de união mecânica ocorre por rebitagem.

O berço da raiz da pá foi projetado como sendo uma peça fundida sólida visando suportar a concentração de tensões principalmente da força centrífuga. Desse modo, a Figura 1 representa a transição entre o perfil aerodinâmico da pá e o punho cilíndrico o qual será fixada radial e axialmente.

### 3.1 Análise dos Deslocamentos

Os deslocamentos previstos da pá (produto final) considerando a condição previamente definida de cargas são representados nas Figura 2. Na figura, observa-se que os maiores deslocamentos ocorrem na ponta da pá na região do bordo de ataque e nas regiões externas à posição da longarina, na direção do bordo de fuga. A situação observada na região do bordo de ataque é análoga à situação verificada em uma viga engastada submetida a um carregamento distribuído. Por outro lado, é importante observar também que os maiores deslocamentos observados nas regiões externas à posição da longarina, que ocorrem na direção dos bordos de fuga se devem a reduções na espessura das pás nestas regiões, ou melhor, na largura do perfil aerodinâmico, de modo a atender a exigências do projeto aerodinâmico.

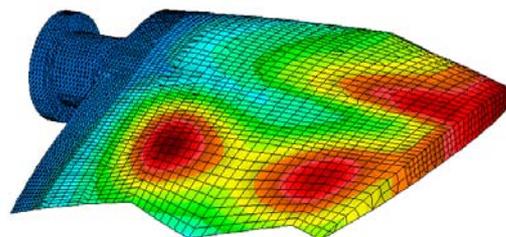


Figura 2. Deslocamentos, adaptado de CEMEF.<sup>(4)</sup>

### 3.2 Análise das Tensões

As tensões, segundo a quadrática de Von Mises para materiais isotrópicos ou materiais anisotrópicos com comportamento mecânico equivalente ao dos materiais isotrópicos ( $R=1$ ), são representadas na Figura 3. Observa-se que as maiores tensões ocorrem nas regiões do punho e no berço do painel da pá. A Figura 3 também mostra em detalhe as tensões na região do punho (raiz da pá) evidenciando o efeito da concentração de tensão em função da variação de seção observada na raiz da pá. Tal variação de seção determina a possibilidade do uso de um ventilador com maior número de pás, tendo em vista que o espaço na região central do cubo limita o fluxo de ar e daí, influi na eficiência e eficácia do ventilador.

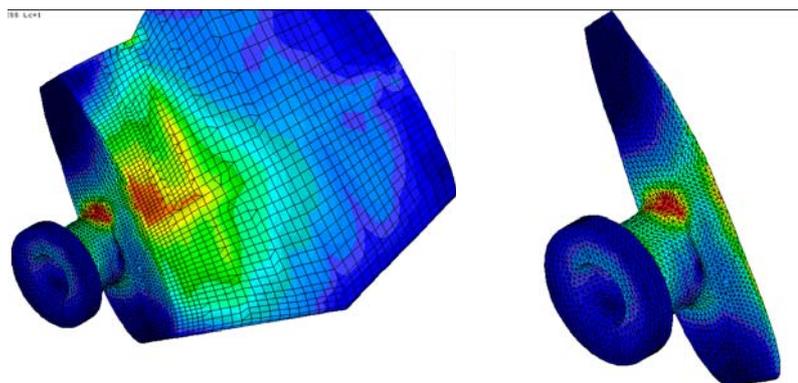


Figura 3. Tensões (Von Mises) , adaptado de CEMEF.<sup>(4)</sup>

Assim, a simulação por elementos finitos desaconselha a utilização de chapas com variações de espessuras localizadas, ou seja, não uniformes. Devido não somente a esse fato igualmente limitante em projeto em razão da concentração de tensões, mas também à dificuldade de conformação de chapas com variação de espessura, é recomendada a confecção de uma pá com variação de espessura uniforme.

Deve-se notar que os valores de rotações somente se aplicam ao referido diâmetro, sendo fator determinante a velocidade de ponta da pá, ou seja, o produto da multiplicação da rotação e o raio. Além disso, os dados de entrada consideram torção máxima da pá como projeto, o que é considerado fator limitante por questões aerodinâmicas. No entanto, as torções de operação são menores que a de projeto. Logo, para cada caso, se pode calcular os esforços considerando as torções da pá em relação ao plano de rotação (*pitch angle*) e os esforços envolvidos para uma validação do produto.

Assim, rotações maiores poderão ser utilizadas com a devida diminuição do diâmetro do ventilador dependendo do cálculo posterior de esforços. Assim como pás de comprimentos maiores podem ser confeccionadas desde que considerando os esforços presentes neste cálculo como limitante. Para tais casos, possivelmente deverá ser diminuída a rotação do sistema.

## 4 TESTES EXPERIMENTAIS

A validação experimental da pá proposta pode ser dividida de acordo com os processos envolvidos, além da validação do produto final em teste de protótipo. Por motivos de indisponibilidade de tempo e de simplificação de trabalho, nesta tese, são suprimidos os testes experimentais com protótipos, da soldagem, testes de

performance do material em altas temperaturas, bem como foram consideradas propriedades mecânicas conhecidas da literatura.

O processo de fabricação da pá pode ser dividido em dois sub-processos críticos: soldagem e estampagem.

O processo de soldagem é constituído da soldagem TIG devido à menor taxa de calor envolvida, alta penetração e por ser um processo com cordões de solda finos quando comparado a outros processos. O que garante uma boa fixação da chapa na parte maciça do punho da pá. Além disso, um bom processo de soldagem é importante no sentido de minimizar deformações nos perfis aeronáuticos considerados maximizando a performance da pá. A espessura de chapa considerada é de 2 mm, a qual é soldável com diminuição do risco de furos na chapa metálica.

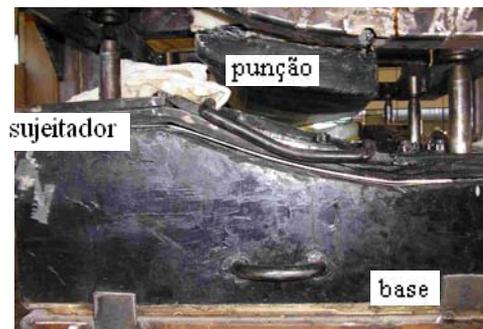


Figura 4. Conformação por força do sujeitador na matriz-Foroni.<sup>(5)</sup>

Os principais problemas, mais comuns, em um processo de estampagem são: presença de rugas nas regiões estampadas, rompimento das chapas, estrição 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 estrição demasiada da chapa e, por fim, a adoção de um sistema de prensagem com capacidade superior à estimada em aproximadamente 50%.

#### 4.1 Aplicações das Teorias de Instabilidades no Projeto das Pás

Este item esboçará os resultados teóricos obtidos da aplicação das teorias das deformações limites, através das curvas limites de clássicas e não clássicas. Essa tarefa é descrita, associada ao aço inoxidável 409, de forma a permitir o desenvolvimento e previsão do limite de estampabilidade deste material, através dos critérios de Dorn,<sup>(6)</sup> Swift-Hill,<sup>(7)</sup> Hill<sup>(8)</sup> e da TPAE.<sup>(9)</sup> Particularmente, para a TPAE é suposto uma variação do ângulo  $\theta$ , conforme obtido por Itikava,<sup>(10)</sup> ou seja,  $\theta = 45^\circ$  a  $65^\circ$ . Na seqüência, a partir de dados experimentais, ou seja, as deformações medidas no plano da chapa, esses dados serão confrontados com as deformações máximas previstas teoricamente, de forma a verificar a qual grau de estrição a chapa está sendo exposta e se tal grau de estrição compromete a fabricação das pás. As Curvas Limites de Conformação para o material e operações empregadas (estiramento e estampagem) podem ser vistas na Figura 6, considerando o material isotrópico ( $R=1$ ), encruamento inicial  $\epsilon_0=0$  e coeficiente de

encruamento do material da chapa  $n=0,22$ . A consideração de material isotrópico é bastante conservativa, na medida em que a consideração da anisotropia na teoria, tenderia a atrasar mais o aparecimento das estirções difusa e localizada. Dessa forma, o plano chapa foi marcado através de um processo eletrolítico de impressão de círculos, na forma de uma grelha, 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 grelha foram impressos com diâmetros iniciais de 8 mm. Após o processo de impressão da grelha no plano da chapa houve a posterior prensagem, conforme realizado nos testes experimentais anteriores. A impressão inicial da grelha na chapa não deformada e na chapa conformada é também mostrada na Figura 5.

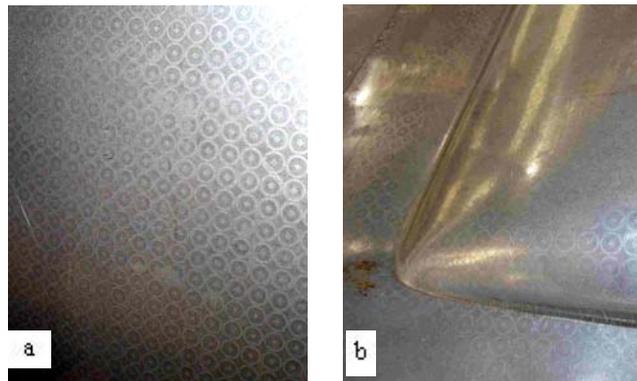


Figura 5. Chapa com marcação (a) inicial (b) conformada, Foroni.<sup>(5)</sup>

**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 Figura 6. 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, 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  $\epsilon_0 = 0$  e o índice de encruamento do material da chapa,  $n=0,22$ .**

Como pode ser visto na Figura 6, 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.

Pode-se notar que a curva TPAE foi obtida para  $45^\circ$  e  $65^\circ$  considerados como ângulos limitantes superior e inferior para aços. Desse modo, deverá ser considerada uma região de incerteza caso os pontos experimentais estiverem entre as curvas TPAE. Para TPAE  $65^\circ$ , Hill, Dorn e Swift, as mesmas deverão ser consideradas como limites superiores de acordo com o tipo de estirção que consideram.

Sendo assim, verifica-se da curva limite de conformação mostrada na Figura 6, 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 dos testes experimentais necessária para uma análise mais precisa.

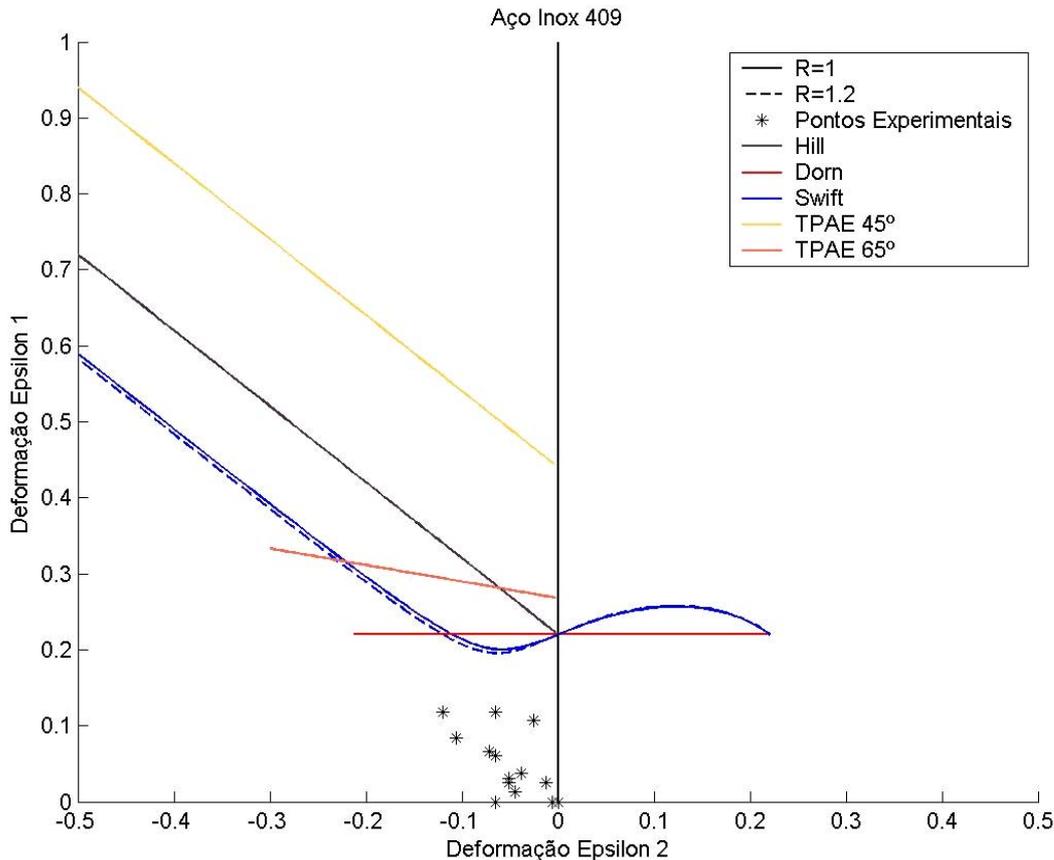


Figura 6. Teorias de conformação aplicadas com pontos experimentais medidos. Foroni. <sup>(5)</sup>

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 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 mostrou-se viável e seguro, na medida que as deformações nas regiões mais deformadas, da raiz da chapa da pá, onde ocorre o maior grau de deformação, 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, como demonstrado pela simulação, 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 Figura 7, a qual, não sofre deformações excessivas.

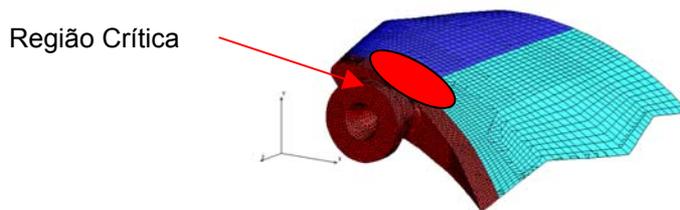


Figura 7. Região crítica da pá em operação.

## 5.2 Análise da Influência da Anisotropia no Processo de Estampagem

Pode ser também observado, da Figura 6 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.

## 5.3 Análise do Produto

O estudo atual baseou-se em um produto (ventilador) já existente no mercado onde se procurou adaptar uma tecnologia, inicialmente em fibra de vidro, e uma condição de trabalho em temperatura ambiente para uma outra tecnologia que emprega o aço inoxidável AISI 409. Esse material, fundamentado na literatura, se mostra adequado para resistir a temperaturas da ordem de 400°C. Sendo assim, decidiu-se pelo seu emprego em pás de ventiladores, particularmente, aqueles usados na exaustão de gases quentes, em especial em aplicações em túneis rodoviários e sistemas de metrô.

Diante desse fato, uma nova tecnologia de fabricação das pás de ventiladores usando o aço inoxidável AISI 409 foi desenvolvida. Essa tecnologia se utiliza basicamente de três processos de fabricação:

O primeiro é a fabricação do punho da pá através de um processo de fundição, como por exemplo, aqueles realizados através da utilização de matrizes de areia ou metálicas, que não foi objeto desse trabalho.

O segundo processo de fabricação é a estampagem, no qual é centrado todo esse trabalho, porque envolve o emprego de um material particular, o que obriga a investigação dos níveis de deformações limites das pás, de modo a garantir que a mesma não falhe com o ventilador em operação. Além disso, a geometria da pá (perfil aerodinâmico) deve ser controlada no processo de estampagem, pois determina a performance do ventilador, assim como esse estudo também envolveu o desenvolvimento de um ferramental, a partir de materiais compostos, mais barato, simples e funcional.

O terceiro processo envolve a soldagem, particularmente, a que garante a ligação entre o punho fundido e a chapa estampada da pá que não foi objeto de tratamento experimental, limitando-se apenas a estudo e desenvolvimento a partir de bases conhecidas da literatura. Nessa direção, houve a opção pelo processo de soldagem TIG que garante uma solda de boa penetração, menor taxa de dissipação de calor, o que evita o processo de sensitização caracterizado pela precipitação do carbono intergranular nos contornos de grão do material quando esse tipo de aço inoxidável é exposto a temperaturas acima de 600°C. Além disso, a menor taxa de dissipação

de calor ocorre porque a soldagem é localizada, o que impede distorções geométricas nos perfis aerodinâmicos.

Adicionalmente, o processo de união mecânica por rebiteamento também é empregado entre o punho fundido e as chapas estampadas (extradorso e intradorso da pá), de modo a reforçar a união mecânica da soldagem na região da raiz da pá.

## 6 CONCLUSÕES

O ventilador produzido emprega uma nova solução de fabricação de pás de ventiladores, a nível comercial, usando o aço inoxidável AISI 409. Essa solução surgiu da adaptação de uma tecnologia inicialmente empregada em ventiladores de material composto para uma condição de trabalho a temperatura ambiente para uma outra que emprega o aço inoxidável AISI 409 em temperaturas de trabalho de até 400°C. A tecnologia desenvolvida se utiliza fundamentalmente de três processos de fabricação: fundição, estampagem e soldagem.

A maior contribuição tecnológica ocorre dentro do processo de estampagem das pás, daí a importância do processo de estampagem nesta tese, razão pela qual envolveu o emprego de um material particular e obrigou a investigação dos níveis de deformações limites das pás, de modo a garantir que a mesma não falhe com o ventilador em operação.

## REFERÊNCIAS

- 1 LANDROVERCLUB, The Mont Blanc Disaster. Disponível em: <<http://www.landroverclub.net/club/HTML/MontBlanc.htm>>, Acesso em: 20 de junho de 2005.
- 2 EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: CEN: EN 12101-3: smoke and heat control systems- Part 3: specification for powered smoke and heat exhaust ventilators English version, Brussels, 2002.
- 3 MENEZES, M. A. Strain limit theories, anisotropy in sheet metal forming and simulation of pressing processes. Birmingham, England, 1995. 361p. Thesis (PhD in Manufacturing and Mechanical Engineering) – University of Birmingham, England.
- 4 CEMEF. Análise estrutural Pá TLN 420. São José dos Campos, 2002. p10.
- 5 FORONI, F.D. 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, 2005.
- 6 DORN, J. E. Stress-strain rate relations for anisotropic plastic flow. Berkeley: University of California, 1948.
- 7 SWIFT, H.W. Plastic instability under plane stress. Journal Mechanics and Physics Solids, v. 1, p.1-18, 1952.
- 8 HILL, R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 1, p. 19-30, 1952.
- 9 MENEZES, M. A. Teoria da propriedade do ângulo da estrição. Ilha Solteira: UNESP, 1995b. (Relatório Técnico: DEM 001/95)
- 10 ITIKAVA, R. K.; Análise da instabilidade plástica de chapas metálicas anisotrópicas utilizando a teoria da propriedade do ângulo da estrição. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP.