

# FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAIS PARA ESTAMPAGEM DE PÁS PARA VENTILADORES USANDO MATERIAIS COMPOSTOS <sup>1</sup>

F. D. Foroni<sup>2</sup>  
M. A. Menezes<sup>3</sup>  
L. A. Moreira Filho<sup>4</sup>

## Resumo

Com a crescente preocupação de exatidão 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; Materiais compostos; Perfis aeronáuticos.

## 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 The bigger cost of a deep-drawing process is known as the manufacturing of matrixes in steel. Due to that, for prototype confections, where the final shape of the good is not completely known, this process can lead to high cost. This work provides an alternative to the common used matrixes by a new technology to manufacture matrixes for deep-drawing fan blade prototypes. This technology presents its innovation by using punches and dies made by composite materials, with high rigidity and compression resistance. It's shown experimentally, that the composite matrixes could comply with the forming requirements. Moreover, they can be reworked easily in case of project changes and corrections and needs less investment, which makes them ideal for prototypes.

**Key words:** Deep-drawing; Composite materials; Aeronautic profiles.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 5º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 22 e 23 de agosto de 2007, São Paulo – SP, 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

Objetivando a redução de custos envolvidos no projeto de desenvolvimento de um ferramental à base de aço ferramenta, na seqüência é descrito um ferramental alternativo desenvolvido à base de materiais compostos especialmente reforçados contra a compressão de modo a garantir a rigidez necessária na estampagem de uma pá. O projeto da pá consiste basicamente em duas cascas estampadas formando os painéis e ligadas por meio de soldagem. Para isso, foi utilizado chapas de aço inoxidável AISI 409 com 2 mm de espessura que serão estampadas na forma de perfis aeronáuticos (extradorso e intradorso). O ferramental desenvolvido objetiva permitir a verificação da viabilidade técnica do projeto.

## 2 PROJETO DA MATRIZ-PUNÇÃO-SUJEITADOR

Para estampar os perfis aerodinâmicos das cascas das pás. Confeccionou-se um matriz através de um modelo da pá. A partir desse modelo, obtém-se o formato da matriz, a posição para o sujeitador e o formato do punção.

Usualmente, as matrizes para estampagem são feitos de aço ferramenta, de forma a suportar os esforços envolvidos na compressão e permitir boa repetibilidade visando uma produção seriada de estampos. No entanto, devido ao custo elevado de investimento em um projeto de desenvolvimento, optou-se pela realização de uma matriz à base de material composto obviamente reforçado para a aplicação.

Assim, o conceito desta matriz é a adoção de camada superficial extremamente rígida para suportar a pressão suportada composta por Araldite SW 419,<sup>(1)</sup> e, diferentemente das matrizes em material composto, a adoção de matrizes maciças com um composto de areia e resina LY 1316. Os materiais utilizados podem ser vistos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Quantidade de Materiais para Ferramental. <sup>(2)</sup>

Item	Material	Punção	Sujeitado	Matriz	Unidade
1	ARALDITE SW 419	2,0	1,0	3,5	kg
2	RESINA LY1316	16	13	30	kg
3	ENDURECEDOR HY1208	1,6	1,3	3,0	kg
4	QUARTZO GRANULADO	156	130	286	kg
5	TECIDO DE FIBRA DE VIDRO TLS 160-90	0,15	0,10	0,15	kg
6	TECIDO DE FIBRA DE VIDRO TLS 260-90	0,50	0,30	0,40	kg
7	VIDRO CRISTAL	1	-	1	pç
8	ENDURECEDOR LENTO HY2969	8,3	6,7	55,6	kg

- Endurecedor HY1208 – utilizado para a catalização das resinas empregadas LY1316 e Araldite SW419.
- Endurecedor Lento HY2969 – utilizado para ajuste fino em conjunto com HY1208.
- Quartzo Granulado – espécie de areia refinada para uso industrial
- Tecido TLS 160-90 – Malha de fibras de vidro entrelaçadas a 90° com densidade 160g/m<sup>2</sup>
- Tecido TLS 260-90 – Malha de fibras de vidro entrelaçadas a 90° com densidade 260g/m<sup>2</sup>
- Vidro – utilizado para prover superfície lisa na base da matriz
- Cera calibrada – utilizada para promover espaçamento controlado entre superfícies
- Compensado de Madeira – utilizado para criar caixas onde são confeccionadas as matrizes

## 2.1 Fabricação da Matriz da Base

Inicialmente, realizou-se a confecção do modelo da pá. O modelo foi realizado através da utilização de gabaritos com os perfis aerodinâmicos posicionados conforme projeto. Após o posicionamento, é realizado o fechamento do esqueleto de gabaritos com massa plástica até a obtenção do modelo. A rigurosidade do modelo em relação ao projeto é obtida através da quantidade de gabaritos utilizados.

Um segundo passo foi confeccionar a caixa para laminação da matriz de modo a permitir a inserção da pá modelo dentro da mesma. O modelo foi posicionado na parte central da caixa de modo a permitir folga mínima de 100 mm em cada lado da caixa. A caixa deve ter uma altura mínima de 300mm.

Depois de posicionado o modelo, alicou-se Araldite SW-419 nas paredes da caixa e no modelo da pá de modo a manter espessura mínima de 1,2 mm. Na matriz confeccionada, devido à necessidade de possíveis reparos dimensionais, foi utilizada uma espessura de 10mm de forma a permitir apenas a retirada da camada externa como compensação dimensional.

Após a pré-cura do gel, laminou-se uma camada de tecido de fibra de vidro TLS160 – 90 com Resina LY1316. Utilizou-se 100pp de resina LY 1316, 10 pp de endurecedor HY1208 e 12pp de endurecedor lento HY2969. No caso de acontecer a cura do gel, aplica-se lixa 100.

Logo após a camada de tecido de fibra de vidro TLS 160-90, laminou-se duas camadas de tecido em fibra de vidro TLS 260-90 com a mesma formulação de resina do TLS 160-90.

Após a laminação das camadas de fibra de vidro, deve-se preencher o volume da caixa com quartzo e resina. No entanto, a mistura é exotérmica e pode vir a aquecer demasiadamente a matriz, o que acarretaria perda das propriedades mecânicas. Para isso, foram utilizados volumes de 1,0kg de Resina LY1316, 600 g de Endurecedor HY 2969 e 13kg de quartzo granulado até completar o volume da caixa. A cada volume, compactou-se a mistura e se aguardou a cura e o resfriamento da matriz.

No último lote de preenchimento (resina + areia), tampou-se a base da matriz com vidro de espessura 3 mm para obter uma base plana.

Após a cura do matriz, deve ser fixados os pinos guia e de fixação.

## 2.2 Fabricação do Sujeitador

A fabricação do sujeitador foi realizada a partir da base da matriz. Para isso, fez-se uma caixa de compensado no formato da pá na parte interna da matriz com altura mínima de 200mm para permitir a confecção do sujeitador com mesmo formato externo a partir da própria caixa da matriz e interno com o formato da pá.

Para impedir que o sujeitador fique colado na base, aplicou-se inicialmente cera desmoldante. Após isso, aplicou-se Araldite SW-419, laminou-se TLS 160-90 e TLS 260-90 e preencheu-se com quartzo do mesmo modo que o processo da base.

Finalizado a cura de todos os materiais compósitos, foram colocadas buchas metálicas no sujeitador de acordo com os parafusos guias da base de forma a permitir o deslizamento.

## 2.3 Fabricação do Punção

O procedimento de fabricação do punção foi realizado a partir da base da matriz com o sujeitador. Para isso, utilizou-se cera calibrada com dois mm na base de forma a permitir um espaçamento condizente com a espessura da chapa conformada deixando também uma folga mínima entre o sujeitador e o punção para permitir o deslizamento.



Figura 1: Matriz base-punção-sujeitador. <sup>(3)</sup>

Após isso, aplicou-se Araldite SW-419, laminou-se TLS 160-90 e TLS 260-90 e preencheu-se com quartzo do mesmo modo que os processos da base e do sujeitador.

Finalizado a cura de todos os materiais compósitos, utilizou-se o vidro para permitir uma superfície lisa e colocar reforços metálicos para permitir a distribuição dos esforços da prensa por toda a superfície do contato punção-base. O ferramental completo pode ser visto na Figura 1.

A partir do desenvolvimento do ferramental, o Cálculo Preliminar de Estampagem, que fornece os esforços a serem considerados na estampagem da casca extradorso do perfil aeronáutico, e a confecção dos ferramentais e estruturas de suporte para a sua confecção, fica possibilitada a confecção de testes experimentais e a validações do produto e do processo, os quais serão descritos no item 3.

## 3 TESTES EXPERIMENTAIS

A validação experimental dos painéis 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 simplificação de trabalho, neste trabalho, são suprimidos os testes experimentais com protótipos, da soldagem, testes de performance do

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

O processo de fabricação da pá pode ser dividido em dois sub-processos críticos: soldagem e estampagem. Estaremos, a seguir, descrevendo somente o processo de estampagem.

### **3.1 Processo de Estampagem**

O processo de estampagem necessitou de cuidados. Mesmo considerando a escolha do material aço inoxidável 409 devido a sua boa aptidão à estampagem, a dificuldade em precisar as tensões máximas localizadas durante a conformação da pá obrigou a realização de testes de estampabilidade. Sendo assim, foram realizados, testes em escala real como forma de controlar e tomar conhecimento de possíveis problemas. Foi considerada a região do extradorso da pá, a região de estampagem mais crítica, em virtude de sua maior profundidade de estampagem. Considerando-se a estampagem do extradorso do perfil aerodinâmico viável, a estampagem do intradorso seria considerada naturalmente viável.

Os principais problemas 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%.

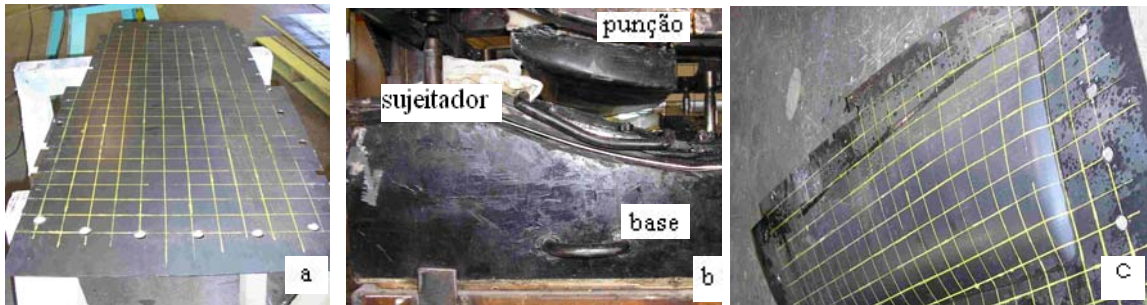
#### **3.1.1 Teste 1 – Teste inicial com aço SAE 1020**

Para o primeiro teste foi considerado o material aço carbono ABNT 1020 visando a 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 malha quadriculada de 50 x 50 mm de modo a permitir a visualização das regiões mais afetadas pela estrição. Uma chapa assim preparada para prensagem pode ser vista na Figura 2a.

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.

Como se pode notar, 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 da chapa. Esta força é exercida por aproximadamente 20 parafusos M12 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 Figura 2b.



**Figura 2.** Conformação da Chapa 1 por força do sujeitador na matriz. (a) Chapa Preparada; (b) Processo; (c) Chapa conformada (3).

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

Após a conformação inicial, foi suspenso o punção e realizado um furo na chapa de forma a se identificar que a conformação foi completa. Foi constatado que a força empregada não foi suficiente. Mesmo assim, já se obteve alguma conformação na chapa.

A Figura 2c 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 o atrito entre a chapa e base da matriz e chapa e sujeitador foram suficientes para garantir a estrição 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.

### 3.1.2 Teste 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, 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.

Para verificar se a deformação foi completa, foi realizado um furo no momento representado pela Figura 2b 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 a primeira conformação como pode ser visto na Figura 3.

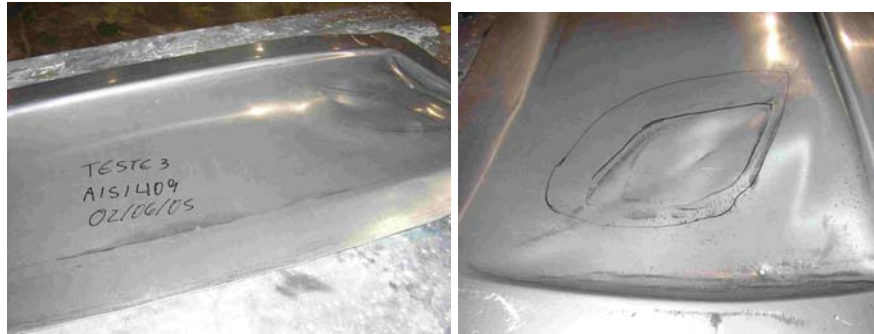
Para medição dimensional das peças, foi cortada a chapa na região de início de conformação de forma a somente manter a parte útil da chapa no produto final. A Figura 3 que representa este corte dá uma visão muito próxima do formato final da pá.



**Figura 3.** Corte final da Chapa 2 para medição dimensional. (3)

### 3.1.3 Teste 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 3.1.2. foi realizado agora com a mudança do material. Tal resultado pode ser visto na Figura 4.



**Figura 4.** Chapa 3 após conformação.<sup>(3)</sup>

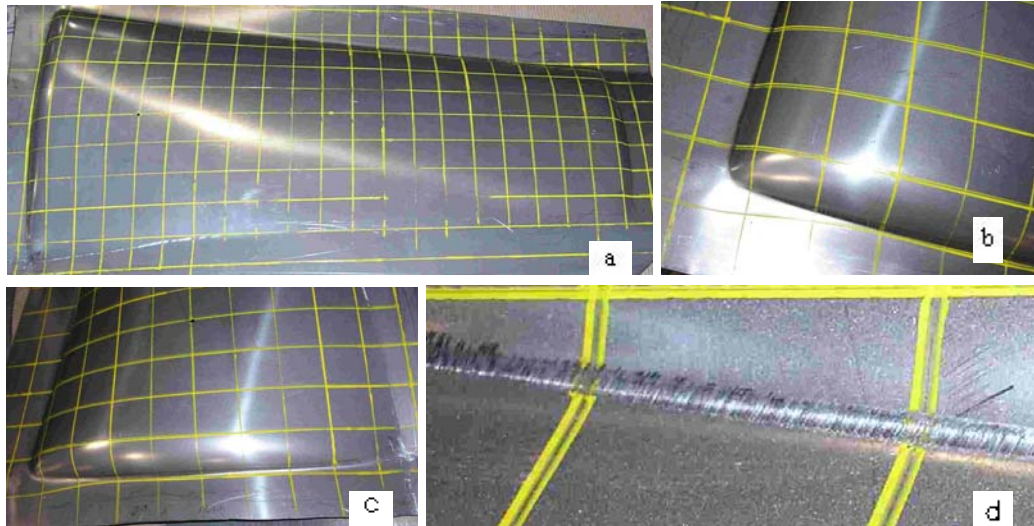
A Figura 4 leva a conclusões interessantes. Foi utilizada a mesma força no punção do item 3.1.2. No entanto, o material atingiu sua conformação completa exceto pelo aparecimento de uma bolha na região inferior da matriz. Isso levou à observação de que havia um acúmulo de óleo de lubrificação, proveniente do pistão, empossado naquela região.

Como no item 3.1.2., a chapa foi cortada e medidas as suas dimensões.

Devido ao empossamento de óleo verificado, houve maior controle da fuga de óleo do cilindro assim como da lubrificação, de forma a não haver mais interferência no sistema (acúmulo de óleo).

### 3.1.4 Teste 4 – Eliminação de Bolhas

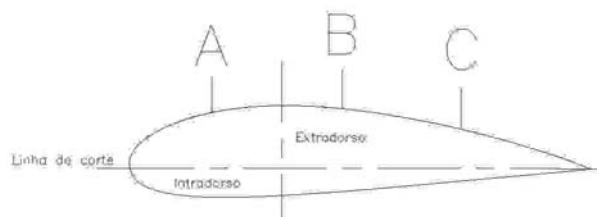
Conforme descrito no item 3.1.3., observou-se que as forças do punção eram suficientes para a confecção da peça estampada em um único estágio. O pré-torque realizado pelo sujeitador inibiu qualquer enrugamento das superfícies estriccionadas (afinamento). Não houve qualquer rompimento das chapas, assim como não houve estricções exageradas. A realização deste quarto teste deveu-se à verificação e eliminação da bolha presente no item 3.1.3 e a obtenção de um dimensional final da peça de acordo com o projeto. Desse modo, foi realizado novo procedimento adicionando-se um furo na chapa na região inferior da matriz de forma a evitar que óleo ou até mesmo ar fique preso na conformação. O resultado pode ser visto na Figura 5.



**Figura 5.** Chapa 4 após conformação. (a) Visão geral; (b) Seção crítica (ausência de enrugamento); (c) Raiz da pá (ausência de bolhas) e (d) Estricção localizada. <sup>(3)</sup>

#### 4 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA CHAPA CONFORMADA

Na seqüência, serão feitas algumas considerações com relação a o papel das variações geométricas das cascas 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.

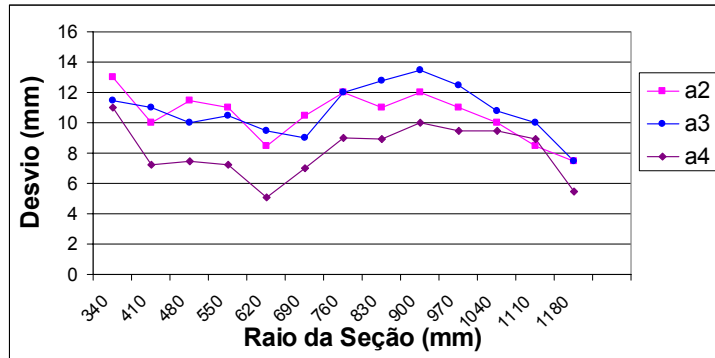


**Figura 6.** Perfil aerodinâmico com pontos de medição. <sup>(3)</sup>

A geometria da pá influi diretamente na performance aerodinâmica do ventilador. Uma variação no perfil da pá, na torção, nas cordas e no processo de fabricação da pá influencia sensivelmente o comportamento aerodinâmico de um ventilador, daí a necessidade de avaliação de possíveis desvios da geometria em relação ao projeto da pá proposto. Após a confecção das pás, foram realizadas medidas das profundidades de estampagem das peças conformadas com o uso de gabaritos, que consistem em chapas recortadas a laser com o mesmo perfil aerodinâmico de projeto das pás, e desta forma, foram avaliados a variação dessas profundidades em três pontos específicos chamados “a”, “b” e “c” equidistantes em cada seção da peça conformada, considerando treze seções para cada peça. Os pontos são considerados são mostrados na Figura 6.

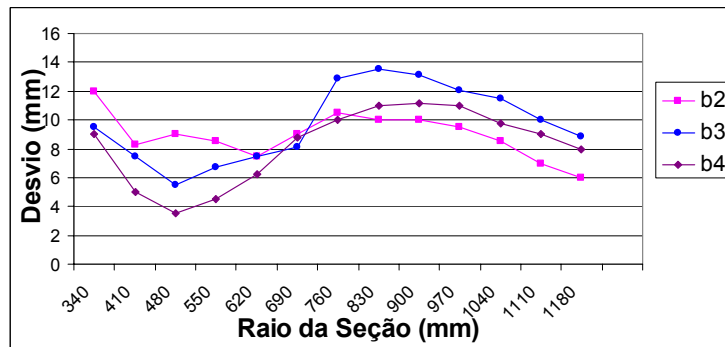
Os desvios medidos foram expostos graficamente de forma a facilitar a análise das variações do perfil aerodinâmico das pás. Assim, os Gráficos 1 e 2 mostram os desvios que ocorreram na conformação em relação ao perfil aerodinâmico proposto nas posições a, b e c de cada peça conformada considerando os testes 2, 3 e 4.





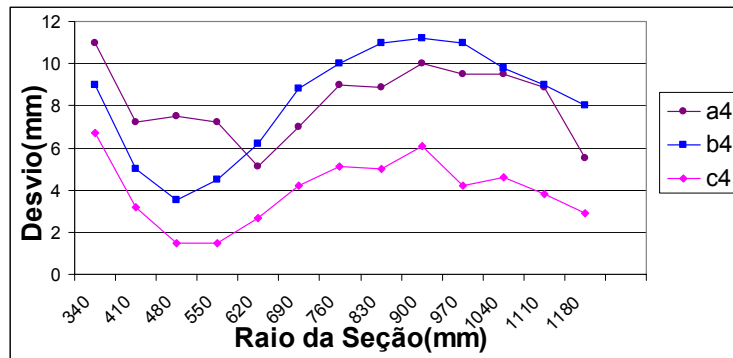
**Figura 7.** Desvios em relação à posição “a”– a2 se refere à chapa2, a3 à chapa 3, a4 à chapa 4.

Tendo em vista que a estampagem mais profunda encontra-se na posição da medição “a” pode-se notar, através do gráfico da Figura 7, que a Chapa 2 possuiu menor deformação por insuficiência de força, seguido da Chapa 3 onde ocorreu a formação de bolha, principalmente na região de raio da seção entre 410 a 620mm. Na seqüência, a Chapa 4 apresentou maior conformação e, conseqüentemente, menor desvio em relação ao perfil aerodinâmico previsto.



**Gráfico 2.** Desvios em relação à posição “b”-b2 se refere à chapa2, b3 à chapa 3, b4 à chapa 4.

No gráfico da Figura 8 é evidenciado um comportamento muito semelhante entre as peças conformadas ao longo do raio da seção medida. Não obstante, se observa do gráfico, para o aço SAE 1020 (Chapa 2), que o efeito da recuperação elástica é menor, visto que, nas regiões de menor esforço necessário para a conformação, ou seja, a partir da posição 830mm, foram obtidas as maiores profundidades. As medições apresentadas também evidenciam que o desvio existente em relação ao projeto aerodinâmico proposto também pode ser associado a um desvio de fabricação do punção e da matriz ou, mesmo, proveniente de um problema de alinhamento.



**Figura 10.** Desvios a serem compensados na matriz e no punção – a4 se refere à posição “a” na chapa4, b4 à posição “b” e c4 à posição “c”, respectivamente.

Sem haver uma preocupação em estudar as causas e a parcela de seus efeitos, nos desvios observados, mas somente visando corrigi-los, seria recomendado considerar apenas as medições observadas na Chapa 4, onde se poderia modificar a forma da matriz e do punção de modo a compensar possíveis efeitos de fabricação, alinhamento e de recuperação elástica. Sendo assim, os dados a serem compensados seriam aqueles vistos no gráfico da Figura 10.

Visando minimizar problemas de alinhamento entre o punção, a chapa e a matriz, seria recomendado a utilização de uma rótula, particularmente para um punção com guias, buscando fornecer maior grau de liberdade ao punção de maneira a exercer força em posições diferentes durante a conformação até o término da estampagem da chapa. De outra forma, se poderia utilizar um punção de elastômero visando redução de custos e o completo preenchimento da matriz pelo elastômero.

É importante enfatizar que o efeito da recuperação elástica das chapas assim como deformações da matriz não foi previsto quando da confecção da matriz. Contudo, aos desvios a serem compensados na matriz deveriam ser somadas a parcela referente à influência da recuperação elástica do material da chapa e deformações de processo. Desta forma, através de medições dimensionais do punção em repouso, pode-se corrigir o gráfico da Figura 10 para estimar os desvios causados pela deformação da matriz e recuperação elástica do material.

## 5 CONCLUSÕES

Através de uma aplicação industrial de desenvolvimento de protótipo, o presente trabalho forneceu uma alternativa às matrizes existentes no mercado através de uma nova tecnologia de fabricação de matrizes para estampagem de pás de ventiladores para protótipos. Tal tecnologia apresentada uma inovação tecnológica a qual emprega matrizes e punções desenvolvidos a partir de materiais compostos, que apresentam elevada rigidez e alta resistência à compressão. A partir de testes experimentais, é mostrado que as matrizes de material composto atenderam às expectativas de conformação. Além disso apresentam facilidade de retrabalho no caso de modificações e correções de projeto e menor custo de investimento o que seria ideal para peças de protótipos.

A partir da geometria da chapa conformada em relação ao projeto aerodinâmico do perfil da pá, podemos afirmar que a chapa conformada apresentou desvios em relação ao projeto aerodinâmico proposto associado a possíveis defeitos de fabricação do punção e da matriz, problema de alinhamento entre a matriz e o punção e de recuperação elástica da chapa após a estampagem. No entanto, não

foram explorados os defeitos associados à perda de rigidez do ferramental durante o processo.

Do processo de estampagem podemos afirmar que o ferramental confeccionado a partir de materiais compostos reforçados contra a compressão se mostrou efetivo experimentalmente apresentando boa rigidez, embora não se tenha realizado qualquer análise da estabilidade estrutural do mesmo durante o processo, optando-se somente por corrigir quaisquer deformações visando o produto final com as dimensões esperadas.

Entretanto, o ferramental utilizado pode promover inconveniências de processo tendo em vista que o curso do punção poderia ser aumentado de maneira a permitir maior flexibilidade para a introdução e extração da peça estampada, o sujeitador não garante um torque constante e igualmente aplicado em uma matriz com plano irregular de assentamento e o mecanismo de extração da chapa conformada, empregado após a estampagem, pode promover deformações exageradas na peça devido ao uso de um sistema de alavanca em um único ponto.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Tecsis Tecnologia e Sistemas Avançados o suporte e a viabilização das condições para a confecção deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 HUNTSMAN. 2003. Araldite: resinas epóxi para modelação e ferramentaria. *Catálogo de produtos*, São Paulo.
- 2 FORONI, F. D., 2004. TPF 000.011: processo de fabricação de matriz para estampagem. *TECSIS*, Sorocaba-SP.
- 3 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.