

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

FELIPE FURLAN

**ESTUDO COMPARATIVO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS COMPÓSITOS
VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DO AÇO NA FABRICAÇÃO DE *RETAINER* DE
AIRBAG AUTOMOTIVO**

São Carlos

2012

FELIPE FURLAN

ESTUDO COMPARATIVO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS COMPÓSITOS
VISANDO À SUBSTITUIÇÃO DO AÇO NA FABRICAÇÃO DE *RETAINER* DE
AIRBAG AUTOMOTIVO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F985e Furlan, Felipe
Estudo comparativo de materiais poliméricos
compósitos visando à substituição do aço na fabricação
de "retainer" de "airbag" automotivo. / Felipe Furlan;
orientador Carlos Alberto Fortulan. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. Airbag. 2. Retainer. 3. Material para retainer.
4. Sistema de retenção. 5. Poliamida. 6. Polipropileno.
7. Aço. 8. Método de ponderação. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato(s): FELIPE FURLAN

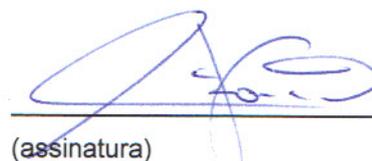
Título: Estudo comparativo de materiais poliméricos compósitos visando à substituição do aço na fabricação de *retainer* de *airbag* automotivo.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

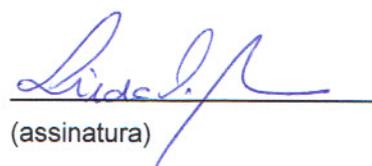
Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan - Orientador

Nota atribuída: 9,0 (Nove)


(assinatura)

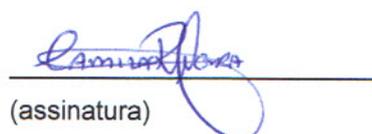
Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

Nota atribuída: 9,0 (nove)


(assinatura)

Química MSc Camila Roberta de Meira

Nota atribuída: 9,0 (Nove)


(assinatura)

Média: 9,0 (Nove)

Resultado: Aprovado

Data: 13/07/2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço à empresa Takata do Brasil S.A. do Brasil S.A. pela grande colaboração na elaboração deste trabalho, fornecendo material e informações que foram imprescindíveis a este estudo.

“Não está ocioso apenas aquele que não faz nada, mas também aquele que poderia fazer algo melhor.”

Sócrates

RESUMO

FURLAN, F., **Estudo comparativo de materiais poliméricos compósitos visando à substituição do aço na fabricação de *retainer* de *airbag* automotivo** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 50p.

O principal objetivo deste trabalho é a redução do custo de um *airbag* através da substituição do material utilizado na fabricação do *retainer* (o suporte do gerador de gás, no *airbag*). O estudo aqui realizado consiste na aplicação de um método de ponderação para comparação entre o aço e materiais poliméricos compósitos na fabricação do *retainer*. Os materiais poliméricos estudados foram o polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro e a poliamida, também reforçada com 40% de fibra de vidro. O *Airbag* é um sistema de retenção passiva que atua após um acidente para evitar maiores danos aos ocupantes do veículo. É formado basicamente pela bolsa, por um gerador de gás, pelo *retainer* e pela tampa, além de sensores e uma central eletrônica no veículo. O *retainer*, parte essencial no sistema de retenção, é o responsável por suportar os grandes esforços gerados na deflagração do *airbag* após o acidente, o que garante uma maior segurança aos ocupantes do veículo. Além de resistir a estes esforços, deve suportar as altas temperaturas atingidas durante a queima do propelente. As normas para este elemento de segurança são bem rigorosas, uma vez que qualquer falha pode causar danos muito sérios aos ocupantes do veículo. O método de ponderação utilizado foi a “Análise do valor útil”, descrito por Pahl, e a partir deste método foi concluído que o polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro é o material mais promissor para tal aplicação. A poliamida também obteve bons resultados e é um possível substituto do aço.

Palavras Chave: *airbag*, *retainer*, material para *retainer*, sistema de retenção, poliamida, polipropileno, aço, método de ponderação

ABSTRACT

FURLAN, F., **Comparative study of polymer composite materials in order to substitute the steel in the manufacture of an automotive airbag retainer** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 50p.

The main objective of this work is to reduce the cost of an airbag by replacing the material used in the manufacture of the retainer (the support of the gas generator). The study performed here is the application of a weighting method for comparison between steel and polymeric materials as raw materials for the retainer. The polymeric materials studied were the polypropylene reinforced with 40% of glass fiber and polyamide also reinforced with 40% of glass fiber. The airbag is a passive restraint system that acts after an accident to avoid further damage to the vehicle occupants. It is basically formed by a bag, a gas generator, a retainer and a cover, as well as sensors and an electronic control unit in the vehicle. The retainer, a key part of the restraint system, is responsible for supporting the great efforts generated the deployment of the airbag after an accident, what ensures greater safety for the vehicle occupants. Besides resisting these efforts, it must withstand the high temperatures reached during the ignition of the propellant. The standards for this safety element are very rigorous, once any failure may cause very serious damage to the vehicle occupants. The weighting method used was "Analysis of the useful value", described by Pahl, and from this method was concluded that polypropylene reinforced with 40% glass fiber is the most promising material for such application. Polyamide also achieved good results and it is a possible substitute for steel as well.

Keywords: airbag, retainer, retainer`s material, Supplemental Restraint System, polyamide, polypropylene, steel

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tempo de abertura de um <i>airbag</i> . Fonte: Takata do Brasil S.A.....	16
Figura 2. 2 – Variação da energia cinética no impacto. Fonte: Takata do Brasil S.A.	16
Figura 2. 3 – Força de retenção no ocupante do veículo. Fonte: Takata do Brasil S.A.	17
Figura 2. 4 – Acionamento de um <i>airbag</i> de duplo estágio. Fonte: Volvo.....	18
Figura 2. 5 – <i>Airbags</i> acionados para cada tipo de colisão. Fonte: Takata do Brasil S.A.	18
Figura 2. 6 – Exemplo de instalação de sensores e ECU em um veículo. Fonte: Takata do Brasil S.A.	19
Figura 2. 7 – <i>Inflator</i> DAB em corte. Fonte: Takata do Brasil S.A.....	20
Figura 2. 8 – Modelo de <i>retainer</i> impresso em 3D. Fonte: Takata do Brasil S.A.	20
Figura 2. 9 – Moldagem por injeção de um polímero termoplástico. (SHACKELFORD, 2008.).....	21
Figura 2. 10 – Moldagem por injeção de um polímero termoplástico. (SHACKELFORD, 2008.).....	22
Figura 2. 11 – Análise do comportamento do fluxo de material na injeção. Fonte: Takata do Brasil S.A.	25
Figura 2.12 – Injetora de rosca recíproca	26
Figura 3.1 – <i>Retainer</i> PAB em PA GF40. Fonte: Takata do Brasil S.A.....	28
Figura 3. 2 – Perfil de valores para comparação de duas soluções. (PAHL, 2005.).	37
Figura 4. 1 – Função de valor para o custo	40
Figura 4. 2 – Função de valor para a tensão de ruptura	41
Figura 4. 3 – Função de valor para o peso	41
Figura 4. 4 – Função de valor para temperatura admissível.....	42
Figura 4. 5 – comparativo entre os materiais sem considerar fatores de ponderação	44
Figura 4. 6 – comparativo entre os materiais considerando os fatores de ponderação.....	44
Figura 4. 7 – Comparação entre os materiais A e B	45
Figura 4. 8 – Comparação entre os materiais A e C.....	46
Figura 4. 9 – Comparação entre os materiais B e C.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 – Características do aço (Fonte: Takata do Brasil S.A.)	27
Tabela 3. 2 – Características do PA GF40 e do PP GF 40 (Fonte: Catálogo Akrolen® PP GF 40 natur (2179) e Catálogo Akulon® K224-PG8.).....	28
Tabela 3. 3 – Comparação entre a análise do valor útil e a diretriz VDI 2225. (PAHL, 2005.).....	30
Tabela 3. 4 – Escala de valores. (PAHL, 2005.).....	32
Tabela 3. 5 – Esquema para avaliação dos critérios. (PAHL, 2005.).....	34
Tabela 3. 6 – Lista de avaliação. (PAHL, 2005.).....	34
Tabela 4. 1 – fatores de ponderação para cada critério avaliado	39
Tabela 4. 2 – Magnitude dos parâmetros avaliados	40
Tabela 4. 3 – Planilha de avaliação com os resultados obtidos.....	43

LISTA DE SIGLAS

DAB	Driver Air Bag
PAB	Passenger Air Bag
SRS	Supplemental Restraint System
ECU	Electronic Control Unit
PA GF40	Polyamide 40% Glass Fiber
PP GF40	Polypropylene 40% Glass Fiber

LISTA DE SÍMBOLOS

U\$
MPa
Kg
°C
ms

Dólares
Megapascal
Quilograma
Graus Celsius
Milissegundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo.....	13
1.2	Justificativa.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	<i>Airbag</i>	15
2.2	Materiais poliméricos.....	21
2.3	O processo de injeção	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	Materiais analisados.....	27
3.2	Análise de valores na engenharia de sistemas.....	29
3.2.1	Identificação de critérios de avaliação.....	30
3.2.2	Análise da relevância para o valor global	31
3.2.3	Análise segundo noções de valor	32
3.2.4	Determinação do valor global	35
3.2.5	Estimativas das incertezas da avaliação	35
3.2.6	Busca de pontos fracos	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Aplicação do método da análise de valor.....	38
4.2	Discussão dos resultados.....	47
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O *airbag* é um sistema que deve ser utilizado junto com o cinto de segurança para reter os ocupantes do veículo em uma batida, reduzindo assim os danos causados a eles. Os mais comuns são os frontais, que ficam alojados no volante e no painel de instrumentos. Existem também os laterais (*side bags*), que ficam nos bancos ou nas portas, cuja função é proteger de impactos laterais ou capotamentos. Existem ainda outros tipos, como os de cortina e os de joelho, por exemplo.

Os *airbags* reduzem os riscos de ferimentos na cabeça e no tórax, impedindo o impacto do ocupante contra o volante e/ou painel do automóvel, ou contra as laterais do veículo (*side bag*). Esses dispositivos são eletronicamente programados para serem ativados em colisões de características específicas: os *airbags* dianteiros, por exemplo, são disparados em fortes colisões frontais ou fronto-obíquas. Em colisões mais leves, laterais, traseiras ou em capotamentos, o dispositivo normalmente não é ativado.

As primeiras soluções para indústria automobilista surgiram nos anos 50, mas ainda precisavam ser muito aperfeiçoadas. O primeiro *airbag* foi lançado em 1980, em um modelo Classe S da Mercedes-Benz. Em 1990, a GM lança o primeiro *airbag* de passageiro frontal. Em 1994, a Volkswagen apresenta o primeiro *airbag* desenvolvido no Brasil, para o Gol Geração II com um sistema adaptado à características brasileiras. Em 1997, a GM lança o primeiro *airbag* lateral (Galileu).

Em 1998, a Mercedes-Benz introduz outra novidade: os *airbags* adaptativos, que disparam em dois estágios, dependendo da intensidade do impacto. A Volvo lança uma cortina inflável para proteger a cabeça tanto dos passageiros dianteiros quanto dos traseiros (Galileu).

Em 2009, várias novidades são apresentadas. A Mercedes-Benz apresenta o cinto inflável. A Toyota desenvolve o primeiro *airbag* central traseiro, para proteger o passageiro sentado no meio do banco de trás. Pesquisadores da Universidade de Cranfield, na Inglaterra, desenvolvem um *airbag* externo, para

proteger os pedestres de uma colisão. O sistema funciona como uma almofada no para-brisa, o local onde a colisão é mais frequente (Galileu).

No Brasil, foi aprovada uma lei que obriga o uso de *airbag* duplo dianteiro em todos os veículos que circularem em território nacional, fabricados aqui ou importados, até 2014 (Lei 11.910, resolução nº 311 do CONTRAM).

Até recentemente, o material utilizado para a produção de *retainer* era exclusivamente o aço. A utilização da poliamida surgiu como uma boa alternativa para substituir o aço em alguns casos, tornando-se uma solução comum atualmente. O polipropileno é outro material que pode ser utilizado e tem algumas características vantajosas em relação aos outros dois: é mais barato e também mais leve, além de ter uma menor absorção de água em relação à poliamida. Entretanto, possui uma menor resistência mecânica e a altas temperaturas.

A preferência por um destes materiais varia muito com a localidade e existem vários fatores que são decisivos para a escolha da melhor opção. O preço do aço varia muito mundialmente, assim como o desejo das montadoras, que em alguns países tem o custo como fator mais importante. Em outros, a estabilidade dimensional, o peso ou mesmo a resistência mecânica são mais importantes.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho consiste na redução do custo de fabricação de um *airbag* de passageiro (PAB) no Brasil, através da substituição do material utilizado na fabricação de um de seus componentes, o *retainer*, que atualmente é fabricado em aço. Serão estudados dois materiais poliméricos compósitos, o polipropileno e a poliamida reforçados com 40% de fibra de vidro e modificadores de impacto, para substituí-lo. Como objetivo secundário, temos também a redução no peso deste sistema, que também pode ser obtida com estes dois materiais.

1.2 Justificativa

A análise do material mais adequado para fabricação de *retainer* é de particular importância porque, a partir do ano de 2014, todos os carros produzidos no Brasil devem possuir *airbag* tanto para o motorista (DAB) como para o passageiro (PAB). (Lei 11.910, resolução nº 311 do CONTRAM)

As montadoras de veículos fazem um enorme esforço para que haja redução nos preços destes equipamentos de segurança, visto que serão utilizados inclusive em todos os carros populares vendidos por aqui. Como o preço do aço no Brasil é alto, a troca deste material por um dos polímeros avaliados pode reduzir significativamente o preço do *retainer*. No mercado automotivo, com enormes volumes de vendas mensais, a redução de centavos de dólar é um ganho bem expressivo.

Segundo a FENABRAVE (Federação Nacional da Distribuição dos Veículos Automotores), foram vendidos 318.957 carros em julho/12 com propulsores de até 2.0 litros. Uma redução de U\$ 0,10 em um *retainer* significaria uma economia de aproximadamente U\$ 32.000,00 no mês. Ao longo da vida dos veículos, este valor seria muito maior. Considerando este volume de vendas, num período de 5 anos, a economia chegaria a U\$ 19.137.420,00.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de proteção passiva: Airbag

Diferentes técnicas foram consideradas para inflar os *airbags*. A primeira delas foi a utilização de compartimentos com gás pressurizado, que possuíam uma válvula que abria durante a colisão. Neste sistema, a saída de gás, que é acompanhada por um resfriamento, é máxima no início e decresce exponencialmente, o que não está de acordo com as necessidades para o uso em *airbags*.

Um conceito alternativo utiliza um sistema híbrido, que combina um ignitor pirotécnico com gases pressurizados. Também possui algumas desvantagens do gás pressurizado.

Finalmente, existe a utilização de um propelente sólido para inflar o *airbag*. É a mais comum e também a mais confiável das três técnicas. O propelente utilizado é alvo de vários estudos atualmente, visando obter melhor desempenho e também produtos da combustão cada vez menos nocivos aos ocupantes do automóvel.

O *airbag* é um conjunto constituído por uma bolsa, um gerador de gás (*inflator*), o suporte do gerador (*retainer*) e sua cobertura. Existem sensores distribuídos no veículo que em caso de acidente enviam um sinal elétrico a uma unidade controladora (ECU), que por sua vez envia um sinal ao gerador. Nele, o detonador inicia a queima do propelente, gerando uma grande quantidade de gás nitrogênio, o que finalmente infla o *airbag* em uma fração de segundo, mais rápido que um piscar de olhos. A Figura 2.1 ilustra o tempo de abertura dos *airbags* do motorista e do passageiro.



Figura 2.1 – Tempo de abertura de um *airbag*. (Fonte: Takata do Brasil S.A. Brasil S.A.)

O projeto deste sistema de retenção considera a aplicação da Lei de Conservação da Energia: “A variação da energia cinética de certo objeto é igual ao trabalho líquido aplicado sobre este objeto”, conforme a equação (1) abaixo:

$$W_{liq} = \Delta EC \quad \rightarrow \quad \int F \cdot ds = \frac{1}{2} \times m \times (v_f^2 - v_i^2)$$

$$F \times s = \frac{1}{2} m (\Delta v^2) \quad (1)$$

Força média do impacto Distância percorrida durante o impacto Energia do impacto

Figura 2. 2 – Variação da energia cinética no impacto. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

Um sistema de retenção eficiente minimiza a força de retenção transmitida ao ocupante, enquanto dissipa sua energia cinética (EC). Isto é realizado maximizando-se a distância “s” durante a qual a força de retenção é aplicada ao ocupante do veículo.

$$F_{\text{ocupante}} = \frac{EC_{\text{ocupante}}}{s} \quad (2)$$

Para uma dada velocidade de batida, esta é uma constante!

Distância percorrida durante o impacto sobre a qual a força de retenção é aplicada

Figura 2. 3 – Força de retenção no ocupante do veículo. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

Os sistemas de *airbag* podem ser de simples ou duplo estágio. Aqueles de duplo estágio agem de maneira diferente para batidas apenas moderadas e para aquelas mais fortes. No primeiro caso, apenas o primeiro estágio é acionado, resultando numa bolsa inflada em torno de 70% de sua capacidade. No segundo caso, ela é inflada completamente.

O *airbag* deve trabalhar em conjunto com o cinto de segurança com pré-tensionador. O cinto de segurança sempre agirá em conjunto com o sistema de *airbag*, podendo agir sozinho no caso de impactos menores. Neste caso, apenas os cintos de segurança são tensionados para eliminar qualquer folga entre ele e o corpo do passageiro. O *airbag* não é acionado. Em impactos moderados, os *airbags* também serão acionados. Se forem de duplo estágio, apenas o primeiro será acionado e ele será inflado em torno de 70% de seu volume. Em impactos maiores, o *airbag* será acionado até o segundo estágio (100% do volume). A Figura 2.4 mostra o acionamento de um *airbag* de duplo estágio.

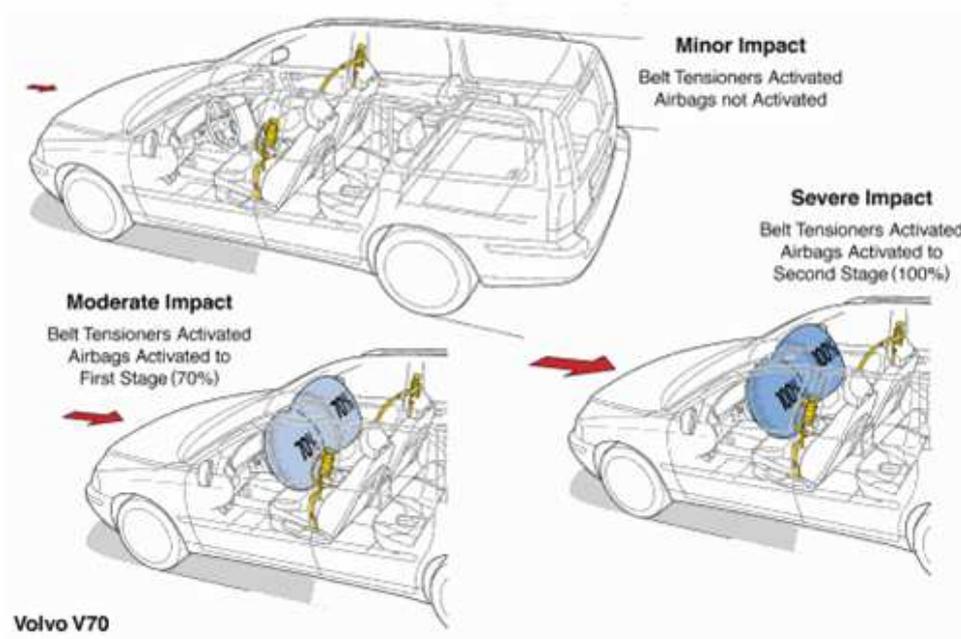


Figura 2. 4 – Acionamento de um *airbag* de duplo estágio.
(Fonte: Volvo)

Durante uma colisão frontal, dois sensores localizados na parte da frente do veículo são responsáveis pelo acionamento dos *airbags* frontais. Eles também serão acionados em colisões oblíquas, mas no caso de colisões laterais ou traseiras, não. Nos veículos que possuem *airbags* laterais e de cortina existem sensores laterais, que são acionados no caso de colisões laterais ou oblíquas. A Figura 2.5 demonstra quais *airbags* serão acionados no caso de cada tipo de colisão.

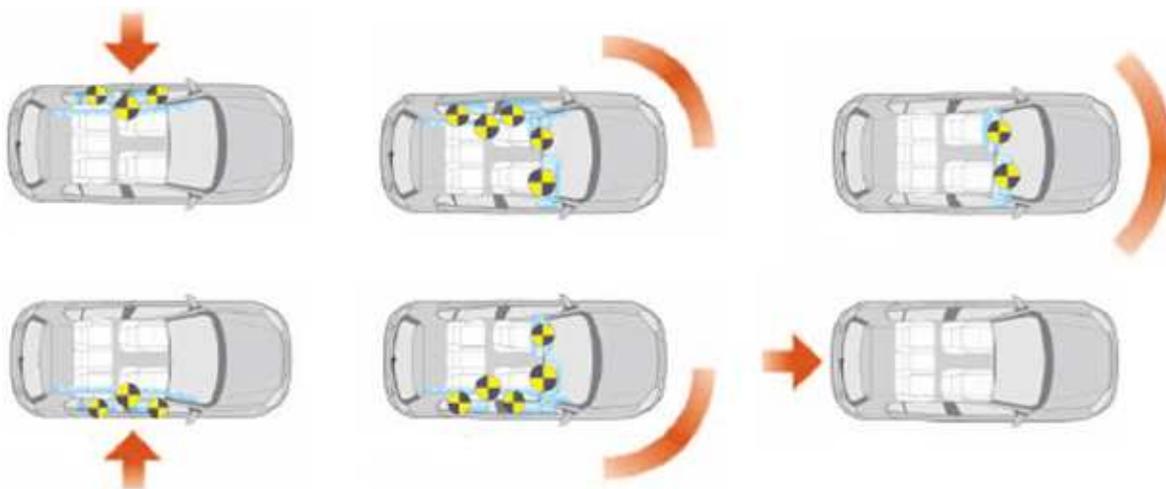


Figura 2. 5 – *Airbags* acionados para cada tipo de colisão.
(Fonte: Takata do Brasil S.A.)

A Figura 2.6 mostra a localização dos sensores e dos cintos de segurança no veículo.

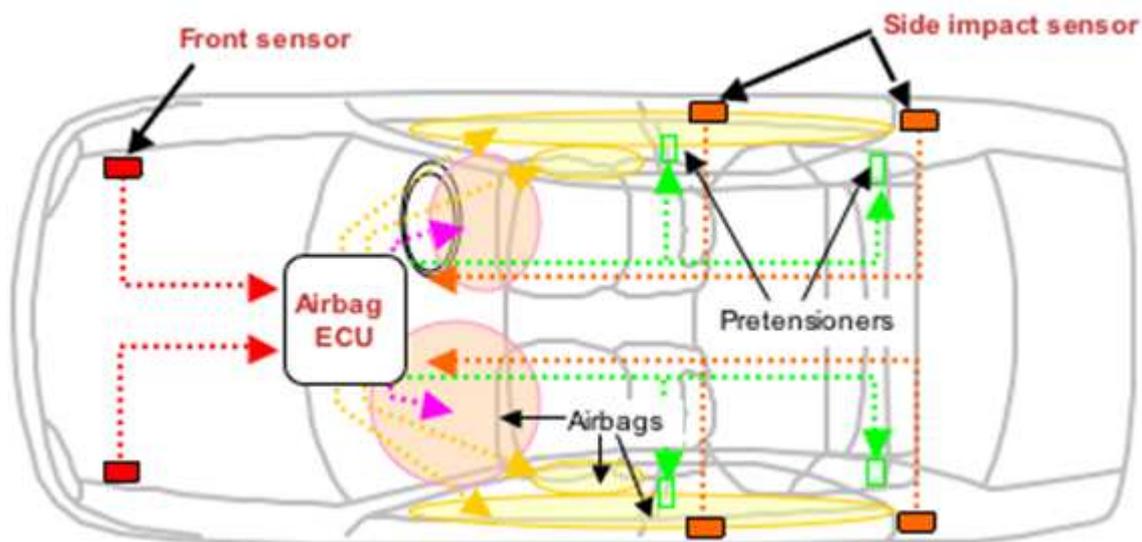


Figura 2. 6 – Exemplo de instalação de sensores e ECU em um veículo.
(Fonte: Takata do Brasil S.A.)

O *inflator* é o responsável pela velocidade de resposta do sistema. As limitações com as quais os *airbag* operam, como a pequena fração de segundo que tem para agir e o pequeno espaço entre volante/painel e passageiro, são grandes. É no *inflator* onde ocorre a detonação do propelente sólido, que queima extremamente rápido e cria um grande volume de gás, suficiente para inflar a bolsa em um tempo inferior a 50 ms.

O gerador é formado por uma câmara onde fica o propelente sólido, um detonador e um filtro metálico. A Figura 2.7 mostra um esquema em corte de um gerador de gás que é utilizado no *airbag* do motorista (DAB).

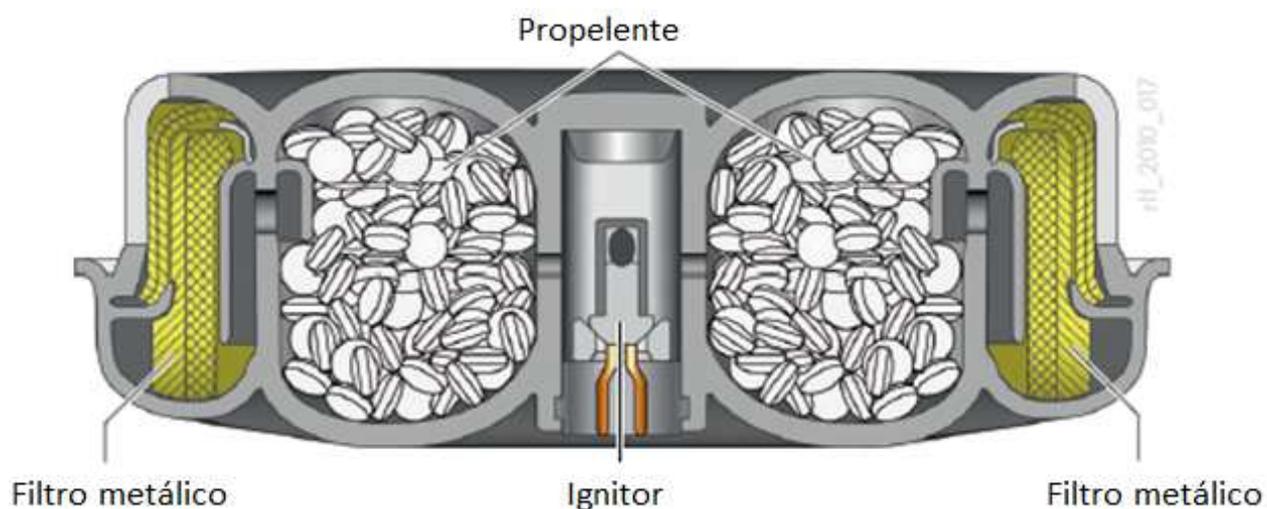


Figura 2. 7 – Inflator DAB em corte. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

O *retainer* deve resistir aos esforços gerados pela detonação do gerador de gás, que são bastante elevados. As temperaturas alcançadas durante a queima do propelente são altas (o gás nitrogênio chega a 150°C dentro da bolsa) e por isso o material utilizado deve resistir bem a esta variação de temperatura.

A Figura 2.8 mostra um modelo impresso em 3D para a visualização do design e da montagem dos componentes sobre o *retainer*.



Figura 2. 8 – Modelo de *retainer* impresso em 3D. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

As normas que devem ser atendidas pelo *airbag* são bem rígidas; uma delas, por exemplo, exige que ele funcione em condições extremas de temperatura, de -35°C a 85°C . Isso diminui consideravelmente as opções de materiais a serem utilizados em seus componentes.

2.2 Materiais poliméricos

A utilização dos chamados “polímeros de engenharia” para a substituição de metais por polímeros é uma tendência crescente e importante nos projetos de engenharia, particularmente na indústria automotiva, onde são encontrados os exemplos mais importantes desta tendência.

Os polímeros podem ser classificados em duas principais categorias: os termoplásticos e os termofixos. Os primeiros são materiais que se tornam moles e deformáveis quando aquecidos, característica que afeta o processamento de tais polímeros. A moldagem por injeção e a moldagem por extrusão são processos predominantes para os termoplásticos.

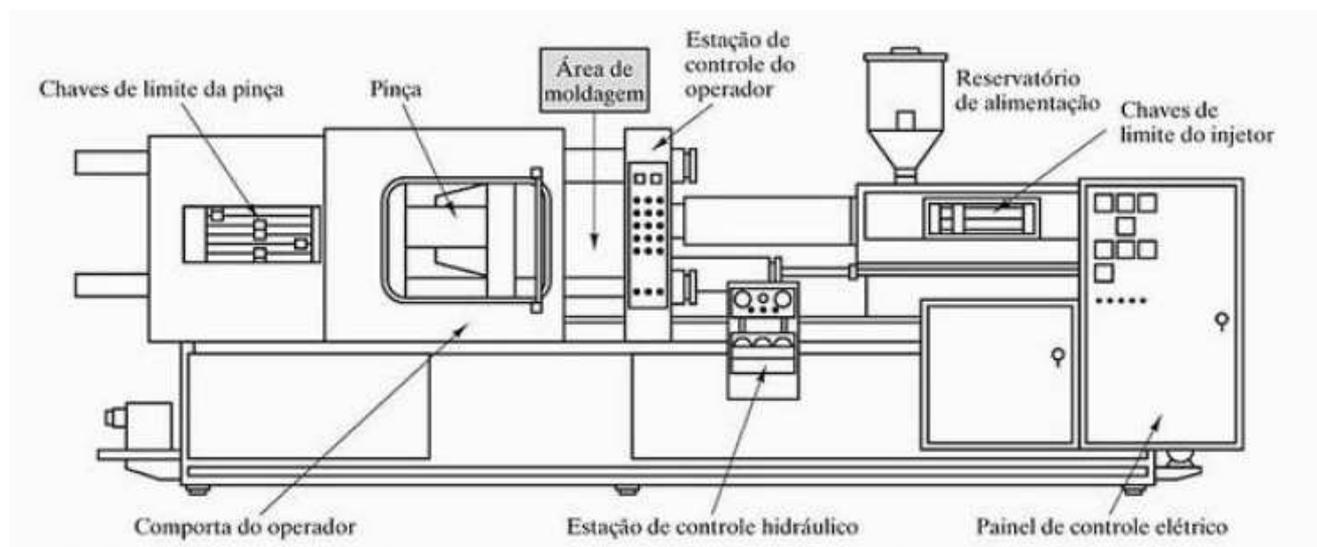


Figura 2. 9 – Moldagem por injeção de um polímero termoplástico. (SHACKELFORD, 2008.)

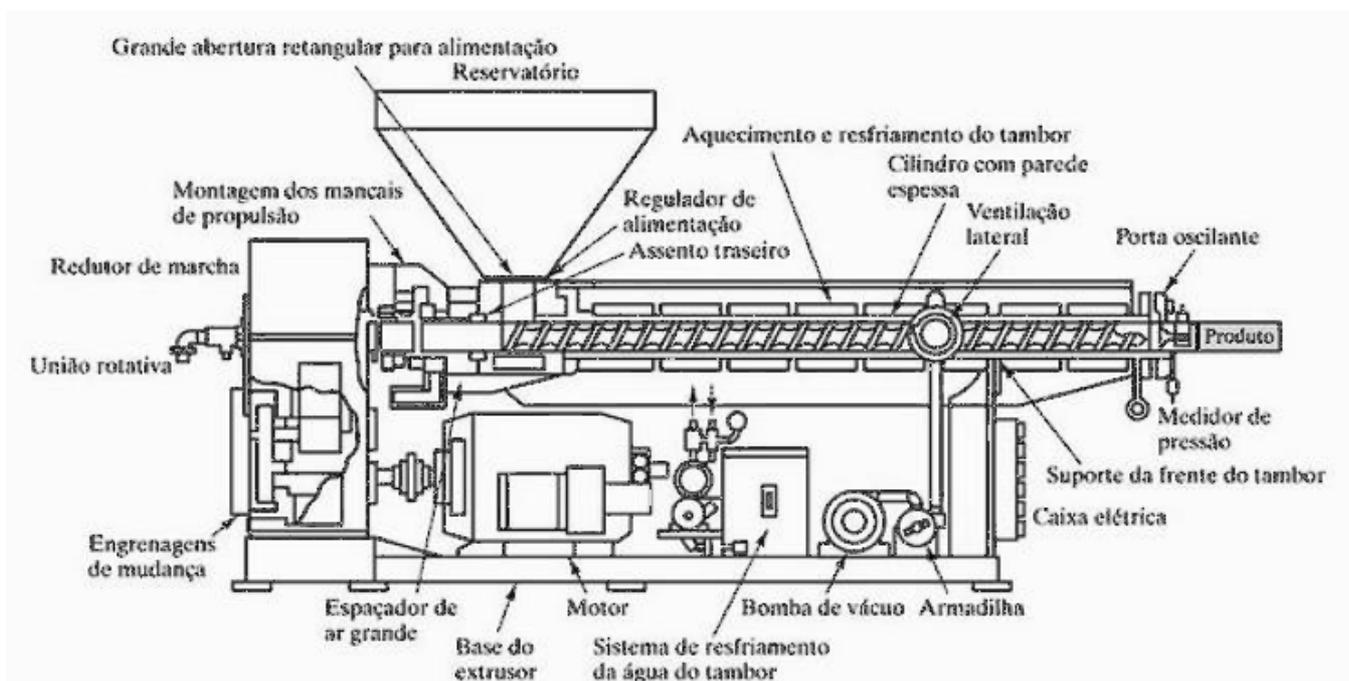


Figura 2. 10 – Moldagem por injeção de um polímero termoplástico.
(SHACKELFORD, 2008.)

Um grande esforço tem sido feito para produzir polímeros com resistência e rigidez suficientes para aplicações estruturais, normalmente dominadas por metais. É nesta categoria que se enquadram o polipropileno e a poliamida.

Os polímeros termofixos são o oposto dos termoplásticos. Eles se tornam mais rígidos com o aquecimento e não perdem esta característica com o resfriamento. A moldagem por compressão e a por transferência são processos predominantes desta categoria.

Estes polímeros podem ser retirados do molde na temperatura de fabricação, já que a polimerização permanece sob resfriamento. Ao contrário, termoplásticos precisam ser resfriados no próprio molde para se evitar as deformações.

Existem vários tipos de aditivos que são utilizados na tecnologia de polímeros para fornecer-lhes características específicas e melhorar suas propriedades, de acordo com a necessidade para cada aplicação. Os tipos mais comuns são:

- plastificantes: usado para amolecer o polímero;
- materiais de enchimentos (ou carga): usados geralmente para fornecer estabilidade dimensional a um baixo custo. Também podem fortalecer o polímero restringindo a mobilidade das cadeias;
- estabilizadores: são aditivos usados para reduzir a degradação do polímero;
- retardadores de chama: reduzem a combustibilidade inerente a certos polímeros;
- corantes: usados para fornecer cor, em polímeros em que a aparência é um fator na seleção de materiais;
- reforços: são bastante utilizados nos polímeros de engenharia para aumentar sua resistência e rigidez, elevando, assim, sua competitividade como substitutos do metal. O uso de desses aditivos, até um nível de aproximadamente 50% do volume, produz um material geralmente considerado um polímero. Acima deste valor, o material é mais corretamente chamado de compósito. Por este motivo, os materiais PA GF40 e PP GF40 serão considerados polímeros compósitos neste trabalho. Como exemplo de um aditivo de reforço temos a fibra de vidro, muito utilizada na prática.

2.3 O processo de injeção

O processo de injeção é uma técnica de moldagem que consiste na condução, homogeneização e aquecimento do composto polimérico, seguido da sua injeção em alta pressão do material fundido para o interior do molde. A injeção pode ser feita através de um fuso e pistão. Após o resfriamento, a peça é extraída do molde e um novo ciclo deste processo é iniciado. As principais etapas do processo são:

a) Fechamento do molde: o ciclo de injeção se inicia pelo fechamento e travamento do molde, que deve suportar as altíssimas pressões de injeção;

b) Dosagem do material: consiste na plastificação e homogeneização do composto no cilindro de injeção, através do aquecimento deste e da rotação do fuso;

c) Preenchimento: injeção do polímero no interior da cavidade do molde;

d) Recalque: a pressão é mantida até a solidificação completa da peça, a fim de compensar a contração do material. Evita, assim, defeitos de moldagem;

e) Resfriamento: terminada a etapa de recalque, o molde permanece fechado de modo que o material seja resfriado, completando sua solidificação. Tempos longos são indesejáveis, pois reduzem a produtividade do processo. No entanto, os materiais possuem um limite mínimo de tempo que devem ser resfriados, caso contrário passarão a existir alguns defeitos na peça final;

f) Extração da peça através dos pinos extratores: o molde é aberto e a peça é extraída através de extratores, que podem ser de diversos tipos – mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos – de acordo com a concepção do molde.

A Figura 2.11 mostra uma simulação do comportamento do fluxo de material durante a injeção na cavidade do molde.

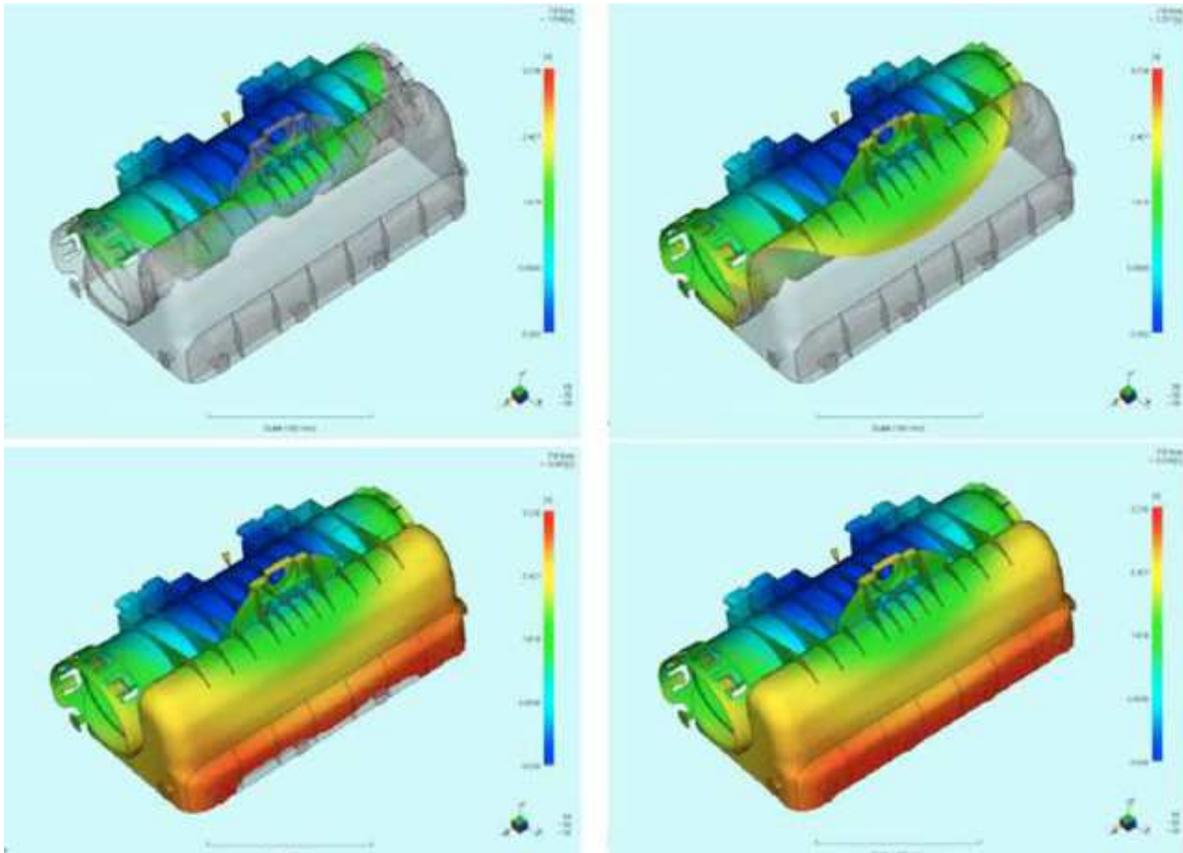


Figura 2. 11 – Análise de fluxo na injeção. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

Algumas variáveis importantes que devem ter um controle adequado são:

- Aquecimento do material até a temperatura adequada para injeção, além de tomar cuidado para que esta temperatura se mantenha até a injeção;
- Homogeneização adequada do material;
- A velocidade do fuso é um fator fundamental na dosagem do material;
- A máquina injetora deve ser rígida para não haver deformações durante o processo;
- Os moldes devem ter um bom acabamento;

- Resfriamento uniforme do material polimérico, de forma que não sejam geradas distorções na peça.

A Figura 2.12 ilustra o funcionamento de uma injetora de rosca recíproca. O fuso é responsável por homogeneizar e aquecer o material. Posteriormente, avança com alta pressão, agindo como um êmbolo.

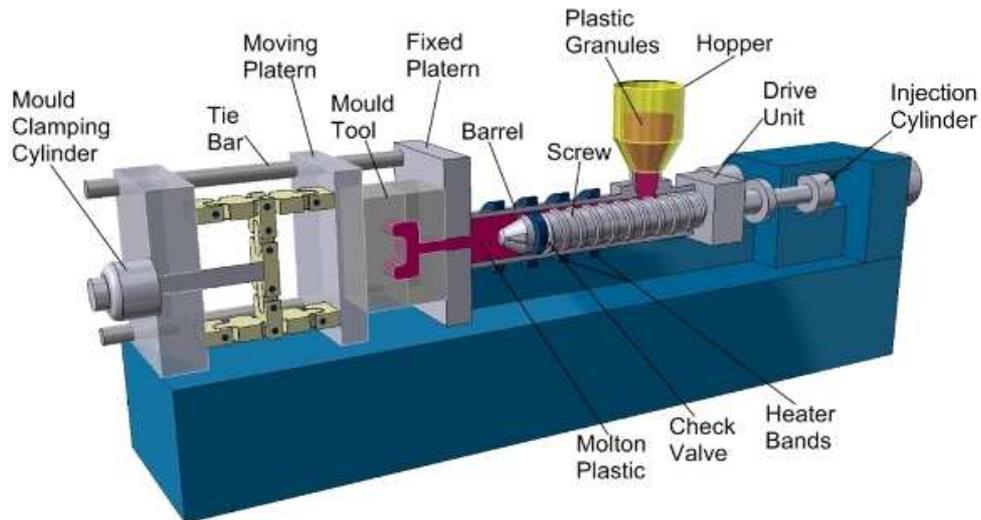


Figura 2.12 – Injetora de rosca recíproca. (Fonte: Rutland Plastic Limited)

Entre as vantagens do processo de injeção estão a elevada produtividade, o grande volume de peça que pode ser fabricado e o processo altamente suscetível à automação. Além disso, as peças requerem pouco ou nenhum acabamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais analisados

Neste trabalho serão avaliados três materiais para a fabricação de *retainer* para o *airbag* de passageiro (PAB) de um veículo. Foram feitas visitas às instalações da Takata do Brasil S.A. Brasil S.A, em Jundiaí, empresa líder de vendas no segmento de *airbag* no Brasil. Foram discutidas as necessidades e desejos tanto dos clientes, como da própria empresa, o que auxiliou a implantação do método utilizado neste trabalho.

O primeiro material analisado, o aço, é largamente utilizado para este fim e presente na maioria dos *retainers* atuais. Suas principais características são:

Tabela 3. 1 – Características do aço (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	Unidade	Aço
Módulo de tensão	MPa	200.000
Limite de escoamento	MPa	265
Limite de ruptura	MPa	312
Alongamento	%	20,00

Os outros dois são materiais que surgem como solução para reduzir custos e peso destes elementos. A poliamida com 40% de fibra de vidro (PA GF40) é um polímero reforçado que atende a todas as exigências atuais para *retainer*, assim como o polipropileno com 40% de fibra de vidro (PP GF40). Ambos possuem como aditivo o modificador de impacto, que melhora consideravelmente suas características no ensaio Charpy (aumentando a energia de impacto necessária para fraturar o material), como mostrado na Tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3. 2 – Características do PA GF40 e do PP GF 40 (Fonte: Catálogo Akrolen® PP GF 40 natur (2179) e Catálogo Akulon® K224-PG8.)

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	Unidade	PA GF40	PP GF 40
Módulo de tensão	MPa	11.500	8.000
Limite de ruptura	MPa	170	98
Alongamento	%	4,50	3,50
Absorção de água	%	4,90	0,79
Absorção de humidade	%	1,50	0,22
Impacto charpy entalhado (-35°C)	KJ/m ²	16	16
Impacto charpy entalhado (+23°C)	KJ/m ²	25	20
Impacto charpy não entalhado (-35°C)	KJ/m ²	110	65
Impacto charpy não entalhado (+23°C)	KJ/m ²	105	68

A PA GF40 também já é utilizada na fabricação de *retainer*. Cada um destes materiais possui suas vantagens competitivas, que serão analisadas posteriormente. A Figura 3.1 mostra um *retainer* PAB feito em PA GF40, enquanto a figura 3.2 mostra o mesmo *retainer* feito em PP GF40.



Figura 3.13 – Retainer PAB em PA GF40. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

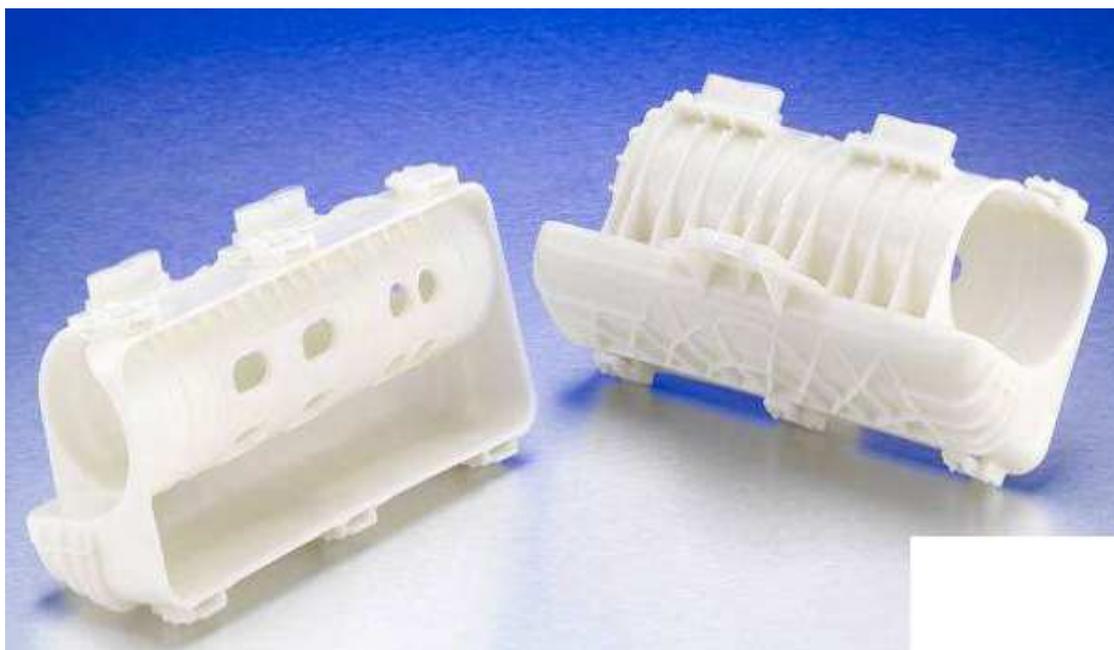


Figura 3. 2– *Retainer PAB* em PA GF40. (Fonte: Takata do Brasil S.A.)

3.2 Análise de valores na engenharia de sistemas

O método para avaliação e seleção destes materiais foi baseado no trabalho dos autores Pahl e Beitz. Segundo eles, “a avaliação não pode se basear em subaspectos pontuais específicos, como custos de produção, questões de segurança, de ergonomia ou do meio ambiente, mas, de conformidade com os objetivos gerais, deve levar em conta todas as influências na justa proporção.”

Por isso, será utilizado um método que permita uma avaliação mais abrangente, que considere um amplo leque de objetivos e as características que os satisfazem. A análise do valor de valores na engenharia de sistemas e a avaliação técnico-econômica de acordo com a diretriz VDI 2225 são os métodos mais utilizados. Neste trabalho, o primeiro foi o método escolhido, pois tem uma estrutura mais clara e diferenciada. O procedimento segundo a diretriz VDI 2225 é mais apropriado quando houver relativamente poucos critérios de avaliação e que sejam aproximadamente equivalentes. A Tabela 3.1 a seguir compara as etapas de avaliação de cada um destes dois métodos.

Tabela 3. 3 – Comparação entre a análise do valor útil e a diretriz VDI 2225.
(PAHL, 2005.)

Sequência	Etapa	Análise de valor útil	Diretriz VDI 2225
1	Identificação dos objetivos ou dos critérios de avaliação que serão utilizados na avaliação das variantes de solução através da lista de requisitos e uma lista de verificação.	Elaboração de um sistema de objetivos escalonado com respeito às dependências e complexidades (hierarquia dos objetivos) com base na lista de requisitos e outras condições gerais.	Compilação de características técnicas importantes, bem como aspirações e exigências mínimas da lista de requisitos.
2	Análise dos critérios de avaliação com relação à sua importância para o valor total da solução. Eventualmente, definição de fatores ponderais.	Ponderação escalonada dos critérios de objetivos (critérios de avaliação) e se for o caso, eliminação dos critérios insignificantes.	Definição de fatores ponderais somente no caso em que os critérios de avaliação diferirem sensivelmente em importância.
3	Compilação dos parâmetros relativos a cada uma das variantes de conceito.	Elaboração da matriz dos parâmetros de objetivo.	Em geral, não previsto.
4	Avaliação dos parâmetros de acordo com a escala de valores (0 a 10 ou 0 a 4 pontos).	Elaboração da matriz de valores de objetivo com ajuda de uma avaliação por pontos com funções de valor; 0 a 10 pontos.	Avaliação dos parâmetros por pontos, 0 a 4 pontos.
5	Determinação do valor global de cada variante de acordo com o conceito via de regra com relação a uma solução ideal (valência).	Elaboração de uma matriz de valores úteis com consideração dos pesos; cálculo dos valores úteis globais por meio de somatórias.	Cálculo de uma valência técnica pela formação de somas com ou sem consideração de pesos em relação a uma solução ideal; caso necessário, cálculo de uma valência econômica baseada em custos de fabricação
6	Comparação de variantes de conceito.	Comparação dos valores de uso globais. Elaboração do diagrama de s (potência).	Comparação das valências técnicas e econômicas.
7	Estimativa das incertezas de avaliação.	Estimativa dos desvios dos parâmetros objetivos e distribuição de valores de uso.	Não previsto explicitamente.
8	procura dos pontos fracos para a melhoria de variantes selecionadas	Elaboração de perfis de valores úteis.	Identificação das características com baixa pontuação.

3.2.1 Identificação de critérios de avaliação

De acordo com Pahl e Beitz (2005), o primeiro passo é a elaboração do conjunto de objetivos. Deles, serão derivados os critérios pelos quais as variantes poderão ser avaliadas. Deve-se tomar cuidado para que sejam satisfeitas, dentro do possível, as seguintes condições:

- As metas devem atender os requisitos decisivos relevantes e os condicionantes gerais da forma mais completa possível, de modo que um critério essencial não seja esquecido;

- As metas individuais precisam ser independentes entre si, de forma que a mudança de um valor de uma variante em relação a um objetivo não influencie os valores da variante em relação a outros objetivos;
- Se o trabalho para aquisição das informações for aceitável, deve-se expressar, se possível, as características do sistema a ser avaliado em termos verbais quantitativos ou ao menos qualitativos.

Por causa da subsequente atribuição de valores, os critérios devem receber uma formulação positiva, para que a avaliação seja uniformizada. Deve-se utilizar o critério “baixo ruído” ao invés de “barulhento”, por exemplo.

A análise de valor de benefício sistematiza essa etapa de trabalho pela elaboração de uma árvore de objetivos. Neste trabalho, os critérios de avaliação foram agrupados por “grau de importância”. Com isso, no topo temos o critério considerado mais importante. Nos níveis abaixo temos os critérios que vem em segundo lugar no grau de importância, e assim sucessivamente. Estes níveis irão gerar um fator de ponderação que indicarão o quão relevante é cada critério-alvo no valor global da solução.

3.2.2 Análise da relevância para o valor global

Os “fatores de ponderação” ou “peso” são números reais e positivos que exprimem a contribuição relativa de um critério de avaliação (meta). Na análise de valores, estes fatores estão sempre entre 0 e 1 (ou 0 e 100) e a soma de todos os fatores devem ser igual a 1 (ou 100).

Uma vez estabelecidos os critérios de avaliação e definidas suas relevâncias, os parâmetros conhecidos ou determinados analiticamente devem ser correlacionados com esses critérios. Estes parâmetros devem ser quantificáveis e caso não seja possível, devem ser feitas asserções verbais, concretas.

3.2.3 Análise segundo noções de valor

A próxima etapa é a atribuição de valores, que segundo a análise do valor de benefício varia de 0 a 10, conforme a Tabela 3.2. De acordo com Pahl e Beitz (2005), a experiência comprova que utilizar um sistema decimal baseado em porcentagem facilita a correlação e a subsequente avaliação.

Tabela 3. 4– Escala de valores. (PAHL, 2005.)

ESCALA DE VALORES			
Análise do valor útil		Diretriz VDI 2225	
Pt.	Significado	Pt.	Significado
0	Solução absolutamente não utilizável	0	insatisfatória
1	Solução muito		
2	Solução fraca	1	solução ainda sustentável
3	Solução sustentável		
4	Solução suficiente	2	suficiente
5	Solução satisfatória		
6	Solução boa com poucas falhas	3	boa
7	Solução boa		
8	Solução muito boa	4	muito boa (ideal)
9	Solução excedendo os requisitos		
10	Solução ideal		

Nesta avaliação, o mais prático é procurar primeiramente por variantes com pontos extremos, muito bons ou muito ruins, e atribuir a elas os pontos correspondentes. Deve-se ter o cuidado de atribuir os valores extremos 0 e 10 para características realmente insatisfatórias ou para características muito boas. Após esta consideração, as demais variantes são ordenadas mais facilmente entre estes extremos.

Para a atribuição dos pontos aos parâmetros das variantes, é preciso que o avaliador conheça o domínio da avaliação e o gráfico da chamada função de valor. Uma função de valor é uma relação entre valores e parâmetros. Na construção dessas funções, o gráfico decorre de uma conhecida relação matemática

entre valor e parâmetros ou, o que ocorre com maior frequência, como gráfico estimado.

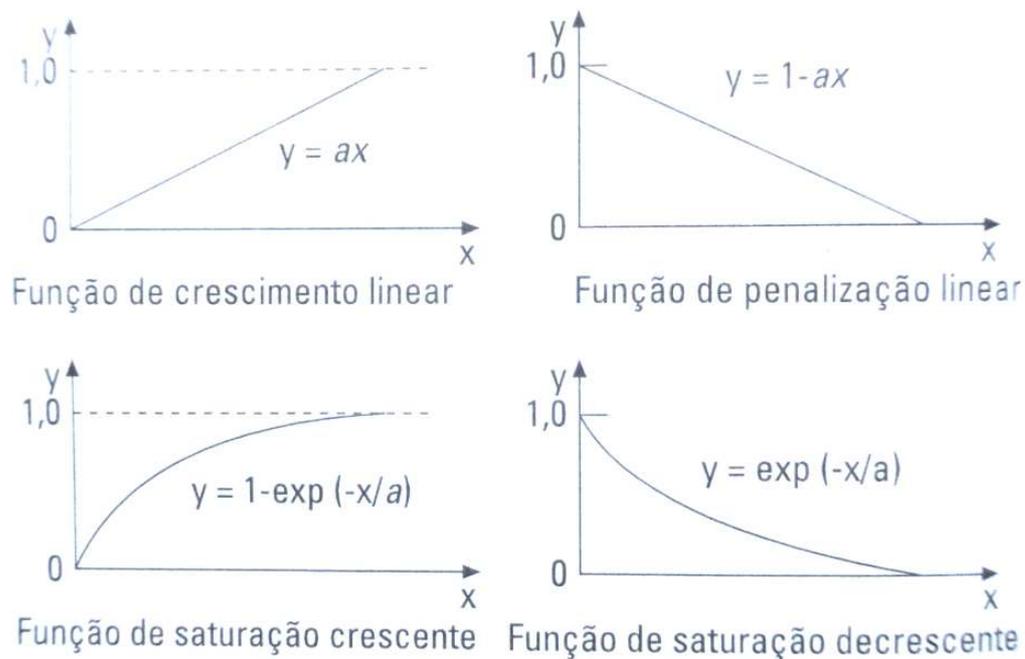


Figura 3. 3– Funções de valores. (PAHL, 2005.)

É recomendável a preparação de um esquema de avaliação no qual os parâmetros dos critérios de avaliação, indicados verbal ou numericamente, são atribuídos escalonadamente às ideias de valor, por atribuição de pontos. A Tabela 3.3 ilustra esta atribuição de pontos a cada parâmetro dos critérios de avaliação.

Tabela 3. 5 – Esquema para avaliação dos critérios. (PAHL, 2005.)

Escala de valores		Magnitude dos parâmetros			
Análise de valor Pontos	VDI 2225 Pontos	Consumo de combustível g/kWh	Potência específica kg/kW	Simplicidade das peças fundidas	Tempo de vida km percorridos
0	0	400	3,5	extremamente	20.000
1		380	3,3	complicadas	30.000
2	1	360	3,1	complicadas	40.000
3		340	2,9		60.000
4	2	320	2,7	médias	80.000
5		300	2,5		100.000
6	3	280	2,3	simples	120.000
7		260	2,1		140.000
8	4	240	1,9	extremamente simples	200.000
9		220	1,7		300.000
10		200	1,5		500.000

Os valores assim apurados para cada uma das variantes da solução w_{ij} , para fins de avaliação, serão lançados na lista de avaliação, como ilustrado na Tabela 3.6.

Tabela 3. 6 – Lista de avaliação. (PAHL, G.; **Projeto na Engenharia**. 2005.)

Critérios de avaliação		Parâmetros		Variante V1 (p. ex. M1)			Variante V2 (p. ex. Mv)			Variante Vj			Variante Vm					
				carac-terística	valor	valor ponderado	carac-terística	valor	valor ponderado	carac-terística	valor	valor ponderado	carac-terística	valor	valor ponderado			
Nr.	fator	unidade	e_{i1}	w_{i1}	wg_{i1}	e_{i2}	w_{i2}	wg_{i2}	...	e_{ij}	w_{ij}	wg_{ij}	...	e_{im}	w_{im}	wg_{im}		
1	baixo consumo de combustível	0,3	consumo de combustível	g/kWh	240	8	2,4	300	5	1,5	...	e_{1j}	w_{1j}	wg_{1j}	...	e_{1m}	w_{1m}	wg_{1m}
2	construção leve	0,15	potência específica	kg/kW	1,7	9	1,35	2,7	4	0,6	...	e_{2j}	w_{2j}	wg_{2j}	...	e_{2m}	w_{2m}	wg_{2m}
3	fácil fabricação	0,1	simplicidade de peças fundidas	-	baixo	2	0,2	médio	5	0,5	...	e_{3j}	w_{3j}	wg_{3j}	...	e_{3m}	w_{3m}	wg_{3m}
4	elevado tempo de vida	0,2	tempo de vida	quilome-tragem	80.000	4	0,8	150.000	7	1,4	...	e_{4j}	w_{4j}	wg_{4j}	...	e_{4m}	w_{4m}	wg_{4m}
...	
i	g_i		e_{i1}	w_{i1}	wg_{i1}	e_{i2}	w_{i2}	wg_{i2}	...	e_{ij}	w_{ij}	wg_{ij}	...	e_{im}	w_{im}			
...	
n	g_n		e_{n1}	w_{n1}	wg_{n1}	e_{n2}	w_{n2}	wg_{n2}		e_{nj}	w_{nj}			e_{nm}	w_{nm}			
	$\sum g_i=1$				Gw_1	Gw_1		Gw_2	Gw_2		Gw_j	Gw_j			Gw_m	Gw_m		
					W_1	W_1		W_2	W_2		W_j	W_j			W_m	W_m		

Como este critério de avaliação possui diferentes relevâncias para o valor global da solução, os fatores ponderados definidos na etapa anterior também

devem ser considerados. Assim, cada valor parcial w_{ij} deve ser multiplicado pelo respectivo valor de ponderação g_i . O valor ponderado resulta em:

$$wg_{ij} = g_i \times w_{ij} \quad (3)$$

A análise de valores considera os valores parciais não-ponderados como valores-alvo e os valores ponderados como valores-úteis.

3.2.4 Determinação do valor global

Após obter os subvalores para cada variante, é necessário determinar seu valor global. O valor global de uma variante será calculada por:

$$\text{Não-ponderado:} \quad Gw_j = \sum w_{ij} \quad (4),$$

$$\text{Ponderado:} \quad Gwg_j = \sum g_i w_{ij} = \sum wg_{ij} \quad (5),$$

Com base na regra da somatória, a análise de valores avalia as variantes através da determinação do valor global máximo, método que avalia como sendo a melhor variante aquela que possui o maior valor global. Portanto,

$$Gw_j \rightarrow \text{Máx} \quad \text{ou} \quad Gwg_j \rightarrow \text{Máx} \quad (4)$$

3.2.5 Estimativas das incertezas da avaliação

Os possíveis erros ou incertezas podem ser classificados em dois grupos principais: os erros subjetivos e as falhas inerentes ao próprio método.

Segundo Pahl e Beitz (2005), os erros subjetivos podem resultar de:

- Abandono da imparcialidade. Esta avaliação subjetiva pode ocorrer inconscientemente a um projetista que compara uma variante de sua preferência com as outras. Por isso, é necessária uma avaliação por diferentes pessoas, se possível, de diferentes áreas do projeto e da produção. Recomenda-se ainda, com insistência, rotular as variantes por uma

designação neutra, como “variante A”, “variante B” e “variante C”, por exemplo;

- Uma esquematização ampla do procedimento também contribui para derrubar influências subjetivas;
- Comparação de variantes sempre pelos mesmos critérios de avaliação, mas que não são igualmente apropriados para todas as variantes. Esse erro pode ser percebido já na determinação dos parâmetros e na sua correlação com os critérios de avaliação. Se, para variantes específicas, não for possível determinar a magnitude dos parâmetros com respeito a determinados critérios de avaliação, deve-se reformular ou eliminar estes critérios a fim de não se deixar induzir por uma avaliação incorreta dessas variantes específicas.
- Variantes são avaliadas isoladamente e não uma após a outra seguindo os critérios de avaliação estabelecidos. Por sua vez, cada critério de avaliação aplicado a todas as variantes (linha por linha da lista de avaliação), a fim de reduzir o preconceito com uma variante específica;
- Forte dependência dos critérios de avaliação entre si;
- Seleção de funções de valor inadequadas;
- Critérios de avaliação incompletos. Esse erro é enfrentado por obediência a um checklist adaptado aos critérios de avaliação da respectiva fase de projeto.

Os erros inerentes ao processo do método de avaliação devem-se ao fato de as magnitudes dos parâmetros previstas serem variáveis aleatórias e sujeitas a incertezas, levando à inevitável “incerteza do prognóstico”. Podem ser reduzidos significativamente caso se faça uma estimativa das dispersões.

Recomenda-se somente expressar os parâmetros quantitativamente caso isto seja possível com certa precisão. Caso contrário, o mais adequado é empregar estimativas verbais (como “baixa”, “média” e “alta”, por exemplo), cujo grau de incerteza pode ser percebido claramente. Valores numéricos induziriam a uma falsa sensação de certeza, por isso são perigosos.

3.2.6 Busca de pontos fracos

Pontos fracos são detectados por valores abaixo da média com relação a certos critérios de avaliação. Devem ser cuidadosamente considerados, principalmente em variantes promissoras e com bons valores globais e, na medida do possível, eliminados na continuação do desenvolvimento. Para detecção de pontos fracos a representação gráfica dos subvalores pode ser útil. É possível utilizar os chamados perfis de valores, de acordo com a figura abaixo.

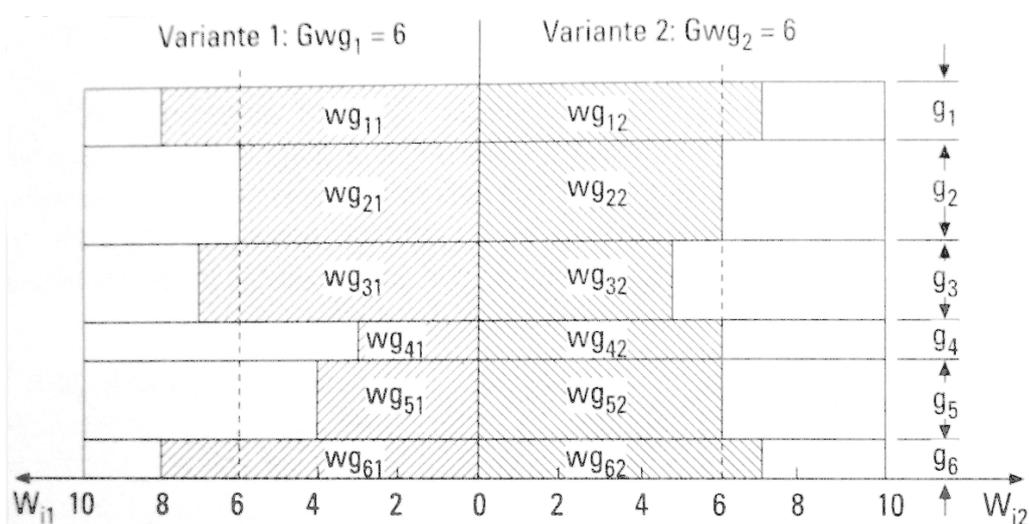


Figura 3. 2 – Perfil de valores para comparação de duas soluções.

(PAHL, 2005.)

Esta busca pelos pontos fracos foi feita baseada nos dados que foram obtidos para cada parâmetro dos materiais avaliados e serão discutidos posteriormente, em “Resultados e Discussões”.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aplicação do método da análise de valor

Foram analisados os seguintes critérios para a comparação entre os materiais:

- baixo custo: o mercado está exigindo custos cada vez menores. Uma vez atendidos os requisitos técnicos, este é o fator mais importante para as montadoras (clientes). Pequenas variações de preço podem definir o sucesso ou o fracasso do produto. Também deve-se analisar a tendência dos preços, de se manter estável, baixar ou aumentar;
- alta resistência mecânica: o *retainer* deve resistir aos esforços elevados que surgem após a queima do propelente. Uma vez atingindo a estas especificações, não são fatores ganhadores de pedido;
- produto leve: a indústria automotiva está sempre em busca da redução de peso. É um dos desejos do cliente para o produto avaliado;
- pouca variação das propriedades do material para grandes variações de temperatura (-35°C a 85°C): o *airbag* deve passar por testes rigorosos, sendo que um deles é funcionar em condições extremas de temperatura. Assim como a resistência mecânica, é apenas um fator qualificador para o material;
- altas temperaturas admissíveis: o *inflator* atinge altas temperaturas que devem ser suportadas pelo material utilizado no *retainer*. É um requisito que deve ser atingido, mas também é apenas qualificatório;
- pouca variação das propriedades devido à umidade: a manutenção das propriedades do material, assim como sua estabilidade

dimensional, são muito importantes para um elemento de segurança. Quaisquer falhas causadas por especificações fora do projeto podem ser extremamente graves;

- possibilidade de fabricação pela própria empresa: é muito importante que a empresa possa ter um controle de qualidade adequado e respostas rápidas a qualquer problema que possa ocorrer com o produto final. Caso o *retainer* venha de algum fornecedor, é necessário um bom controle da qualidade para evitar problemas na montagem ou no funcionamento do *airbag*, um item de segurança que não pode falhar;
- disponibilidade do material: o material avaliado deve ter um número adequado de fornecedores, para a empresa não ficar refém de apenas um único fornecedor, possuindo assim uma alternativa caso um ou dois fornecedores tornem-se inviáveis.

Uma vez definidos os critérios, determinou-se a relevância de cada um, através dos “fatores de ponderação” (fator “g”). Foi dada uma nota de 10 a 25 para cada, dependendo da importância de cada requisito. Posteriormente, estes valores foram normalizados, de forma que a somatória destes desse “um”. A tabela 4.1 mostra os valores do fator “g” para cada critério.

Tabela 4. 2 – fatores de ponderação para cada critério avaliado

			fator "g"
1	baixo custo	25	0,213675214
2	alta resistência mecânica	10	0,085470085
3	produto leve	15	0,128205128
4	pouca variação das propriedades para grandes variações de temperatura (-35°C a 85°C)	10	0,085470085
5	altas temperaturas admissíveis	10	0,085470085
6	pouca variação das propriedades devido à umidade	18	0,153846154
7	possibilidade de fabricação pela própria empresa	16	0,136752137
8	disponibilidade do material	13	0,111111111
		117	1

A próxima etapa, a atribuição de valores, foi realizada baseada na tabela 4.2, onde foram definidas as magnitudes dos parâmetros para cada faixa da escala de valores. Foram criados gráficos da função de valor para os parâmetros que puderam ser quantificados.

Tabela 4. 3 – Magnitude dos parâmetros avaliados

Escala de valores	Magnitude dos parâmetros							
	Análise de valor	Custo (U\$)	Tensão de ruptura (Mpa)	Peso (Kg)	Estabilidade com a temperatura	Temperatura máxima admissível (°C)	Estabilidade com a umidade	Máquinas para atender aos processos
0	5,40	50	0,650	muito baixa	105	muito baixa	nenhuma	muito baixa
1	5,10	60	0,600		120			
2	4,80	70	0,550	baixa	135	baixa	quase nenhuma	baixa
3	4,50	80	0,500		150			
4	4,20	90	0,450	média	165	média	algumas	média
5	3,90	100	0,400		180			
6	3,60	110	0,350	alta	195	alta	quase todas	alta
7	3,30	120	0,300		210			
8	3,00	130	0,250	muito alta	225	muito alta	todas	muito alta
9	2,70	140	0,200		240			
10	2,40	150	0,150		255			

O preço, abaixo do valor idealizado de U\$ 2,40, foi considerado como o valor 10. Um valor de U\$ 5,40 já foi considerado o outro extremo, valor o qual nenhuma montadora estaria disposta a pagar, conforme a Figura 4.1.

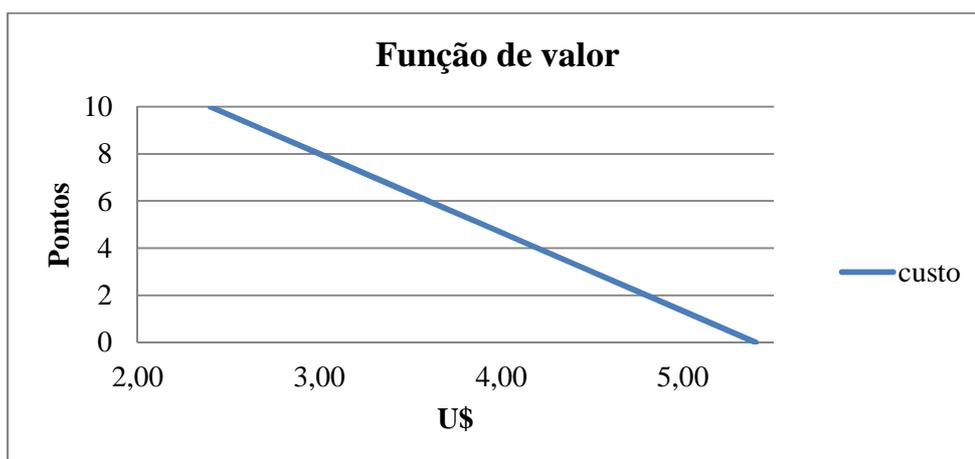


Figura 4. 1 – Função de valor para o custo

A tensão de ruptura, a partir do valor de 150 MPa, foi considerada como uma solução excelente, acima da qual qualquer material seria avaliado com o

valor máximo, caso do aço. O valor de 98 MPa, para o PP GF40, é considerado suficiente para a aplicação, como ilustra a Figura 4.2.

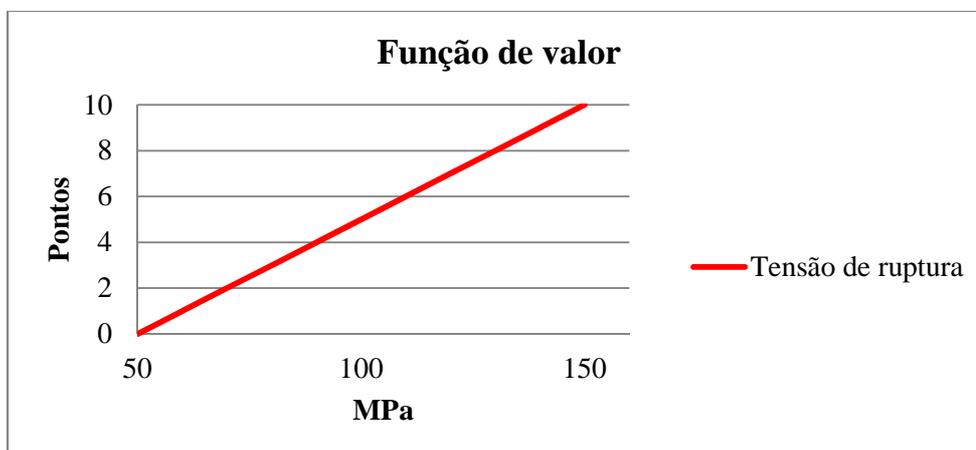


Figura 4. 2 – Função de valor para a tensão de ruptura

A função de valor do peso, assim como para o custo, é decrescente. Neste caso, o aço tem um desempenho sustentável, porém abaixo do desejado. Os polímeros aparecem como boas soluções.

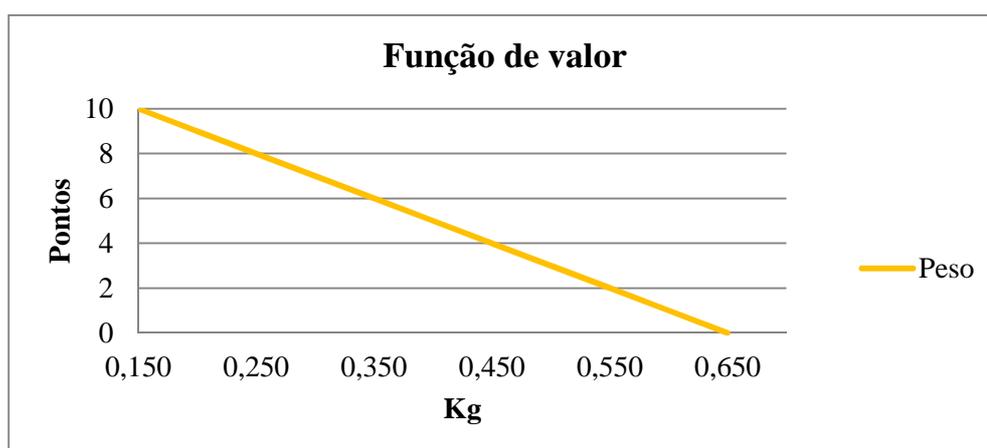


Figura 4. 3 – Função de valor para o peso

A temperatura máxima admissível é um fator qualificador. Acima de certo valor, todas as soluções são adequadas. Para o aço, este valor está bem acima do necessário, recebendo, assim, um valor 10. O polipropileno possui uma temperatura admissível próxima do limite, sendo que chega a fundir em algumas partes após a queima do propelente. Por isso, recebe valor 3 na avaliação, sendo considerada uma solução sustentável.

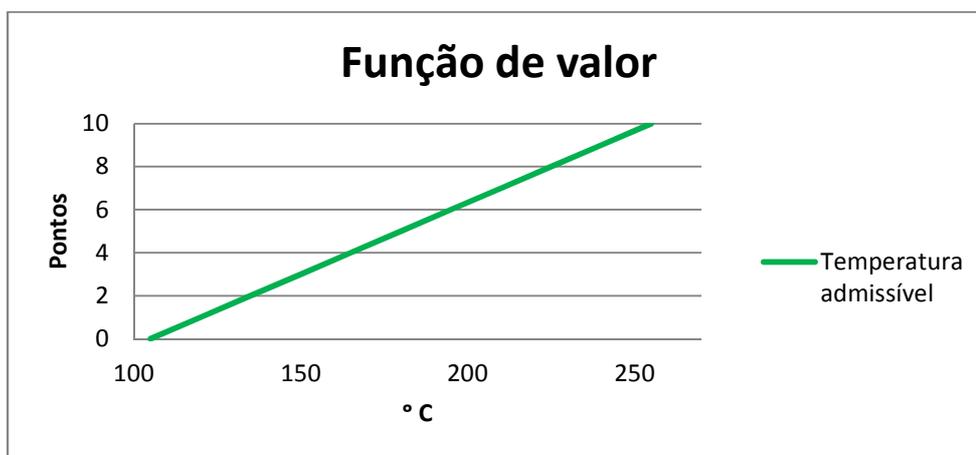


Figura 4. 4 – Função de valor para temperatura admissível

Os outros parâmetros foram avaliados de forma verbal, por isso não foram criados gráficos representando suas respectivas funções de valor. Como os critérios devem receber uma formulação positiva, as expressões “muito alta” e “todas” indicam o extremo superior (10) enquanto “muito baixa” e “nenhuma” indicam o extremo inferior.

Uma vez bem definida a relação entre a magnitude dos parâmetros e a escala de valores, os valores “w” foram apurados para cada variante estudada, em cada um dos critérios avaliados. Estes valores foram lançados numa planilha e foram finalmente calculados os valores ponderados para cada material, “wg”.

O valor global de cada variante foi calculado fazendo-se a somatória de cada subvalor. O material com o maior valor global é considerado a melhor solução. A Tabela 4.3 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 4. 4 – Planilha de avaliação com os resultados obtidos

LISTA DE AVALIAÇÃO SEGUNDO A ANÁLISE DE VALOR														
Nr.	Critérios de avaliação	fator g_{i1}	Parâmetros			Material A			Material B			Material C		
			unidade	custo	unidade	característica	valor	ponderado	valor	ponderado	valor	ponderado	característica	valor
						e_{i1}	w_{i1}	$w_{g_{i1}}$	e_{i2}	w_{i2}	$w_{g_{i2}}$	e_{i3}	w_{i3}	$w_{g_{i3}}$
1	baixo custo	0,217		custo	U\$	4,06*	4	0,870	2,93*	8	1,739	2,68*	9	1,957
2	alta resistência mecânica	0,087		tensão de ruptura	Mpa	312	10	0,870	115	6	0,522	98	4	0,348
3	produto leve	0,130		peso	Kg	0,498	3	0,391	0,341	6	0,783	0,291	7	0,913
4	pouca variação das propriedades para grandes variações de temperatura (-35°C a 85°C)	0,087		estabilidade com a temperatura	-	pouca variação	8	0,696	pouca variação	8	0,696	pouca variação	8	0,696
5	altas temperaturas admissíveis	0,087		temperatura máxima admissível	°C	720	10	0,870	200	6	0,522	150	3	0,261
6	pouca variação das propriedades devido à umidade	0,157		estabilidade com a umidade	-	alta	7	1,096	média	4	0,626	alta	6	0,939
7	possibilidade de fabricação pela própria empresa	0,122		maquinas para atender aos processos	-	nenhuma	1	0,122	todas	10	1,217	todas	10	1,217
8	disponibilidade do material	0,113		fornecedores	-	alta	6	0,678	alta	6	0,678	média	5	0,565
		$\sum g_{i1} = 1$					49	5,591		54	6,783		52	6,896

Material A	Aço
Material B	PA GF40
Material C	PP GF40

A partir destes valores, foram feitos gráficos comparando os três materiais avaliados. A Figura 4.5 mostra a comparação sem considerar os fatores de ponderação. Já a Figura 4.6 compara os materiais já incluindo tais fatores.

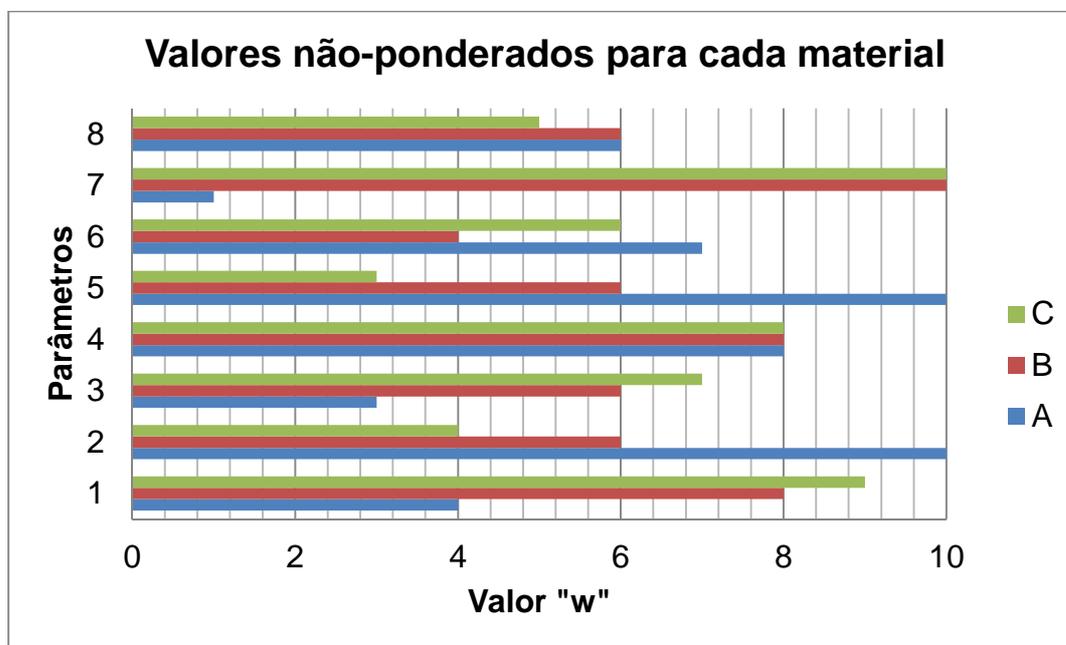


Figura 4. 5 – comparativo entre os materiais sem considerar fatores de ponderação

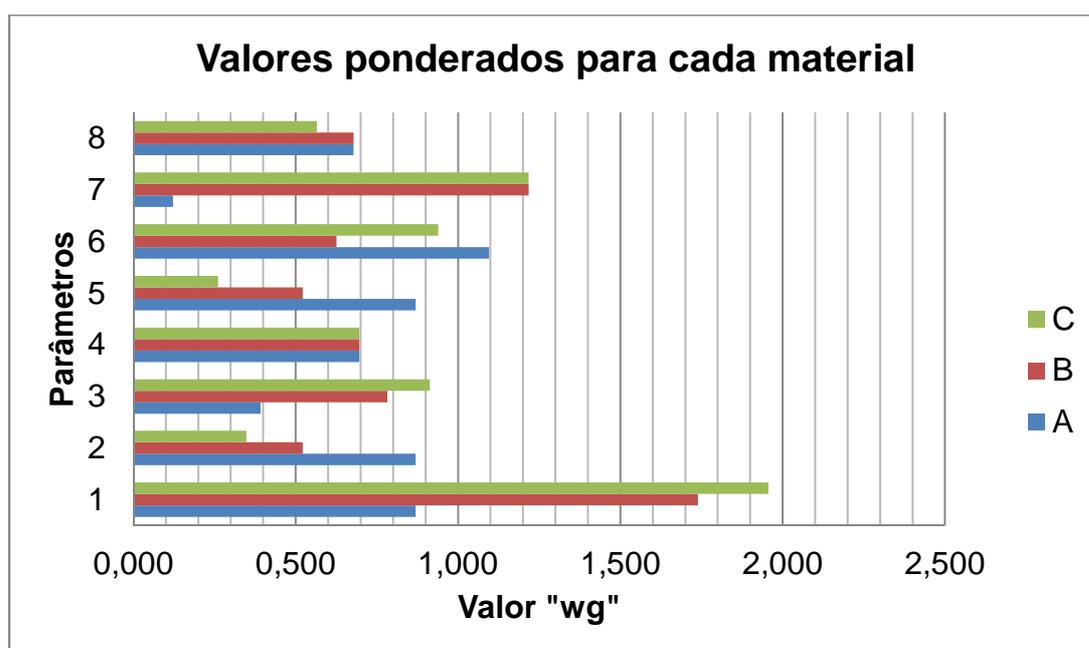


Figura 4. 6 – comparativo entre os materiais considerando os fatores de ponderação

A análise da Figura 4.5 nos permite avaliar os pontos fracos e os pontos fortes de cada material, sem considerar nenhum peso. Isto é muito importante ser avaliado, pois uma solução com maior valor global pode ser muito boa em alguns pontos, mas não ser a mais adequada por possuir algum ponto fraco que possa comprometer o produto final.

Analisando a Figura 4.6, podemos verificar o grau de importância dos pontos fracos encontrados anteriormente. A partir dele podemos perceber que um possível ponto fraco do material C, o parâmetro 5, tem uma pequena participação no valor global. Entretanto, o material A possui um desempenho consideravelmente abaixo dos outros em relação ao parâmetro número 1, que tem grande participação na composição deste valor.

Para facilitar a visualização e a comparação entre os materiais, entendeu-se que seria interessante um comparativo de cada material dois a dois. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os resultados obtidos.

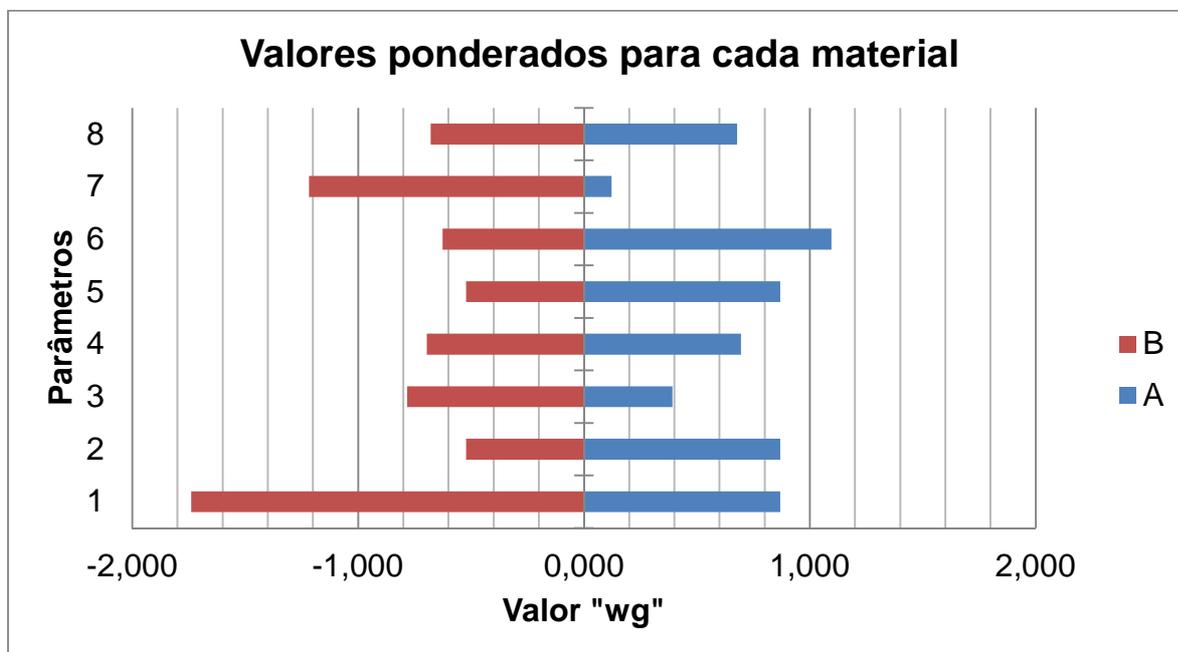


Figura 4. 7 – Comparação entre os materiais A e B

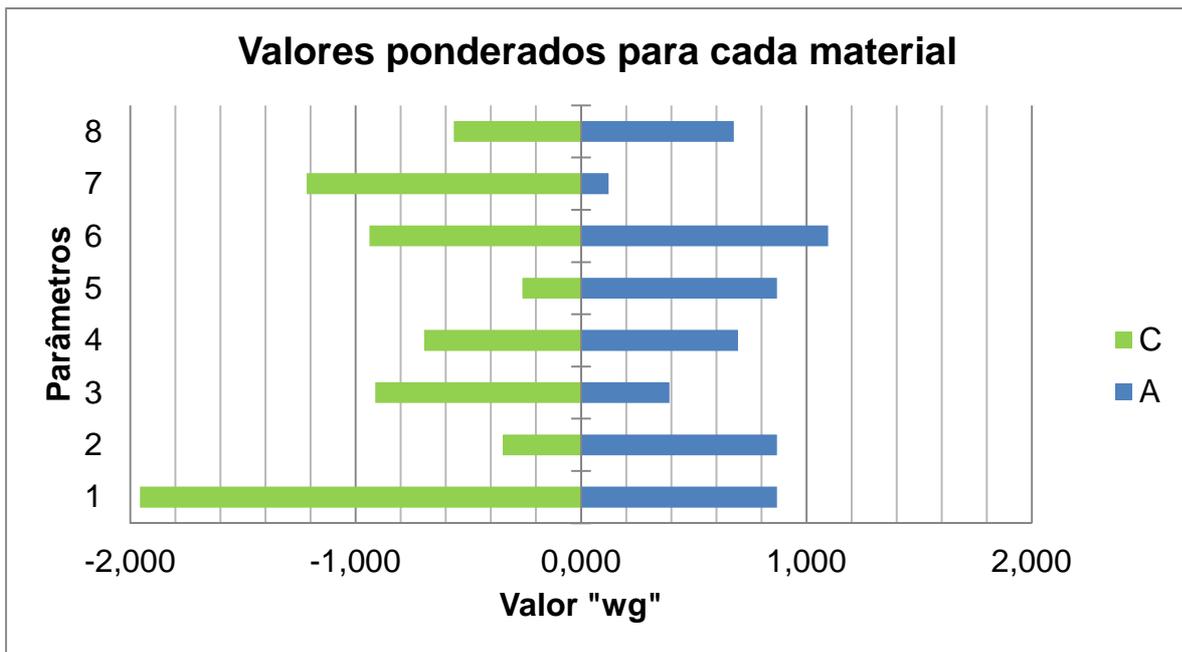


Figura 4. 8 – Comparação entre os materiais A e C

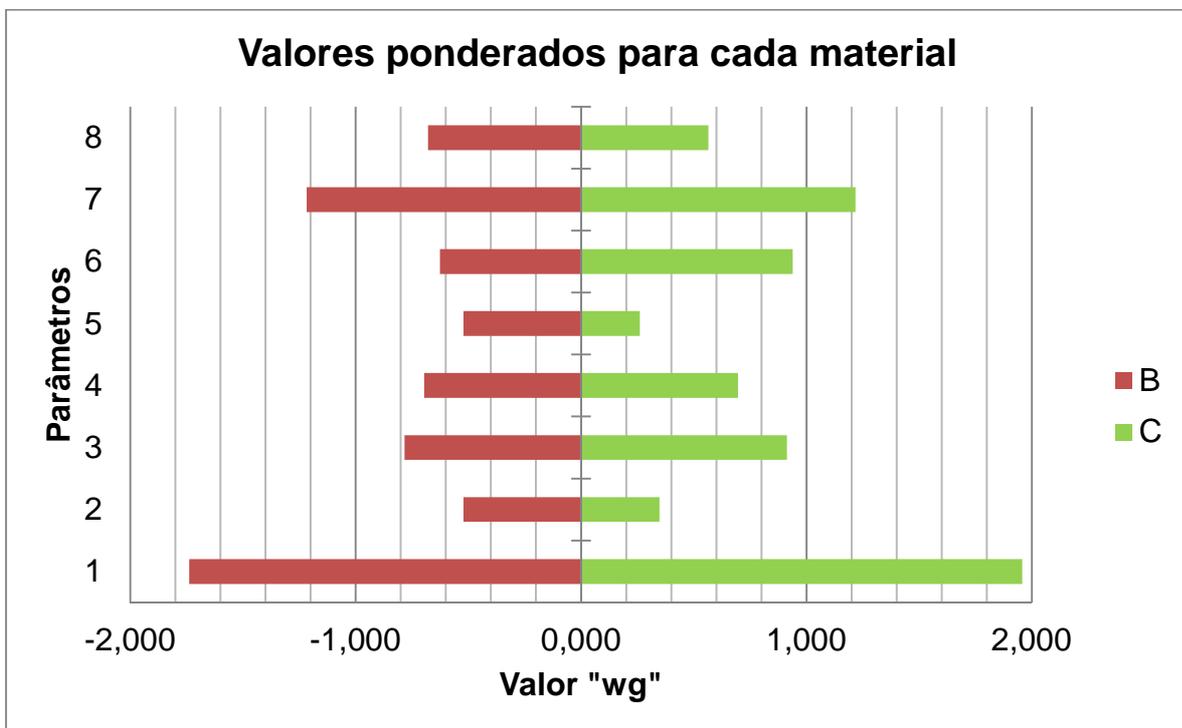


Figura 4. 9 – Comparação entre os materiais B e C

A comparação que pode ser feita a partir dos gráficos acima é importante, pois o material com maior valor global não é necessariamente a melhor solução. Comparando os materiais desta maneira, pode-se avaliar se os pontos fracos identificados, principalmente nos materiais A e C, comprometem o desempenho e/ou as vantagens de cada um.

4.2 Discussão dos resultados

A Tabela 4.3 mostra que o material C obteve o maior valor global, podendo ser considerado, a princípio, o melhor material entre os três. Entretanto, para garantir que esta conclusão inicial está correta, deve-se analisar os pontos fracos dos materiais B e C para avaliar se esta vantagem do material C ainda se sustenta. Isto deve ser feito porque o material B obteve um valor próximo do primeiro, não podendo ser uma solução descartada neste momento.

A maior deficiência do material C é sua máxima temperatura admissível. Alguns pontos da peça chegam a fundir durante a deflagração do *airbag*, o que não deveria acontecer. Contudo, o desempenho do *airbag* não é comprometido. Uma solução para este problema é a troca do *inflator* por outro que atinge temperaturas menores após a queima do propelente e possui custo similar ao usado normalmente. Desta forma, o desempenho do material C neste critério torna-se mais adequado.

O material B é mais regular nos critérios avaliados, sendo 4 seu menor valor, em relação a sua estabilidade com a umidade. Por conta disto, poderíamos considera-lo mais adequado que o material C, mas a estabilidade com a umidade é um fator que alguns clientes (montadoras) consideram muito importante, tendo uma preferência em relação ao material C. A poliamida absorve bastante umidade, podendo ter variações dimensionais além das permitidas pelo projeto. Por isso, exige um maior controle na hora da produção. Sua resistência mecânica não é prejudicada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho conclui que o material C – o PP GF 40 – é o mais promissor para realização de experimentos mais detalhados para garantir sua utilização. É importante salientar que esta análise foi fortemente baseada nas condições brasileiras, sendo que o resultado poderia ser muito diferente se realizado em outros países.

No Japão, por exemplo, o aço tem um preço muito competitivo em relação aos outros materiais, além de algumas as empresas possuem estamparias próprias. Isto justifica a preferência dos japoneses pelo aço, que aqui perde para os polímeros principalmente devido a estes dois fatores.

Nos Estados Unidos, é importante que o *airbag* seja o mais leve possível, pois possuem carros enormes e com muitos deste dispositivo de segurança. Na Europa existe uma preocupação grande com os problemas que podem ser causados pela umidade, mas também adotaram como solução a substituição do aço para redução de preço e custos.

Neste estudo, o polipropileno – PP GF40 – mostrou-se o material com o melhor custo benefício entre os três avaliados. Ele possui o melhor preço e o menor peso, além de cumprir com todos os requisitos necessários. Sua temperatura máxima admissível, que está perto do limite aceitável, pode ser contornada pela troca do *inflator* utilizado, reduzindo as temperaturas que são atingidas durante a deflagração do *airbag*.

A poliamida – PA GF40 – mostrou-se um material mais regular nos critérios avaliados, mas sua maior absorção de água (que pode causar maiores variações dimensionais) é um ponto fraco que contribuiu na decisão final. Também é uma boa solução para a substituição do aço, com preços melhores, mas perde para o polipropileno em um fator considerado muito importante para algumas montadoras.

Finalmente, o aço é o material menos competitivo dos três para o mercado brasileiro. Suas características relacionadas ao desempenho são excelentes, mas, no Brasil, seu preço é muito mais elevado que o dos outros

materiais, devido principalmente aos processos de fabricação pelos quais deve passar, exigindo diferentes máquinas e mais mão-de-obra, enquanto os *retainers* poliméricos são produzidos através apenas do processo de injeção. Em geral, as empresas fabricantes de *airbags* já possuem as injetoras necessárias para fabricação do *retainer* em plástico, pois já produzem outros elementos plásticos – a cobertura do *airbag*, por exemplo – como ocorre na empresa Takata do Brasil S.A.. No caso do aço, o *retainer* precisa ser comprado de fornecedores externos.

REFERÊNCIAS

AKRO-PALSTIC. Catálogo Akrolen® PP GF 40 natur (2179).

DSM PRODUCT. Catálogo Akulon® K224-PG8. PA6-I-GF40; 40% Glass Reinforced, Impact Modified.

GALILEU, **A história do *airbag*.** Disponível em: <<http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,DML14768-17580,00-AIRBAG.html>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

MATWEB. Biblioteca de propriedades dos materiais. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 20 jun. 2012.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. **Projeto na Engenharia.** Editora Edgard Blücher. São Paulo. Tradução da 6^a edição alemã. 412p. 2005.

RUTLAND PLASTIC LIMITED, **Plastic Injection Molding Machine.** Disponível em: <http://www.rutlandplastics.co.uk/moulding_machine.shtml>. Acesso em: 25 nov. 2011.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais.** Pearson. São Paulo. 6 ed. 556p. 2008.

UFBA, **Moldagem por injeção.** Disponível em: <<http://www.ferramentalrapido.ufba.br/moldagemporinjecao.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2012.