

Seleção de Materiais no Projeto de Máquinas e Implementos Agrícolas

S. Scheleski

samuelscheleski@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil

Resumo

Baseado na necessidade de sistematizar a seleção de materiais, existem diversos métodos e ferramentas. O objetivo geral deste trabalho é selecionar e aplicar metodologias de seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas. Para isso, foram realizados: um estudo sobre o desenvolvimento desse setor da indústria; a detecção dos seus requerimentos; a análise e escolha dos métodos e ferramentas de seleção de materiais indicados para essa indústria e o desenvolvimento de estudo de caso. Baseado nesses procedimentos, chegou-se às seguintes conclusões: (1) a metodologia Ashby, foi selecionada, pois incentiva os projetistas a considerar a ampla gama de oportunidades de inovação proporcionada pelos materiais. A aplicação dessa metodologia requer a utilização de ferramentas e procedimentos de apoio; (2) o desenvolvimento de um sistema informatizado para seleção de materiais voltado para o setor mostrou-se inviável nas condições estabelecidas nesse trabalho; (3) o software CES é uma boa opção de ferramenta de apoio; (4) os procedimentos de síntese e similaridade evidenciaram-se importantes para expandir a visão de projetistas, mas carecem de melhores ferramentas de apoio, e (5) a metodologia escolhida proporciona uma visualização dos procedimentos adotados em outros setores da indústria e capacita as empresas no domínio de novas tecnologias.

Palavras-chave: *Seleção de Materiais, Máquinas e implementos Agrícolas, Inovação Tecnológica.*

Material Selection in Agricultural Machinery and Implements Design

Abstract

Based on the need to systematize the material selection, there are various methods and tools. The general objective of this work is to select and apply material selection methodologies in the agricultural machinery and implements design. For this, were performed: a study of the development of this sector of the industry; detection of their requirements; analysis and choice of materials selection methods and tools suitable for this industry, and the development of a case study. Based on this procedures, the following conclusions can be reached: (1) the Ashby methodology was selected because it encourages designers to consider the wide range of innovation opportunities that materials provide. The application of this methodology requires the use of support tools and procedures; (2) the development of a computerized system for material selection for the industry proved to be unfeasible under the conditions established in this work; (3) the CES software is a good choice of support tool; (4) the synthesis and similarity procedures proved to be important to expand the vision of the designers, but need better support tools, and (5) the methodology chosen provides a preview of the procedures adopted in other industry sectors, and enables companies to master new technologies.

Keywords: *Material Selection, Agricultural Machinery and Implements, Technological Innovation.*

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da economia brasileira se sustenta no agronegócio, que é o propulsor da indústria de máquinas e implementos agrícolas. Diante de um mercado globalizado, repleto de grupos multinacionais, e de uma demanda cada vez mais exigente, que busca incansavelmente por inovações tecnológicas para o aumento da produtividade e lucratividade, as indústrias desse setor têm enfrentado grandes dificuldades para se manterem competitivas.

Na luta para prosperar num mercado acirrado, muita atenção deve ser dada ao processo de projeto, que talvez seja

a melhor maneira de uma empresa buscar subsídios para vencer e possuir diferenciais frente aos concorrentes.

A seleção de materiais, além de ser uma das tarefas mais importantes e complexas do processo de projeto, é um ponto fundamental para a inovação tecnológica e consequente manutenção da competitividade das empresas.

Atualmente pode-se afirmar que todas as famílias de materiais são utilizadas na fabricação de máquinas e implementos agrícolas. A cada dia surgem novos materiais e as opções disponíveis aos projetistas se expandem cada vez mais

O grande desafio dos projetistas é escolher, entre os milhares de materiais existentes, o mais adequado para cada

aplicação. As indústrias de máquinas e implementos agrícolas são diversas e abrangem diferentes tipos de produtos. Cada empresa, cada produto, possui suas particularidades, que geralmente acabam sendo decisivas para a escolha final do material e processo de fabricação.

Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho é selecionar e aplicar metodologias de seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os métodos existentes de seleção de materiais visando uma análise crítica.
- Verificar as variáveis envolvidas com a seleção de materiais de maneira a avaliar ferramentas existentes sobre o assunto quanto a sua adequação às necessidades do projeto de máquinas e implementos agrícolas.
- Testar as metodologias e ferramentas selecionadas na seleção de materiais de um componente típico de uma máquina agrícola.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada uma revisão da literatura que aborda assuntos relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Essa revisão trata da indústria de máquinas e implementos agrícolas, da seleção de materiais no projeto, das metodologias de seleção de materiais e por fim das ferramentas de auxílio para a seleção de materiais.

2.1 Máquinas e Implementos Agrícolas

Um dos temas relevantes para o desenvolvimento desse trabalho é o estudo da indústria de máquinas e implementos agrícolas, que é o assunto da presente seção.

2.1.1 Histórico

O aumento populacional e a conseqüente maior demanda por alimentos, fez o homem abandonar a vida nômade e passar a produzir seus próprios alimentos através da agricultura. Desde então as práticas e métodos de produção agrícola evoluíram muito. Atualmente o desenvolvimento das máquinas e implementos agrícolas transformou completamente o rumo da produção agrícola no mundo.

Segundo Vian e Andrade [20] a necessidade de envolvimento de mão-de-obra na agricultura diminuiu drasticamente com o desenvolvimento das máquinas e implementos agrícolas. A mecanização agrícola teve seu início no continente Europeu, e posteriormente foram se alastrando pelo mundo. Porém de acordo com os autores, os arados de madeira e ferro fundido produzidos na Europa não se adaptavam ao solo da pradaria norte americana, pois não deslizavam e abriam os sulcos de forma inadequada. Assim, em 1837 no estado de Illinois (EUA), o ferreiro John Deere desenvolveu um arado de aço polido, que se adaptou perfeitamente ao solo da pradaria norte americana.

De acordo com Deere [8] “em 1837, John Deere, ferreiro e inventor, tinha pouco mais do que uma forja, um pedaço de aço polido que tinha sido jogado fora e uma ideia que viria ajudar os agricultores, alterando para sempre o rosto da agricultura”. Partindo de uma inovação, viabilizada pela seleção de um novo material, o ferreiro John Deere se transformou no criador da Deere & Company, que hoje tem atuação global e é, junto com CNH e AGCO, um dos maiores fabricantes de máquinas e implementos agrícolas do mundo.

2.1.2 Evolução e tendências de mercado

Desde o seu surgimento, as máquinas e implementos agrícolas tem evoluído muito. De acordo com Martensen [14], o

desenvolvimento desses produtos progrediu de forma extremamente rápida durante as últimas décadas. Para o autor, os marcos mais importantes dessa evolução, são:

- A combinação de várias etapas do processo em uma única máquina;
- A utilização de unidades e controles hidráulicos;
- A utilização de controles eletrônicos;
- E o extremo aumento no desempenho individual das máquinas.

As inovações obtidas em máquinas e implementos agrícolas nas últimas décadas foram possíveis, em grande parte, graças a evolução dos materiais de engenharia. Em um tempo não tão distante a típica máquina agrícola era construída exclusivamente de aço e ferro fundido cinzento. Porém, de acordo com Martensen [14] isso vem mudando consideravelmente. Segundo o autor as razões para o uso de diferentes materiais nas máquinas e implementos agrícolas atuais são:

- A maior carga sobre os componentes devido ao aumento do desempenho;
- Em alguns casos o projeto com peso leve é imperativo por conta de normas legais e para evitar a compactação do solo;
- Requerimento de maior resistência devido às cargas mais elevadas em componentes e capacidades superiores;
- Aumento da demanda no tempo de vida das máquinas e implementos agrícolas modernas;
- Aumento da demanda de design e ergonomia das máquinas.

Os contínuos esforços das indústrias de máquinas e implementos agrícolas para a redução de massa em função da menor compactação do solo também são citados por Alves et al [1]. Segundo eles, a introdução de materiais leves (plásticos, compósitos, ligas de alumínio) em substituição de materiais tradicionais como o aço é uma realidade neste setor. Para os autores, todas as famílias de materiais de engenharia são utilizadas na construção das máquinas e implementos agrícolas atuais. Neste sentido, os materiais compósitos, leves e de alta performance, vêm se destacando como importantes aliados no aumento da eficiência e na redução da massa destas máquinas.

Alves et al [1] ainda citam o exemplo do painel de comando de um pulverizador da empresa Jacto, que é feito com o compósito GFRB (polímero reforçado com fibra de vidro). Segundo ele, a utilização da GFRB na construção deste painel, que antes era feito de aço, teve os seguintes benefícios: otimização do design, maior produtividade, menor custo e melhor eficiência ambiental. Apesar do GFRP não ser reciclável, como é o aço, ele produz peças mais leves que acarretam em um menor consumo de combustível.

Baseado no que tem sido apresentado nas grandes feiras de máquinas e implementos agrícolas, Tipa [18] e Zerbini [22] relatam que uma grande tendência é o aumento da potência e tamanho. O gerente da Massey Ferguson, Leonel Oliveira, em entrevista para Tipa [18] relata que “o agricultor quer tirar o máximo da produtividade que tem, dessa forma está investindo em tecnologia e aumentando a faixa de potência dos tratores e colheitadeiras. Quem tinha trator de 100 CV, hoje, está buscando algo acima de 130 CV”. Além disso Oliveira afirma que a falta de mão de obra no campo está

forçando a mecanização. Neste sentido, pode-se afirmar que o desenvolvimento de novas tecnologias é uma grande necessidade para a indústria de máquinas e implementos agrícolas, pois além dos anseios por maior produtividade e lucratividade, os agricultores necessitam de máquinas que diminuam os requerimentos de mão de obra.

De acordo com Zerbinati [22] a abertura de áreas em regiões com potencial produtivo e com a incerteza do clima, podem reduzir a janela operacional e fazem com que o produtor precise de um conjunto máquina-implemento com maior potencial operacional. Para o autor, o requerimento de maior potência nos tratores se deve ao aumento no tamanho dos implementos. Assim, evidencia-se que o maior tamanho e consequente maior massa dos implementos gera a necessidade de tratores com maior potência.

Zerbinati [22] ainda relata que o aumento do tamanho das máquinas traz a desvantagem do aumento da compactação do solo. Neste sentido pode-se afirmar que a utilização de materiais leves, que possibilitem o projeto de máquinas maiores, porém não tão pesadas, é uma alternativa para amenizar tal desvantagem.

2.1.3 Desafios para a inovação

Elucidando as tendências de inovação é possível vislumbrar o futuro e se antecipar frente aos concorrentes. Deste modo, a eficiência ambiental é responsável por muitas das tendências de utilização de materiais no setor de máquinas e implementos agrícolas.

Além disso, no futuro uma maior população irá requerer máquinas agrícolas maiores e esse aumento de tamanho não pode acarretar em um aumento significativo na massa destas máquinas. A máquina agrícola conceito ANTS (figura 1) apresentada pela Valtra em 2010, vislumbra um futuro em que, segundo os seus idealizadores, a população mundial chegaria a 9 bilhões e as áreas agricultáveis seriam menores do que hoje.

O nome ANTS representa um jogo de letras que faz referência a série atual de tratores Valtra, e também é o plural de "ant" (formiga em inglês), pois as formigas conseguem levantar até 50 e puxar até 30 vezes o valor da sua massa, caracterizando o grande desafio para a inovação tecnológica das máquinas e implementos agrícolas, que é o de diminuir a massa e aumentar a capacidade



Figura 1 - Máquina agrícola conceito ANTS
Fonte: Valtra [19]

As recentes evoluções dos materiais de engenharia podem ser as grandes aliadas nesse desafio. Para isso existe uma tendência de substituição de materiais, que hoje são muito utilizados na construção máquinas e implementos agrícolas. Segundo Alves et al [1] a utilização de compósitos com fibras de juta, que além de ser renovável é mais leve e barata do que a fibra de vidro, apresentando propriedades mecânicas compatíveis com a maioria das aplicações, se apresenta como um aliado para a redução da massa dessas

máquinas. Com isso se conseguirá um ganho ainda maior na eficiência ambiental. Os autores realizaram um estudo em que chegaram à conclusão de que a substituição da fibra de vidro por fibra de juta (fibra vegetal), gera uma economia de 165 litros de combustível para a expectativa de vida de 200.000 km de um determinado pulverizador. Porém, é necessário salientar, que segundo Ferrante e Walter [10], os compósitos com de fibras vegetais tem como desvantagem a maior absorção de umidade e por isso são aplicadas, geralmente, em componentes internos.

De acordo com Joutsenvaara e Vierelä [12], na contramão da substituição dos aços por compósitos, os metais vêm evoluindo e também têm acompanhando a tendência de redução da massa e aumento de resistência. Conforme o autor, a utilização de aços de alta resistência em máquinas e implementos agrícolas possibilita a redução nas espessuras e consequente redução de massa nos produtos. Porém, o aumento da resistência dos aços traz inevitavelmente maiores desafios para a fabricação. A evolução dos processos de fabricação deverá minimizar esse efeito. Outro ponto abordado pelos autores é a evolução das técnicas de revestimento, que reabririam o caminho para o uso de aços carbono em aplicações onde se exige resistência à corrosão.

Assim, se pode afirmar que a evolução na utilização de materiais na indústria de máquinas e implementos agrícolas segue um rumo parecido com o de outras indústrias, como a aeronáutica e a automobilística, pois também tem seu desenvolvimento impulsionado pela utilização inovadora de materiais.

2.2 Seleção de materiais

A tarefa de selecionar materiais faz parte de todos as etapas do processo de projeto, começa, geralmente, junto com os primeiros esboços e se completa com a definição das especificações do produto.

Muitas vezes novos materiais geram oportunidades de inovação e possibilitam a satisfação de necessidades que antes não podiam ser atendidas. Os responsáveis pela seleção de materiais devem ficar atentos e não ignorar essas oportunidades, que são a chave para o desenvolvimento de produtos de sucesso. Assim, como qualquer outra tarefa do projeto, a seleção de materiais deve ser executada de forma ágil, eficaz e sistêmica.

Segundo Ashby [2], cada uma das etapas do projeto exige decisões sobre os materiais e sobre os processos de fabricação. Para o autor as ferramentas de seleção de materiais desempenham um papel importante em cada etapa. O que muda, ao passar das etapas, é a natureza dos dados sobre materiais. Inicialmente os dados podem ser superficiais, no entanto a medida em que as fases do projeto avançam estes dados precisam ser refinados.

A enorme gama de materiais existente representa inúmeras oportunidades de inovação tecnológica. Assim, de acordo com Ferrante [9], para que essas oportunidades sejam aproveitadas ao máximo, o processo de seleção de materiais deve seguir a forma de um funil. O funil ilustra a necessidade de considerar, inicialmente, a maior quantidade de materiais possíveis, de modo a não perder nenhuma oportunidade razoável. A cada fase do projeto a quantidade de materiais diminui, através da utilização de critérios de eliminação, até se chegar ao material escolhido. Conforme o autor, não utilizar a lista completa pode caracterizar uma oportunidade de inovação perdida.

2.3 Metodologia de seleção de materiais

Segundo Ferrante e Walter [10] a evolução da seleção de materiais de tarefa empírica para metodologia estruturada deve-se a Michael Ashby da Universidade de Cambridge. Tal

metodologia começou a ser desenvolvida no fim da década de 1980 e tem como base os mapas de propriedades dos materiais, que permitem comparar qualquer conjunto de materiais a partir de suas propriedades.

O procedimento básico de seleção de materiais, apresentado por Ashby [2], envolve quatro etapas básicas: (1) um método para traduzir os requisitos de projeto em uma especificação para o processo e materiais, (2) um processo de triagem para eliminar aqueles que não podem satisfazer as especificações, restando apenas um pequeno conjunto. (3) um sistema para classificar os materiais e processos sobreviventes, identificando aqueles que têm o maior potencial e (4) uma maneira de procurar por informações de apoio (documentação) sobre os candidatos melhores classificados, dando o máximo de informações sobre os seus pontos fortes, pontos fracos, a história de uso e potencial futuro. Assim, de acordo com Ashby [2] para sair do ponto de partida, com todos os materiais, e chegar a um único material é necessária a concretização das etapas de tradução, triagem, classificação e documentação. Para esse caminho ser percorrido da melhor forma existem procedimentos e ferramentas de auxílio. Além disso, segundo o autor é necessário citar que a seleção de materiais deve ser sempre efetuada em conjunto com a seleção do processo de fabricação.

2.4 Ferramentas para seleção de materiais

Existem várias ferramentas disponíveis no mercado para a seleção de materiais. Elas variam desde simples catálogos até softwares com sistema de busca multicritérios. Dentre as ferramentas encontradas, merecem destaque:

- **MatWeb - Material Property Data** [16], Permite acessar, gratuitamente, um banco de dados com mais de 100 mil tabelas que contém informações a respeito das propriedades técnicas dos materiais. Um dos métodos de pesquisa disponibilizados é o feito através do cruzamento de valores das propriedades técnicas dos materiais, o usuário com conta gratuita pode escolher até três propriedades, estipulando os valores máximos e mínimos admitidos no projeto. O site ainda disponibiliza uma grande lista de fornecedores para os materiais de seu banco de dados e arquivos de informações compatíveis com os principais softwares CAE (Computer Aided Engineering) e CAD (Computer Aided Design).
- **ASM Material Handbook** [4], Os livros da ASM Internacional são uma grande fonte de dados sobre propriedades técnicas dos materiais, além disso a ASM disponibiliza acesso on-line via pagamento de anuidade. Assim, essa ferramenta atende aos requerimentos de informações sobre propriedades técnicas para a seleção de materiais e serve como referência para o desenvolvimento de muitos bancos de dados digitais como o MatWeb.
- **Mapas de Propriedades dos Materiais** [2], São diagramas que resumem as propriedades técnicas dos materiais de um modo compacto, mostrando a faixa abrangida por cada família e classe de material. Eles revelam correlações entre critérios de projeto e características técnicas dos materiais, auxiliando na verificação e estimativa de informações, permitindo uma rápida comparação dos candidatos.
- **CES - Cambridge Engineering Selector** [6], Desenvolvido com base nos mapas de propriedades dos materiais de Michael Ashby, o CES é um software que realiza o cruzamento de informações relacionadas aos materiais em um banco de dados com etapas progressivas de restrições, permitindo encontrar materiais que coincidem com os requisitos do projeto. Com o CES é possível acessar informações relativas às propriedades dos materiais, aos processos de fabricação, às propriedades ecológicas, à durabilidade e aos custos. Baseado nestas informações é possível gerar gráficos e mapas que facilitam a visualização dos dados. Possui um módulo de auditoria em eco sustentabilidade. Assim, se pode afirmar que o CES é uma ótima alternativa de ferramenta para auxiliar a realização das etapas de seleção de materiais na metodologia Ashby.
- **Materioteca Milão** [15], Localizada em Milão, conta com amostras físicas, para a análise de propriedades subjetivas, em um centro de exposições de acesso gratuito. Também possui um website com dados sobre processos de fabricação e materiais poliméricos, dados estes de caráter técnico e descritivo. O seu site disponibiliza ferramentas de busca com quatro tipos de critério: família, setor de aplicação, processo de fabricação e nome do fornecedor.
- **Laboratório de Design e Seleção de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul** [13], Disponibiliza um site com informações de propriedades técnicas, subjetivas e processos de fabricação. O website permite o download de artigos, dissertações e outras pesquisas relacionadas a área de materiais e design. Não possui ferramentas de busca, assim o usuário tem que ir direto ao material no qual está buscando informações.
- **Braskem** [5], A maior produtora de resinas termoplástica das Américas, possui uma grande variedade de produtos polímeros em seu portfólio. Para a consulta de informações sobre seus produtos, possui três opções de busca em seu website: 1) pesquisa técnica combinando informações (processo de fabricação, família de produtos, aplicação); 2) pesquisa com o nome exato do produto que se deseja consultar e 3) pesquisa pelos valores (mínimo e máximo) aceitados de índice de fluidez.
- **Gerdau** [11], Um catálogo de materiais, também pode ser considerado uma ferramenta de seleção. Neste sentido, a empresa Gerdau, que é líder no segmento de aços longos nas Américas e uma das principais fornecedoras de aços longos especiais do mundo. Disponibiliza em seu website catálogos com especificações técnicas sobre seus produtos, além de possuir sistema de busca por catálogos através da inserção de critérios como o mercado de aplicação, forma e tipo. Além das características técnicas dos materiais também fornece em seus catálogos informações sobre tratamentos térmicos e processos de fabricação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui são apresentados os materiais e métodos utilizados na seleção das metodologias e ferramentas mais adequadas ao projeto de máquinas e implementos agrícolas, bem como os procedimentos adotados para aplicação dessas metodologias e ferramentas em um estudo de caso onde essas técnicas foram aplicadas e analisadas.

3.1 Seleção de metodologias e ferramentas

Foram realizados diversos procedimentos visando a seleção dos melhores métodos e ferramentas de seleção de materiais para o projeto de máquinas e implementos agrícolas. Os procedimentos foram os seguintes:

- a) **Estudo sobre a indústria de máquinas e implementos agrícolas.** Para o entendimento dessa indústria foram elucidados aspectos relevantes desse setor, dentre eles: histórico, peculiaridades, evolução dos produtos, tendências e desafios para a inovação tecnológica. Grande parte desse estudo foi incorporado ao capítulo 2, na forma de revisão bibliográfica. Entretanto, essa etapa é fundamental para a definição de todos os procedimentos adotados nesse trabalho.
- b) **Deteção dos requerimentos, com relação a seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas.** Foram investigadas as dificuldades e carências no processo de seleção de materiais nas indústrias de máquinas e implementos agrícolas. Foi realizada uma análise geral sobre o estado da técnica do processo de seleção de materiais, variáveis envolvidas e procedimentos adotados. Além da experiência do próprio autor como engenheiro projetista de máquinas agrícolas, foram desenvolvidas diversas consultas a engenheiros, dirigentes e outros profissionais para a deteção das dificuldades e requerimentos necessários para a melhoria dos procedimentos relacionados a seleção de materiais nos projetos nesse setor. Na grande maioria das vezes, as considerações externadas são restritas por políticas industriais. Entretanto, essas considerações foram acatadas para o desenvolvimento desse trabalho, especialmente para a seleção dos métodos e ferramentas adequados para supri-las.
- c) **Análise dos métodos de seleção de materiais quanto a sua aplicação na indústria de máquinas e implementos agrícolas.** Com base nos requisitos e carências com relação à seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas, foram analisados os métodos existentes quanto a sua aplicação nesse setor da indústria.
- d) **Análise das ferramentas de seleção de materiais quanto a sua aplicação na indústria de máquinas e implementos agrícolas.** A aplicação da metodologia de seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas requer a utilização de ferramentas computacionais e procedimentos de apoio. Assim, o trabalho voltou-se para a busca desses instrumentos. Primeiramente foi necessário escolher entre as opções de desenvolver ferramentas específicas ou utilizar procedimentos e ferramentas preexistentes.
- Foi realizado um experimento no qual foi desenvolvido um sistema de informação seletor de materiais direcionado ao projeto de máquinas e implementos agrícolas. Para a realização desse experimento foram utilizadas as linguagens de programação PHP e HTML, bem como o banco de dados MySQL;
 - Avaliação da utilização da ferramenta MatWeb como sistema auxiliar na realização das etapas de seleção de materiais;
 - Avaliação da utilização da ferramenta CES - Cambridge Engineering Selector.
- e) **Seleção da metodologias e ferramentas para desenvolvimento de um estudo de caso.** Após a análise das diversas variáveis envolvidas com o projeto de máquinas e implementos agrícolas, foram selecionadas metodologias e ferramentas disponíveis mais adequadas

para a seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas.

3.2 Estudo de caso

No estudo de caso foram aplicados e avaliados os métodos e ferramentas selecionados. Para isso foi escolhido como objeto de estudo uma carenagem lateral de uma colhedora de grãos.

A escolha de uma colhedora explica-se por ser um equipamento bastante difundido, e por existirem diversos modelos no mercado. Além disso, as colhedoras são equipamentos complexos, que demandam um esforço suplementar para redução de massa, como forma de aumentar a sua capacidade de armazenagem e economia de combustível.

A carenagem lateral foi escolhida devido a ser um ótimo exemplo dos desafios da indústria de máquinas e implementos agrícolas com relação a seleção de materiais. Trata-se de um componente que requerer um bom projeto mecânico e tem como grande diferencial o projeto industrial.

É importante destacar, que a realização do estudo de caso não visa apenas selecionar um material para a carenagem, e sim, gerar oportunidades para análises e discussões a respeito das metodologias e ferramentas selecionadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos procedimentos realizados.

4.1 Seleção de metodologia

Baseado nos procedimentos realizados nesse trabalho, pode-se afirmar que a opção de metodologia de seleção de materiais disponível mais adequada para o projeto de máquinas e implementos agrícolas é a que foi desenvolvida por Michael Ashby baseado nos mapas de propriedades dos materiais. A escolha dessa metodologia deve-se aos procedimentos sistêmicos e que direcionam os projetistas a considerar a ampla gama de materiais disponíveis. Portanto, o método é uma excelente alternativa para otimizar o processo de desenvolvimentos de produtos nesse setor.

4.2 Sistema de informação seletor de materiais

A aplicação da metodologia Ashby no projeto de máquinas e implementos agrícolas requer a utilização de ferramentas e procedimentos de apoio. Assim, o trabalho voltou-se para a busca desses instrumentos. Primeiramente, foi necessário escolher entre as opções de desenvolver ou utilizar procedimentos e ferramentas preexistentes. Assim, foi realizado um experimento no qual foram buscados subsídios para o desenvolvimento de um sistema de informação seletor de materiais direcionado ao projeto de máquinas e implementos agrícolas.

A ideia inicial foi desenvolver um sistema que a partir da inserção de dados do projeto, retorna como saída o material a ser utilizado. Para a realização do experimento foram utilizadas as linguagens de programação PHP e HTML, bem como o banco de dados MySQL. Os mesmos foram escolhidos devido a compatibilidade com os sistemas operacionais Windows e Linux e por serem gratuitos.

Durante o desenvolvimento desse sistema de informação seletor de materiais direcionado ao projeto de máquinas e implementos agrícolas evidenciou-se que a diversidade de situações envolvidas no projeto dificulta muito tal formato. Após isso o projeto da ferramenta foi redirecionado, chegando-se a um sistema informatizado baseado na WEB. Entretanto, constatou-se que esse sistema não teria grandes diferenciais frente a outras ferramentas, como o MatWeb, e seria inferior a outras, como o CES - The

Cambridge Engineering Selector. Além disso, para torná-lo realmente aplicável ainda seriam requeridos muitos ajustes e fugiria aos objetivos desse trabalho. Foi constatado que o esforço necessário para o desenvolvimento de um sistema dedicado é muito mais complexo do que se pensava inicialmente.

Walter [21] investigou a atividade projetual em contraposição aos métodos de seleção de materiais em busca de subsídios para a elaboração de um método e de um sistema de informações de seleção de materiais adequado a atividade de design no Brasil. O sistema de informação proposto pelo autor se mostra adequado para suprir lacunas não preenchidas pelos instrumentos existentes, sendo uma ótima alternativa para o desenvolvimento de produtos. É composto de um sistema digital de informações e de uma coleção ordenada de amostras (Materioteca). Porém, apesar de se mostrar uma ótima alternativa, ainda não teve sua aplicação totalmente viabilizada.

Assim, evidenciou-se que a melhor alternativa para o cumprimento dos objetivos desse trabalho é a de utilizar procedimentos e ferramentas preexistentes. De forma complementar, pode-se pensar na utilização de uma ferramenta que integre diversos setores da empresa de máquinas e implementos agrícolas, tais como almoxarifado, depósito de materiais, setor de logística, departamento de compras, etc. Além disso, se mostrou necessária a utilização de um banco de dados da empresa para registrar o histórico do processo de seleção de materiais, possibilitando que o mesmo seja utilizado posteriormente como apoio a realização de projetos futuros.

4.3 Seleção de ferramentas e procedimentos

Para auxiliar na realização de cada uma das quatro etapas do método Ashby, ou seja, tradução, triagem, classificação e documentação, foram selecionados procedimentos específicos e ferramentas adequadas ao projeto de máquinas e implementos agrícolas.

Tabela 1 - Guia de Tradução

| Atributos | Questionamentos |
|------------------------|--|
| Função | O que o componente faz? <i>Ex: viga submetida à flexão.</i> |
| Restrições absolutas | Quais são as condições não negociáveis que ele deve cumprir? <i>Ex: módulo de young > 20 GPa.</i> |
| Restrições negociáveis | Quais são as condições negociáveis, porém desejáveis, que ele deve cumprir? <i>Ex: se for reciclável melhor.</i> |
| Objetivo | O que deve ser maximizado ou minimizado? <i>Ex: minimizar massa e custo.</i> |
| Variáveis livres | Quais são os parâmetros do problema que o projetista tem liberdade para mudar? <i>Ex: espessura.</i> |

Fonte: Adaptado de Ashby (2012)

4.3.1 Tradução

A tradução corresponde à etapa de interpretação dos requisitos de projeto e consequente expressão dos mesmos em atributos dos materiais. Assim, como ferramenta de auxílio para essa etapa, aplicável ao projeto de máquinas e implementos agrícolas, o melhor procedimento encontrado está resumido na tabela 1.

O Guia de Tradução gera objetividade ao procedimento, pois direciona o foco do projetista ou equipes de projeto, para as questões relevantes à seleção de materiais, que estão

preestabelecidas. O texto em destaque, que pode observado no guia, corresponde a exemplos de preenchimento.

Baseado nos procedimentos normalmente realizados na indústria de máquinas e implementos agrícolas é possível afirmar que para a melhor eficiência dessa etapa, os questionamentos do guia devem ser respondidos, na medida do possível, por equipes interdisciplinares. Esse ambiente cooperativo promove o intercâmbio de ideias e contribui para o desenvolvimento de melhores produtos.

4.3.2 Triagem

Considerando todas as etapas realizadas na execução desse trabalho, é possível concluir que a etapa de triagem é o ponto central do método de seleção de materiais proposto. As outras etapas servem para estabelecer entradas ou para processar os dados de saída obtidos na triagem. Assim, as escolhas efetuadas aqui, visam direcionar o processo de seleção de materiais contextualizada no projeto de máquinas e implementos agrícolas, integrando conceitos de engenharia e design. Deste modo, foram selecionados os procedimentos:

- Análise e similaridade, pois enfatizam o projeto mecânico;
- Inspiração e síntese, pois enfatizam o projeto industrial.

Nos procedimentos de triagem que contemplam o projeto mecânico, a ferramenta de auxílio selecionada foi o Software CES, que foi escolhido devido ao mesmo oferecer rápido acesso a dados e proporcionar grande liberdade na exploração de escolhas potenciais através dos mapas de propriedades dos materiais.

Já nos procedimentos voltados ao projeto industrial, as melhores ferramentas encontradas foram o Rol de Percepções e o Fluxograma de Síntese, aplicáveis a síntese, que serão apresentados no estudo de caso. Para o procedimento por inspiração foi constatada uma falta de ferramentas de auxílio. Uma opção de ferramenta ideal seria uma materioteca como a Material Connexion, apresentada na revisão bibliográfica. Porém, não havendo esta disponibilidade, as ferramentas de inspiração disponíveis são resumidas a revistas, internet, catálogos de produtos, ou qualquer meio de inspiração que ocorrer ao projetista.

Assim, a figura 2 apresenta os procedimentos, as ferramentas e a estrutura de trabalho, selecionados para a triagem no projeto de máquinas e implementos agrícolas.

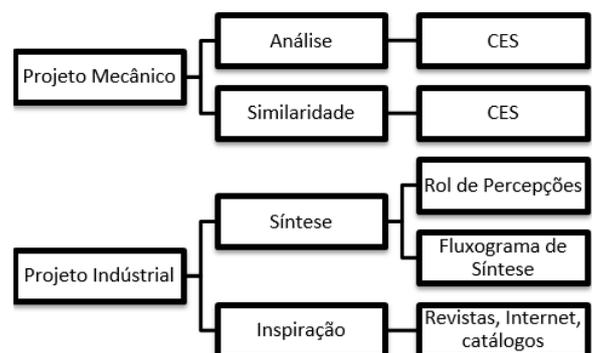


Figura 2 - Fluxograma de Síntese

A opção por realizar a triagem através dos procedimentos de análise, similaridade, síntese e inspiração de forma combinada, se deve às necessidades detectadas no setor de máquinas e implementos agrícolas. Pois esses procedimentos de forma combinada são muito mais eficazes do que a utilização de qualquer um deles isoladamente. Além

disso, essa diversidade promove a multidisciplinaridade da triagem.

4.3.3 Classificação

A classificação corresponde a escolha dos melhores candidatos potenciais que podem executar o serviço, a partir de uma lista de materiais gerada na etapa de triagem.

Para a efetivação dessa etapa o CES continua sendo uma boa ferramenta de auxílio, pois pode gerar mapas de propriedades dos materiais e ranquear os candidatos com base em critérios de comparação como os índices de material.

Além disso, ficou evidenciado que a melhor maneira de realizar essa etapa é dar liberdade à equipe de projeto para estabelecer critérios de classificação, que durante o processo de seleção de materiais se mostraram convenientes. O estabelecimento desses critérios será demonstrado no estudo de caso, pois dependem de questões de cada projeto.

4.3.4 Documentação

Por fim os melhores candidatos potenciais, definidos na classificação, são analisados de uma forma detalhada (etapa de documentação) para que sejam tiradas conclusões finais sobre os melhores materiais para a fabricação.

Para a realização dessa etapa o CES também foi uma boa opção de ferramenta encontrada, pois possui banco de dados com informações sobre materiais. Além disso, a equipe de projeto fica livre para estabelecer critérios de comparação que se mostrem interessantes, como por exemplo, ensaios mecânicos, simulações computacionais, cálculos de engenharia, pesquisas de mercado, etc.

4.4 Estudo de Caso

A opção por um estudo de caso motivou-se pela necessidade de contextualização dos métodos e ferramentas de seleção de materiais selecionados em um componente de equipamento do setor de máquinas e implementos agrícolas.

4.4.1 Escolha e Apresentação do Componente

Existem diversas colhedoras de grãos de qualidade no mercado, que na maioria das vezes cumprem com eficiência os requisitos de trabalho. A opção dos consumidores por uma ou outra marca leva em conta diversos fatores e muitas vezes o design externo é um grande diferencial, pois é ele que passa as primeiras percepções do produto.



Figura 3 - Carenagem lateral colhedora John Deere

O componente escolhido para esse estudo de caso é a carenagem lateral de uma colhedora de grãos. Trata-se de um componente que permite a utilização de diversos materiais, diferentes processos de fabricação e recursos de design.

4.4.2 Seleção de Materiais Para Carenagem Lateral de Colhedora

Aqui são apresentados os resultados da aplicação das metodologias e ferramentas na seleção de materiais

selecionadas no item 4.3 para a seleção de materiais de uma carenagem lateral de colhedora.

Tradução

Em termos mecânicos uma carenagem lateral é uma chapa de superfície complexa carregada sob flexão. Deve resistir a choques eventuais, portanto, materiais frágeis, com tenacidade à fratura (K_{Ic}) menor do que 1,0 MPa, são inaceitáveis; deve ser rígida o suficiente para suportar o próprio peso sem sofrer deflexão e deve ter formas e superfícies complexas para seguir os padrões atuais de design. Além disso, deve ser leve, pois a massa extra aumenta o consumo de combustível e provoca mais compactação do solo. Se possível, o material selecionado deve ser reciclável. Por fim, deve atender a todos os requisitos e objetivos com o mínimo custo possível. A tabela 2 apresenta os principais requisitos de projeto para a carenagem.

Tabela 2 - Guia de triagem para a carenagem lateral

| Atributos | Requisitos |
|-------------------------------|--|
| Função | Carenagem - Chapa submetida à Flexão |
| Restrições absolutas | Tenacidade à fratura $> 1,0 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; deve ter rigidez para se auto sustentar; deve resistir a impactos; deve ser moldável. |
| Restrições negociáveis | Se for reciclável melhor. |
| Objetivo | Minimizar massa e custo. |
| Variáveis livres | Espessura. |

As restrições absolutas correspondem a requisitos essenciais, portanto, só são aceitáveis materiais que as cumpram. As restrições negociáveis são altamente recomendáveis. Porém, devem ser ponderadas junto com os objetivos. Já os objetivos devem ser trabalhados de modo a serem maximizados ou minimizados.

Triagem

Nesta etapa são apresentados os procedimentos realizados para a determinação dos materiais que podem ser usados para construir a carenagem. Para isso, foram aplicados os quatro procedimentos de triagem e ferramentas selecionados.

• Triagem por síntese

Uma colhedora, além de prover os requisitos de serviço, deve atender aos requerimentos perceptivos demandados pelo usuário. A síntese se demonstra relevante para prover essa demanda, pois guia o projetista a agregar aspectos simbólicos ao produto. A tabela 3 apresenta o Rol das Percepções com os aspectos simbólicos, considerados importantes para a carenagem, no qual os aspectos que se aplicam a carenagem aparecem destacados.

Os atributos perceptivos, definidos, servem de entrada para o fluxograma de aplicação da síntese (figura 4). Assim, conforme o fluxograma, esses atributos foram relacionados a imagens de produtos que atendem a essas percepções. A partir dessas imagens foi montado um painel com imagens de produtos relacionados aos atributos.

Assim, devido as imagens do painel terem sido julgadas relevantes ao conceito, foram buscados materiais e processos de fabricação relacionados aos atributos através dos produtos. Para essa busca não foram encontradas ferramentas específicas, por isso recomenda-se que ela seja realizada por uma equipe, com conhecimentos preexistentes, que pode utilizar recursos, como por exemplo, consultas a manuais ou à internet.

Tabela 3 – Rol das Percepções

Fonte: Adaptado de Ashby e Johnson [1]

| Percepção | Opósito | Percepção | Opósito |
|-------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| Agressivo | Passivo | Elegante | Deselegante |
| Barato | Caro | Extravagante | Contido |
| Clássico | <u>Moderno</u> | Feminino | Masculino |
| Impessoal | Amigável | Formal | Informal |
| Inteligente | Bobo | Artesanal | <u>Industrializado</u> |
| Público | Exclusivo | Engraçado | Sério |
| Decorado | Plano | Informal | Formal |
| Delicado | <u>Robusto (Rude)</u> | Irritante | Amável |
| Descartável | <u>Durável</u> | Maduro | Jovem |
| Maçante | Sexy | Nostálgico | <u>Futurístico</u> |

| Material | Processo |
|---------------------------------|---------------|
| Aço baixo carbono | Estampagem |
| Liga de alumínio 2024 | Estampagem |
| GFRP (epóxi / fibra de vidro) | RTM ou SMC |
| ABS | Termoformagem |
| CFRP (epóxi / fibra de Carbono) | RTM ou SMC |

• **Triagem por inspiração**

Aqui foram procurados materiais, sem restrições, estimulando o processo criativo. A inspiração parece ter uma grande capacidade de incentivar inovações, pois o projetista fica livre para conhecer novos materiais e processos de fabricação. Assim, foi realizada uma exploração aleatória em bancos de dados como o do CES, em revistas, artigos científicos, fotos de feiras agrícolas e internet, sempre focando nas inovações e tendências.

Neste contexto, a utilização de compósitos com fibras vegetais, que em algumas aplicações têm substituído parcialmente ou totalmente a fibra de vidro, foi constatada como uma possibilidade. Por exemplo, foram descobertos um automóvel, que é feito de compósito com polímero e fibra de cânhamo trançado e uma motocicleta, que tem carenagens de material compósito com fibra de linho e cânhamo com matriz de bioresinas.

Porém, devido a não terem sido encontrados dados confiáveis sobre esses materiais, eles não foram considerados aptos para construir a carenagem da colhedora. Neste caso poderiam ter sido realizados ensaios laboratoriais, porém o principal foco desse estudo é averiguar o método de seleção e não o desenvolvimento de novos materiais.

Além de beneficiar a seleção de materiais, a inspiração normalmente é útil para o processo de desenvolvimento do produto como um todo. Ela promove a ampliação do campo de visão e da capacidade criativa do projetista, pois o liberta, do foco restrito ao componente em análise, para vislumbrar tendências e inovações tecnológicas.

• **Triagem por similaridade**

Aqui o método de seleção de materiais por similaridade é utilizado como base para o método de análise. Por serem amplamente utilizados, os materiais tradicionais têm seu status respeitado, já que por certas razões possuem a completa combinação de atributos que atendem, ou até então atendiam, os requisitos do projeto.

Com base em uma pesquisa realizada em diversas colhedoras de grãos, percebeu-se que os principais materiais utilizados são o aço de baixo carbono e o compósito GFRP (fibra de vidro contínua ou picada em uma matriz de polímero termofixo – normalmente epóxi ou poliéster). Nas primeiras colhedoras desenvolvidas utilizavam apenas o aço para fabricação da carenagem, no entanto o desenvolvimento dos compósitos, o aumento do tamanho das máquinas e os requerimentos de maior liberdade de formas para o design têm aumentado muito a utilização de materiais compósitos na fabricação de carenagens.

Percebe-se que cada caso é específico e fatores como o público alvo, local de fabricação, tiragem de produção e tamanho da máquina são decisivos para a escolha do material e processo de fabricação. O processo SMC (Sheet Molding Compound) é geralmente utilizado nas colhedoras maiores e com grandes volumes de produção, já o processo RTM Light tem menor investimentos em moldes e é utilizado em casos que requerem mudanças rápidas de design.

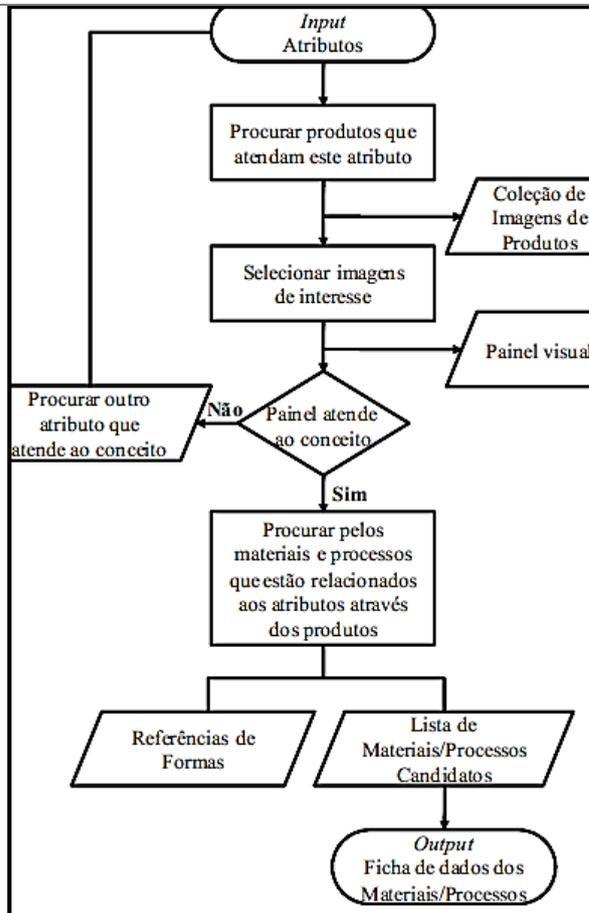


Figura 4 – Fluxograma de síntese
Fonte: Silva et al [22]

A lista de materiais e processos encontrados é apresentada na tabela 4.

Percebe-se que a síntese, além de promover a consideração dos aspectos simbólicos dos produtos, aproveita da experiência da equipe de projeto. Essa experiência tem grande valor e jamais deve ser desprezada.

Tabela 4 – Materiais e processos triados por síntese

A tabela 5 apresenta os dados genéricos dos aços de baixo carbono e do GFRP. Os dois materiais apontados como tradicionalmente utilizados em carenagens de colhedoras de grãos. O princípio do método de similaridade é buscar por materiais que tenham características parecidas, mas que no entanto tenham alguma propriedade de interesse otimizada com relação aos tradicionais. A busca por similares será feita a seguir, na triagem por análise. Os materiais tradicionais apresentados aqui servirão como referência para isso.

• Triagem por análise

Com base nos requisitos de projeto estabelecidos na etapa de tradução e nas propriedades dos materiais tradicionais, foram executadas no software CES, as seguintes operações:

- Criação do Mapa de Propriedades dos Materiais - densidade versus módulo de elasticidade. Esse mapa foi criado utilizando o universo de materiais com ponto de vista "macroscópico"; ou seja, de forma mais ampla;
- A partir do Mapa de Propriedades dos Materiais gerado, foi determinada a reta que corresponde ao índice de material. A reta foi posicionada na base do aço de baixo carbono, que é o material tradicional de referência. Os materiais com menor índice de material que o aço de baixo carbono são eliminados do processo, como mostra a figura 5.

Tabela 5 - Dados de interesse para os materiais tradicionais

| Material | Preço (BRL/Kg) | Densidade (Kg/m ³) | Módulo de elasticidade (GPa) | Tenacidade à fratura (MPa. \sqrt{m} ;) | Reciclável | Processo |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|---|------------|------------|
| Aço de baixo carbono | 1,16 - 1,27 | 7800 - 7900 | 205 - 215 | 42 - 67 | Sim | Estampagem |
| GFRP | 7,14 - 7,84 | 1500 - 1800 | 13,8 - 27,6 | 6 - 25 | Não | SMC OU RTM |

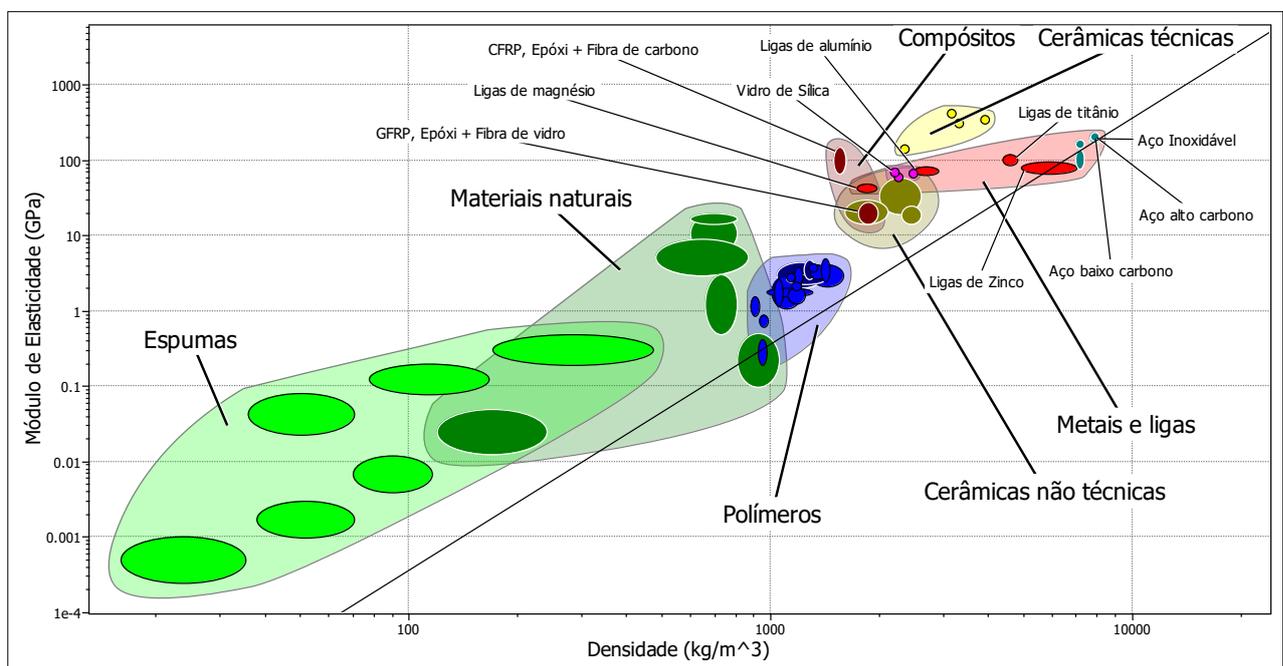


Figura 5 - MPM Densidade versus Módulo de Elasticidade

Fonte: CES Edupack no laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS - LdSM/UFRGS

Através da observação do Mapa de Propriedades dos Materiais, ilustrado na figura 5, percebe-se que existem materiais com ótimo Índice de Material (quanto mais acima da reta maior o IM), como as espumas e materiais naturais, porém sua pequena densidade e baixo módulo de elasticidade resultariam em peças com volume muito grande, e que

obviamente não seriam viáveis para uma carenagem de colhedora. Além disso podem ser observados materiais frágeis como vidros e cerâmicas, portanto, inaceitáveis para essa aplicação. Nos resultados mostrados no Mapa de Propriedades dos Materiais da figura 5, foram aplicados os seguintes filtros:

- Densidade: de 890 Kg/m^3 (tendo como base a família dos polímeros, que teve materiais triados pelos métodos de síntese e inspiração) até 7850 Kg/m^3 (tendo como base o material tradicional, aço carbono);
 - Tenacidade à fratura: maior do que $1,0 \text{ MPa}\cdot\text{Vm}$, eliminando-se assim os materiais frágeis e as espumas;
 - Módulo de elasticidade: maior do que $0,8 \text{ GPa}$ (tendo como base a família dos polímeros, que teve materiais triados na síntese);
 - Processos de fabricação: foram eliminados os materiais que não podem ser moldados na forma da carenagem.
4. Dar preferência para materiais triados em dois métodos: aumenta a chance de se selecionar um material que realmente será aplicado;
 5. Menores custos: de acordo com os objetivos do projeto;
 6. Maiores IM's: de acordo com o objetivo do projeto;
 7. Dar preferência a materiais recicláveis: de acordo com uma restrição negociável do projeto.

Os três primeiros critérios são obrigatórios, já os demais são negociáveis e dependem da análise dos Mapas de Propriedades dos Materiais. Para comparação do custo por m^3 de cada material triado foi gerado com auxílio do CES o gráfico da figura 7.

Com base na observação dos mapas e na ponderação dos critérios apresentados, foram selecionados para a etapa de documentação, os seguintes materiais, qualificados de acordo com o IM, do maior para o menor:

Assim, baseado nos filtros aplicados, os candidatos sobreviventes são apresentados no Mapa de Propriedades dos Materiais da figura 6. São esses os materiais que podem executar a função de material da carenagem. Como pode ser observado, ainda restaram diversos polímeros, dois compósitos, alguns metais não ferrosos, como as ligas de alumínio, e alguns aços, como o aço de baixo carbono. Dentre eles estão todos os materiais triados na síntese e também os materiais tradicionais.

Classificação

Aqui é onde se identifica, dentre os materiais que passaram pelas etapas de triagem, os que podem fazer melhor o serviço, tendo-se como base os requisitos de projeto. Neste sentido, para a classificação e definição dos materiais que vão para a documentação foram levados em conta os seguintes critérios:

1. Selecionar no mínimo um material de cada grupo triado: com o objetivo de explorar as particularidades de cada grupo;
2. Selecionar no máximo cinco materiais: limitando-se assim o número de candidatos da documentação;
3. Selecionar materiais tradicionais: promovendo-se assim, a investigação dos motivos pelos quais eles são utilizados;

- 1º CFRP: apesar de ter custo elevado e não ser reciclável, tem o maior IM e foi triado por dois métodos;
- 2º Ligas de Alumínio: tem o menor custo dos metais não ferrosos, possui o terceiro maior IM, foi triado por dois métodos e é reciclável;
- 3º GFRP: material tradicional, triado por dois métodos e menor custo entre os cinco com maior IM;
- 4º ABS: IM próximo dos outros polímeros, triado por dois métodos e reciclável;
- 5º Aço baixo carbono: material tradicional, menor custo do que os outros aços, triado por dois métodos e é reciclável.

Cabe lembrar que devido a seleção de materiais ser um processo iterativo os materiais não aproveitados para a documentação ainda podem ser utilizados, caso os outros se mostrem inviáveis.

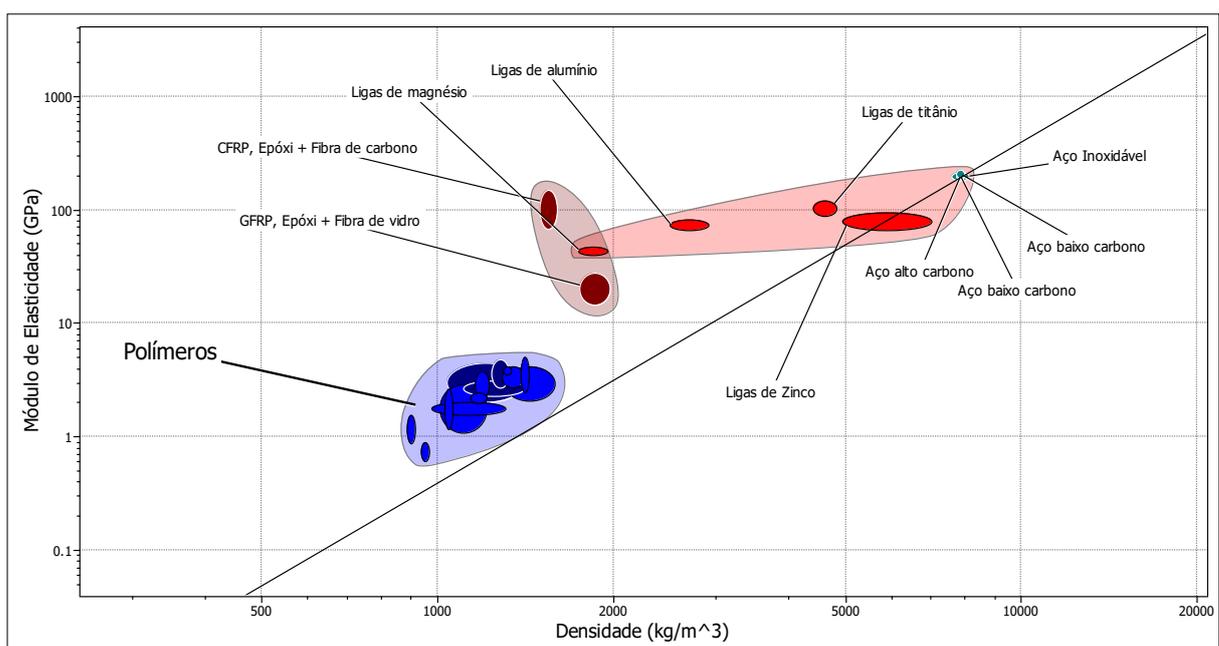


Figura 6 - MPM Densidade versus Módulo de Elasticidade com materiais triados
Fonte: CES Edupack no Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS - LdSM/UFRGS

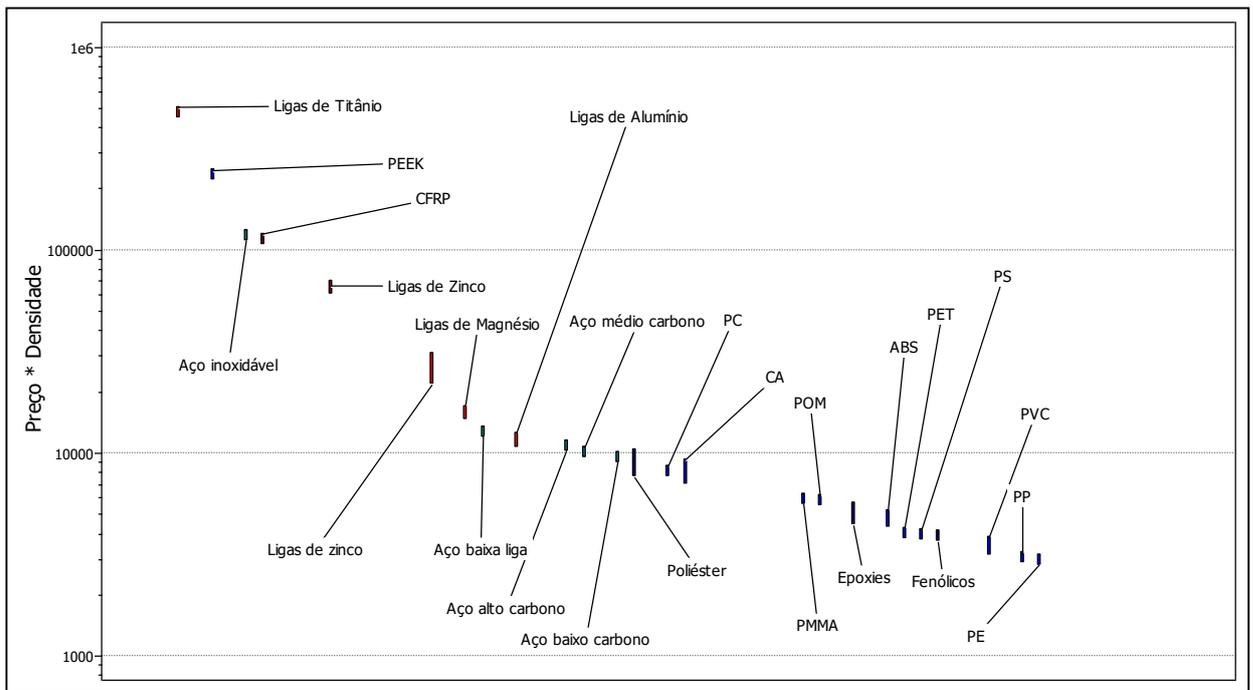


Figura 7 – Gráfico do custo

Fonte: CES Edupack no Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS - LdSM/UFRGS

Documentação

O resultado das etapas anteriores é uma lista de cinco candidatos potenciais para a fabricação da carenagem. Aqui, eles são avaliados de forma mais detalhada para embasar uma escolha final.

Devido aos materiais ainda estarem representados na forma “macroscópica”, isto é, cada material ainda representa um grupo de opções. Foi realizado, com o auxílio do CES e de acordo com a aplicação, a determinação da forma “microscópica” dos candidatos. Assim, as formas detalhadas, bem como o processo de fabricação, suas aplicações usuais e as justificativas das escolhas são:

CFRP (epóxi / fibra de carbono) – SMC (Sheet Molding Compound) - As peças de CFRP fabricadas pelo processo SMC apresentam menor custo se comparadas com outros processos de fabricação de compósitos. O processo requer grandes investimentos em moldes, porém menores do que injeção plástica e estamparia. Usos típicos do material: elementos estruturais leves na indústria aeroespacial e aeronáutica, transporte terrestre; artigos esportivos; molas e vasos de pressão.

ABS (chama retardada) - Termoformagem - O material possui temperatura de amolecimento maior do que os ABS's comuns, além de retardar a propagação de chamas, comuns em colhedoras. O processo de termoformagem utiliza elevada mão de obra, porém menores investimentos em moldes e maquinário do que a injeção plástica. Além disso, a injeção plástica não é indicada para peças grandes como a carenagem. Usos típicos do material: capacetes de segurança; painéis de instrumentos de automóveis e outros componentes internos; acessórios para tubos; dispositivos de segurança; caixas para aparelhos de pequeno porte; equipamentos de comunicação; máquinas de negócios; canalizações de hardware; grelhas de automóveis; coberturas de roda; alojamentos de espelho; forros de geladeira; conchas de bagagem; bandejas para compras; mortalhas cortador; cascos de barcos; grandes

componentes para veículos de passeio; selos de tempo; tiras disjuntor geladeira e tubulação para sistemas de drenagem de resíduos de ventilação.

Liga de Alumínio 2024 – Estampagem - Liga de alumínio que é fabricada em grandes escalas. O processo de estampagem é o indicado para a obtenção de formas como uma carenagem de design complexo. Usos típicos do material: aplicações de aeronaves, fabricação de armas, feixes de luz, equipamentos desportivos.

GFRP (epóxi / fibra de vidro) - SMC (Sheet Molding Compound) - Material tradicional, utilizado em carenagens de colhedoras. As peças de GFRP fabricadas pelo processo SMC apresentam menor custo se comparadas com outros processos de fabricação de compósitos. O processo requer grandes investimentos em moldes, porém menores do que injeção plástica e estamparia. Usos típicos do material: cascos de navios e barcos; carrocerias; componentes para automóveis; revestimentos e acessórios em construção civil.

Aço de baixo carbono laminado a frio (Norma NBR EM 5915) – Estampagem - Material tradicional, utilizado em carenagens de colhedoras. O processo de estampagem é o indicado para a obtenção de formas como a de uma carenagem de design relativamente complexo. Usos típicos do material: Peças estampadas em geral, que requeiram conformação com profundidade moderada.

Na etapa de documentação, deve-se analisar como os candidatos se comportam em relação aos objetivos de projeto. Nesse caso, é interessante calcular quais as consequências da escolha de cada material sobre massa e no custo do componente. Tendo como referência uma carenagem de aço baixo carbono com massa de 40 kg, é possível calcular as massas das carenagens construídas com os outros materiais por meio de relações do inverso do módulo de elasticidade. Neste sentido, a tabela 6 apresenta os dados de interesse para os cinco candidatos.

Tabela 6 – Dados de interesse

| Material | Densidade (Kg/m ³) | Módulo de elasticidade (GPa) | $IM = \frac{E^{1/3}}{\rho}$ | Massa (Kg) | Custo (BRL/Kg) | Custo por peça (BRL) |
|---|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------|----------------|----------------------|
| CFRP (epóxi/fibra de carbono SMC) | 1550 | 109,5 | 0,00309 | 9,77 | 37,25 | 364,07 |
| Liga de alumínio 2024 | 2765 | 73,85 | 0,00152 | 19,88 | 4,70 | 93,34 |
| GFRP (epóxi/fibra de vidro SMC) | 1650 | 20,7 | 0,00166 | 18,13 | 7,50 | 135,87 |
| ABS (chama retardada) | 1110 | 2 | 0,00114 | 26,58 | 5,52 | 146,57 |
| Aço baixo carbono laminado a frio (EM 5915) | 7850 | 207,5 | 0,00075 | 40,00 | 1,16 | 46,20 |

Baseando-se na documentação exposta e nos dados de interesse exibidos na tabela 6, é possível chegar as seguintes conclusões:

- O compósito CFRP apresenta o melhor IM e pode fabricar a peça de menor massa. Porém, parece ainda não ter custo compatível com a indústria de máquinas e implementos agrícolas. A sua aplicação se torna viável quando o fator massa tem importância soberana, como nas indústrias aeronáutica e aeroespacial;
- Com base na tabela 6, conclui-se que a liga de alumínio 2024 desponta como a melhor alternativa dos cinco candidatos, comparando-se com os materiais tradicionais pode produzir uma peça com menos da metade da massa do aço e significativamente mais barata que o GFRP;
- O polímero ABS, apesar de ter menor densidade e menor custo de matéria prima, produz peças mais pesadas e caras do que o GFRP. A desvantagem no preço do ABS frente aos concorrentes tende a aumentar devido ao processo de termoformagem ter menor produtividade. Apesar disso, o candidato se apresenta como uma alternativa reciclável, frente ao GFRP, e mais leve do que o aço. Sua aplicação ganha força nos projetos em que a reciclagem é obrigatória ou tenha peso elevado na escolha;
- O aço produz as peças mais pesadas, porém é reciclável e barato. Com o custo de uma peça fabricada em GFRP é possível produzir aproximadamente quatro peças de aço. Sua aplicação se torna viável em colhedoras que tenham o custo como fator prioritário. Para fabricação por estampagem e grandes volumes de fabricação, o aço torna-se uma opção interessante.

Cabe destacar que essas informações são circunstanciais, os custos de cada material podem variar muito de acordo com a empresa, equipamentos existentes, volume de produção, mão de obra, etc. A liga de alumínio 2024, apesar de ser apontada como melhor opção, não é tradicionalmente aplicada em carenagens de colhedoras. Os fatores que levam a isso provavelmente têm a ver com particularidades na utilização desse material. Peculiaridades estas, que o setor de

máquinas e implementos agrícolas não está acostumado e por isso cria resistências para a sua utilização.

O presente estudo de caso se concentrou, principalmente, na resolução do imbróglio entre minimização da massa e custo. Dois objetivos que se mostram conflitantes, materiais que produzem as peças mais leves são, geralmente, os mais caros. O custo é claro, tem sempre muita relevância em qualquer tipo de projeto, porém a importância da redução de massa nas novas tecnologias, que visam menores consumos de combustível e maior eficiência dos motores, tem aumentado cada vez mais. A redução da massa tem efeito cascata sobre uma pluralidade de aspectos ligados ao desempenho e ao projeto. Em uma colhedora, a importância da redução de massa tem aumentado cada vez mais. Isso ocorre devido ao aumento do tamanho e capacidade dessas máquinas. Com base nessa tendência, materiais como o CFRP podem ser viabilizados em um futuro não tão distante.

Assim, para uma escolha final é necessária uma outra cadeia de procedimentos, como o detalhamento de processos de fabricação, tiragem, maquinário, capacitação de pessoal, etc. Caso, qualquer um desses itens mostrem dificuldades excessivas, para os materiais da tabela 10, o processo de seleção pode ser retomado a partir da lista de classificação com os outros materiais candidatos.

5. CONCLUSÕES

Baseado na análise das metodologia e ferramentas de seleção de materiais aplicáveis ao setor de máquinas e implementos agrícolas e no estudo de caso onde se avaliou a aplicabilidade dos métodos selecionados na seleção de materiais para a fabricação de um componente de um equipamento típico desse setor da indústria, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A metodologia Ashby incentiva os projetistas de máquinas e implementos agrícolas a considerar a ampla gama de oportunidades de inovação que os materiais de engenharia proporcionam;
- O desenvolvimento de um sistema informatizado para seleção de materiais voltado para o setor de máquinas e implementos agrícolas mostrou-se inviável nas condições estabelecidas nesse trabalho;

- Com relação às ferramentas de auxílio à aplicação da metodologia selecionada, pode-se afirmar que o software CES se mostrou uma boa opção para a indústria de máquinas e implementos agrícolas;
- Os procedimentos de triagem por síntese e triagem por similaridade carecem de melhores ferramentas que as disponíveis atualmente para o setor de máquinas e implementos agrícolas;
- Os procedimentos de triagem por síntese e triagem por similaridade se mostraram um caminho para expandir a visão de projetistas de máquinas e implementos agrícolas, que normalmente negligenciam fatores relativos ao projeto industrial;
- No desenvolver deste trabalho ficou evidente que a seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas é uma tarefa que requer conhecimentos de diferentes áreas, principalmente engenharia e design;
- A metodologia de seleção de materiais selecionada nesse trabalho pode ser um dos principais fatores para a inovação tecnológica no setor de máquinas e implementos agrícolas;
- A metodologia de seleção de materiais selecionada nesse trabalho proporciona uma visualização dos procedimentos adotados em outros setores da indústria e capacita a empresa no domínio de tecnologia a serem implantadas em projetos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1]. Alves, C. et al. Sustainable design procedure: the role of composite materials to combine mechanical and environmental features for agricultural machines. *Materials and Design* 30 4060-4068, 2009.
- [2]. Ashby, M. F. Seleção de materiais no projeto mecânico. 4ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [3]. Ashby, M. F.; Johnson, K. *Materials and design - the art and science of material selection in product design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [4]. ASM. Disponível em: <<http://www.products.asminternational.org/hbk>>. Acesso em: abr. 2014.
- [5]. Braskem. Disponível em: <<http://www.braskem.com.br>>. Acesso em: dez. 2013.
- [6]. CES. Cambridge Engineering Selector - Edupack 2013 (software). Reino Unido: GrantaDesign, 2009. Maiores informações em: <<http://www.grantadesign.com>>. Acesso em: ago. 2014.
- [7]. CES. Cambridge Engineering Selector - Edupack 2013 (software). Reino Unido: GrantaDesign, 2009. Maiores informações em: <<http://www.grantadesign.com>>. Acesso em: ago. 2014.
- [8]. Deere. Disponível em: <<http://www.deere.com>>. Acesso em: dez. 2013.
- [9]. Ferrante, M. Seleção dos materiais de construção mecânica: estratégias e metodologia básica. In: Simpósio sobre materiais, 2000, Rio de Janeiro. Anais.
- [10]. Ferrante, M; Walter, Y. A materialização da ideia: noções de materiais para design do produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- [11]. Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br>>. Acesso em: abr. 2014.
- [12]. Joutsenvaara J.; Vierelä R. Future materials in agricultural construction. Publications of Kemi-Tornio University of Applied Sciences: 2013.
- [13]. LdSM/UFRGS. Laboratório de design e seleção de materiais da Universidade federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ndsm>>. Acesso em: jun. 2014.
- [14]. Martensen, K. Progress in typical materials for agricultural machinery, 2006. Disponível em: <<http://www.clubofbologna.org/ew/documents/Martensen-paper.pdf>>. Acesso em: ago. 2014.
- [15]. Materioteca. Disponível em: <<http://www.materioteca.it>>. Acesso em: abr. 2014.
- [16]. Matweb. Material property data. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: abr. 2014.
- [17]. Silva, B. M.; et al. Investigação do método de seleção de materiais por síntese: ferramenta de auxílio para designers. UNOPAR Cient. Exatas Tecnol., Londrina, v. 8, n. 1, p. 59-63, Nov. 2009.
- [18]. Típa junior, N. Maior potência é tendência em máquinas. *Jornal do Comércio*. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=133429>>. Acesso em: set. 2014.
- [19]. Valtra. Disponível em: <<http://www.valtra.com.br>>. Acesso em: abr. 2014.
- [20]. Vian, C. E. F.; Andrade Júnior, A. M. Evolução histórica da indústria de máquinas agrícolas no mundo: origens e tendências. In: 48º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Anais... Campo Grande, 2010.
- [21]. Walter, Y. O conteúdo da forma: Subsídios para seleção de materiais e design. Dissertação de mestrado. Bauru: UNESP, 2006.
- [22]. Zerbinati, M. T. Mecanização agrícola – História e as tendências do mercado. 2011. Disponível em <<http://agrimanagers.wordpress.com/2011/05/28/mecanizacao-agricola-historia-e-as-tendencias-do-mercado/>>. Acesso em: set. 2014.