

UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ELEVADA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM APLICAÇÕES DE ENGENHARIA: IMPLICAÇÕES TÉCNICAS E ECONÔMICAS PRÁTICAS¹

Willy Ank de Moraes²
Herbert Christian Borges³

Resumo

A aplicação de materiais de maior resistência mecânica em componentes veiculares permite diminuição da sua espessura o que leva à redução do peso do veículo e, conseqüentemente, melhor desempenho e menor consumo de combustível. Dessa forma, existem muitos desenvolvimentos que buscam a substituição de materiais de baixa resistência por outros de mais alta resistência, visando ganhos de desempenho nestes equipamentos. O uso de novas ligas metálicas, baseadas no alumínio e no titânio, além do desenvolvimento de novos aços microligados (ARBL ou HSLA) e/ou com transformação/presença de mais de uma fase (DÚPLEX, DUAL-PHASE, TRIP e TWIP), tem este objetivo básico. Porém, existem considerações importantes que devem ser feitas para que esta substituição seja viável, tanto as associadas ao processo de fabricação, quanto ao uso prático destes equipamentos e componentes, além das de caráter econômico. Este trabalho apresenta as principais considerações que devem ser feitas para realizar substituições reais e práticas em componentes de uso rodoviário e exemplos de casos na substituição de aços. Nos casos apresentados, as substituições ocorreram com sucesso, não só pela diminuição do peso da estrutura, mas também pelo o aumento da resistência mecânica total da estrutura, com mínimo impacto na produção e ainda com redução do custo final do equipamento.

Palavras-chave: Novos materiais; Aplicação de materiais; Aços microligados; Veículos.

ENGINEERING APPLICATION OF HIGH STRENGTH STEELS: TECHNICAL AND ECONOMIC PRACTICAL IMPLICATIONS

Abstract

Vehicular equipments and parts made with high strength materials will leave to low weight, low fuel consumption and better performance of these vehicles. In that way, there are several developments aiming replacement of low strength materials to higher strength to improve vehicular performance. New alloys, based on aluminum and titanium, and developments on new microalloyed steels (HSLA) and/or transformed or additional phase (DÚPLEX, DUAL-PHASE, TRIP e TWIP), have this basic objective. However, there are important considerations need to be done to turn this replacement possible: manufacture issues, practical final use of the equipments and parts, and economical viability. This work presents the main considerations that need to be done to make real materials replacement on vehicular components and show real cases with steels. In that replacements cases, success was obtained not only by weight savings, but additionally by increase of final structure resistance, with minimum impact on manufacturing and besides, with lowering final cost of equipment.

Key words: New materials; Materials application; Microalloyed steels; Vehicles.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia, Analista de Produtos/Desenvolvimento de Novos Produtos da Gerência de Assistência Técnica da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) e Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília (UNISANTA). E-mail: willyank@unisanta.br ou willymoraes@cosipa.com.br.

³ Mestrando em Eng^a Metalúrgica, Eng^o Metalurgista. Analista de Produtos (Assistência Técnica) da Gerência de Assistência Técnica da COSIPA. E-mail: herbertborges@cosipa.com.br.

1 INTRODUÇÃO

Muitos trabalhos da literatura técnica visam a redução de peso dos veículos (automóveis, trens ferroviários, navios, aviões), objetivando a melhoria do desempenho destes veículos, a redução do consumo de combustível e minimização da emissão de poluentes nas grandes cidades. Muitos destes trabalhos partem do simples conceito de que, substituindo um material de menor resistência por outro de maior resistência, é possível produzir o mesmo componente, ou estrutura, com materiais mais finos e leves e que apresentam o mesmo grau de resistência absoluta, mas que levam a uma redução do peso total do veículo. Este tipo de análise tem sido utilizado na disputa entre diferentes materiais estruturais e foi um dos principais pilares para o desenvolvimento do projeto ULSAB.^[1]

A correta seleção do material pode ter grande impacto no peso dos veículos, pois é considerável o peso total de metal utilizado nos veículos. Em um trabalho encomendado pelo IBS e realizado pelo IPT em 2005, utilizaram-se dois veículos de passeio de fabricação nacional e verificou-se que os pesos totais dos componentes em aço nestes veículos foi de 503 kg e 594 kg, o que representa uma média de 53% em um peso total de 903 kg e 1.180 kg, respectivamente.^[2] Outros trabalhos descrevem a participação do aço nas diversas partes dos automóveis. Em um destes exemplos,^[3] o aço utilizado na carroceria possui uma participação em torno de 25% do peso total de um carro de passeio médio, seguido por 18% para o motor e transmissão e por 12% para o sistema de suspensão. Neste caso, o aço participa em um total de 55% do peso total do automóvel, que é um resultado similar ao total médio de 53% obtido no trabalho do IBS.

Quando se analisa rapidamente os números citados nestes trabalhos e considera-se a citada distribuição de peso nas diversas partes do automóvel [3] como válidas nos automóveis nacionais,^[2] pode-se fazer uma estimativa do potencial de ganho pela substituição de materiais, conforme mostrado na Tabela 1. Caso ocorra um incremento em resistência de 33% e a uma posterior redução de 27% peso pela redução da espessura na carroceria, ocorreria uma redução de 70kg no peso total do veículo, que já equivale ao peso de um passageiro médio.

Tabela 1 – Possível ganho de um automóvel pela substituição de materiais na carroceria.

Automóvel	Peso	Participação do aço		Aço na carroceria		Redução de peso na carroceria		
	(kg)	(kg)	(%)	(%)	kg	(%)	kg	(% total)
A	903	503	55,7%	25%	226	27%	61	6,8%
B	1180	594	50,3%	25%	295	27%	80	6,8%
Média	1042	549	53%	25%	260	27%	70	6,8%

Deve-se salientar neste exemplo que nem todo ganho de resistência foi explorado, o que dota este automóvel de um incremento líquido em resistência que aumenta sua longevidade, especialmente sob condições de fadiga.^[4] Um ganho de 33% em resistência poderia ser obtido, por exemplo, ao se substituir um aço DIN EN10268 H240LA (com limite de escoamento mínimo de 240MPa) por outro da mesma qualidade, porém do grau H320LA (que exige limite de escoamento mínimo de 320MPa).^[5]

Entretanto, somente a substituição de um material de menor resistência mecânica por outro de maior resistência mecânica, seja ele um aço, uma liga de metal não ferrosa ou mesmo um material não metálico, não garante o sucesso na aplicação. Além da grande gama de materiais que são aplicados nos diversos componentes de um veículo como exemplificado na Figura 1, existem outras considerações que

devem ser feitas para que a substituição tenha sucesso e que a vantagem do ganho em peso não agregue dificuldades em outros aspectos na fabricação e no uso final do veículo.^[6] Considerações a respeito da conformabilidade, soldabilidade, rigidez da estrutura e especialmente custo devem ser feitas nas diversas possibilidades de substituição de materiais utilizados em veículos em face do objetivo principal que é reduzir o peso da estrutura final.

Como já indicado anteriormente,^[2,3] um dos materiais mais utilizados pela humanidade e, em particular, na indústria de automóveis, caminhões/ônibus e componentes rodoviários é o aço. Especialmente para estas aplicações, desenvolveram-se novos tipos de aços, tais como: aços Microligados (com adições de Nb, V e Ti), *DÚPLEX* (ferrita e austenita), *DUAL-PHASE* (ferrita e martensita), *TRIP* (*TR*ansformation *I*nduced by *P*lasticity)^[7] e *TWIP* (*TW*inning *I*nduced by *P*lasticity) [8] que têm sido empregados em combinação para otimizar a resistência e o peso de veículos, como exemplificado na Figura 1.^[7]

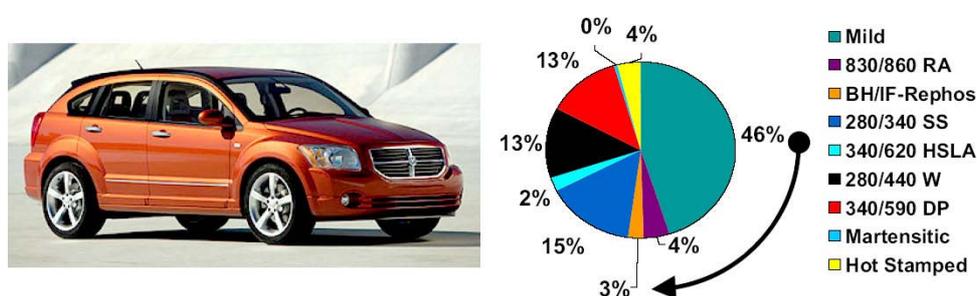


Figura 1 – Variedade de tipos de aços utilizados na carroceria de um automóvel moderno.^[7]

Este trabalho descreve alguns dos requisitos particulares que devem ser verificados ao se analisar a substituição de aços de menor resistência por outros de maior resistência, particularmente para o setor de implementos rodoviários. Ilustraram-se duas situações reais de substituição de materiais que levaram a resultados práticos positivos para clientes da Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa que participaram deste estudo.

2 DESENVOLVIMENTO

O trabalho foi desenvolvido em resposta à contínua necessidade de redução de custo e ganho em desempenho de produtos, especialmente no competitivo segmento de implementos rodoviários. Partindo de algumas particularidades válidas para produtos de aços planos e de suas principais características técnicas, elaborou-se um plano de substituição de materiais que pôde ser implementado por clientes da COSIPA, com assessoria da Assistência Técnica da Usina de Cubatão.

2.1 Particularidades dos Aços Planos

Além das características químicas (limites de composição química) e mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, dobramento, etc.), existem outras características aplicáveis aos aços planos, que não são diretamente explicitadas na norma pela qual o aço é especificado, como nas normas: DIN EN10268,^[5] ASTM A36^[9] e ASTM A572.^[10] Questões relacionadas à tolerância dimensional, planicidade e de forma são especificadas em outras normas complementares às normas dos aços, como na norma ASTM A568,^[11] que geralmente fazem vínculo à classificação do grau de resistência do aço, como

ilustrado na Tabela 2. Assim, a alteração do grau de resistência do aço pode exigir que se alterem as tolerâncias de fornecimento do material, como explicitado na Tabela 2. Nota-se que as tolerâncias na faixa de espessura de 2,08 a 5,84mm são ligeiramente diferentes para aços de baixa/média para alta resistência (em destaque).

Tabela 2 – Tolerâncias dimensionais aplicáveis para aços planos conforme a ASTM A568,^[11] de acordo com o grau de resistência.

ESPESSURA NOMINAL	BAIXA/MÉDIA RESISTÊNCIA				ALTA RESISTÊNCIA				
	AFASTAMENTO SUPERIOR E INFERIOR NA ESPESSURA				AFASTAMENTO SUPERIOR E INFERIOR NA ESPESSURA				
	509 < L ≤ 1016	1016 < L ≤ 1219	1219 < L ≤ 1524	1524 < L ≤ 1650	509 < L ≤ 812	812 < L ≤ 1016	1016 < L ≤ 1219	1219 < L ≤ 1524	1524 < L ≤ 1650
1,30 < e ≤ 1,45	0,12	0,15	0,15	0,17	-	-	-	-	-
1,45 < e ≤ 1,80	0,15	0,15	0,17	0,17	-	-	-	-	-
1,80 < e ≤ 2,08	0,17	0,17	0,17	0,20	0,17	0,17	0,17	0,17	0,20
2,08 < e ≤ 2,49	0,17	0,17	0,17	0,20	0,17	0,20	0,20	0,20	0,22
2,49 < e ≤ 4,57	0,17	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,27
4,57 < e ≤ 5,84	0,20	0,22	0,25	0,27	0,22	0,22	0,25	0,25	0,27

Obs.: Aços com limite de escoamento acima de 340MPa são considerados de alta resistência; entre 310 e 340MPa (inclusive) são considerados de média e abaixo de 310MPa são aços de baixa resistência segundo a ASTM.^[11]

Por outro lado, para otimizar o processo produtivo é muito utilizada a chamada “espessura padrão”, que é um pequeno prêmio (desconto) que os produtores e revendedores de metais planos oferecem para aqueles que adquirem material em espessuras específicas, mais costumeiras ao mercado. No caso dos aços alguns exemplos das chamadas “espessuras padrão” são: 2,65 mm; 3,00 mm; 4,75 mm; 5,00 mm; 6,30 mm; 8,00 mm e 9,50 mm. Na eventual redução de espessura, após a seleção de um material de maior resistência mecânica, é aconselhável que a espessura final pertença ao conjunto das “espessuras padrão”, o que limita as possibilidades de escolhas de espessura, mas tende a tornar o ganho mais proveitoso.

Tabela 3 – Exemplo de seis categorias de classificação de aços planos e dos principais aços associados a estas categorias.^[13]

ESTAMPAGEM	ESTAMPAGEM PROFUNDA	ESTRUTURAL RESISTENTE A CORROSÃO	ESTRUTURAL		ESTRUTURAL BAIXA LIGA/ALTA RESISTÊNCIA	LONGARINAS
ASTM A1008 DS ASTM A1011 DS DIN 1614 P2 DIN EN 10111 DIN EN 10130 JIS G3131 NBR 5906 NBR 5915	ASME SA620 ASTM A1008 DDS ASTM A619 ASTM A620 ASTM A620 A...B COS - EEP CC COS IF SEW 092 QSTE 340 TM	ASTM A242 T1 ASTM A242 T2 ASTM A606 COS AR COR NBR 5008	AS/NZS 1594 Grau HA200...HA350 ASME SA283 ASTM A1011 SS ASTM A283 ASTM A36 ASTM A572 ASTM A611 BS 1449 Part 1 Grau 34/20...50/35 BS 4360 Grau 40/43/50A...40/43/ 50D BS 4360 Grau 43A...43D BS 4360 Grau 50A...50DD COS CIVIL CSP	DIN 1623 P2 (1986) DIN 17100 Grau St 44.2...St 70.2 JIS G3101 JIS G3136 NBR 5000 NBR 5004 NBR 6648 Grau CG21...CG28 NBR 6649 NBR 6650 SAE J1392 Grau 040XLK...050XLF UNE EN 10025 S275 UNE EN 10025 S355	ASTM A1008 HSLAS C1 ASTM A1008 HSLAS C2 ASTM A1011 HSLAS C1 ASTM A1011 HSLAS C2 ASTM A572 ASTM A588 ASTM A607 CL1 ASTM A633	COS LNE DIN EN 10149-2 JIS G3113 NBR 6655 NBR 6656

Também devem ser tomados cuidados quanto ao tipo de aço que está sendo selecionado, porque existem várias categorias de aços, cada qual com suas características particulares que muitas vezes não são compatíveis. Um erro muito comum neste aspecto é a substituição de aços utilizados em longarinas dobradas (ou chassis), como por exemplo, o NBR 6656 LNE 38^[12] pelo aço estrutural ASTM A572 Gr. 55.^[10] Neste caso, ambos os aços possuem o mesmo limite de escoamento mínimo (380MPa), porém a conformabilidade do aço NBR 6656 é maior do que o ASTM A572, devido aos demais requisitos da norma e ao tipo de aplicação final, não sendo recomendável fazer esta substituição mesmo que o aço ASTM A572 seja mais comum e tenha menor custo.

2.2 Resistência Mecânica

O pilar da redução de peso das estruturas está na utilização de materiais mais resistentes. Eles proporcionam peças e componentes mais finos e leves e que apresentam a capacidade de suportar a mesma carga absoluta. O principal parâmetro de projeto utilizado para comparação e para definir as substituições de material é o limite de escoamento. Contudo, outros parâmetros também devem ser verificados, pois possuem influência no desempenho do material que será utilizado. São exemplos: alongamento, o limite de resistência, expoente de encruamento e coeficiente de anisotropia. No caso do alongamento é necessário explicitar o tipo do corpo de prova (CP) e base de medida (L0), pois os valores de alongamento também são dependentes destes parâmetros.^[14]

Diferentes mecanismos de endurecimento atuam na obtenção da resistência mecânica desejada nos metais e, portanto, também nos aços planos.^[15] Dependendo da aplicação final do material, determinados mecanismos são escolhidos para maximizar as propriedades desejadas, mantendo o menor custo possível. Neste sentido é bastante difundido o uso de aços microligados ao nióbio e também ao titânio e vanádio, como forma de obter uma maior resistência mecânica aliado a um baixo conteúdo em carbono equivalente, com ganhos principalmente em soldabilidade e conformabilidade. Mais recentemente, novos aços têm surgido com características ainda mais atraentes,^[7] mas com questões ainda a serem resolvidas em conjunto entre produtores, consumidores e projetistas.^[6,8]

2.3 Soldabilidade

Os métodos de soldagem mais comuns, empregados em aços laminados a quente para a produção de implementos rodoviários são: soldagem por eletrodo revestido (*SMAW - Shielded Metal Arc Welding*) e os processos de soldagem com proteção gasosa (*MIG – Metal Inert Gas* e *MAG – Metal Active Gas*). Em qualquer processo é desejável um metal com boa soldabilidade. Neste caso, o conceito de aço de boa soldabilidade é àquele que não apresenta trincas na zona termicamente afetada pelo calor da solda (ZTA), em variadas situações ou procedimentos de soldagem. A possível existência de trincas nesta região está muito relacionada à composição química do aço:

1. maiores teores de carbono equivalente (C, Cr, Mo, V e Mn) tornam mais provável a ocorrência de transformação martensítica, que além de gerar uma microestrutura frágil, também cria tensões residuais na região da solda, podendo levar à formação de trincas monotonicamente ou por fadiga;^[4]

2. altos níveis de hidrogênio podem induzir à fragilização por hidrogênio, apesar de que, neste caso, a maioria do hidrogênio contamina o metal soldado exatamente durante o momento da soldagem, o que depende muito de como é executado o procedimento de solda.

O procedimento de solda pode intensificar ou minimizar os efeitos metalúrgicos que ocorrem na ZAC de maneira que um aço com carbono equivalente ligeiramente superior pode ser tão soldável quanto um aço com baixo carbono equivalente, caso a diferença entre os teores não seja muito grande ou caso o procedimento de solda seja convenientemente ajustado. Além disso, mudanças muito radicais na resistência mecânica dos aços implica necessariamente na mudança do metal de adição (eletrodo) utilizado nos processos de soldagem.

Idealmente, a utilização de aços de maior nível de resistência mecânica deve levar em consideração os efeitos sobre a soldabilidade, pois mesmo um ligeiro ajuste no procedimento de solda devido à mudança do metal pode ser um fator limitante para esta substituição. Como uma referência para um valor de carbono equivalente, pode-se referenciar ao citado pela norma API 5L,^[16] que é uma das normas mais rígidas em relação à soldabilidade. Essa norma limita o carbono equivalente de aços de alta resistência em 0,43%, conforme definido pela fórmula do *International Institute of Welding (IIW)*:

$$\%C_{eq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Mo + \%Cr + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (1)$$

2.4 Conformabilidade

Dobramento e estampagem são os principais processos que exigem do material uma conformabilidade mínima para sua utilização nos processos de fabricação de componentes e estruturas de veículos. A diminuição da espessura das peças é um fator que auxilia a sua conformabilidade, especialmente em dobramento. Porém o incremento de resistência limita a sua capacidade de deformação e aumenta o efeito mola (também conhecido com *springback*).^[6] No uso de um material com maior nível de resistência, normalmente a ductilidade deste material cai ligeiramente, o que pode implicar na ocorrência de trincas como as mostradas na Figura 2.



Figura 2 – Trincas oriundas do processo de conformação (dobramento) de um aço com alta resistência mecânica.

Peças estampadas ou dobradas em aço podem ser cortadas por estampo ou a Laser. No caso do corte em estampo, como mostrado na Figura 3, existem rebarbas e rugosidades deixadas pelo processo que durante a posterior conformação da peça se tornam pontos de concentração de tensões e deformações que podem levar a induzir trincas se o metal não tiver ductilidade suficiente. Aços com maior nível de resistência mecânica, além de apresentarem uma diferente morfologia de

acabamento no corte por estampo e de aumentarem o desgaste das ferramentas de estampo, são mais sensíveis ao nível de acabamento pelo corte do estampo. Assim, o uso destes aços requer uma verificação e provavelmente uma nova regulação dos equipamentos de corte para a sua adequação ao novo material.

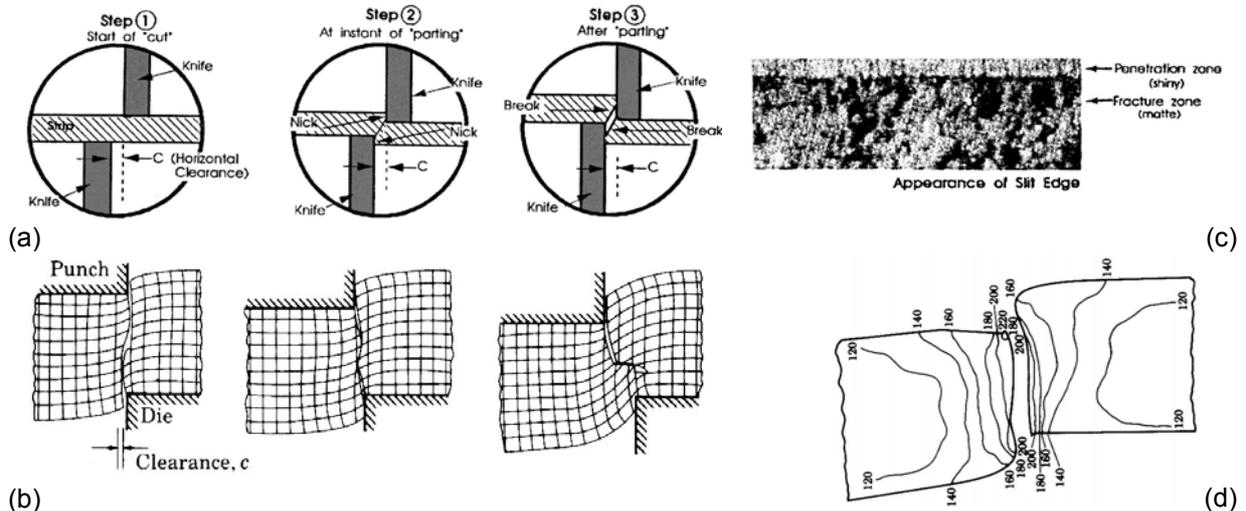


Figura 3 – Morfologia superficial de uma peça metálica cortada por estampo. O tamanho relativo da zona de penetração depende de uma série de características do processo, como da folga entre as ferramentas (definida como C ou *Clearance* acima).^[17,18] (a) e (b) mostram detalhes do processo de corte, (c) ilustra os diferentes acabamentos superficiais (liso e rugoso) da superfície cortada e (d) as variações de dureza (Vickers) em uma peça de aço SAE 1020 após o corte.

Aços com maior nível de resistência mecânica possuem melhorias na sua conformabilidade, que são oferecidas durante o processo de fabricação. Dentre estas melhorias, destacam-se a alteração da morfologia das inclusões (com emprego de cálcio, titânio ou metais de terras raras), redução do teor de enxofre e emprego de mecanismos de endurecimento mais adequados, como por exemplo, o refino de grão.

2.5 Rigidez e Empenamento

O uso de aços de alta resistência leva à redução de peso. Porém, como o módulo de rigidez (ou módulo de Young) destes aços é praticamente o mesmo dos aços de menor resistência, entre 180 GPa a 205 GPa,^[19] a rigidez do componente é reduzida à medida que se reduz a sua espessura, mesmo que o nível de resistência mecânica aumente. A diminuição da rigidez do componente pode levar à maior geração de vibrações, que elevam o ruído, o desgaste ou mesmo induzir fadiga no veículo.

Por outro lado, a menor espessura também torna o material mais susceptível ao empenamento em uso, que é a instabilidade elástica seguida de deformação plástica ou dobramento (flambagem distorcional) de componentes muito finos. A capacidade de um componente em empenar está diretamente associada ao momento de inércia do componente, função da razão entre a largura livre (b_f) e a espessura (t) deste componente (b_f/t).

Assim, quanto maior for a resistência do aço, para obter a redução de peso respectiva, deve-se:

1. fazer uma mudança na espessura do componente ou quando sua rigidez é pouco pronunciada ou;

- compensar a perda da resistência ao empenamento pela redução da largura do componente ou pela alteração de sua geometria.

2.6 Custo

Existe uma série de vantagens no uso de aços de alta resistência mecânica para a produção de estruturas e componentes veiculares que agregam a uma redução do custo de manutenção destes veículos. Entretanto, não necessariamente o custo inicial do projeto será diminuído com o emprego destes aços. A Tabela 4 exemplifica o (sobre) custo relativo existente entre cinco aços estruturais diferentes conforme obtido da bibliografia.^[20] Salienta-se que o custo real dos aços depende de vários fatores, sendo que esta tabela serve apenas como referência para orientação.

Tabela 4 – Relações entre a resistência mecânica e custo de alguns aços estruturais.^[20]

Specification	Type	Minimum yield point		Strength increase over A36,	Cost increase over A36,	Other features
		MPa	ksi	%	%(a)	
ASTM A36	Plain carbon	248	36	Lowest cost per pound
ASTM A572 Grade 50	Nb/Vmicroalloy	345	50	38.9	9.4	Good weldability
ASTM A440	Mn-Cu	345	50	38.9	13.4	Not for welded structures. Corrosion resistance twice that of A36
ASTM A441	Mn-V-Cu	345	50	38.9	13.4	For welded structures. Atmospheric corrosion resistance twice that of A36
ASTM A242	Multiple alloy, weathering steel	345	50	38.9	38.3	Weathering steel. Atmospheric corrosion resistance 4 times that of A36 (often 5 to 8 times that for Type 1). Type 2 has excellent toughness.

(a) Based on 1970 U.S. dollars. Source: Reprinted with permission from Ref. 22

Neste caso, a substituição do aço ASTM A36^[9] por ASTM A572 Gr. 50^[10] implica em 39% de aumento de resistência, aumento maior do que os 33% da suposta substituição DIN EN 10268 H240LA por H320LA citada no item 1 deste trabalho. Como o custo do aço é 9,4% maior,^[20] então esta substituição levará a uma efetiva diminuição no custo inicial da peça ou componente que está sofrendo a substituição, pois os ganhos em resistência e diminuição de peso são maiores do que o (sobre) custo do material.

Como já citado, outras características são importantes. A utilização de aços com maior resistência à corrosão pode não levar a ganhos imediatos de custo (vide Tabela 4 para o caso do A242). Contudo, a longo prazo, os ganhos em redução do consumo de combustível, aumento da capacidade de carga (carga paga) e ampliação da longevidade da estrutura podem compensar, em muito, este custo inicial, mesmo que mais elevado.

2.7 Propostas de Substituição

Ao se considerar todos os itens analisados (aplicabilidade, tolerâncias, espessura padrão, resistência mecânica, soldabilidade, conformabilidade, rigidez, empenamento e custo), propuseram-se substituições de aços para clientes da COSIPA que atuam no setor de implementos rodoviários. Nestas propostas de substituição, visou-se:

- redução imediata do custo total da estrutura;
- aumento da resistência mecânica e redução do peso total da estrutura;
- manutenção das condições de fabricação ou mínima influência sobre estas;

- menor impacto sobre as tolerâncias dimensionais, de forma e na rigidez da estrutura final;
- melhora do desempenho e a qualidade geral dos produtos do cliente.

Estes objetivos foram atingidos por:

- substituição de aços de menor nível de resistência, por aços de nível de resistência imediatamente superior,
- diminuição da espessura, visando adotar a espessura padrão imediatamente inferior à inicialmente adotada,
- demonstração para os clientes da redução de custo proveniente e posteriores vantagens;
- assessoria direta da Assistência Técnica da Cosipa junto aos seus clientes.

3 RESULTADOS

Este trabalho apresenta dois casos em que foi empregada a substituição do aço ASTM A36^[9] por ASTM A572 Gr. 50\:^[10] carreta para transporte de cana-de-açúcar e carreta rodoviária para transporte de granéis.

3.1 Caso 1: Carreta de Cana-de-Açúcar

A Figura 4.a ilustra uma carreta utilizada para o transporte de cana-de-açúcar que é basicamente constituída de peças tubulares de seção reta quadrada, como as mostradas na Figura 4.b. Neste caso o principal objetivo era tornar a estrutura mais leve. Foram analisados três tipos de aços em substituição ao ASTM A36.^[9] A Tabela 5 ilustra os valores dos limites de escoamento de cada um dos aços e a Tabela 6 os possíveis ganhos em peso que poderiam ser explorados.



Figura 4 – (a) Carreta de transporte de cana-de-açúcar e (b) exemplos de tubos que compõem sua estrutura.

Tabela 5 – Comparação entre os limites de escoamento e incremento de resistência mecânica dos aços^[9,10,12,13] analisados para este caso.

Tipo de aço	Limite de escoamento	Incremento
	(MPa)	(%)
ASTM A36	250	0%
ASTM A572 Gr.50	345	38%
NBR 6656 LNE38	380	52%
COS LNE 600	600	140%

Tabela 6 – Possíveis substituições de material e respectivos ganhos em peso, explorando ao máximo o incremento no limite de escoamento dos aços listados^[9,10,12,13] nas diversas partes constituintes da carreta de cana-de-açúcar.

Partes	Participação	e	ASTM A36	ASTM A572 Gr.50	NBR 6656 LNE38	COS LNE 600			
	(%)	(mm)	(kg)	(kg) (Diminuição)	(kg) (Diminuição)	(kg)	(Diminuição)		
Caçamba	28%	6,3	2020	1464	-28%	1329	-34%	842	-58%
Chassi	38%	6,3	2750	1993	-28%	1809	-34%	1146	-58%
Elevador	19%	12,7	1050	761	-28%	691	-34%	438	-58%
Rodagem	17%	12,7	996	722	-28%	655	-34%	415	-58%
Total			6816	4939	-28%	4484	-34%	2840	-58%
Redução de peso (espessura teórica)			0%	-28%		-34%		-58%	

Considerando os critérios do item 2.7, sugeriu-se a substituição do ASTM A36^[9] pelo ASTM A572 Gr. 50.^[10] Neste caso, o potencial de redução de peso deve levar em consideração a possibilidade de utilizar a “espessura padrão”, citada no item 2.1, o que leva ao reajuste indicado pela Tabela 7 e aos novos resultados ilustrados na Tabela 8.

Tabela 7 – Ajustes nas espessuras dos aços analisados^[9,10,12,13] para aplicar na carreta de cana-de-açúcar em face das “espessuras padrão”.

Aço	Espessuras (mm)					
	inicial	teórica	real	inicial	teórica	real
ASTM A36	6,30	6,30	6,30	12,70	12,70	12,70
ASTM A572 Gr.50		4,57	4,75		9,20	9,50
NBR 6656 LNE38		4,14	4,25		8,36	9,50
COS LNE 600		2,63	2,65		5,29	6,30

Tabela 8 – Possíveis substituições de material e respectivos ganhos em peso, utilizando valores de “espessura padrão” para os aços listados^[9,10,12,13] nas diversas partes constituintes da carreta de cana-de-açúcar.

Partes	Participação	e	ASTM A36	ASTM A572 Gr.50	NBR 6656 LNE38	COS LNE 600			
	(%)	(mm)	(kg)	(kg) (Diminuição)	(kg) (Diminuição)	(kg)	(Diminuição)		
Caçamba	28%	6,3	2020	1523	-25%	1363	-33%	849,7	-58%
Chassi	38%	6,3	2750	2073	-25%	1855	-33%	1157	-58%
Elevador	19%	12,7	1050	785,4	-25%	785,4	-25%	520,9	-50%
Rodagem	17%	12,7	996	745	-25%	745	-25%	494,1	-50%
Total			6816	5127	-25%	4748	-30%	3021	-56%
Redução de peso (espessura padrão)			0%	-25%		-30%		-56%	

Neste caso, houve um ganho em peso final de 25% que, considerando os dados apresentados pela Tabela 4,^[20] ainda serão acompanhados por uma redução em custo inicial para a fabricação do produto. Deve-se lembrar que a presente substituição também permite a um incremento na vida útil do componente.

3.2 Caso 2: Carreta Rodoviária para Transporte de Granéis

A Figura 5 ilustra a aplicação de um componente estrutural em carretas rodoviárias para o transporte de granéis. O objetivo principal da presente substituição é a diminuição do custo de fabricação do componente, constituído por três chapas soldadas de aço ASTM A36.^[9] Neste caso, como no caso anterior, a mesma análise pode ser feita com diversos aços e um resultado similar aos apresentados pelas Tabelas 6, 7 e 8 será obtido.

Entretanto, para esta aplicação torna-se necessário analisar com mais cuidado a rigidez do componente, pois uma redução na espessura do componente implica em perda de rigidez, maior flexibilidade da estrutura, maior geração de vibrações e ruído

além do aumento da possibilidade de colapso por empenamento da viga. A Tabela 9 ilustra os valores de diversas propriedades mecânicas calculadas a partir de equações conhecidas na literatura e utilizadas para caracterização de perfis estruturais.^[21] A resistência mecânica em tração do perfil não foi alterada neste caso.

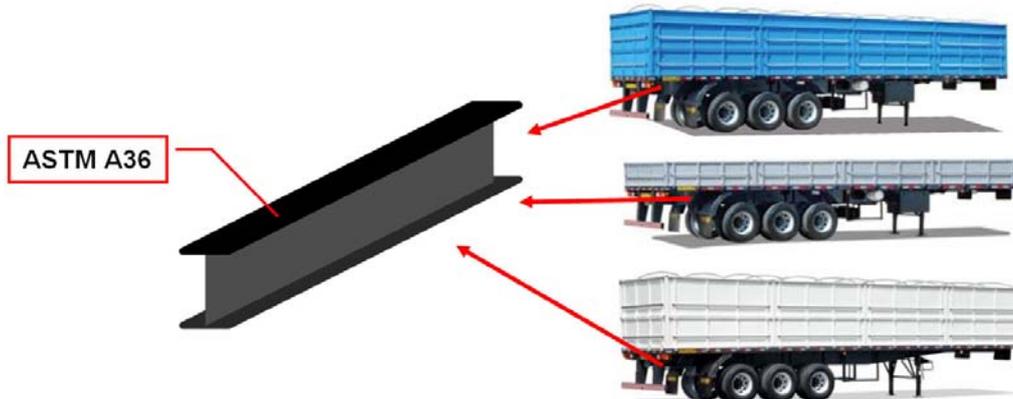


Figura 5 – Aplicação da viga de aço ASTM A36^[9] em alguns modelos de carretas rodoviárias para transporte de granéis.

Tabela 9 – Resultados da análise da mudança do tipo de aço em um perfil estrutural (longarina) utilizado na construção de uma carreta rodoviária para transporte de granéis.

CARACTERÍSTICAS	ANTES	DEPOIS	Unid.	Variação
Espessura da alma (t_w)	8,00	5,00	mm	-38%
Altura da alma (h)	368	368	mm	0%
Espessura das mesas ($t_{fi} = t_{fs}$)	16	16	mm	0%
Largura das mesas ($b_{fi} = b_{fs}$)	100	100	mm	0%
Comprimento do perfil (L)	15	15	mm	0%
Altura do perfil (d)	400	400	mm	0%
Momento de inércia (I_x)	15125,7	13879,8	cm ⁴	-8%
Momento de inércia (I_y)	268,2	267,1	cm ⁴	0%
Módulo de resistência elástica (W_{xs})	756,3	694,0	cm ³	-8%
Módulo de resistência elástica (W_{xi})	756,3	694,0	cm ³	-8%
Módulo de resistência elástica (W_y)	53,6	53,4	cm ³	0%
Massa linear (m)	48,2	39,6	kg/m	-18%
Peso do componente (P)	723,5	593,5	kg	-18%

Os resultados indicam que é possível trocar o aço ASTM A36^[9] pelo aço ASTM A572 Gr. 50^[10] com ganho considerável em peso na peça (18%) e com um possível ganho em custo, conforme indicado pela Tabela 4.^[20] Entretanto, os resultados também ilustram uma pequena perda de rigidez (8%) do perfil (medida pelo momento de inércia). Neste caso, existem duas possibilidades já citadas no item 2.5: ou se admite esta pequena perda de rigidez (desde que pequena, como é o caso) ou se altera a geometria do componente.

Neste caso, um pequeno aumento na espessura das “mesas” ou “abas” do perfil de 16 mm para 18 mm aumentaria o momento de inércia deste perfil, ainda mantendo uma diminuição de peso considerável, conforme ilustra a Tabela 10. Após análises, o cliente decidiu manter a espessura das “mesas” ou “abas” do perfil em 16 mm, considerando que esta pequena perda em rigidez está compensada pela segurança de seu projeto mecânico.

Tabela 10 – Valores obtidos para o perfil estrutural (longarina) analisado: os valores de redução de peso consideram uma espessura na “alma” do perfil igual à 5mm.

Espessura das mesas (tfi)		Momento de inércia (Ix)		Módulo de resistência elástica (Wxs)	
(mm)	(% redução de peso geral do perfil)	(cm4)	(%)	(cm3)	(%)
16	-18 %	15125,7	-8%	694,0	-8%
17	-15 %	14519,6	-4%	726,0	-4%
18	-12 %	15152,4	0%	757,6	0%
19	-9 %	15778,3	4%	788,9	4%
20	-6 %	16397,3	8%	819,9	8%

4 CONCLUSÕES

O trabalho foi desenvolvido em resposta à contínua necessidade de redução de custo e ganho em desempenho de produtos, especialmente no competitivo segmento de implementos rodoviários. As análises feitas indicam que não é apenas o grau de resistência dos aços que deve ser levado em consideração e sim outros fatores, dentre os quais àqueles enumerados no item 2. Para os dois casos de substituição ilustrados, foi possível obter não só a redução de peso e desempenho das estruturas, mas também incrementar a competitividade dos produtos, seja pela redução do custo, seja pela melhoria geral da resistência dos componentes.

REFERÊNCIAS

- 1 **The UltraLight Steel Auto Body (ULSAB)**, AISI-American Iron and Steel Institute. Disponível em: <http://www.autosteel.org/AM/Template.cfm?Section=ULSAB1>. Acesso em: 31 de março de 2008.
- 2 Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS): **A participação do aço nos automóveis**. Relatório da análise feita pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Disponível em: <http://www.ibs.org.br/index.asp>; Acesso em: 01 de março de 2008.
- 3 SSAB Swedish Steel, Press Release: **New supersteels help the automotive industry meet environmental targets**. Disponível em: <http://www.ssabtunnplat.com/templates/PressPage.aspx?id=3568>. Acesso em: 28 de março de 2008.
- 4 RABBI, M.S.; **Fadiga dos Metais**. In: MORAIS, W.A.; et. al. Curso: “Metalurgia Física e Mecânica”. São Paulo: ABM. Volume 2, módulo 4, capítulo 3, páginas 401-424. 2007.
- 5 DIN EN 10268: **Cold-rolled flat products made of high yield strength microalloyed steels for cold forming – Technical delivery conditions** – English version of DIN EN 10268. 1999.
- 6 SILVA, A. T.; **Análise das implicações do uso dos novos aços de alta resistência mecânica na indústria automobilística**. 59^o Congresso da ABM, São Paulo (SP). Editado em CD-ROM, páginas 335 a 342, 2004.
- 7 MILITITSKY, M.; **Advanced Steel Products for Lightweighting at Daimlerchrysler**. In: HASHIMOTO, S. et. al. International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steel for Automotive Applications. Proceedings. Araxa, MG, Brazil. December 5-8. Editado em CD-ROM, p. 53-63. 2005.
- 8 KIESE, J.; **New lightweight Steels for Automotive Applications – potential and risk**. In: HASHIMOTO, S. et. al. International Symposium on Niobium

- Microalloyed Sheet Steel for Automotive Applications. Proceedings. Araxa, MG, Brazil. December 5-8. Editado em CD-ROM, p. 89-97. 2005.
- 9 ASTM A36/A36M: **Standard Specification for Carbon Structural Steel**. Book of Standards Volume: 01.04. 2007.
 - 10 ASTM A572/A572M-07: **Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel**. Book of Standards Volume: 01.04. 2007.
 - 11 ASTM A568/A568M-07a: **Standard Specification for Steel, Sheet, Carbon, Structural, and High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, General Requirements for**. Book of Standards Volume: 01.03. 2007.
 - 12 COSIPA: **Catálogo de produtos laminados**. Disponível em: <http://www.cosipa.com.br>. Acesso em: 20 de março de 2008.
 - 13 NBR 6656: **Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. 1992.
 - 14 ISO 2566/1: **Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels**. International Organization for Standardization, 1984.
 - 15 MORAIS, W.A.; et. al.; **Modelamento e quantificação da relação propriedades x microestrutura nos aços estruturais laminados a quente da COSIPA**. 62^o Congresso da ABM, Vitória (ES). Editado em CD-ROM, páginas 3285 a 3296. 2007.
 - 16 API 5L: **Specification for Line Pipe**. American Petroleum Institute (API), 43rd Edition. 2004.
 - 17 THEIS, H. E.; **Handbook of Metalforming Process**. Marcel Dekker Inc. USA. 1999.
 - 18 KALPAKJIAN, S.; **Manufacturing Process for Engineering Materials**. Addison Wesley Longman Inc. 3rd Edition, 1997.
 - 19 BAUCCIO, M.; **ASM Metals Reference Book**. American Society for Metals. Third edition, p.311. 1993.
 - 20 BAUCCIO, M.; **ASM Metals Reference Book**. American Society for Metals. Third edition, p.113. 1993.
 - 21 NBR 15279:2005; **Perfis estruturais de aço soldados por alta frequência (eletrofusão) – Perfis I, H e T – Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.