



Tema: Produtos metálicos ferrosos

## APLICAÇÃO DE AÇOS MICROLIGADOS DE ELEVADA RESISTÊNCIA MECÂNICA NA ESTRUTURA DO PROTÓTIPO AUTOMOTIVO FÓRMULA SAE DA UNICAMP\*

Érico França Oliveira e Silva<sup>1</sup>  
Marcos Alexandre Stuart Nogueira<sup>2</sup>

### Resumo

O conceito de utilização de aços microligados de elevada resistência mecânica nas estruturas automotivas como forma de reduzir peso, aumentar desempenho, reduzir o consumo de combustível e proporcionar maior segurança, já está bem difundido na indústria mundial. A CBMM vem desenvolvendo um projeto com a equipe da Unicamp que compete na Fórmula SAE como um meio de difundir o conceito da aplicação dos aços microligados para aqueles que serão a próxima geração da tecnologia automotiva. O projeto foi iniciado em 2011 e praticamente todas as peças do protótipo foram trocadas de aço AISI A36 para vários tipos de aços microligados com limite de escoamento superiores a 700MPa. Esse trabalho apresenta exemplos de componentes onde as reduções em massa atingiram até 32%.

**Palavras-chave:** Formula SAE; Aços microligados; Nióbio.

### APPLICATION OF HIGH STRENGTH MICROALLOYED STEELS IN UNICAMP'S FORMULA SAE PROTOTYPE

### Abstract

The concept of using high strength microalloyed steels in vehicle structures as a way to reduce weight, improve performance, reduce fuel consumption and enhance safety is widespread around the world. CBMM has been developing a project with the Unicamp Formula SAE team to raise awareness that microalloyed steels represent the next generation in automotive technology. The project started in 2011 and practically all the AISI A36 prototype parts have been replaced with several high strength steels with strength limits above 700 MPa. This paper presents examples in components where mass was reduced by up to 32%.

**Keywords:** Formula SAE; Microalloyed steels; Niobium.

<sup>1</sup> Departamento de Desenvolvimento de Mercado, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), São Paulo, SP, Brasil; erico.franca@cbmm.com.br.

<sup>2</sup> Departamento de Desenvolvimento de Mercado, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), São Paulo, SP, Brasil; marcos.stuart@cbmm.com.br.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A CBMM apoia os alunos da Engenharia mecânica da Universidade de Campinas, Unicamp, no seu projeto FSAE- Unicamp Fórmula SAE. É uma competição estudantil que reúne as maiores universidades do mundo para definir o melhor protótipo com motor de até 600 cc, numa disputa que envolve o projeto, a produção e o desempenho do protótipo, Figura 1. O principal objetivo dessa competição é estimular os estudantes a utilizarem seus conhecimentos e as competências que necessitarão ter quando forem profissionais nas suas áreas de atuação. Atualmente existem cerca de 500 equipes competindo no mundo nessa modalidade.



**Figura 1** – Protótipo utilizado pela FSAE UNICAMP Fórmula SAE que obteve o vice campeonato no Brasil em 2013

O time da Unicamp foi formado em 2006 e a partir de 2011 passou a ter o patrocínio da CBMM. Além do apoio para a formação dos estudantes, o principal objetivo da CBMM é difundir os conhecimentos e conceitos básicos sobre os aços microligados ao nióbio, materiais cada vez mais presentes no segmento automotivo. A equipe FSAE Unicamp Fórmula SAE tem apresentado resultados de desempenho de destaque e vem se consolidando ano a ano como equipe inovadora e muito competitiva. Inclusive em 2013 receberam a premiação de reconhecimento mundial denominada Swedish Steel Prize – 2013, University Challenge, entregue pela empresa SSAB [1].

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar os aços microligados que foram utilizados em substituição aos aços carbono tanto na estrutura do protótipo quanto em vários dos seus componentes, indicando as correspondentes reduções de massa decorrentes dessa mudança.

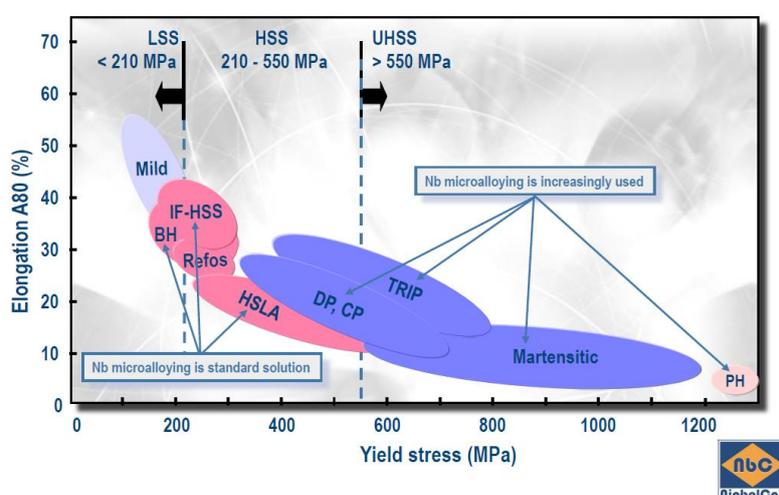
### 1.1 Efeito do Nióbio nos Aços Automotivos

O aço que vinha sendo intensivamente utilizado pela Unicamp era o A36, que apresenta limite de escoamento da ordem de 250 MPa. Foi sendo substituído por aços com limites de escoamento entre 700 e 850 MPa. Algumas outras equipes

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

utilizam os AISI 4130, um aço ligado para tratamento térmico de têmpera, enquanto que outras aplicam fibra de carbono. Uma vez que a Unicamp desejava produzir um protótipo competitivo quanto a desempenho e custos de fabricação, optou pelo aço de elevada resistência mecânica, associando leveza, segurança e baixos custos de produção. Os aços micro ligados apresentam maior facilidade e segurança na soldagem em comparação com o AISI 4130, pois estes apresentam elementos de liga em quantidades significativas para alterar as regiões termicamente afetadas pelo calor na soldagem, podendo se tornar frágeis devido a formação de martensita caso não sejam tomados cuidados extra com tratamentos de alívio de tensões e de revenimento. Os aços microligados, contendo baixos teores de elementos de liga e baixo carbono, são a melhor opção para soldagem.

O nióbio atualmente é utilizado na maioria dos aços automotivos, conforme representado na Figura 2 [2].



**Figura 2-** Aços automotivos e suas relações entre limite de resistência e alongamento [2]

O nióbio refina os grãos austeníticos dos aços na laminação a quente, o único mecanismo de aumenta resistência e tenacidade simultaneamente [3]. O nióbio também aumenta a homogeneidade das microestruturas, o que leva ao aumento de resistência mecânica sem perder a sua capacidade de ser conformado a frio e de receber operações de furação e dobramento [3-7]. Usar materiais cada vez mais resistentes e que possam ser conformados a frio é o grande desafio dos aços automotivos e o nióbio tem contribuído fortemente nas famílias dos aços HSLA, DP, CP e TRIP apresentados na Figura 2. Estes desenvolvimentos levaram a uma intensiva utilização do nióbio nesses materiais automotivos, viabilizando os projetos de redução de peso em busca de um melhor desempenho dos veículos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A tabela 1 apresenta os aços aplicados nos diferentes protótipos da Fórmula SAE e os materiais de elevada resistência utilizados pela equipe da Unicamp. Normalmente são utilizados aços carbono do tipo A36 por simplicidade e facilidade de fornecimento. Em muitos casos, principalmente das equipes norte americanas, são utilizados os aços para têmpera da família dos AISI 4130, pois podem ser obtidos valores elevados de resistência mecânica. São aços ligados ao cromo e molibdênio cuja comparação com um microligado é feito pela fabricante de aços SSAB em

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

folheto técnico [8]. A equipe da Unicamp optou pela utilização dos microligados por apresentarem propriedades muito superiores aos aços carbono, levando a uma redução da massa dos protótipos além de uma maior segurança em serviço e por apresentarem um custo muito inferior aos aços ligados do tipo AISI 4130. Além disso, os microligados são mais facilmente soldáveis que os ligados, ou seja, não apresentam zonas de fragilidade e nem necessitam de tratamentos térmicos posteriores a soldagem, o que torna a fabricação dos protótipos mais produtiva e de menores custos, que são requisitos básicos para a competição da Fórmula SAE e para as produções na vida real. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados pela equipe da Unicamp estão na Tabela 2.

**Tabela 1** – Aços mais utilizados pelas equipes da Fórmula SAE e os aços microligados aplicados pela equipe da Unicamp- Normas ASTM A751: 2008, ASTM E1086: 2008 e ASTM 415:2008

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb
Aço Carbono	0,25	0,50	1,70	0,035	0,035	-	-	-	-	-
AISI 4130	0,30	0,35	0,50	0,035	0,035	1,0	-	0,25	-	-
Domex 700MC	0,063	0,062	1,790	0,017	0,003	-	-	-	0,011	0,056
DOCOL 1000DP	0,152	0,440	1,50	0,016	0,003	-	-	-	-	0,015

Valores indicativos para aço carbono e AISI 4130. Para o Docol e Domex, valores obtidos nos aços utilizados no protótipo.

**Tabela 2** – Propriedades mecânicas dos aços utilizados no protótipo da UNICAMP antes e depois do projeto de aplicação de aços microligados de elevada resistência

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	A (%)
Aço Carbono	260 - 380	360 - 510	26 - 36
Domex 700MC	765	810	20
DOCOL 1000DP	760	1050	12

Ensaio de acordo com ASTM A 370:2010 – Seção 5 a 13

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

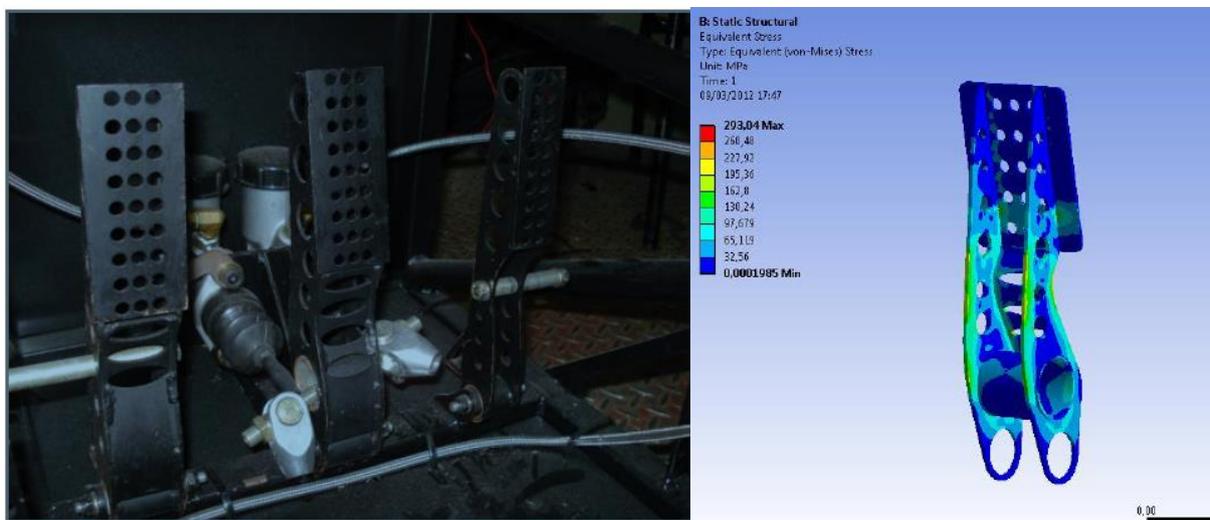
### 3.1 Resultados

Aplicação dos aços microligados em diferentes peças e componentes do protótipo da Unicamp.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

### 3.1.1 Pedais

A aplicação mais simples, mas não menos importante, corresponde aos pedais do protótipo, Figura 3. Produzidos com A36, frequentemente tinham que ser reparados ou substituídos durante os testes ou mesmo durante a competição pois deformavam. A necessidade de ter um protótipo leve e o próprio projeto nas regiões dos pedais limitavam as dimensões que poderiam ser utilizadas, levando a ocorrência dessas deformações. Passaram a utilizar o material Docol 1000DP. Antes da adoção dos materiais de elevada resistência, os pedais eram feitos com chapas de 3mm de espessura. Essas espessuras foram reduzidas para 2 mm com o Docol 1000DP. Essa espessura foi posteriormente reduzida para 1,5mm sem que houvesse qualquer deformação do componente em serviço. A Tabela 3 apresenta as reduções obtidas pela utilização do aço Docol 1000DP nesses pedais e seus componentes. Houve redução total de 32% em relação ao peso inicial dessas pedaleiras com a utilização desses aços micro ligados.



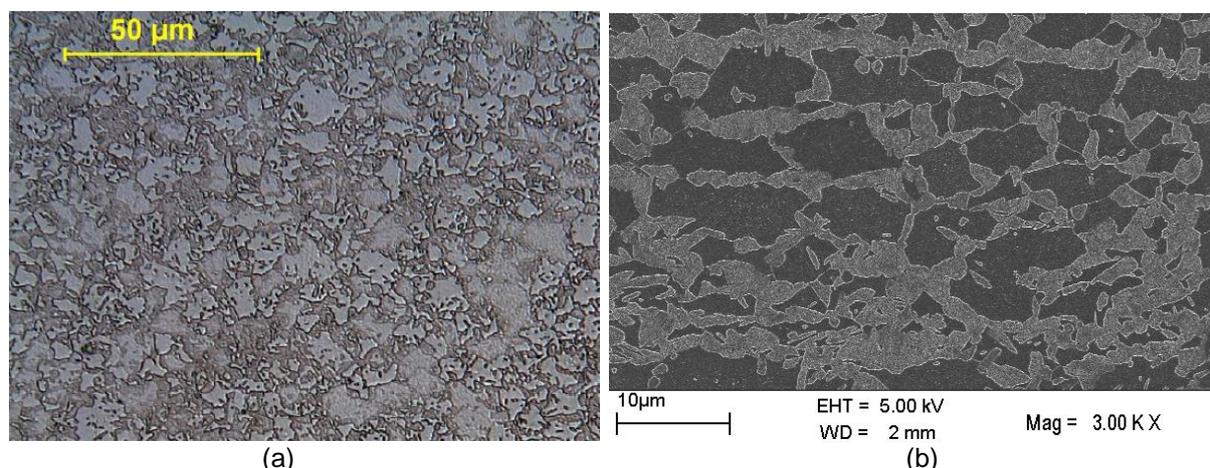
**Figura 3** – Pedais utilizados no protótipo da Unicamp e imagem de simulações feitas nesse componente por meio de elementos finitos ANSYS

**Tabela 3** - Reduções de massa obtidas pela aplicação do aço microligado Docol 1000DP em substituição aos aços carbono A36 nos pedais

	Modelo anterior (kg)	Novo protótipo (kg)	Redução de massa (kg)
Pedal do acelerador	0,45	0,30	0,15
Pedal da embreagem	0,65	0,45	0,20
Pedal de freio	0,65	0,45	0,20
Fixação dos pedais (6 peças)	0,08	0,06	6X0,02=0,12
Base do pedal	1,2	0,8	0,40
Fixação geral (4 peças)	0,05	0,04	4X0,01=0,04
Total	3,71	2,52	1,11

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

O aço aplicado, o DOCOL 1000DP, é um material com duas fases, ferrítico-martensítico, conforme mostrado pela Figura 4. Contém martensita que garante sua elevada resistência mecânica.



**Figura 4** - Aço microligado DOCOL 1000 DP. Imagem obtida por microscopia óptica (a) e eletrônica (b). Material da família dos DP – dual phase, ferrítico – martensítico.

### 3.1.2 Suspensão

A dirigibilidade e o desempenho do protótipo dependem fortemente do projeto da sua suspensão. Essa é uma das aplicações mais críticas de aço, Figuras 5 e 6. São peças de desenhos complexos e que são submetidos a tensões elevadas em uso, sendo um dos itens de segurança do protótipo. Produzidas em A36, apresentavam durante as competições, quebras ou deformações por esforços.



**Figura 5** – Componentes da suspensão do protótipo da UNICAMP

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



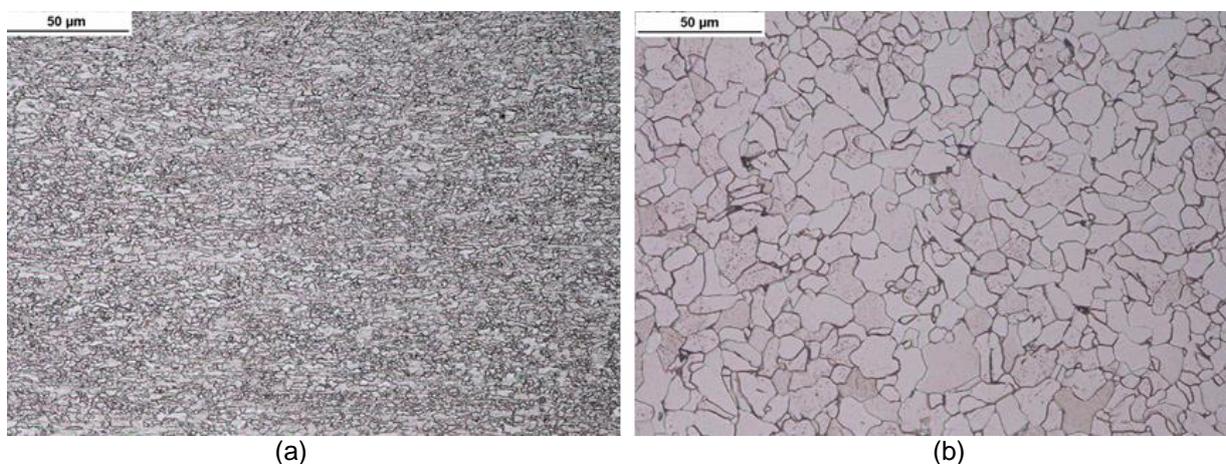
**Figura 6** – Suspensão feita com aço carbono (esquerda) e com aço microligado (direita).

Houve redução de massa de 16% com a aplicação dos aços microligado nesses componentes, Tabela 4.

**Tabela 4** – Redução de massa do suspensão do protótipo devido a aplicação de aço micro ligado Domex 700MC em substituição ao aço carbono A36

	Modelo anterior com aço A36	Modelo com Domex 700MC
Massa (kg)	1,35	1,13
Redução (%)	16	

A Figura 7 mostra a microestrutura do aço Domex 700MC em comparação com a microestrutura de aço carbono que era utilizado no protótipo da UNICAMP. As microestruturas são constituídas de ferrita na sua quase totalidade, com pequenas regiões com perlita. Há uma grande diferença de tamanho de grão. O aço microligado ao nióbio apresenta granulação muito mais fina e homogênea, com tamanho médio de 3,0 µm. Já o aço carbono apresenta um tamanho médio de grão de 9,0 µm.



**Figura 7** – Aço Domex700MC (a) e aço carbono (b) utilizados nas estruturas do protótipo da UNICAMP em diferentes estágios de desenvolvimento. Ferrita com algumas regiões contendo perlita.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

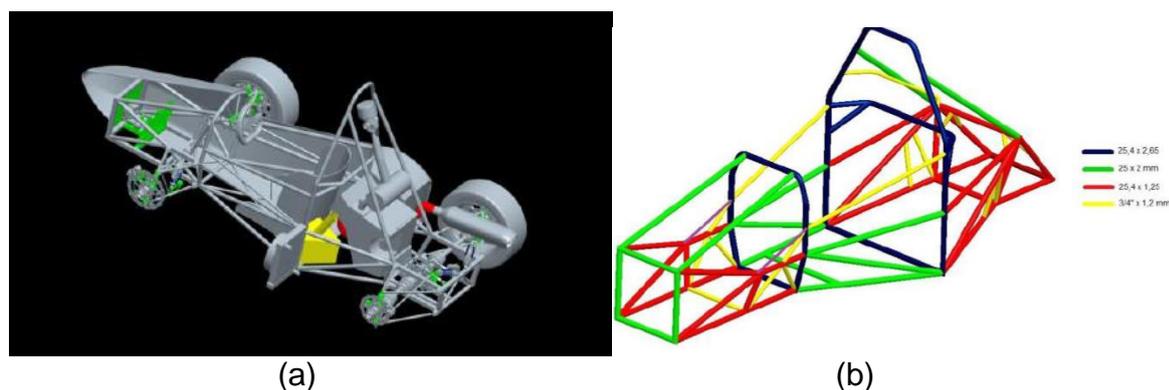
O mesmo conceito aplicado para o mecanismo de suporte da suspensão foi responsável por reduções de massa de 24%, Tabela 5, nesse caso com a utilização do aço DOCOL 1000DP. Foram feitas simulações por elemento finito ANSYS e, mesmo utilizando estrutura com paredes mais finas, o coeficiente de segurança do componente aumenta, pois o limite de escoamento do aço microligado é significativamente maior do que o valor do aço carbono, Tabela 5.

**Tabela 5** - Redução de massa e aumento do coeficiente de segurança de componente de fixação da suspensão devido a aplicação de aço microligado Docol 1000DP em substituição ao aço carbono A36

	Modelo anterior com A36	Modelo com Docol 1000 DP
Espessura da chapa (mm)	3	2
Massa ( kg)	0,205	0,155
Redução de massa (%)	24	
Máxima tensão de projeto (MPa)	227	338
Limite de Escoamento do material (MPa)	250	850
Coeficiente de segurança	1,10	2,51

### 3.1.3 Estrutura do protótipo

A estrutura do protótipo é tubular e o aço carbono foi quase que totalmente substituída por aço Docol 900Y, Figura 8. Apenas os tubos com 25,4 x 2,65 mm permaneceram em aço A36 para manter o protótipo dentro dos padrões estabelecidos pela organização desse programa de competição. A utilização de um aço de maior resistência, além permitir uma redução de 27% de massa, permitiu a aplicação de um desenho diferente para a estrutura do protótipo, o qual proporcionou uma maior resistência a torção do conjunto, Tabela 6. A dirigibilidade do protótipo melhorou com essa alteração de projeto.



**Figura 6** – Estrutura tubular do protótipo com A36 (a) e com o aço Docol 900Y (b). Foram feitas alterações no desenho da estrutura graças a utilização do aço de maior resistência mecânica.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Tabela 6** – Redução de massa e maior resistência a torção da estrutura devido a aplicação do aço microligado Docol 900Y e do novo desenho do protótipo da Unicamp

	Modelo anterior com A36	Modelo com Docol 1000 DP
Massa (kg)	39,8	29,0
Redução de massa (%)	27	
Resistência a torção da estrutura (Nm/ grau)	698	751

Para as estruturas tubulares utilizou-se o aço DOCOL 900Y, um laminado a frio especialmente desenvolvido para tubos contendo 900 MPa de limite de resistência. É microligado até 0,06% de nióbio, o que lhe garante microestrutura fina e homogênea.

### 3.2 DISCUSSÃO

Aumentar a resistência mecânica dos aços, o princípio básico para a obtenção dos benefícios de redução de massa, pode ser feito de diversas formas. A mais simples é aumentar o teor de carbono do material. O carbono aumenta a resistência por meio da obtenção de fases mais resistentes como bainita e martensita mas leva também a uma redução da tenacidade do material e maiores dificuldades para sua soldagem [9]. As estruturas ficam mais frágeis, um risco impensável para um protótipo de competição. A utilização de microligados ao nióbio, devido ao seu forte efeito de refino de grão, proporciona o aumento de resistência sem nenhum prejuízo de outras propriedades, aumentando a tenacidade e a soldabilidade, pois podem ser utilizados aços com menores teores de carbono. Os aços de maiores resistências aqui utilizados, contém teor de carbono abaixo de 0,15%, sendo que o Domex apresentava teor de carbono de 0,063%, o que lhes garante uma excelente soldabilidade.

Devido aos valores bem superiores de resistência desses microligados em relação aos aços carbono, sempre se pode reduzir massa e mesmo aumentar os coeficientes de segurança, determinados por análises por cálculo de esforços por elementos finitos. O limite de resistência de um A36 varia de 280 – 380 MPa enquanto que do DOMEX 700 MC e do DOCOL 1000 DP são da ordem de 750 MPa, valores muito superiores.

Além dos ganhos obtidos pela substituição por aços de maior resistência, essa substituição pode levar a outras melhorias quando são considerados o projeto e desenho do protótipo. Esse foi o caso da estrutura tubular, uma vez que as alterações no seu desenho proporcionaram um aumento da sua resistência a torções, fator fundamental para a estabilidade do veículo.

### 4 CONCLUSÃO

A utilização de aços de elevada resistência microligados ao nióbio em substituição aos aços carbono, deu condições para que o protótipo da Fórmula SAE da Unicamp

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



tivesse reduções de massa de diversos componentes e da sua própria estrutura em valores de:

- sistema de pedais – 32%
- suspensão – 16%
- fixação da suspensão – 24%
- estrutura tubular – 27%

Além dessas reduções de massa, houve aumento significativo da segurança desses componentes, como foi exemplificado para o sistema de fixação da suspensão que dobrou o seu coeficiente de segurança.

No caso da estrutura tubular, com os aços de maior resistência mecânica, foi possível usar novo desenho, o que proporcionou maior estabilidade ao protótipo, com aumento da sua resistência à torção.

O aço microligado apresenta menor tamanho de grão médio e maior homogeneidade das microestruturas.

## REFERÊNCIAS

- 1 Sanchez AB, Pavani IT, Fantelli FC, Guardia L, Nogueira AS - Use of high strength steel to improve the performance of FSAE UNICAMP Team student racecar- Swedish Award Student papers, SSAB, 2013.
- 2 Morhbacher H. The use of high strength steel in recent car body designs, CBMM paper, 2011
- 3 Mohrbacher H. Effects of niobium microalloying on microstructure and properties of hot-dip galvanized sheet. In: The Asia-Pacific Galvanizing Conference; nov. 2009; Jeju, Korea. 2009.
- 4 Bleck W, Ratte E. Fundamentals Of Cold Formable Hsla Steels, Rwth Aachen University, Germany. In: International symposium on niobium microalloyed sheet steel for automotive application. TMS 2006.
- 5 Olsson K, Gladh M, Hedin JE, Larsoon J. Microalloyed High Strength Steels for Reduced Weight and Improved Crash Performance in Automotive Applications. In: International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steel for Automotive Application. TMS 2006.
- 6 Granbom, Y. Influence of niobium and coiling temperature on the mechanical properties of a cold rolled dualphase steel. La Revue de Métallurgie-CIT. 2007;April.
- 7 Sugimoto KI.et al - Applications of Niobium to Automotive Ultra High-Strength TRIP-Aided Steels with Bainitic Ferrite and/or Martensite Matrix. Materials Science and Technology. 2007.
- 8 Practical testing of Chro Moly 4130 tubes and Docol 800 DP-tubes. Knowledge Service Center, SSAB, 2010.
- 9 Graville BA. Cold cracking in welds in HSLA steels. Proc. Int. Conf. American Society for Metals. 1976; Nov.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.