

ESTUDO DOS EFEITOS ADIÇÃO DE NIÓBIO NAS LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS PARA AÇOS ESTRUTURAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

GABRIEL LUKIANTCHUKI DE MELO OLIVEIRA (IC);

JAN VATAVUK (ORIENTADOR).

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

O crescimento da população mundial, combinado com as altas taxas de urbanização leva a engenharia a estar sempre inovando e buscando novos conhecimentos para satisfazer as diversas demandas da sociedade, seja com carros mais rápidos, edifícios mais altos ou até métodos de produções mais eficientes. A engenharia mais eficaz e dinâmica é uma tendência para os próximos anos de desenvolvimento tecnológico, as soluções trazidas possibilitarão uma melhor convivência do ser humano com o meio ambiente.

Neste artigo se discute brevemente as características e vantagens de uma inovação dentro do setor da engenharia de materiais: as ligas metálicas ferrosas que passam por processos de microligamento com nióbio. Estas ligas em especial, por sua vez, trouxeram muitas possibilidades de otimização de produtos que levam em sua composição peças metálicas. Dentre os inúmeros setores onde esta tecnologia pode ser aplicada, o foco deste estudo está relacionado construção civil. Para o melhor entendimento dos benefícios do aço de alta resistência microligado ao nióbio, realizou-se uma consulta às memórias de projeto cedidas gentilmente pela Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia (CBMM). Em posse destas informações é possível se discutir as vantagens do emprego destas ligas metálicas na construção civil, como alternativa métodos tradicionais de construção metálica.

Palavras-chave: Nióbio; Aço estrutural; Alta Resistência.

ABSTRACT

The growth of the world population combined with the high rates of urbanization leads engineering to be always innovating and seeking new knowledge to meet the diverse demands of society, be it with faster cars, higher buildings or even more efficient production methods. The most effective and dynamic engineering is a trend for the next years of technological development, the solutions brought will enable a better coexistence of the human being with the environment.

This article briefly discusses the characteristics and advantages of an innovation within the material engineering sector: ferrous metal alloys that undergo microalloying processes with niobium. These special alloys, in turn, have brought many possibilities of optimization of products that take in their composition metallic pieces. Among the many sectors where this technology can be applied, the focus of this study is related to civil construction. For a better understanding of the benefits of niobium microalloyed high strength steel, a consultation was made to the design memories courtesy of Brazilian Mining and Metallurgy Company (Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia - CBMM). In possession of this information it is possible to discuss the advantages of the use of these metal alloys in civil construction, as an alternative traditional methods of metal construction.

Keywords: Niobium, Structural Steel and High Resistance.

1. Introdução

A crescente demanda por espaço nas grandes cidades pressiona o mercado da construção civil a produzir edifícios cada vez mais altos e eficientes em termos de menor impacto ambiental, adequação ao contexto urbano e outras propostas socioeconômicas; o tempo compreendido entre os serviços de pré-obra e entrega do edifício pronto também tem que ser reduzido para que se possa ter menos impactos no ambiente de construção. Isso acrescenta mais desafios para o engenheiro estrutural, que precisará conciliar todas as competências funcionais estruturais requeridas, aspirações do cliente, exigências dos órgãos reguladores e ainda o design idealizado pela arquitetura, pretendendo obter melhor custo/benefício.

No âmbito da competência estrutural, existe um grande número de pontos a serem atendidos. No geral, toda a composição estrutural deve ser forte o suficiente para poder resistir à todas as cargas a qual será submetida, bem como tem de ser rígida o suficiente para não ceder aos esforços axiais provocados pelo vento e chuva, e ainda, robustas para não se abalar com catástrofes naturais mais graves, como terremotos; e duráveis, para servirem à sociedade por grande período de tempo.

Construções de concreto armado ou construções de metal, são submetidas à muitas cargas e esforços axiais ao longo de sua existência, mas graças ao avanço na tecnologia da produção de metais, hoje contamos com características mecânicas superiores aos seus antecessores, que podem suprir essas diversas demandas de projeto. Os aços microligados à pequenas adições de Nióbio satisfazem estes requisitos.

A China tem estado na liderança da produção de metal por 17 anos (China Steel Construction Society, p. 45, 2009.), por isso, a preocupação com a qualidade do refino do metal, com o meio ambiente, peso, performance contra abalos sísmicos também tem aumentado. As previsões indicam que nos próximos 10 anos a China terá o maior número de arranha-céus e estruturas de grandes espessuras (China Steel Construction Society, p. 67, 2010.), e o uso de aço estrutural micro ligado ao Nióbio aumentará proporcionalmente. A tabela a seguir exemplifica o crescente uso de metal em comparação à produção total de aço, referente aos anos compreendidos entre 2009 e 2011.

Ano	Produção de Metal (em milhões de toneladas)	Consumo de metal para construções metálicas (em milhões de tonelada)	Proporção (%)
2009	565	23	4.1
2010	626	26	4.2
2011	683	30	4.4

Tabela 1. Produção e consumo de metal para construções nos anos de 2009 a 2011 (China Steel Construction Society, 2010).

Por construções metálicas estão inclusas obras como: pontes, arranha-céus, trilhos, usinas, entre outros. De acordo com a Sociedade Estatística de Construções Metálicas da China as proporções de aplicação desse metal estão de acordo com a tabela a seguir.

Ano	Prédios	Pontes	Mastros de Torre	Outros
2009	54	9	7	30
2010	66	11	6	17

Tabela 2. Proporções em porcentagem, de acordo com as aplicações, nos anos de 2009 e 2010 (China Steel Construction Society, 2010).

Os dados das tabelas 1 e 2 nos confirmam as tendências previstas no ano de 2005 para a produção de aço e aplicação do mesmo, com o crescente uso em arranha-céus e pontes, as construções metálicas terão de ser repensadas de modo a serem otimizadas.

Dentro de 10 anos a China contará com uma população de 1.318 arranha-céus, sendo que pelo menos 700 estão em fase de planejamento e construção, o que não só torna a China um parque tecnológico de construção civil, mas como também um mercado em potencial para o desenvolvimento da tecnologia em estruturas metálicas. De acordo com as análises da Sociedade de Construções Metálicas Chinesas (CSCS) o uso de aço-carbono tem sido substituído cada vez mais e mais por aços de alta performance estrutura (W. B. Morrison, 2000).

Devida à intensiva atividade sísmica e grandes tensões a serem suportadas, é necessário que o aço estrutural tenha alta capacidade de escoamento, alta plasticidade, elevada dureza e seja economicamente viável economicamente, e é nesse contexto que as ligas micro-ligadas ao nióbio entram em cena, pois como verificado ao longo desse artigo, essas ligas especiais atenderão com maior satisfação a esses requisitos.

2. Desenvolvimento do Argumento

O concreto protendido vem sendo usado nas construções por séculos, esse tipo de construção é muito popular, principalmente porque a maioria dos materiais constituintes do concreto armado é encontrado de maneira fácil e próxima ao local de aplicação (com exceção de cimento e aditivos). Apesar de algumas construções usarem concreto de alta resistência, na ordem de 100MPa de resistência à compressão (F_{ck}), também comumente o concreto com ' F_{ck} ' na ordem de 25 e 40 MPa é utilizado, variando conforme a necessidade de projeto. No entanto, por mais elevada que seja a resistência F_{ck} à compressão, a resistência à tração é muito baixa, na ordem de 1/10 de sua resistência à compressão. Diferente de materiais metálicos, o concreto é um material frágil, não tem a capacidade de se deformar sem deixar fissuras, que é a característica principal de materiais dúcteis, portanto, se torna necessário a prática de reforçar a estrutura de concreto com barras que irão resistir aos esforços de tração. Essa técnica é a essência do concreto armado, fundamental para peças de concreto como vigas e vigas-colunas que serão solicitadas quanto aos esforços de tração. Também em colunas, as barras de reforço ajudarão a resistir aos esforços internos solicitantes, então, uma vez que, quase todos os tipos de construção em concreto incluem provisões para inclusão de barras metálicas de reforço, pensar em construções de concreto implica em pensar em metais para reforço dos mesmos, nos levando a entender a relevância da aplicação de barras metálicas na construção.

Então, isolando o conteúdo "concreto" e pensando somente no uso dos materiais metálicos dentro do concreto protendido, faz sentido buscar materiais cada vez mais eficazes para melhorar o desempenho das estruturas, sem comprometer o núcleo estrutural, uma vez que o metal dentro do concreto, em grandes proporções, corresponderá a uma grande parte da obra. Os componentes metálicos que reforçarão as peças de concreto passam por inúmeros ensaios de laboratório para que

satisfaçam as especificações impostas pelas normas de cada país, de modo a garantir a segurança e desempenho correto na sua aplicação.

De maneira geral, o aço produzido para concreto armado tem que passar em vários ensaios como resistência à tração, dobramento, alongamento, etc., antes de serem empregados no concreto. Recentemente, na América do Norte, foram produzidas barras de reforço para concreto armado microligadas ao nióbio (sendo as composições de nióbio adicionadas de vanádio) que posteriormente foram ensaiadas quanto sua resistência a tração e carga de rompimento (S. G. Jansto, 2011). Amostras de 20 mm de diâmetro em média foram cortadas da mesma barra de origem, cujas especificações químicas estavam dentro dos parâmetros referentes ao certificado "mill", documento de garantia de qualidade usado na indústria metalúrgica que certifica as propriedades químicas e físicas dentro de padrões internacionais (ASTM International, 2007). Para este mesmo ensaio, foram utilizadas para fins comparativos barras microligadas apenas com Vanádio. O programa de testes considerou as barras idênticas quanto à forma geométrica e resultados obtidos podem ser observados na figura 1, que expressa dois diagramas de tensão por deformação sobrepostos das duas barras ensaiadas em questão. No eixo horizontal do gráfico tem-se os valores correspondentes à deformação (dividida pela deformação limite da região elástica, de modo a tornar o gráfico adimensional), enquanto no eixo vertical tem-se valores correspondentes à tensão aplicada ao longo do tempo (valores também divididos pela tensão máxima que limita a região plástica, de modo a tornar os valores do gráfico adimensionais).

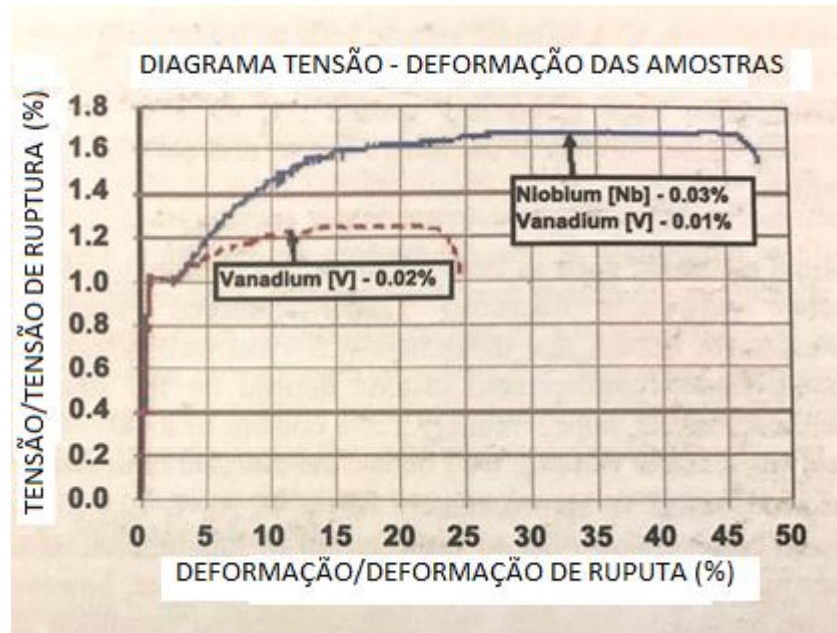


FIGURA 1. Diagrama de tensão-deformação para barras de reforços microligadas ao vanádio e nióbio (S. G. Jansto, 2011).

Os resultados apresentados na figura acima indicam valores de resistência e alongamento superiores para o aço contendo 0,03% de Nióbio [Nb] e 0,01% de Vanádio [V] (traçado azul), com relação entre limite de resistência e limite de escoamento de 1.68, propriedades muito superiores às obtidas pela liga baseada unicamente em vanádio [V] (traçado vermelho).

Dentre os fatores que influenciam no desempenho mecânico de uma barra metálica pode-se citar a área transversal como um fator importante a ser levado em consideração para posteriores análises. A barra baseada na liga contendo nióbio possui propriedades de resistência superiores ao material tradicional, permitindo utilizar secção transversal menor e comprimento reduzido para o mesmo nível de carregamento mecânico (Q. Yu et al., 2004).

Uma vez atingidos valores que satisfazem as necessidades da construção armada com uma quantidade menor de aço a ser empregado, pode-se otimizar o modo de produção de grandes galpões industriais e arranha-céus.

Entendendo isso, a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), líder mundial em produção e extração de nióbio, usou desta tecnologia para otimizar seus processos na ampliação de uma de suas plantas industriais de sintetização de Nióbio em Araxá-MG, a Companhia contou com a colaboração da CODEME Engenharia, uma das principais construtoras brasileiras especializadas em estruturas

metálicas, que foi responsável pela fabricação do aço ASTM A572 composto com nióbio, majoritariamente utilizado nessa obra, em substituição ao tradicional aço ASTM A36. A partir dos resultados dos estudos da nova liga, teve início a otimização do design estrutural atendendo as necessidades de resistência de maneira mais eficiente, com redução do tempo de fabricação e investimento. O edifício da fábrica de sinterização, conhecido como Sinter Plant II, faz parte de um projeto para aumentar a produção da planta da CBMM para 150.000 toneladas por ano (SILVESTRE. p.34, 2011). A Sinter Plant II abriga um maquinário pesado, o processo de produção requer um fluxo intenso de materiais nos níveis vertical e horizontal. Nas figuras 2 e 3 pode-se ver o modelo da estrutura que foi usada na ampliação, bem como os formatos das peças utilizadas (*shape type*), tipo de aço (*steel type*) e peso (*weight*) em quilogramas.

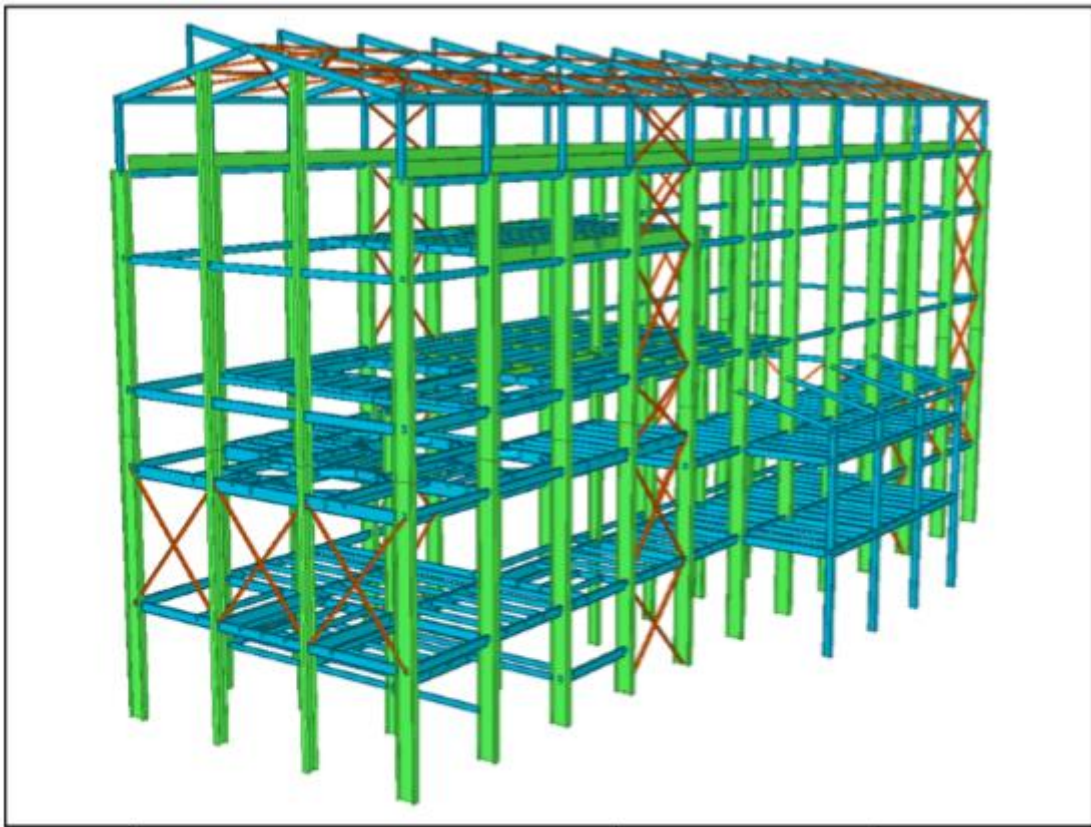


FIGURA 2. Modelo gráfico final, prévia da estrutura sem fechamentos da planta de expansão Sinter II.

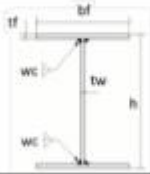
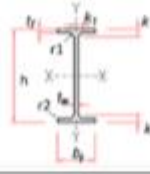
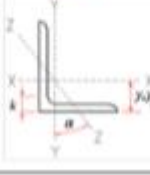
Legend	Shape Type		Steel Type	Weight (kg)
		H Welded shapes	ASTM A572 Gr. 50 Microalloyed steel	156.809
		W Hot-rolled shapes	ASTM A572 Gr. 50 Microalloyed steel	104.282
		Angles Hot-rolled shapes	ASTM A36 Regular carbon steel	22.614

FIGURA 3. Especificações e formas dos metais representados na imagem 2. [7]

Pela combinação das duas imagens verifica-se que toda a expansão foi planejada para ser executada em aço A572 Gr. 50, sendo esta a liga metálica microligada ao nióbio, enquanto menos de 5% da estrutura é composta pelo tradicional aço-carbono manganês A36. Perfis em H e W foram utilizados para esta empreitada.

Para fins comparativos gerais, a tabela 3 abaixo expõe as especificações padrões de cada tipo de aço utilizado na expansão, os separando por tipo e aplicação.

Standard Designation	Application	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Chemical composition (%)					
					C	Mn	Si	P	S	Nb
ASTM A 572 Gr.50	Welded shapes	> 345	> 450	> 21	< 0,23	0,45 - 1,35	< 0,40	< 0,04	< 0,05	0,005 - 0,05
ASTM A 572 Gr.50	Hot-rolled Shapes	> 345	> 450	> 18	< 0,23	0,45 - 1,35	< 0,40	< 0,04	< 0,05	0,005 - 0,05
ASTM A36	Welded shapes	> 250	400 - 550	> 20	< 0,25	0,8 - 1,20	0,15 - 0,40	< 0,04	< 0,05	-
ASTM A36	Hot-rolled Shapes	> 250	400 - 550	> 20	< 0,26	-	< 0,4	< 0,04	< 0,05	-

Tabela 3: Especificações padrões (ASTM International, 2007)

Apenas por simples observação da tabela 3, consegue-se dados que comprovam a superior eficácia mecânica do aço A572. O patamar de escoamento

(*yield strength*) expresso em MPa, a tensão de ruptura (*tensile strength*) e a porcentagem de alongamento (*elongation*) estão representados na tabela 3 para as composições químicas (*chemical composition*) listadas na sequência da linha de cada tipo de aço, a adição de nióbio pode variar de 0,005% a 0,05% da composição total da liga.

Para demonstrar e validar a comparação entre as características descritas na tabela padrão de especificações para cada tipo de aço, a CBMM realizou ensaios com amostras e condições semelhantes de aços A572 e A36 que serão apresentados. [7]

Nos ensaios de tensão-deformação, os equipamentos responsáveis por tracionar as amostras plotaram os gráficos expressos na Figura 4, onde foram observados resultados coerentes e dentro dos padrões ASTM. As conclusões obtidas desses ensaios são semelhantes às conclusões do mesmo ensaio mostrado anteriormente (figura 1) válido para as ligas metálicas compostas apenas por vanádio e àquelas compostas de vanádio adicionado de nióbio.

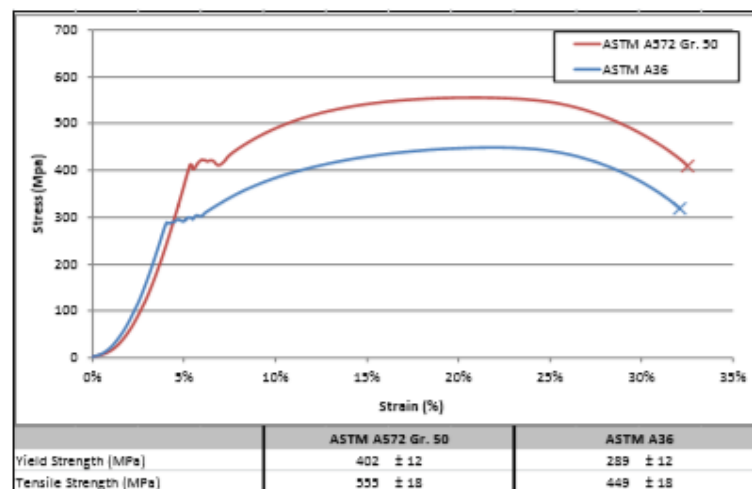


FIGURA 4. Curvas de tensão-deformação para ligas microligadas ao nióbio (ASTM A572) e aço carbono manganês (ASTM A36), no eixo horizontal, tem-se a porcentagem de alongamento com relação ao tamanho original enquanto no eixo vertical tem-se a tensão aplicada nas amostras em MPA. [7]

O aço A572 apresentou patamar de escoamento de 402 (± 12) MPa e tensão limite de resistência de 555 (± 18) Mpa, enquanto o aço carbono manganês comum (A36) se mostrou inferior, apresentando patamar de escoamento de 289 (± 12) MPa e tensão limite de resistência de 449 (± 18) Mpa.

Também foram realizados testes de impacto, utilizando-se do pêndulo de Charpy para obtenção de resultados consistentes, na temperatura de (26°C) os testes foram realizados de acordo com as normas padronizadas para avaliar a dureza das amostras. A tabela 4 mostram os resultados dos ensaios comparativos dos testes de impacto.

Samples	ASTMA572 Gr.50 Toughness (J)	ASTMA36 Toughness (J)
1st test	179 ± 2	105 ± 2
2nd test	155 ± 2	111 ± 2
3rd test	169 ± 2	108 ± 2
Average result	168	108

TABELA 4: Energia absorvida (toughness) antes da fratura no teste de Charpy.

Três testes foram realizados consecutivamente para três amostras diferentes, o aço de alto desempenho A572 Gr.50 obteve em média capacidade de absorção de 168J antes de fraturar, o que é 60J (em média) a mais do que a outra opção convencional de aço A36. A dureza está fortemente ligada ao arranjo molecular do material em questão, a fim de verificar isso, análises microscópicas foram feitas para entender a microestrutura de ambas as amostras e os resultados expressos na figura 5.

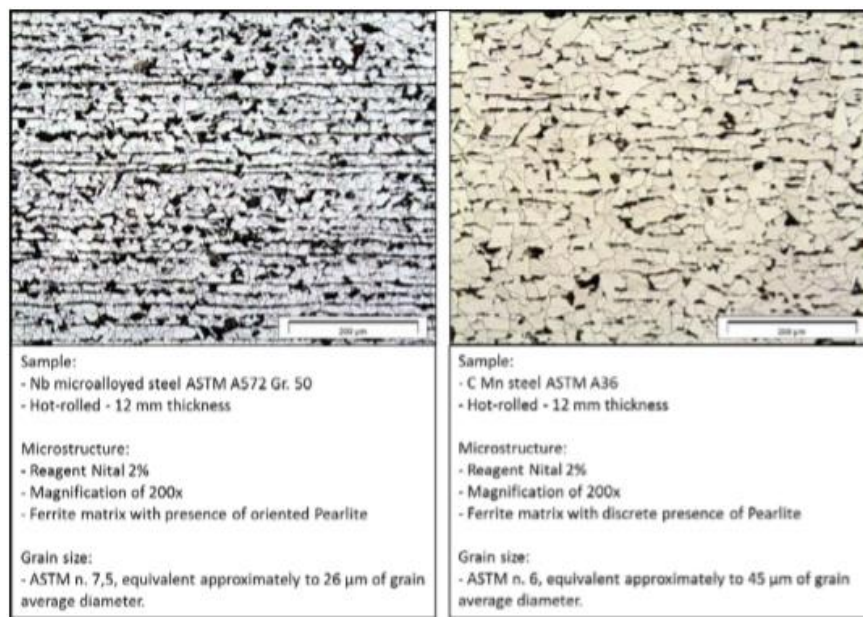


FIGURA 5: Microestrutura bandeada constituída por ferrita (região clara) e perlita (região escura). (K. Ichikawa, M. Fujioka, R. Uemori and A. Yoshie, 2011).

A obtenção de um menor grão obtido no aço A572 aliado com um tratamento térmico adequado são as principais razões para que este se apresente em vantagem com relação às suas propriedades mecânicas dentre os demais aços. A expressão matemática que relaciona a resistência ao escoamento ao tamanho de grão médio dos metais devida a equação de Hall-Petch está apresentada a seguir:

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot d^{-0,5}$$

Onde:

d - Diâmetro médio dos grãos;

σ_0 e k constantes do material.

A expressão acima sugere que quanto menor o tamanho de grão do material metálico, maior o seu limite de escoamento, propriedade de suma importância nos cálculos estruturais, pois via de regra, as tensões as quais estão sujeitas a estrutura nunca podem ultrapassar o limite de escoamento do material, caso contrário a estrutura em questão viria a apresentar riscos de segurança.

Com os ensaios realizados e especificações mecânicas coletadas, os engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura da planta de expansão re-projetaram a mesma estrutura em aço ASTM A36, para fins comparativos, daqui em diante entende-se a separação dos projetos em 'A' e 'B', sendo o projeto A o edifício atual com estrutura em aço de alta resistência (aço microligado ao nióbio, ASTM A572 Gr. 50) e o projeto B, o edifício hipotético com estrutura composta com o comum aço carbono mangânes (ASTM A36).

Para a metodologia de cálculo aplicada, foram considerados os mesmos padrões de cálculo entre as duas situações, bem como foram mantidos todos os aspectos em termos de carga aplicada, área de construção interna, volume, extensão, altura, comprimento e largura. Todas as informações com respeito às especificações dos materiais foram retiradas das tabelas anteriores já apresentadas e serviram como base para calcular a estrutura do edifício nas duas situações de projeto. Para o projeto hipotético B, foi calculado cada elemento para se equiparar a mesma resistência de carga do projeto atual A. Considerando todos os aspectos geométricos e físicos das peças, bem como todo o processo de produção que resulta no material hipotético para o projeto B, envolvendo fabricação, transporte instalação, etc., e comparando isso com o existente estudo do projeto A, pode-se observar resultados expressivos.

O primeiro aspecto a ser avaliado foi o design necessário para que as peças do projeto B satisfizessem as necessidades da obra. Devido ao uso do A36 que possui menor resistência mecânica, quase todos os elementos tiveram suas dimensões aumentadas em comparação com o projeto A, vigas e colunas tiveram que ampliar suas áreas de seção transversal para suprir as demandas de projeto estrutural, a figura 6 abaixo mostra com precisão o corte da seção transversal das vigas para suporte dos esforços axiais, vê-se a diferença entre as dimensões necessárias para suportar a mesma sobrecarga da mesma estrutura em questão.

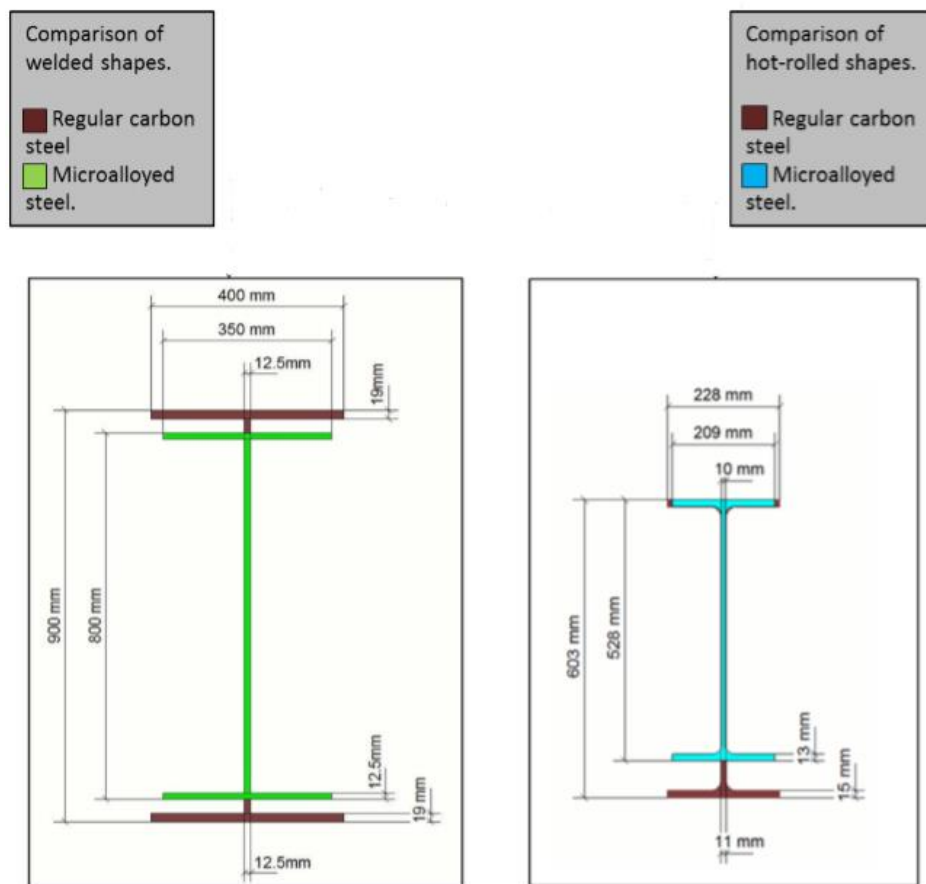


FIGURA 6: Comparação das áreas das seções transversais entre o A572 (figura à direita) e o A36 (figura à esquerda). [7]

Como esperado houve uma redução significativa na altura (na ordem de 30%) nas peças que foram compostas com adição de até 5% de nióbio, também houve uma redução do comprimento das peças que perpendicularam o eixo vertical, se encurtando em quase a metade do comprimento em comparação com as peças feitas em aço A36, pois nessas condições geométricas ambas suportam os mesmos esforços axiais solicitantes.

A alteração na dimensão das peças impactam diretamente em outra grandeza escalar, o peso. Pensando no processo de produção como um todo, alterar as dimensões de uma peça metálica implicam também em alterar a produção desse aço. A CBMM interessada em entender o quanto de peso foi reduzido e o quanto foi a produção de aço foi alterada, produziu as tabelas 4 e 5, que mostram em detalhes por peça estes aspectos.

Project A High strength steel (ASTM A572 Gr. 50)		Project B Regular carbon steel (ASTM A36)		Shape type	Weight reduction from B to A (%)
Shape	Linear weight (kg/m)	Shape	Linear weight (kg/m)		
W310x44.5	44,5	W360x64.0	64,0	Beam	30
W200x26.6	26,6	W250x38.5	38,5	Column	31
W360x110.0	110,0	W610x155.0	155,0	Column	29
800x350/350x19.00/19.00x12.50	179,2	900x400/400x19.00/19.00x19.00	247,9	Column	28
800x350/350x12.50/12.50x12.50	144,7	900x400/400x19.00/19.00x12.50	203,9	Column	29
500x350/350x12.50/12.50x12.50	115,3	600x250/250x16.00/16.00x22.40	162,7	Column	29
500x350/350x16.00/16.00x12.50	133,8	600x250/250x22.40/22.40x22.40	185,5	Column	28
700x300/300x22.40/22.40x9.50	154,4	900x300/300x25.00/25.00x9.50	181,1	Beam	15
W150x18.0	18,0	W150x18.0	18,0	Beam	0
W250x44.8	44,8	W250x44.8	44,8	Beam	0
W410x75.0	75,0	W530x92.0	92,0	Beam	18
W530x92.0	92,0	W610x113.0	113,0	Beam	19
W610x113.0	113,0	W610x155.0	155,0	Beam	27
W530x82.0	82,0	W610x101.0	101,0	Beam	19
W410x60.0	60,0	W530x72.0	72,0	Beam	17
W200x19.3	19,3	W310x21.0	21,0	Beam	8
W360x44.0	44,0	W460x52.0	52,0	Beam	15
W250x25.3	25,3	W360x32.9	32,9	Beam	23
W410x53.0	53,0	W530x66.0	66,0	Beam	20
W310x28.3	28,3	W310x38.7	38,7	Beam	27
W310x44.5	44,5	W460x52.0	52,0	Beam	14
600x300/300x16.00/16.00x8.00	111,0	800x250/250x19.00/19.00x8.00	122,4	Beam for crane rolling	9

TABELA 5: Tabela de peso por metro e comparativa entre aço-carbono manganês e aço de alta resistência. [7]

Nas duas primeiras colunas temos listado todos os pesos por metro linear de todas as peças do projeto A que foram utilizadas para compor a estrutura da figura 2, enquanto nas colunas centrais temos especificado para os mesmos modelos de peças os pesos lineares de acordo com a área de seção transversal aprensetada para suprir as necessidades estruturais no projeto B. As duas últimas últimas colunas expressam a função estrutural de cada peça listada e a redução de peso linear em porcentagem que foi obtida comparando as colunas anteriores.

As maiores diferenças são expressas onde as peças tem dimensões maiores, fazendo com que a utilização do aço A572 de alta resistência acarrete em diminuir o

peso linear da estrutura em até 30% em alguns trechos. Tendo esses valores expressos em metros lineares, pode-se agora utilizar os dados de projeto mencionados na imagem dois e gerar uma tabela comparativa de peso entre os modelos de projeto A e B.

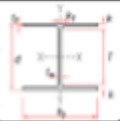
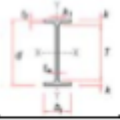
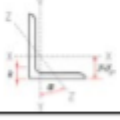
Shape type		Project A	Project B	Difference (kg) B - A	Difference (%) Reduction in consumption adopting Project A
		Weight (kg) ASTM A572 Gr. 50 High strength steel	Weight (kg) ASTM A36 Regular carbon steel		
	H type - welded shapes	156.809	210.633	53.824	26
	H type - hot rolled beams	104.282	129.255	24.973	19
	L type - hot rolled beams	22.614	22.614	-	0
Total		283.705	362.502	78.797	22

TABELA 6: Comparação do consumo de aço. [7]

Com os dados de projeto foi verificado o peso real para cada tipo de peça empregada no projeto atual A e o hipotético B, e comparando os dois nos seus totais, conseguimos obter uma redução de 22% no peso total da estrutura, o que representa 78,798 toneladas a menos de aço adotando o projeto A como executivo.

Quando se pensa em quase 79 toneladas a menos de aço produzidas e conseguimos cumprir com as necessidades do projeto estrutural, automaticamente surgem muitos benefícios indiretos advindos dessa economia, nas recentes tendências econômicas e ambientais não há como se pensar em construções de grande porte sem levar em consideração os impactos ambientais que estas vão acarretar do começo ao fim das obras. O alto consumo de combustíveis fósseis, bem como seus meios de extração e preparo para ser utilizado nas indústrias siderúrgicas, é um dos principais fatores de custo na produção de metais, fazendo da sustentabilidade um assunto não só ambiental mas também econômico.

Os aços estruturais microligados com nióbio oferecem a oportunidade de reduzir o peso total de uma determinada estrutura em comparação com uma construção de aço não microligada.

Para quantificar essa redução, temos expresso os valores atrelados à emissão de Dióxido de carbono (CO₂) listados na tabela 5, onde se pode entender as grandezas de economia que são feitas quando se usa o aço de alta resistência como alternativa às vias tradicionais de aço. Para a obtenção de um valor final de redução das emissões de CO₂ quando se utiliza aço microligado foram utilizados para comparação as quantidades calculadas de peso dos projetos A e B, onde no projeto A temos a demanda de produção de 284 toneladas de aço de alta resistência enquanto no projeto B temos uma demanda maior de 363 toneladas de aço carbono. Para a produção de aço ser realizada, recursos naturais são utilizados para gerar o produto final, o custo da energia consumida na produção é um fator importante a ser considerado no processo como um todo, a economia dessa energia representa um grande ganho para as siderúrgicas, a tabela 6 expressa esses consumos para análise. Em cada processo da produção de aço foi listado o consumo unitário por tonelada de energia em GigaJoules (GJ) e depois aplicado às quantidades previstas em projeto.

Production line	Reference	Project A (HSS)	Project B (C steel)	Reduction = B - A
	CO ₂ Emissions (kg / t steel)	Total CO ₂ Emissions for 284 t steel (kg)	Total CO ₂ Emissions for 363 t steel (kg)	Reduction in CO ₂ Emission (kg)
Coke Oven	51	14.512	18.549	4.037
Blast Furnace	1.000	284.000	363.000	79.000
BOF	245	69.495	88.826	19.331
V Degas/Ladle Met	39	10.962	14.012	3.049
Cont Cast	20	5.623	7.187	1.564
Hot Rolling	189	53.534	68.426	14.892
Pickling	77	21.925	28.024	6.099
TOTAL	1.620	460.052	588.024	127.972

TABELA 5: Emissões de Dióxido de carbono. [4]

Como resultado final da comparação quantitativa da emissão de carbono temos o valor de 127.972 Kg de dióxido de carbono que não virão a ser lançados na atmosfera quando a escolha de aço é o previsto no projeto A, causando um menor impacto ambiental na camada de ozônio e diminuindo a agressão à qualidade do ar na atmosfera. Há também os impactos ambientais e custos devido a necessidade do

transporte de material da siderúrgica para a obra, com uma diminuição de quase 79 toneladas de aço para ser empregado na obra, menos caminhões serão usados para mobilizar o material, consecutivamente menos mão de obra para transporte e instalação também serão necessários.

Production line	Reference	Project A (HSS)	Project B (C steel)	Reduction = B - A
	Energy consumption (GJ / t steel)	Total CO2 Energy consumption for 284 t steel (GJ)	Total CO2 Energy consumption for 363 t steel (GJ)	Reduction in Energy consumption (GJ)
Coke Oven	3,89	1.105	1.412	307
Blast Furnace	12,48	3.544	4.530	986
BOF	1,02	290	370	81
V Degas/Ladle Met	0,72	204	261	57
Cont Cast	0,34	97	123	27
Hot Rolling	2,67	758	969	211
Pickling	1,40	398	508	111
TOTAL	22,52	6.396	8.175	1.779

TABELA 6: Consumo de energia em Giga Joules (GJ) (J. P. Birat, J. P. Vizios, Y. L. Pressigny, M. Schneider and M. Jeanneau, 1999).

A menor quantidade de toneladas de aço A572 a ser produzida comparada com o aço A36 presente no hipotético no projeto B acarreta em uma grande quantidade a menos de energia que precisa ser utilizada na produção do mesmo, considerando todos os processos que envolvem a produção de aço, no total para este edifício industrial, teremos uma economia de 1.779 GJ, o que representa um ganho de 21% de eficiência energética. Para fornecer uma perspectiva sobre essa economia, o consumo anual de energia per capita nos Estados Unidos é de 338 GJ. [5].

Todas essas economias na produção de aço acarretam diretamente no no custo total das obras metálicas, considerando as quantidades necessárias de aço para realizar a expansão na planta de sintetização, como demonstrado, será necessário 22% a menos de aço A572 para a obra em questão. No entanto, o aço de alta resistência A572 custa 6% a mais por quilo do que o aço carbono A36, assim pode-se comparar os custos por unidade, como a tabela 7 mostra.

Steel Type	Total Weight (%)	Steel unitary price (%)	Total Cost (%)
ASTM A36 - Regular Carbon steel	100	100	100
ASTM A572 Gr.50 - High strength steel	78	106	83
Savings by adopting High strength steel			17

TABELA 7: Comparação de custo entre o aço carbono manganês comum e o aço de alta resistência.

[7]

Por fim, pode-se verificar que há uma economia de 17% no custo total na escolha do aço ASTM A572 Gr. 50.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo visa apresentar o aço com microligamento de nióbio e ilustrar suas características mecânicas através de ensaios realizados pela CBMM, na oportunidade em que a mesma realizou uma expansão utilizando este material visando entender os benefícios e economias do mesmo. A partir da memória de cálculo e ensaios, concluímos que os testes metalúrgicos e mecânicos demonstraram as melhorias significativas nas propriedades do aço devido ao menor tamanho de grão graças ao microligamento de nióbio, em resumo: Força de rendimento aumentada em 39%; resistência à tração aumentada em 23%; tenacidade aumentada em 55%. Ao utilizar o aço de alta resistência em obra, as economias e ganhos observados foram:

Necessidade de utilizar 22% a menos de aço, o que significa uma economia de 78,7 toneladas; consecutivamente a economia de volume gerou uma redução de 17% no custo total do projeto, sem contabilizar o transporte e mão de obra que precisaria ser utilizado para o aço convencional A36. Quanto aos aspectos ambientais, a utilização do aço ASTM A572 Gr. 50 evitou que 127.972 Kg de dióxido carbono fossem lançados na atmosfera. No quesito consumo de energia, vimos que, com a redução da quantidade de massa metálica necessária para ser empregada na obra devido ao design mais leve do A572, menos energia foi gasto para a produção do mesmo, se o A36 comum tivesse sido utilizado, 1.779 GJ de energia a mais teriam sido gastos para produzir a quantidade equivalente de aço carbono regular necessária para construir a mesma estrutura em questão.

Embora o preço por quilograma (Kg) do aço reforçado seja 6% mais caro, devido às suas propriedades mecânicas e benefícios decorrentes destas, e também

às circunstâncias atreladas a sua produção, transporte e implantação, vimos que o emprego do aço de alta resistência ASTM A572 Gr. 50, que diferente dos aços comuns, passou por processos de microligamento ao nióbio, demonstrou ser mais eficiente tanto mecanicamente quanto economicamente.

4. REFERÊNCIAS

1. K. Ichikawa, M. Fujioka, R. Uemori and A. Yoshie, **Progress in Thermomechanical Control Process Steel Plates**, 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST, June, 2011, Winter Park, Colorado, USA.
2. W. B. Morrison, **Overview of Microalloying in Steel**, The Proceedings of the Vanitec Symposium, Guilin, China 2000.
3. S. G. Jansto, **Niobium-Bearing Plate Steels for the 21st Century**, 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST, June, 2011, Winter Park, Colorado, USA.
4. Center for Sustainable Systems, University of Michigan. 2011. **U.S. Energy System Factsheet Pub. No. CSS03-11**.
5. J. P. Birat, J. P. Vizios, Y. L. Pressigny, M. Schneider and M. Jeanneau, **CO2 Emissions and the Steel Industry's Available Responses to the Greenhouse Effect**, Seminar on Abatement of Greenhouse Gas Emissions in the Metallurgical & Materials Process Industry, 28 February - 3 March, 1999, San Diego, California, USA.
6. S. G. Jansto, **The Contribution of Niobium-Bearing Steels and Enhanced Sustainability," The 6th International Conference on High Strength Low Alloy Steels**, 31 May – 2 June 2011, Beijing, China
7. SILVESTRE, L.M.; PIMENTA, R. J.; NOGUEIRA, S. M.; QUEIROZ, L.; MOURA, H.S.; JORDÃO, A.M.; RIBEIRO, R.; PIMENTA, M.A.; CONCEIÇÃO, J.L.; ROCHA, L.; BURATTO, F.; FONSECA, E.A. – **HIGH STRENGTH STEEL AS A SOLUTION FOR THE LEAN DESIGN OF INDUSTRIAL BUILDINGS** – 2011.

8. China Steel Construction Society, 2009 **Production and Operation Investigation Report China Steel Structure Manufacture Enterprise.**

9. China Steel Construction Society, 2010 Production and; **Operation Investigation Report of China Steel Structure Manufacture Enterprise.**

10. ASTM, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, A572/A572M, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2007.

11. Q. Yu et al., **Effect of Microcontent Nb in Solution on the Strength of Low Carbon Steels**, Materials Science and Engineering A, 379 (1-2) (2004), 384-390.

FIGURAS [2, 3, 4, 5 e 6]: SILVESTRE, L.M.; PIMENTA, R. J.; NOGUEIRA, S. M.; QUEIROZ, L.; MOURA, H.S.; JORDÃO, A.M.; RIBEIRO, R.; PIMENTA, M.A.; CONCEIÇÃO, J.L.; ROCHA, L.; BURATTO, F.; FONSECA, E.A. – **HIGH STRENGTH STEEL AS A SOLUTION FOR THE LEAN DESIGN OF INDUSTRIAL BUILDINGS** – 2011.

Contatos:

Gabriel Lukiantchuki de Melo Oliveira (Orientando): gabriel_glmo@hotmail.com

Jan Vataavuk (Orientador): janvataavuk@uol.com.br