

# USO DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA MICROLIGADO AO NIÓBIO COM LIMITE DE ESCOAMENTO DE 450 MPA PARA CONSTRUÇÕES MAIS EFICIENTES\*

Thiago de Souza Amaral<sup>1</sup>  
Leonardo Magalhães Silvestre<sup>2</sup>  
Peter Langenberg<sup>3</sup>  
Alexandre Magnus Jordão<sup>4</sup>  
Marcos Paulo Meira<sup>5</sup>  
Marcelo Carboneri Carboni<sup>6</sup>

## Resumo

Os aços de alta resistência microligados ao nióbio tem se demonstrado uma solução ótima na fabricação de aços para utilização em perfis estruturais utilizando os conceitos já desenvolvidos para a indústria de gás e óleo. O nióbio com seu efeito refinador de grãos, com redução da temperatura de transformação entre austenita-ferrita, endurecimento por precipitação e retardamento da recristalização da austenita, usado em equilíbrio com titânio, manganês e silício e os novos processos de produção com resfriamento controlado torna possível a obtenção de aços com microestrutura bainítica, baixo carbono e alta resistência mecânica. Este trabalho demonstra os pontos de destaque referentes ao projeto de estruturas utilizando estes aços, bem como uma avaliação quanto ao processo de soldagem durante a fabricação das mesmas. É possível evidenciar que a estrutura final se torna ideal para aplicação em diversos ambientes devido a sua baixa temperatura de transição dúctil-frágil, produção de uma estrutura com cerca de 10% a menos em peso, 5% a menos em custo e com excelente soldabilidade.

**Palavras-chave:** Aço BLAR; Nióbio; Estrutura metálica; Soldagem; Redução de custo.

## USE OF NIOBIUM HIGH STRENGTH STEELS WITH 450 MPA YIELD STRENGTH FOR LEAN CONSTRUCTIONS

### Abstract

The high-strength microalloyed niobium steels has shown to be a solution in the manufacture of steel for use in structural profiles using the concepts already developed for the oil and gas. Niobium with its grain refining effect, reducing the temperature of transformation from austenite-ferrite, precipitation hardening and delaying the recrystallization of austenite, added in balance with titanium, manganese and silicon and new production processes with controlled cooling, makes it possible obtaining steels with bainitic microstructure, low carbon and high strength. This work demonstrates the prominent points for the design of structures using these steels, as well as an evaluation of welding process during the manufacture thereof. It is possible to show that the final structure becomes ideal for application in various environments due to its low temperature ductile-brittle transition, producing a structure with about 10% less in weight, 5% less cost and with excellent weldability.

**Keywords:** HSLA Steel; Niobium; Lean structures; Welding; Cost reduction.

- <sup>1</sup> Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Mecânica, Engenheiro da Qualidade na CBMM, Araxá, MG, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Desenvolvimento de Mercado na CBMM, São Paulo, SP, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenheiro de Materiais, Doutor em Engenharia de Estruturas, Diretor, IWT, Aachen, Alemanha.
- <sup>4</sup> Engenheiro Civil, Especialista em Estruturas, Engenheiro de Projetos na CBMM, Araxá, MG, Brasil.
- <sup>5</sup> Técnico em Metalurgia, Técnico de Processos na CBMM, Araxá, MG, Brasil.
- <sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Gerente de Desenvolvimento de Mercado na CBMM, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a World Steel Association, metade dos 1665 milhões de toneladas de aço produzidos em 2014 foram utilizados no mercado de construção, sendo 25% na forma de perfil laminado, 44% em vergalhão, ou barras para concreto armado, e os 31% restantes na forma de chapas. Além desta área de aplicação, os aços estruturais também foram utilizados em outros setores como por exemplo o de equipamentos mecânicos que correspondeu por outros 16% do total do aço consumido em 2014, segundo a mesma fonte [1]. Esta grande utilização de aço estrutural tende a permanecer em crescimento nos próximos anos devido à necessidade do crescimento das atividades industriais, aumento da população e substituição de infraestruturas antigas. É esperado que o consumo de aço no mundo suba de 1500 milhões de toneladas em 2000 para cerca de 2800 milhões de toneladas em 2050. [2]

Existe, entretanto, uma tendência importante quando se fala em utilização de recursos naturais e emissões de gases de efeito estufa que aponta por uma utilização mais consciente dos recursos naturais. Além disso, a otimização de custos tem se demonstrado cada vez mais importante com o aumento da competitividade global e investimentos cada vez menores.

Desta forma, a redução de custo pode ser feita através da economia de material, ou, em outras palavras, pela redução da espessura das chapas utilizando aços de maior resistência mecânica. Um exemplo prático desse conceito é dado por Silvestre et al., que demonstrou economia de 22% em peso de aço na estrutura projetada para o prédio da unidade de Sinterização II na CBMM em Araxá, MG, Brasil. Isto se deu com a utilização de um aço estrutural da classe ASTM A572 Grau 50 ou S355 (limite de escoamento de 345 MPa) em substituição a uma estrutura com aço carbono convencional classe ASTM A36 (limite de escoamento de 250 MPa). A redução de material proporcionou ainda 21,7% de redução de gases de efeito estufa (28 toneladas de dióxido de carbono equivalente), 21% de redução de consumo energético (1779 GJ) e 17% de redução de custos ao se comparar ao projeto com aço de menor resistência. [3]

Os aços microligados (geralmente com menos de 0,10% de elementos microligantes) são uma solução ideal por resultarem em materiais com resistência mais elevada. O Nióbio é neste caso o microligante ideal ao fornecer alta resistência, tenacidade e não prejudicar a soldabilidade destes aços.

Alguns autores[4, 5] demonstram que uma nova geração de aços estruturais de baixa liga e alta resistência (BLAR) e aços para tubulações produzidos por conformação termomecânica (TMCP) já estão disponíveis. Esses aços, que foram inicialmente desenvolvidos para atender as necessidades das indústrias de petróleo e gás, apresentam aumento de aplicação em outras variedades de estruturas. Eles são caracterizados pelo aumento da resistência à tração e tenacidade, conjuntamente com a redução do carbono equivalente (garantindo uma excelente soldabilidade) o que é essencial em construções complexas. O “design” da nova geração de aços, devido ao baixo carbono equivalente, demanda requisitos menores em termos de temperatura de pré-aquecimento e interpasse durante a soldagem, além de melhorar sua conformabilidade, estando em linha com a tendência de redução de custos.

Esta tecnologia permite avançar ainda mais no que foi proposto anteriormente, sendo o objetivo deste trabalho apresentar desde o projeto até a execução das estruturas metálicas de um novo prédio da unidade de Desfosforação na CBMM em Araxá, MG, utilizando o aço ASTM A572 Grau 65 em combinação com o Grau 50. É ainda

proposto, demonstrar como os procedimentos de soldagem podem ser otimizados e não apresentam problemas nestes aços com baixo carbono.

### 1.1 Benefícios do nióbio em aços microligados

Os aços estruturais são uma solução para os desafios importantes enfrentados nas construções modernas, pois permitem alcançar maior eficiência econômica, e atender à demanda crescente em se construir mais rápido e com menor consumo de energia e de matérias-primas. Além disso, a crescente consciência ambiental tornou incontestável o fato de que as emissões de dióxido de carbono têm de ser reduzidas continuamente.

Entre as famílias de aços, os microligados são considerados a solução para a concepção de estruturas mais eficientes. Os avanços na metalurgia nas últimas décadas, envolvendo o uso de elementos microligantes e o controle no processamento dos aços desde a aciaria até a laminação, levaram à obtenção de aços com maior resistência e melhores atributos para aplicações estruturais.

Aços de alta resistência são os aços microligados cujas propriedades foram modificadas pela adição de uma pequena quantidade de um elemento de liga (geralmente menos do que 0,10%). O nióbio é a solução ideal quando se busca maior resistência, aumento da tenacidade e também melhor soldabilidade. Os benefícios técnicos e econômicos associados ao uso de pequenas adições de nióbio, conferindo melhorias significativas em propriedades mecânicas, levaram à crescente popularidade deste elemento no mercado. Apesar de normas com a ASTM A572 e NBR 5008 limitarem os teores de nióbio abaixo de 0,050% e 0,060% respectivamente, o estudo realizado pela comissão européia envolvendo 10 parceiros demonstrou o benefício de usos mais elevados de nióbio que se tornaram padrões em normas API também em outros setores, entre eles o estrutural com benefícios especiais em relação a soldabilidade destes aços [6].

Este artigo apresenta um caso real em que se obteve uma estrutura mais leve e uma excelente soldabilidade como benefícios da tecnologia de aços microligados ao nióbio, através de uma solução de engenharia otimizada para a nova planta da Desfosforação da CBMM em Araxá, Minas Gerais – Brasil.

### 1.2 Mecanismo de refino de grão

Nióbio efetivamente controla a microestrutura do aço e pequenas quantidades deste elemento pode refinar o tamanho de grão de produtos laminados. O efeito do nióbio como refinador de grão está esquematicamente ilustrado na Figura 1 [3].

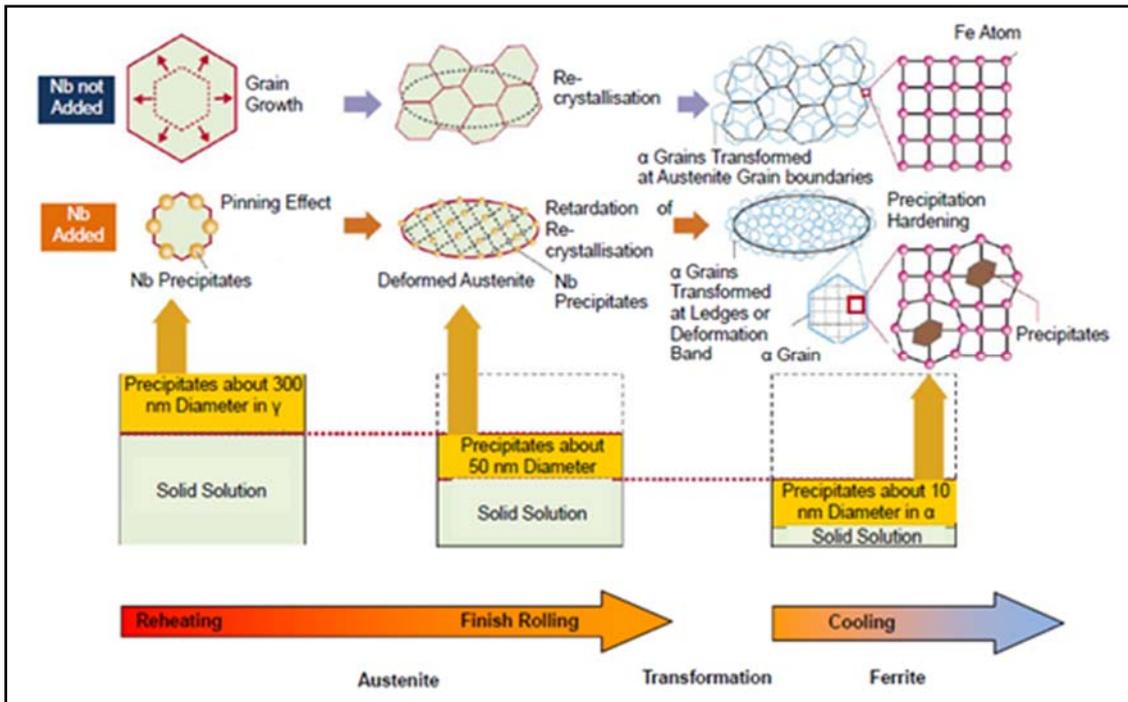


Figura 1: efeito do nióbio como refinador de grão. [2]

### 1.3 Aumento de resistência

Tamanho de grão fino é um requisito essencial nos aços para se obter propriedades de resistência e tenacidade. Figura 2 [3] mostra o forte efeito que o tamanho de grão ( $d$ ), na resistência mecânica em aços carbono-manganês.

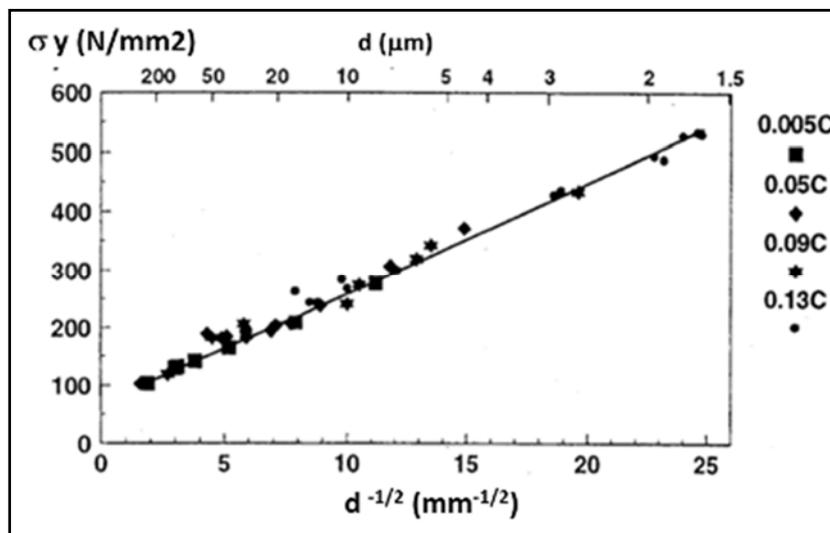


Figura 2: Relação entre o tamanho de grão e resistência mecânica.[2]

Reduzir o tamanho de grão gera um importante aumento na resistência para todos os teores de carbono considerados. Esta redução de tamanho de grão, é ainda maior quando se usa nióbio, devido ao seu efeito de prevenção de recristalização durante a laminagem controlada. Além disso, o nióbio precipita sob a forma de partículas muito finas, contribuindo ainda mais para o aumento da resistência.

#### 1.4 Composição química e controle da zona afetada pelo calor (ZAC)

No setor estrutural, Ouchi [7] descreve o uso disseminado dos aços de baixa liga e alta resistência em navios, construções civis, prédios e veículos de transporte. Isto se deve a soldabilidade superior e trabalhabilidade a frio desses aços quando comparados aos aços carbono convencionais. Os aços TMCP (Thermomechanical Control Process), a forma mais moderna de produção dos aços de baixa liga e alta resistência, praticamente tomaram este mercado devido as suas várias vantagens, dentre as quais se cita o decréscimo de teor de carbono ou teor de carbono equivalente, melhoria na tenacidade à baixa temperatura, redução de custos de fabricação e tempo de entrega dos aços. Especialmente em aços de aplicação offshore, os requisitos se tornaram severos, particularmente em termos de valor de energia absorvida Charpy e CTOD (Crack Tip Opening Displacement) à baixa temperatura no metal de base e na ZAC. A otimização de parâmetros TMCP durante a produção de chapas grossas e o efetivo uso de alguns elementos microligantes para o refino da microestrutura da ZAC em soldagens com alto calor imposto foram medidas tomadas para atender estes requisitos.

Barbaro et al. [8] confirma que o controle das propriedades da ZAC pode ser realizado através do controle químico da composição do aço. Sendo que uma relação estequiométrica entre titânio e nitrogênio (Ti/N) provê uma boa homogeneidade e uma grande quantidade de precipitados de nitretos de titânio (TiN) de pequena dimensão, a condição ótima para o efeito de “pinning” que evita o crescimento do grão austenítico. Cita ainda que o nióbio habilita a capacidade completa deste elemento e contribui também para:

- Refinamento de grão;
- Redução da temperatura de transformação entre austenita-ferrita;
- Endurecimento por precipitação;
- Retardamento da recristalização da austenita.

Barbaro et al. [8] cita também que nos aços microligados ao nióbio e titânio existem precipitados complexos de (Ti,Nb)(C,N), alguns com núcleos ricos em titânio e camadas externas ricas em nióbio e outros como precipitados isolados. Mesmo sendo conhecido que os precipitados de nióbio nesses aços dissolvem-se a temperaturas mais baixas do que os TiN, percebe-se um melhor controle do crescimento dos grãos austeníticos à 1350 °C nos aços com alto teor de Nb. Os mecanismos para tal podem estar relacionados, mas não limitado, a:

- Efeito de dragagem do Nb em solução sólida, provindo da dissolução de NbC e NbCN;
- Existência de camadas ricas de Nb em torno de TiN, evitando o crescimento dos precipitados de titânio;
- Segregação de Nb nos contornos dos grãos austeníticos e/ou redução de energia no contorno, o que pode retardar o crescimento do grão.

Stalheim & Muralidharan [9] demonstram em seu trabalho de simulação de diferentes curvas CCT (ou TTT contínuo) que os diferentes elementos afetam as transformações de fase de maneira diferente nos aços TMCP. Como exemplo, um aumento do teor de carbono move o campo ferrítico, perlítico e bainítico para a direita (aumentando o tempo necessário para a transformação) permitindo a formação da fase martensítica. Já a adição de elementos como molibdênio, níquel e nióbio reduzem a cinética de formação da ferrita e perlita permitindo desta forma uma maior formação de bainita. Cada elemento afeta o diagrama CCT diferentemente, seja na natureza ou na magnitude.

## 1.5 Projetos otimizados de estruturas metálicas com aço BLAR

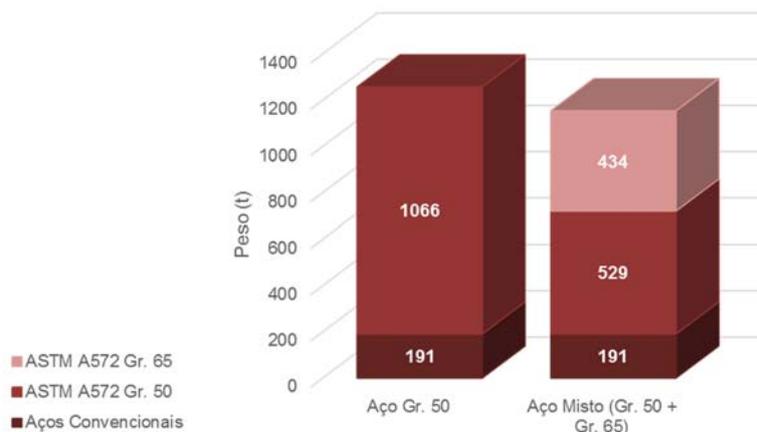
Inúmeros são os fatores que influenciam no custo final de uma estrutura, incluindo elementos externos e complementares ao processo de fabricação, tais como montagem, logística, entre outros. Porém alguns destes fatores estão diretamente ligados ao uso e otimização do material utilizado. Neste sentido, Bellei [10], estabelece entre outros, a seleção do sistema estrutural como sendo um dos principais fatores que possibilitam a redução de custo de uma estrutura que, numa escala geral, desde o projeto até a montagem, representa de 20% a 50% deste custo final

Partindo desta premissa, de que a seleção adequada do sistema estrutural é elemento fundamental para a otimização de qualquer projeto de estruturas metálicas, a gerência de engenharia da CBMM em conjunto com seus parceiros no desenvolvimento do projeto do edifício da Secagem que faz parte do projeto de expansão de sua unidade de Desfosforação, procurou arranjar o modelo estrutural deste edifício de tal forma que o maior proveito possível fosse alcançado com o aumento da resistência do aço. Minimizou-se desta forma a influência da deformação ou esbeltes, parâmetros puramente geométricos e que independem da resistência do aço. A ideia era conciliar uma engenharia bem pensada aliada ao uso de aços BLAR com maior capacidade de resistência ao escoamento e à ruptura. Os aços escolhidos para tal estudo foram o ASTM A572 Grau 50 e Grau 65, oferecido, com reservas de disponibilidade, no formato plano e longo pelas usinas siderúrgicas nacionais. Este aço atende aos critérios da norma obrigatória em território nacional ABNT NBR 8800 para projetos de estruturas metálicas, que flexibilizou em sua versão 2008 a mudança da relação elástica (LR – Limite de Ruptura/LE – Limite de Escoamento) de 1,25 para 1,18. O aço produzido pelo processo de laminação controlada e resfriamento acelerado gerando microconstituintes majoritariamente bainíticos é o que permite atingir tal relação.

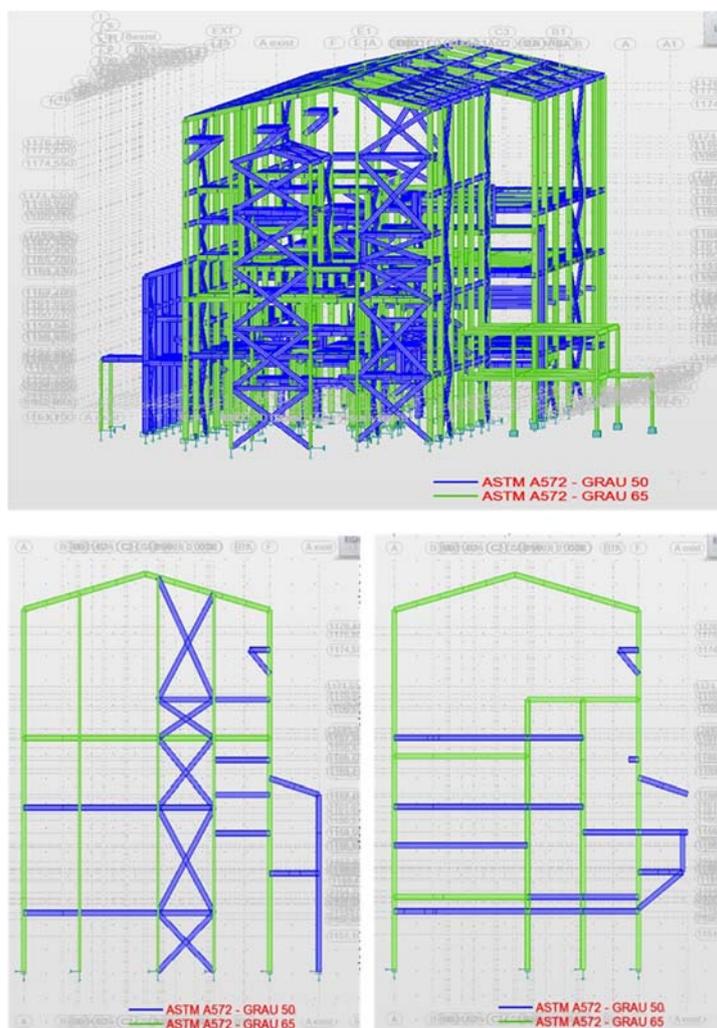
Neste contexto foram definidos os seguintes critérios para o uso dos materiais na estrutura, considerando entre outros aspectos, a disponibilidade destes materiais por parte das usinas nacionais:

- Para as peças que tiveram como critério de dimensionamento o estado limite de serviço (flecha por exemplo) o uso do ASTM A572 Grau 65 não faz diferença pois o aumento do limite de escoamento, obtidos a partir de aços BLAR especiais, não influencia na deformação;
- Perfis laminados não utilizaram ASTM A572 Grau 65 pois não demandaram quantidade suficiente para compra mínima, segundo os critérios comerciais adotados pela siderúrgica. O baixo uso em laminados se deu pelo fato de que o mesmo perfil ASTM A572 Grau 50 atendeu o projeto e de não haver em território nacional produção de laminados neste grau de resistência de forma comercial;
- Boa parte do uso de ASTM A572 Grau 65 se deu nos pórticos principais compostos por colunas e tesouras de cobertura, pois a partir de um estudo quanto a adição de um sistema estrutural eficiente, obteve-se vantagem devido aos esforços elevados e bom nível de travamento interno proporcionado pelas plataformas do edifício;
- Nas plataformas de trabalho internas obteve-se vantagem para utilização do ASTM A572 Grau 65 em vigas principais com seções acima de 600mm de altura;
- O projeto utilizou, em ordem de prioridade, perfis soldados ASTM A572 Grau 65, laminados ASTM A572 Grau 50, soldados ASTM A572 Grau 50;

Abaixo (figura 3) podemos perceber os volumes de uso de cada um dos materiais utilizados, em toneladas, e a sua distribuição no projeto (figura 4):



**Figura 3:** Comparação dos pesos dos diferentes aços utilizados nos projetos



**Figura 4:** 3D e vistas do prédio projetado com estrutura mista

No projeto, as junções foram realizadas conforme necessidades do projeto estrutural (figura 4), seguindo as seguintes premissas:

- Para a junção realizada em processo de soldagem SAW (arco submerso) deverá ser atendido os esforços de 65 ksi sendo a junção realizada em dois aços de mesmo grau (fabricação do perfil);
- Para a junção realizada em processo de soldagem FCAW (arame tubular), ocorrerá principalmente a soldagem de materiais dissimilares com penetração total (travamentos, base e outras estruturas ligas ao perfil);
- Pequenos reparos em campo poderão ser realizados no processo de Eletrodo revestido;
- Não foi possível utilizar perfil laminado em grau 65, por não haver disponibilidade no mercado.

## 1.6 Soldagem de aços BLAR

Apesar da evolução no processo de fabricação e a otimização das composições para a obtenção de características ideais nos aços bainíticos, as normas de especificação de aços, como por exemplo a norma ASTM A572, mantêm a possibilidade de fabricação dos aços com teores de carbono muito elevados não compatíveis ao processo de laminação controlada e resfriamento acelerado modernos.

Um exemplo são os aços classificados como grau 65 da norma ASTM A572 (2013), que atualmente são fabricados por processos de resfriamento acelerado que darão origem a estruturas bainíticas, com concentração percentual em massa de carbono máximo de 0,1% conforme citado no item 2.3. Entretanto, a norma ASTM considera como especificação para os aços desta mesma classe teores de carbono máximo de 0,26 % para chapas com espessura menores que 13mm, e 0,23 %, para chapas entre 13 e 32 mm de espessura.

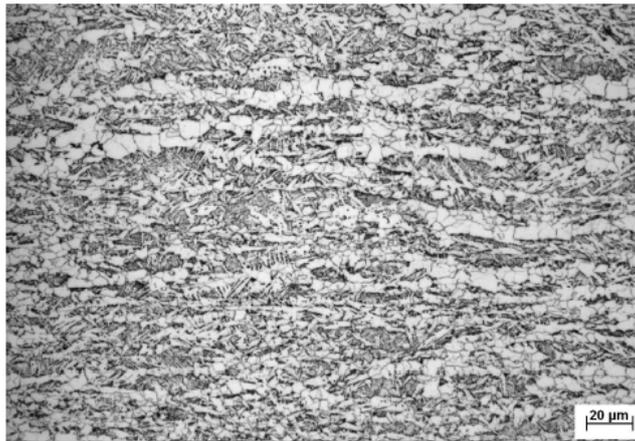
Devido aos altos valores de carbono especificados nas normas de aço, as normas que especificam juntas pré-qualificadas em aços estruturais, AWS D1.1 (2010), demandam exigências potencialmente desnecessárias, como, por exemplo, valores elevados de pré-aquecimento (com consequência sobre o custo de fabricação e imprevisibilidade sobre as propriedades mecânicas).

Scotti et al. [11], entretanto, alertam que aços estruturais com tratamento termomecânico apresentam alguns cuidados e, por isso, existe a necessidade do estudo do seu comportamento durante os ciclos térmicos de soldagem.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do projeto em grau 65, foi utilizado o aço TMCP da USIMINAS que foi caracterizado conforme figura 5 com microestrutura basicamente composta de bainita, perlita fina e ferrita poligonal. As características estão descritas nas tabelas 1 e 2.

Foram utilizados os consumíveis de soldagem ESAB TUBROD 81 NI1 ULTRA de diâmetro de 1,6 mm em conformidade com a especificação AWS A5.29 E8XTX para o processo FCAW entre junções de aço Sincron, arame Böhler de diâmetro 1,2 mm com especificação AWS A5.20 E71T-1C para junção de aços dissimilares em FCAW e os consumíveis, arame ESAB OK Autrod 12.24 de diâmetro de 2,5mm conforme norma AWS A.5.23 EA2 e fluxo ESAB OK Flux 10.71 conforme norma AWS A5.23 F8A4 para o processo SAW, em conformidade com o descrito na norma AWS D1.1 (2010)



**Figura 5:** Microestrutura do aço ASTM A572 Grau 65, Nital 4% e amplificação de 500x

**Tabela 1.** Composição química de aço ASTM A572 Grau 65 utilizado no projeto

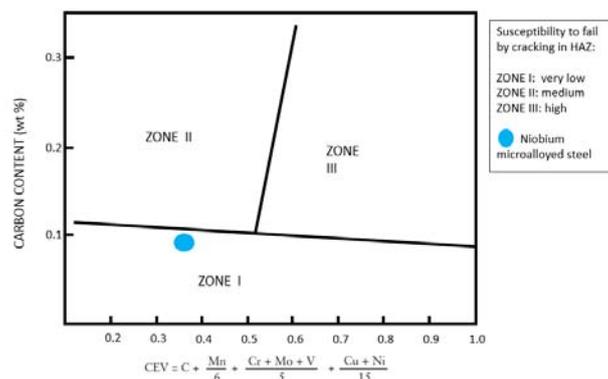
C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Nb(%)	Cu(%)	N(%)	Ti(%)	CEV
0,09	0,25	1,50	0,014	0,002	0,030	0,143	0,004	0,013	0,35

**Tabela 2.** Propriedades do aço ASTM A572 Grau 65 utilizado no projeto

LE (MPa)	LR (MPa)	LR/LE	AL (%)	Charpy (-50 °C) (J)
503	615	1,22	22	215

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na composição química descrita na tabela 1, foi possível iniciar a avaliação da soldabilidade do aço e possível necessidade de procedimento de pré-aquecimento conforme descrição do anexo I da norma AWS D1.1.



**Figura 6:** Avaliação conforme diagrama de Graville

A partir desta análise, pode-se notar que o aumento de resistência por refinamento de grãos permite uma redução do carbono equivalente e por consequência posiciona o aço na melhor zona de trabalho de forma a evitar trincas por hidrogênio ou endurecimento da zona afetada pela solda.

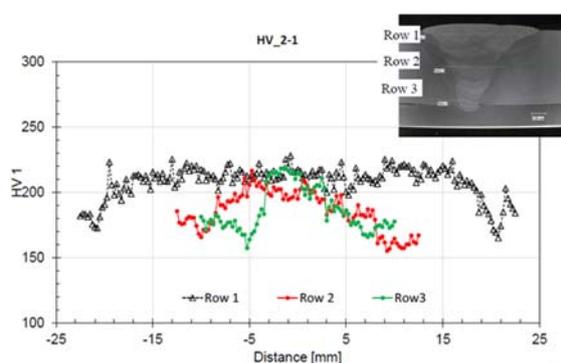
### 3.1 Soldagem da Estrutura

Para a realização da soldagem de acordo com a referência normativa AWS D1.1 foi necessário realizar nova qualificação dos soldadores e do procedimento. Foram geradas placas de teste para qualificação dos procedimentos da solda pelo processo de arco submerso (SAW) em junta de topo aço ASTM A572 Grau 65 e solda pelo processo arame tubular (FCAW) em junta de topo de aços dissimilares ASTM A572 Grau 50 e 65, todos sem a necessidade de pré-aquecimento. Os resultados estão apresentados na tabela 3.

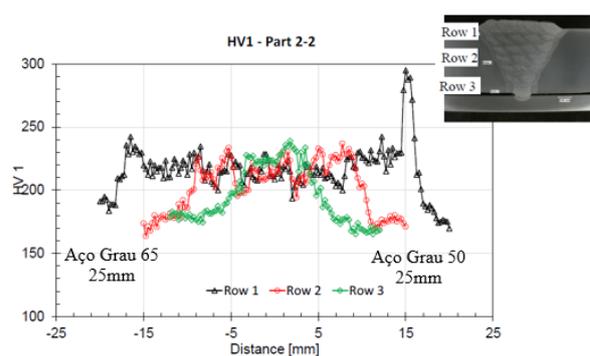
**Tabela 3:** Resultado dos testes e comentários

Ensaio	Resultado	Comentário
Redução de área (RA) na direção Z	> 60%	Superior a 30% demonstrando não haver tendência a decoesão lamelar.
Tração (LR)	570 MPa (SAW)	Atende a especificação do aço A572 Grau 65 (mínimo 550 MPa).
Dureza	203 HV10 (SAW ZAC) 213 HV10 (FCAW ZAC)	Inferior a 350 HV10 não indica a ocorrência de zonas duras e susceptibilidade de trincas por formação de martensita.
Teste de dobramento	SAW e FCAW não apresentaram trinca na solda.	O resultado demonstra que mesmo após dobramento a junta soldada não apresenta trinca, qualificando o procedimento de soldagem.
Charpy V (23 °C)	293 J (SAW ZAC)	Mesmo não sendo um requisito para estruturas estáticas, o resultado demonstra boa tenacidade a temperatura típica do local de aplicação (Araxá-Brasil)
Temperatura de transição dúctil-frágil (27 J)	- 52°C (SAW ZAC)	A temperatura de transição abaixo de -50°C demonstra a boa aplicabilidade deste perfil soldado mesmo a baixas temperaturas.

Desta forma o procedimento foi qualificado. Foram realizadas avaliações mais detalhadas das microestruturas e linhas de dureza conforme figuras 7 a 10.

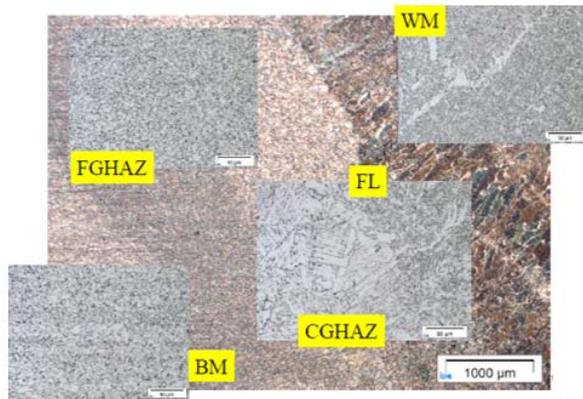


**Figura 7:** Medição de linha de dureza na solda SAW

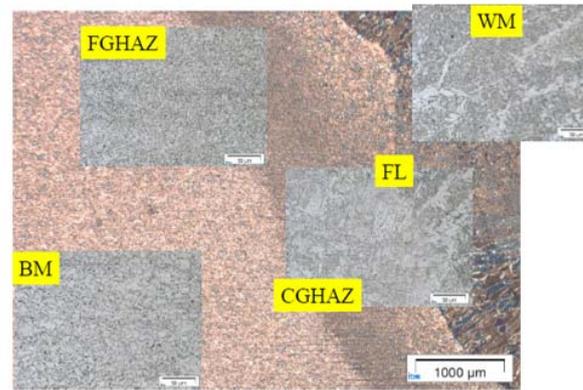


**Figura 8:** Medição de linha de dureza na solda FCAW

A dureza ao longo de toda a linha e nos diferentes níveis não demonstrou dureza elevada, como esperado, devido ao baixo carbono equivalente. No caso da Figura 8, é interessante notar que o aço de menor resistência (Grau 50) apresentou as maiores durezas e susceptibilidades de formação de martensita, de forma que o aço produzido no processo TMCP se demonstra mais eficiente na relação dureza x resistência.



**Figura 9:** Macro e micrografia das regiões da solda SAW



**Figura 10:** Macro e micrografia das regiões da solda FCAW

Em relação a avaliação das microestruturas pode-se notar que o aço apresentou estruturas diferenciadas, especialmente no que se refere ao tamanho de grão, devido ao processo de arco submerso apresentar maior calor imposto na peça, tornando o ciclo térmico (tempo acima das temperaturas de início e fim de transformação e taxa de resfriamento) mais longo. Este ciclo térmico será o responsável pelo aumento do grão e pela mudança de estrutura majoritariamente bainítica para estrutura bainítica e ferrítica.

#### 4 CONCLUSÃO

Como resultado da aplicação do conceito de aço de baixo carbono microligado ao nióbio aplicado a estrutura metálica no projeto de prédio industrial, foi possível:

- Obter um aço de alta resistência e tenacidade, com temperatura de transição dúctil-frágil negativa (inferior a  $-50^{\circ}\text{C}$ ), permitindo a aplicação em diversos ambientes e localizações;
- Redução do consumo total de aço no projeto em 10% em peso, comparando com uma estrutura projetada inteiramente com aço ASTM A572 Grau 50;
- Produção de uma estrutura facilmente soldada devido ao baixo carbono e baixo carbono equivalente;

Através das descrições acima, é esperada uma redução de 9% da energia consumida e redução de 9% de emissões de gases de efeito estufa para fabricação, transporte e montagem do aço. Uma redução de 5% de custos quando comparado a um projeto com aço ASTM A572 Grau 50 também foi estimada. Estes valores serão melhor detalhados e validados em publicação futura devido ao prédio estar atualmente em sua fase de execução das fundações.

#### Agradecimentos

Agradecemos as empresas CODEME e USIMINAS pela parceria no desenvolvimento deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 World Steel Association. Steel Markets, Buildings and Infrastructures. 2015 [acesso em 07 jan. 2016]; Disponível em: <http://www.worldsteel.org/Steel-markets/Buildings-and-infrastructure.html>.
- 2 Ichikawa K, Fujioka M, Uemori R, Yoshie A. Progress in Thermomechanical Control Process Steel Plates. 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST, 2011.
- 3 Silvestre L et al. High Strength Steel as a Solution for the Lean Design of Industrial Buildings. Journal of Materials Research and Technology. Elsevier, 2012; 35-41.
- 4 Meester B. The Weldability of Modern Structural TMCP Steels. ISIJ International. 1997; 37 (6):537-551.
- 5 Fluess P, Valentin R, Schwinn V, Hanus F. Application of Nb in TMCP Structural Steel Plates with Thickness up to 120 mm. Niobium Bearing Structural Steels – TMS. 2010; 89-103.
- 6 Webster S, Drewett L. The EU Project Hiperc - High-Performance, Economic Steel Concept for Linepipe and General Structural Use. Niobium Bearing Structural Steels – TMS. 2010; 201-217.
- 7 Ouchi C, Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes. ISIJ International. 2001; 41 (6): 542-553.
- 8 Barbaro F J, Zhu Z, Kuzmikova, L, Li H, Gray J M. Towards Improved Steel Alloy Designs for Control of Weld Heat Affected Zone Properties. 2nd International Symposium on Nb and Mo Alloying in High Performance Steels. 2013; 1-13.
- 9 Stalheim D G, Muralidharan G. The Role of Continuous Cooling Transformation Diagrams in Material Design for High Strength Oil and Gas Transmission Pipeline Steels. Proceedings of IPC 2006, 6th International Pipeline Conference, Calgary. 2006.
- 10 Bellei I H. Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo. PINI, 2004.
- 11 Scotti A, Li H, Miranda R M. Um Round-Robin Teste com Simulação Térmica da ZAC de Soldagem para Obtenção de Diagramas CRC: a necessidade de procedimentos e terminologia de microconstituintes harmonizados. Soldagem e Inspeção. 2014; 19 (03): 279-290.