

EFEITO DA ADIÇÃO DE MICROLIGANTES E DA LAMINAÇÃO CONTROLADA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BAIXO CARBONO*

Vanessa Veríssimo dos Santos¹

Ricardo José de Faria²

Geraldo Lúcio de Faria³

Resumo

Com o objetivo de produzir aços de alto desempenho com propriedades mecânicas favoráveis para aplicações estruturais, o conceito de laminação controlada associado à influência do Nb e do Ti como elementos microligantes tem sido extensivamente estudado. Estes elementos, quando em solução sólida, afetam as temperaturas críticas de transformação de fase e o comportamento de recuperação e recristalização do aço, levando à obtenção de um produto com boa relação de resistência mecânica-tenacidade. O presente trabalho compara o comportamento mecânico de dois aços laminados a quente: i) um aço baixo carbono comum (ASTM A36); ii) um aço microligado com baixo teor de carbono com adições de nióbio e titânio (ASTM A572). Os aços selecionados têm composição química de base semelhante, no entanto, como o aço ASTM A572 é microligado, foi laminado termomecanicamente enquanto o ASTM A36 laminado a quente de forma convencional. Os dois produtos laminados foram submetidos a procedimentos de caracterização microestrutural e a ensaios mecânicos. As propriedades mecânicas do aço ASTM A572 foram substancialmente maiores do que as verificadas para o ASTM A36. A microestrutura de ambos os aços é constituída por ferrita e perlita. No entanto, a adição de elementos microligantes associado ao processo de laminação controlada contribuiu para o refino de grãos de ferrita, levando ao aumento das propriedades mecânicas do aço ASTM A572.

Palavras-chave: Aços microligados; Laminação controlada; Aços de Alta Resistência e Baixa Liga - ARBL; Nióbio; Titânio.

EFFECT OF MICROALLOYING ADDITION AND CONTROLLED ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A BASIC LOW CARBON STEEL

Abstract

With the aim to manufacture a high performance steel with favorable mechanical properties for structural applications, the concept of controlled rolling associated with the influence of niobium and titanium as microalloying additions has been extensively studied. These elements, when in solid solution, affect the critical temperatures of phase transformation and the steel recovery and recrystallization behavior, leading to obtaining a product with a good mechanical strength-toughness ratio. The present work compares the mechanical performance of two hot-rolled steels: i) a common low-carbon-steel (ASTM A36); ii) a low-carbon-microalloyed-steel with niobium and titanium additions (ASTM A572). The selected steels have similar base chemical composition, however as the ASTM A572 is microalloyed, it was thermomechanically rolled while ASTM A36 was conventionally hot-rolled. The two rolled products were submitted to microstructural characterization procedures and to mechanical tests. The mechanical properties of the ASTM A572 steel were substantially higher than the ASTM A36 one. The microstructure of both steels consists of pearlite and ferrite. The microalloying element additions in concomitance with the controlled rolling process contributes to the refining of ferrite grains increasing the mechanical properties of the ASTM A572 steel.

Keywords: Microalloyed-steel; Controlled rolling; Steel HSLA; Niobium; Titanium.

¹ Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Assessor Técnico, Gerência de P&D, Gerdau, Ouro Branco, MG, Brasil.

³ Físico, Dr., Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Até a década de 60, além dos aços temperados e revenidos, existia-se também aços com limite de escoamento entre 350MPa e 450MPa na condição de laminados ou normalizados. A competitividade do mercado siderúrgico, exigiu que as usinas buscassem por níveis de qualidade ainda mais elevados em seus produtos. Foi então que a partir da década de 1970 surgiu-se a necessidade de utilização de aços de baixo custo, com maior resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade [1,17].

Visando atender às especificações dos clientes devido a alterações no desempenho em serviço e nas propriedades mecânicas do material, as indústrias de aço buscaram melhorias em seus processos através do desenvolvimento ou aperfeiçoamento de ligas que garantissem propriedades mecânicas que transcendessem as que já existiam. Por consequência, aços-carbono têm sido substituídos por aços microligados que garantam aumentos de resistência e tenacidade ao material quando manufaturados pelo processo de laminação controlada [2]. O processamento termomecânico de aços microligados surge com a finalidade de produzir aços com baixíssimos teores (a soma dos elementos de liga geralmente não ultrapassa 2 % e o teor de C < 0,25 %) de elementos microligantes, afim de se obter um aumento simultâneo da resistência mecânica, soldabilidade e da tenacidade à fratura dos aços por meio do refino de suas microestruturas [3-4].

A indústria da construção civil utiliza chapas grossas laminadas a quente do aço ASTM-A36 classificado entre os materiais da chamada qualidade estrutural. Este material é usualmente empregado na construção de pontes, estruturas de equipamentos, passarelas, edifícios, plataformas de petróleo, dentre outros. São aços caracterizados como aço carbono de média resistência mecânica, com boa soldabilidade, apropriados para utilização em elementos da construção que sofram níveis relativamente baixos de carregamento (400MPa à 550Mpa). Em função da ausência de elementos microligantes, este aço não responde bem a tratamentos termomecânicos, sendo assim limitado para determinadas aplicações. Caso este material respondesse bem a este tipo de processamento, para a mesma composição química base, poder-se-ia desenvolver produtos de maior valor agregado que pudessem ser utilizados em aplicações ainda mais nobres.

Segundo Colaço [5], o aumento da resistência mecânica dos aços-carbono é alcançado às custas do aumento do teor de carbono. Por outro lado, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), se comportam de maneira diferente. A adição de elementos microligantes, tais como Nb e Ti, provocam o endurecimento por solução sólida e por precipitação de carbonetos, contribuindo ainda para o refinamento da microestrutura e, conseqüentemente, levando ao aumento simultâneo da ductilidade e resistência mecânica do material.

O aço ASTM-A572-50-T1 é um aço de Alta Resistência e Baixa Liga - ARBL, microligado ao nióbio e titânio, classificado como aço estrutural, sendo muito utilizado na construção civil quando se objetiva utilizar estruturas grandes e leves, com alta resistência mecânica afim de se obter um acréscimo no carregamento da estrutura [6]. Ao ser feita a comparação entre estes dois aços, ASTM A36 e A572-50-T1, observa-se algumas semelhanças entre eles. Ambos são aços estruturais de baixo carbono (C < 0,30%), com pequenas adições de manganês (até 2%), com boa soldabilidade e ductilidade. No entanto, o A36 é um aço carbono comum e o A572 é

um aço microligado (ARBL). Normalmente, os aços microligados são especificados em termos de resistência mecânica e desenvolvidos a partir de composições químicas base já empregadas com sucesso em aços baixo carbono (como o ASTM A36) com o acréscimo de elementos microligantes e aplicação de processamento termomecânico. Com o controle destes parâmetros, aumentos consideráveis de resistência mecânica são obtidos nos aços microligados, por exemplo, o aumento no limite de escoamento pode chegar até mais de 30% em relação ao aço carbono comum de composição química base semelhante.

Neste contexto, o presente trabalho se propôs a avaliar a influência da adição de elementos microligantes e da aplicação de um tratamento termomecânico sobre a evolução microestrutural e de propriedades mecânicas de um aço baixo carbono. Para esse fim, duas placas de aço foram avaliadas: uma do aço ASTM A36 que foi laminada a quente pelo processo convencional e uma do aço ASTM A 572 (composição química básica similar à do ASTM A36, porém com adição de Nb e Ti) que foi termomecanicamente processada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizadas amostras provenientes de duas chapas grossas produzidas industrialmente na espessura de 25,00mm a partir de aços distintos. Um aço sem adição de microligantes equivalente ao ASTM-A36 (A36/A36M – 14) e outro microligado ao nióbio e titânio, equivalente ao ASTM-A572-50-T1 (A572/A572M – 15). Estas amostras foram cuidadosamente selecionadas de forma a viabilizar um estudo sobre os efeitos da adição de microligantes e da aplicação de um processamento termomecânico sobre a evolução microestrutural e de propriedades mecânicas de chapas grossas com teores de C e Mn semelhantes. Os requisitos de composição química segundo as normas ASTM A572 (2015) e ASTM A36 (2014) estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2(1) [7-8].

Tabela 1 – Especificação de composição química (% massa) para o aço ASTM-A572-50-T1. Adaptado da Norma ASTM A572 (2015) [7].

	C	Mn	Cu	P	S	Si	Nb	Ti
Mín.	-	0,80	0,20	-	-	-	0,005	0,008
Max.	0,23	1,35	-	0,030	0,030	0,40	0,050	0,020

Tabela 2⁽¹⁾ – Especificação de composição química (% massa) para o aço ASTM-A36. Adaptado da Norma ASTM A36 (2014)⁽¹⁾ [8].

	C	Mn	P	S	Si	Al
Mín.	-	0,80	-	-	-	0,020
Max.	0,25	1,20	0,030	0,030	0,40	0,050

⁽¹⁾ Para cada redução de 0,01% de carbono é permitido um acréscimo de 0,06% de manganês sendo o máximo de 1,35%.

Na Tabela 3 estão representadas algumas especificações das propriedades mecânicas dos dois aços segundo as normas ASTM A36 (2014) e ASTM A572 (2015) [7-8].

Tabela 3 – Especificações das propriedades mecânicas dos aços ASTM A36 e A572 [7-8].

PROPRIEDADES MECÂNICAS		ASTM A36	ASTM A572
Limite de escoamento mín. (MPa)		250	345
Limite de resistência mín. (MPa)		400 - 550	450
Alongamento (%)	L ₀ = 50 mm	23	21

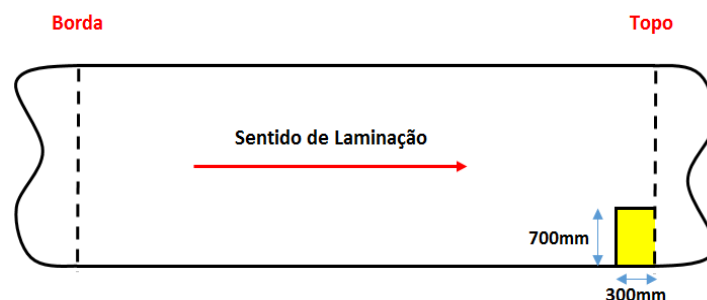
2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Laminação a Quente

O equipamento utilizado para a conformação mecânica das placas de aços foi um laminador quádruplo reversível. A partir dos processamentos de laminação a quente planejados especificamente para cada aço, foi possível obter, para ambos, chapas com espessuras de 25,00mm para execução das análises de caracterização microestrutural e dos ensaios mecânicos.

O laminador quádruplo reversível é um equipamento capaz de executar dois tipos de laminação: laminação convencional e laminação controlada. A laminação convencional foi executada no aço ASTM A36, através da aplicação de sucessivos passes de deformação plástica, sem rigor quanto ao controle das temperaturas ao longo do processo. Já a laminação controlada foi aplicada ao aço ASTM A572 por ser um produto que possui a adição de elementos microligantes em sua composição química. O material passou por vários passes de redução respeitando-se rigorosamente determinados patamares de temperatura previamente planejados para obtenção das propriedades mecânicas requeridas para o referido do aço.

A partir da produção dos esboços (primeiro produto que sai do laminador), uma amostra de cada chapa foi cortada em sua extremidade na região de topo da laminação da chapa, conforme estabelece a regra de amostragem. Esta região corresponde ao topo da laminação da chapa. As dimensões das amostras foram: 700 mm de largura por 300 mm de comprimento conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** – Representação da regra de amostragem no esboço laminado.

2.2.2 Ensaios Mecânicos

A resistência mecânica dos aços foi determinada por meio de ensaios de tração, em corpos de prova (CPs) usinados nas direções transversal em relação a direção de laminação. Os testes foram realizados numa máquina de tração de marca SHIMADZU UH-F600KNI com capacidade de 300KN. Os corpos-de-prova foram retirados da posição correspondente ao topo do esboço na posição da borda, conforme exigência da norma ASTM-A36 (2014) [8]. Os CPs, com seção circular,

foram usinados com base de medida igual a 50 mm e diâmetro de 12,5 mm. A tensão limite de escoamento foi determinada, com uso de um extensômetro automático, como sendo aquela correspondente à tensão obtida para 0,5% de deformação. As condições de ensaio foram executadas de acordo às especificações da norma ASTM-A370 (2014) [10]. Os resultados de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento (ALO) e razão elástica (LE/LR) foram obtidos pelo cálculo das médias aritméticas dos valores encontrados em cada CP ensaiado.

Os ensaios de tenacidade ao impacto Charpy na direção transversal e longitudinal à direção de laminação das chapas grossas foram realizados com a utilização de CPs retirados na posição correspondente a $\frac{1}{4}$ da espessura das amostras. Os CPs foram reduzidos para espessura de 10mm conforme recomendação da norma ASTM-A370 (2014) [10]. As condições de preparação dos CPs e de execução dos testes foram realizadas de acordo as especificações da norma ASTM-A370 (2014) [10]. Os testes foram realizados nas temperaturas de 20°C 0°C e -20°C, numa máquina ZWICK modelo RPK750 com capacidade máxima de 750J. É importante lembrar que para corpos-de-prova-Charpy retirados na direção transversal à de laminação da chapa, o entalhe foi usinado paralelo à direção de laminação do material, enquanto que para o CPs retirados na direção longitudinal da chapa o entalhe foi usinado perpendicularmente à direção de laminação do material. Além disso, os valores de energia média absorvida foram apresentados individualmente para cada conjunto de CPs.

2.2.3 Análise Fractográfica dos Corpos de Prova de Impacto Charpy

Foram realizadas análises fractográficas em alguns corpos de prova de impacto fazendo-se o uso de um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV afim de verificar o comportamento microfractográfico dos dois aços.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Laminação Convencional e Laminação Controlada

A laminação das placas de aço seguiu todas as premissas que os processos de laminação convencional e laminação controlada demandam. Tanto o aço ASTM A36 quanto o ASTM A572 sofreram elevadas reduções de espessura. Ambos os aços passaram pela etapa de laminação de desbaste, que ocorre logo após o processo de reaquecimento de placas no forno. Os passes de desbaste permitem reduzir a espessura da placa até a obtenção de um esboço com espessura adequada para etapa de acabamento. A laminação de acabamento é executada quando o material se encontra em temperaturas mais baixas. Nesta etapa ocorre o condicionamento da austenita, os grãos austeníticos submetidos aos passes de laminação são deformados assumindo uma forma alongada, empanquecada que se direcionam no sentido de laminação. É importante lembrar que o plano de passes vai depender da resistência mecânica do aço laminado e das limitações de força e de torque do laminador [17-18]. Em ambos os materiais foram executados 15 passes de redução para que se chegasse numa espessura final de 25mm na chapa.

A Figura 2 mostra o plano de passes dos dois aços quando submetidos ao processo de laminação convencional e controlada. É notória a diferença existente entre os

dois processos de laminação. Enquanto o A36 foi laminado sem que ocorresse maior rigor quanto ao controle de temperatura o A572 foi laminado com um controle de temperatura estratégico conforme planejamento calculado a partir de equações desenvolvidas em estudos de diversos autores, dentre eles Boratto et al. (1989) e Ouchi (1982) [19-20].

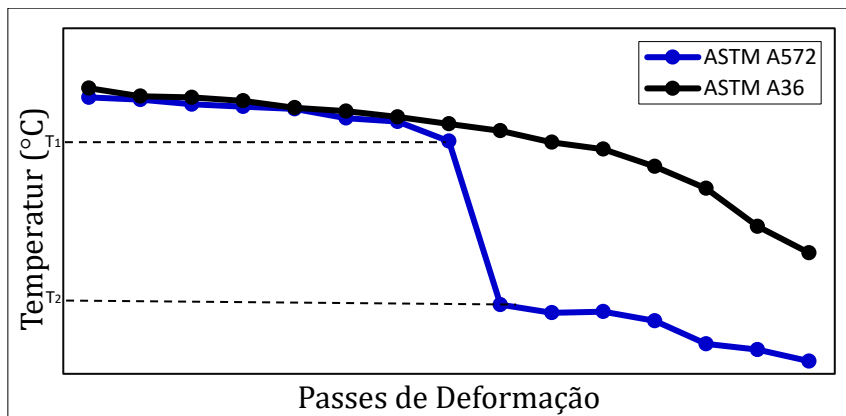


Figura 2 - Temperatura de cada passe de deformação dos aços submetidos ao processo de laminação convencional (ASTM A36) e laminação controlada (ASM A572).

É importante destacar que o principal objetivo da laminação de desbaste é promover o refino de grão por intermédio da completa recrystalização da austenita após passes sucessivos de deformação executados em temperaturas mais altas. Dessa forma, ocorre a nucleação e crescimento de novos grãos austeníticos de formato equiaxial. Essa estratégia é mostrada na Figura 2, para condições de temperatura onde os aços são laminados acima da temperatura T_1 . Entre as temperaturas T_1 e T_2 ocorre o conhecido tempo de espera, onde o material é resfriado ao ar livre até alcançar uma temperatura abaixo da temperatura de não recrystalização da austenita (T_{nr}), para a partir disso, dar início aos passes de acabamento. Abaixo da T_{nr} , a austenita deformada não recupera mais seu formato equiaxial que apresentava antes dos passes de laminação, ou seja, abaixo dessa temperatura não haverá mais recrystalização de grãos austeníticos [24].

A atuação dos elementos microligantes Nb e Ti ocorre justamente abaixo da temperatura de não recrystalização (T_{nr}), onde a difusão de carbono é retardada pela precipitação desses elementos bons formadores de carbonetos [21]. A forma empanquecada dos grãos é justificada porque abaixo da T_{nr} a austenita não sofre mais recrystalização. A austenita estabilizada, apresentará um encruamento residual na microestrutura que se acumula a cada passe dado. O encruamento faz surgir bandas de deformação na microestrutura, promovendo maior número de sítios disponíveis para a nucleação da ferrita [22]. Com a sequência de passes de deformação em temperaturas cada vez mais baixas, o material atingirá uma temperatura crítica A_{r3} onde iniciará a formação de ferrita. A austenita ainda presente nesta faixa de temperatura entre A_{r3} e A_{r1} sofrerá um encruamento adicional aumentando ainda mais o número de sítios disponíveis para nucleação de ferrita, e a ferrita sendo encruada, fará com que ocorra um aumento da resistência mecânica no material. Tudo isso resultará em uma microestrutura com grãos ainda mais refinados (equiaxiais) no aço microligado [23]. O processo de laminação controlada comparado ao processo de laminação convencional apresenta cinética de nucleação diferente. Enquanto no processo de laminação convencional a nucleação de grãos

ferríticos ocorre nos contornos de grãos austeníticos, no processo de laminação controlada, além da nucleação de novos grãos nos contornos de grãos austeníticos, novos grãos são nucleados em regiões das maclas e bandas de deformação formadas durante a deformação plástica.

3.2 Caracterização Microestrutural

A microestrutura de ambos os aços laminados a quente estudados nesse trabalho é formada pelos constituintes ferrita proeutetóide e perlita. Observou-se que a estrutura do aço conformado por laminação controlada (ASTM A572) apresentou um menor espaçamento médio entre as bandas de ferrita comparado ao aço processado convencionalmente (ASTM A36). Observou-se ainda, colônias de perlita e um refino muito expressivo devido a ação dos elementos microligantes Nb e Ti, que trabalham ativamente em campos específicos de temperatura inibindo o crescimento de grãos durante o processo de laminação controlada. A Figura 3 apresenta as micrografias obtidas por microscopia óptica desses dois aços.

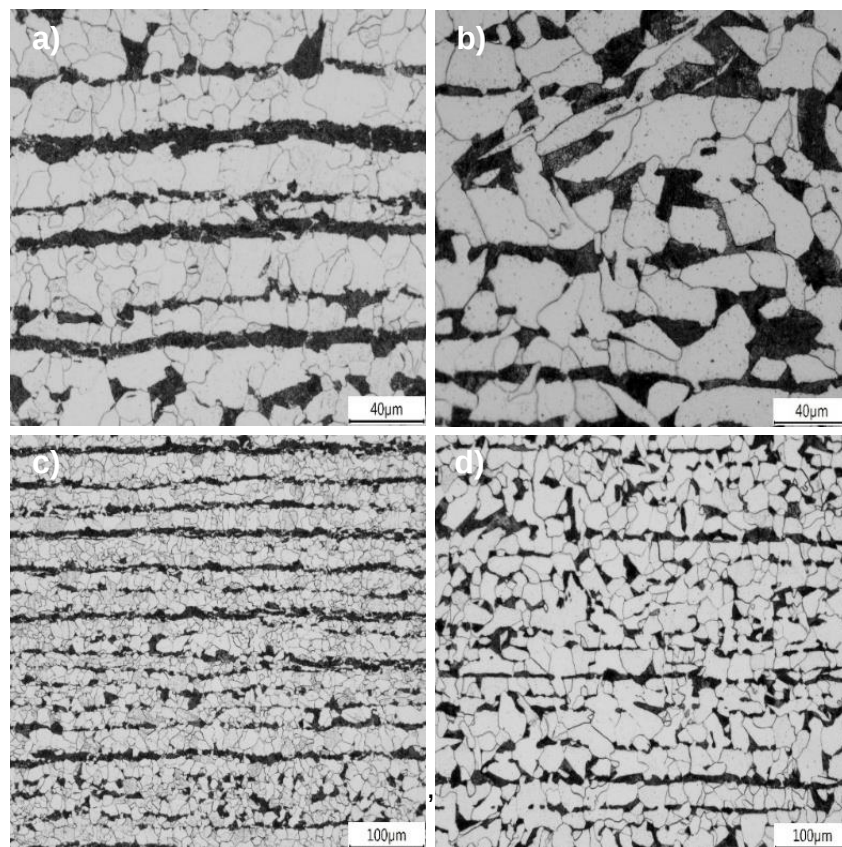


Figura 3 – Microestruturas dos aços ASTM A572 e ASTM A36 conformados sob laminação controlada e laminação convencional, respectivamente. a) ASTM A572 - MO - 500x – centro, b) ASTM A36 - MO - 500x - centro c) ASTM A572 - MO - 200x - 1/4 na direção Longitudinal, d) ASTM A36 - MO - 200x - 1/4 na direção Longitudinal – Ataque Nital 5%.

Segundo Yiming et al., Colpaer, Majka et al., Grange, Barreiro [11-15], o mecanismo de formação de bandeamento é um tipo de anisotropia microestrutural causada pela segregação de um ou mais elementos de liga substitucionais (por exemplo: manganês, silício, fósforo, enxofre e alumínio) durante a solidificação do aço. Quando o aço é austenitizado, não há energia suficiente para promover a difusão de

longo alcance de átomos de raio atômico relativamente grandes (Si, Mn), dessa forma a segregação não é eliminada, criando assim, durante o resfriamento, sítios preferenciais para nucleação de ferrita, em temperaturas mais altas, onde a austenita está menos estabilizada e de perlita, em temperaturas mais baixas, a partir de grãos austeníticos mais estabilizados [11-15].

É importante dizer que o bandeamento observado na microestrutura do A572 está associado à segregação química do manganês, pois o teor deste elemento no aço microligado é mais acentuado comparado ao ASTM A36. A segregação de manganês associada ao processamento termomecânico do material é o que dá origem a uma microestrutura bandada. Diante disso, vale destacar o papel significativo dos elementos de liga substitucionais no deslocamento das curvas de transformação de fase. O bandeamento é justamente o resultado da influência desses elementos na estabilidade da austenita. Regiões enriquecidas em Mn dificultam a difusão de carbono deixando a austenita mais estável no resfriamento, favorecendo as transformações de decomposição em temperaturas mais baixas e, portanto, favorecendo a formação de perlita [11-16]. Além disso, observou-se também que no ASTM A36 a fração de ferrita é favorecida devido ao menor teor de manganês em sua composição química.

Como já exposto acima, o refino da estrutura do aço microligado foi maior do que a do aço laminado de forma convencional. A ação do Nb e Ti juntamente com o processamento termomecânico são fatores que contribuíram fortemente para refino da microestrutura. Em função disso, foi quantificado o tamanho de grão médio ASTM de ambos os aços conforme dados representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tamanho de grão médio dos aços ASTM A572 e ASTM A36.

Amostra	Tamanho de Grão Médio (μm)	G (ASTM)
ASTM A572 L	4,92	12,50
ASTM A572 T	5,74	12,00
ASTM A36 L	15,54	9,00
ASTM A36 T	15,02	9,00

De acordo a norma ASTM E112 – 13, sabe-se que quanto maior o tamanho de grão médio ASTM mais refinada é a microestrutura do material [9]. Dessa forma, observa-se claramente que com a aplicação do processamento termomecânico e a adição de microligantes, a estrutura do aço ASTM A572 comparado ao aço ASTM A36 obteve um refino de 68,34% na microestrutura da amostra retirada na direção longitudinal e de 61,78% na microestrutura da amostra retirada na direção transversal.

3.3 Ensaios Mecânicos

3.3.1. Ensaios de tração

Foram executados três ensaios de tração para cada amostra de aço após a laminação. Os resultados obtidos de LE e LR são apresentados na Figura 4. Esta figura mostra a média dos resultados obtidos para cada triplicata de amostras. Percebe-se que o aço processado termomecanicamente obteve propriedades

mecânicas superiores ao aço conformado por laminação convencional. Enquanto o LE, LR e Alongamento do ASTM A572 foram de 404MPa, 519MPa e 46%, respectivamente, o ASTM A36 obteve 312MPa, 476MPa e 43%, respectivamente.

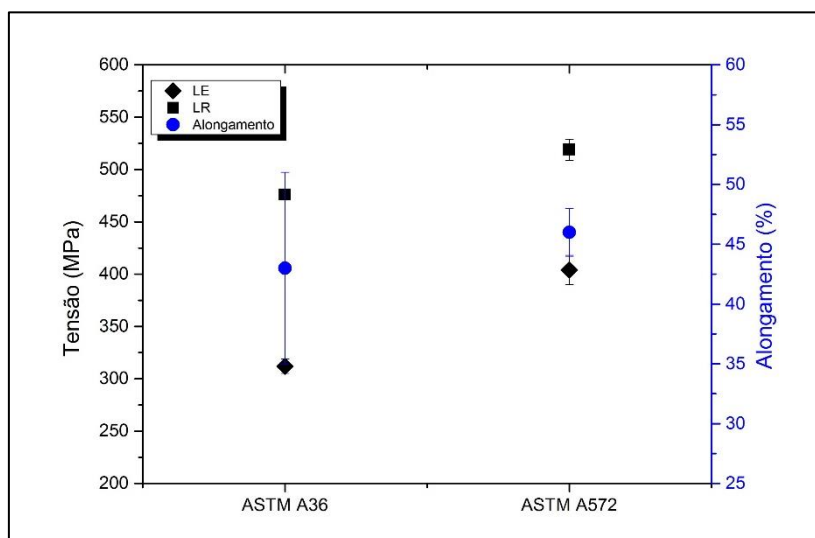


Figura 4 – Média dos resultados obtidos para o Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência (LR) e Alongamento Total (%) dos aços ASTM A572 e A36.

Comparado ao aço C-Mn convencional, a alta resistência do aço microligado vem da contribuição dos múltiplos mecanismos de endurecimento: endurecimento por solução sólida devido ao alto teor do Mn, endurecimento por refino de grãos, endurecimento por precipitação dos Nb(C,N) e Ti(C,N) e endurecimento por multiplicação de discordâncias (encruamento da ferrita) [27].

Já era esperado este aumento de propriedades mecânicas no aço microligado devido a ação do Nb e Ti em temperaturas críticas de transformação durante o processo de laminação controlada. A adição de elementos bons formadores de carbonetos ao aço baixo carbono inibe o crescimento de grãos ferríticos grosseiros, pois estes elementos na forma de precipitados estabilizam os grãos autênticos e abaixam a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$. Portanto, a ferrita advinda de temperaturas mais baixas por influência da ação dos carbonetos de Nb e Ti associado ao processamento termomecânico será consideravelmente mais refinada comparada a ferrita formada pelo processo de laminação convencional (em temperaturas mais altas), conforme já verificado na Figura 3 [27]. Como consequência disso, haverá aumentos simultâneos na ductilidade, resistência mecânica e tenacidade que são atribuídos ao aço microligado.

3.3.2 Ensaios de Tenacidade ao Impacto Charpy

Os ensaios de Tenacidade ao Impacto Charpy foram realizados nas temperaturas de 20°C, 0°C e -20°C nas direções transversal e longitudinal com o objetivo de quantificar a energia absorvida por cada material na temperatura ambiente e em baixas temperaturas, além de observar como as propriedades destes aços variam com a direção de retirada dos corpos de prova. Para cada temperatura, os ensaios foram feitos em triplicata. As Figuras 5 e 6 mostram os valores médios de energia absorvida nos ensaios realizados em corpos de prova amostrados nas direções transversal e longitudinal, respectivamente.

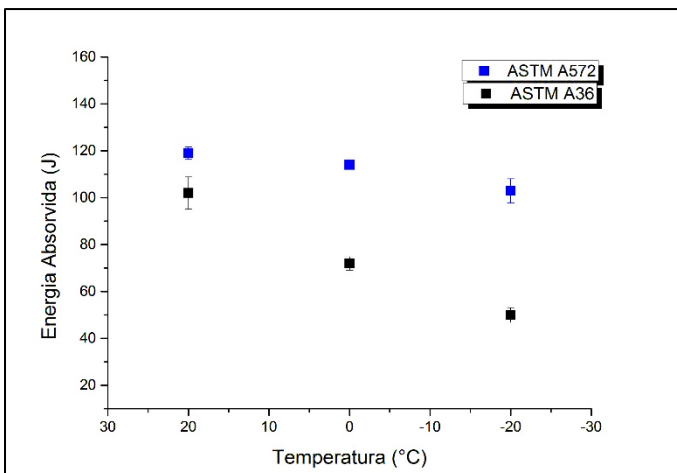


Figura 5 – Tenacidade ao impacto dos corpos de prova retirados na direção transversal dos aços ASTM A572 e ASTM A36.

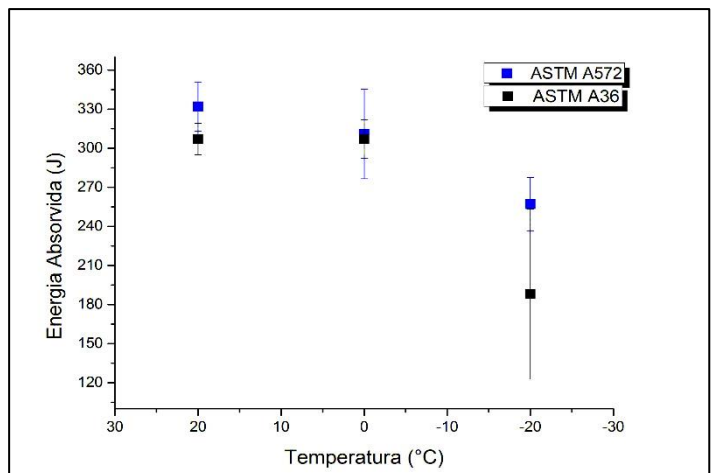


Figura 6 – Tenacidade ao impacto dos corpos de prova retirados na direção longitudinal dos aços ASTM A572 e ASTM A36.

Os resultados obtidos nos ensaios de tenacidade ao impacto Charpy mostraram que para ambos os aços, quanto menores as temperaturas, menor a energia absorvida pelos materiais, indicando que ambos os aços se tornam menos tenazes. Além disso, fica evidente pelos resultados apresentados que o aço A572 obteve resultados mais satisfatórios quando comparado ao A36. A energia absorvida por este foi consideravelmente maior do que a do A36 nas condições estudadas. Os ensaios foram executados nas duas direções afim de averiguar a anisotropia dos materiais.

Segundo Dieter [25] a anisotropia consiste na variação das propriedades mecânicas de um material conformado mecanicamente, dependendo sempre da direção que se retira o corpo de prova para ensaio. A anisotropia ocorre através da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas que a microestrutura do metal apresenta ao passar por grandes ciclos de deformação plástica por trabalho mecânico (anisotropia cristalográfica) ou devido ao alinhamento preferencial de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada na direção de trabalho da deformação plástica (fibramento mecânico). Isso justifica a menor absorção de energia dos corpos de prova retirados na direção transversal à de laminação. Nessa direção o material estará mais susceptível à propagação de trincas na presença de um concentrador de tensão devido ao bandeamento paralelo à direção de laminação proveniente da segregação de manganês, conforme já mencionado e discutido na Figura 3 [11-16].

3.4 Análises Fratográficas

As micrografias da Figura 7 mostram o comportamento microfractográfico dos corpos-de-prova Charpy ensaiados na temperatura de -20°C, consideravelmente crítica. Fica evidente perceber o tipo de fratura em cada material, enquanto no ASTM A572 observa-se a coalescência de microcavidades (*dimples*) e extensa deformação plástica as quais destacam a maior ductilidade do material, o ASTM A36 apresenta facetas de clivagem que destacam a maior fragilidade deste aço em baixas temperaturas. Além disso, sua superfície apresentou aspecto regular sem a presença de cavidades profundas. Observou-se ainda o aparecimento de trincas

secundárias (indicadas por setas vermelhas na Figura 7) no corpo de prova do aço ASTM A36 que mostram, mais uma vez, a influência do bandejamento no comportamento mecânico do material, ou que nesse ponto específico ocorreu a precipitação de algum constituinte que fragilizou a estrutura [26].

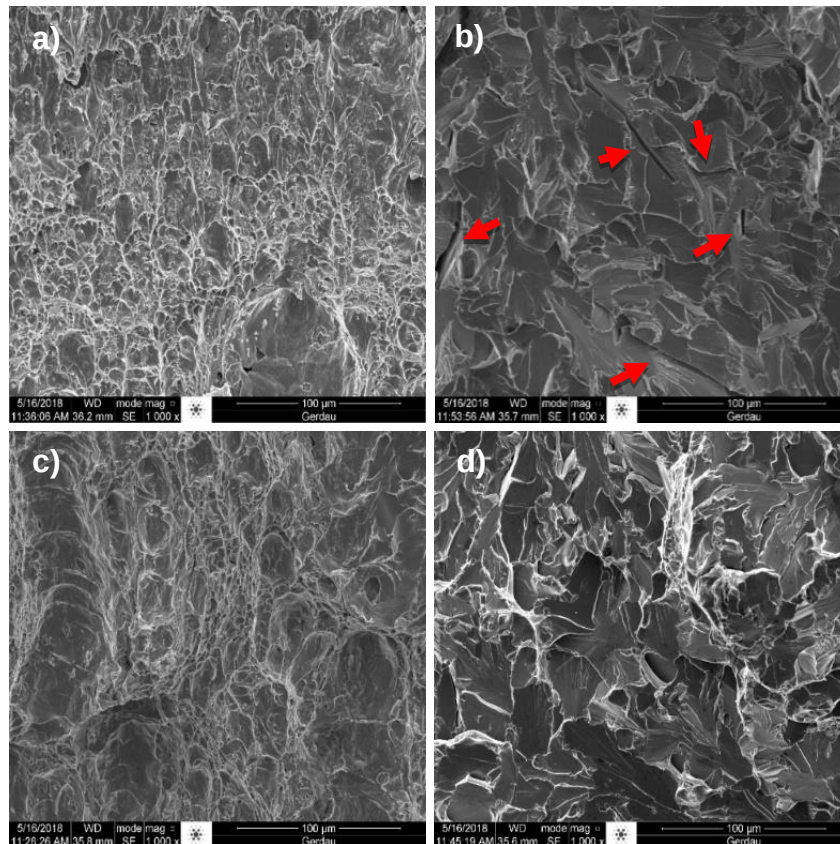


Figura 7 – Micrografia MEV das fraturas dos corpo-de-prova Charpy ensaiados nas temperaturas de -20°C nas direções longitudinal e transversal para os aços a) ASTM A572 – L, b) ASTM A36 – L, c) ASTM A572 – T, c) ASTM A36 – T.

Observou-se que mesmo à temperatura ambiente, existe uma diferença de desempenho em termos de comportamento mecânico no aço ASTM A36 variando-se a direção do entalhe no corpo de prova. Isso é reflexo da anisotropia do material. Na direção transversal, direção na qual o aço se encontra sob um estado de solicitação crítica, a energia absorvida pelo ASTM A36 foi menor comparado ao ASTM A572. Certamente isso pode ter acontecido porque quando o entalhe se encontra paralelo à direção de laminação a fragilização é mais acentuada devido às bandas de ferrita e perlita na microestrutura do material, pois existirá maior facilidade de propagação de trincas nessas interfaces. O bandejamento altera as propriedades mecânicas do aço, justificando assim tais resultados obtidos nos ensaios de impacto como representado na Figura 8.

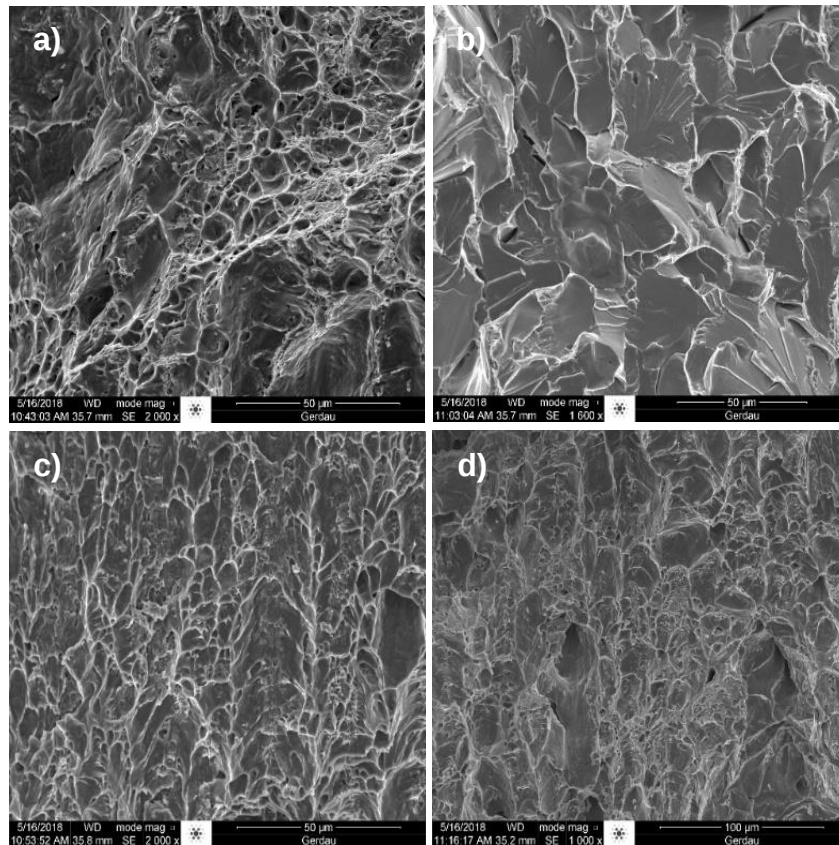


Figura 8 – Micrografia MEV das fraturas dos corpo-de-prova Charpy ensaiados nas temperaturas de +20°C nas direções longitudinal e transversal para os aços a) ASTM A572 – L, b) ASTM A36 – L, c) ASTM A572 – T, c) ASTM A36 – T.

Figura 9 destaca as superfícies fraturadas dos corpos-de-prova Charpy ensaiados a 20°C, sendo possível observar as diferenças macrográficas de cada aço. A maior absorção de energia do A572 justifica a maior deformação plástica lateral no CP (fratura dúctil). Já o CP do A36 apresentou fratura regular, refletora, com pouca deformação lateral (fratura frágil).

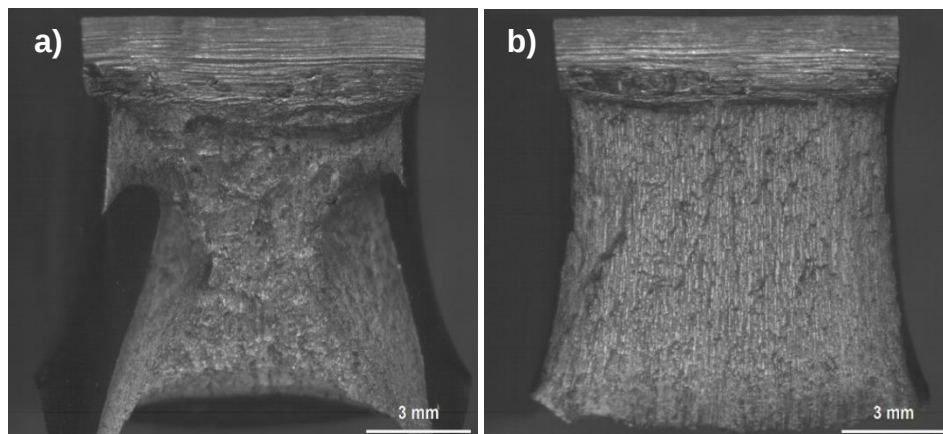


Figura 9 – Aspecto das fraturas nos ensaios de impacto Charpy realizados na temperatura de +20°C para os aços a) ASTM A572 e b) ASTM A36.

4 CONCLUSÃO

Comparando as propriedades mecânicas dos dois aços, ASTM A36 e ASTM A572, pode-se concluir que o aço A572 apresentou melhor desempenho do que o aço A36. O mesmo apresentou um refino de aproximadamente 68% no tamanho de grão ferrítico, um aumento de 29,5% no Limite de Escoamento (LE) e 9,0% no Limite de Resistência (LR) em relação ao A36. Além disso, o aço microligado e processado termomecanicamente obteve um acréscimo de 7% no alongamento total e um aumento de 16,7%, 58,3%, e 106% de energia absorvida para as temperaturas de 20°C, 0°C e -20°C, respectivamente, em comparação ao aço laminado convencionalmente. O bom desempenho deste aço em baixas temperaturas justifica o aumento das propriedades mecânicas como tenacidade ao impacto e ductilidade quando comparado ao aço ASTM A36. Dessa forma, fica evidente que a adição de elementos microligantes associado ao processamento termomecânico adequado contribuiu para o refino do tamanho de grão e para o aumento simultâneo da resistência mecânica e tenacidade do aço microligado ASTM A572.

Agradecimentos

Os autores agradecem à GERDAU – Usina Ouro Branco pela disponibilização do laboratório para execução e caracterização dos ensaios e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa de um dos autores.

REFERÊNCIAS

- 1 Deardo, A.J. An overview of microalloyed steels, 8th Process Technology Conference Proceedings, Warrendale, 1988, p. 67-78.
- 2 Diniz, E. O. Avaliação da Influência do Nióbio na Microestrutura e Propriedades Mecânicas da barra chata temperada e revenida para aplicação de feixe de molas. 2005. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- 3 Lino J. J. P. Laminação Controlada de um Aço Microligado ao Nióbio Visando a Obtenção do Grau API X60 em Laminador Steckel. Dissertação de Mestrado. Rede Temática em Engenharia de Materiais. 2017.
- 4 Padilha, Â. F.; Siciliano Jr., F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 3ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. Cap. 10, p. 132-160.
- 5 Colaço, R. Materiais de Construção – Guia de Utilização, Editores: M^a. Clara Gonçalves, F. Margarido e R. Colaço, Loja da Imagem, 2005.
- 6 Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA). Aço em Construção – Aços estruturais. 2014, disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em: 28 jan. 2018.
- 7 ASTM Designation A572/A572M. Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA, 2015. 4 p.
- 8 ASTM Designation A36/36M. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA, 2014. 4 p.
- 9 ASTM Designation E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size: American Society for Testing and Materials. USA, 2013. 28 p.

- 10 ASTM Designation A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products: American Society for Testing and Materials. USA, 2014. 21 p.
- 11 Yiming, X., Weins, W. N., Dhir, A. A metallographic investigation of banding and diffusion of phosphorus in steels, *Microstructural Science*, v.20,1993
- 12 Colpaert, H., *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*, 4ª ed., São Paulo, Edgard Blucher, 2008, 653 p.
- 13 Majka, T. F., Matlock, D. K., Krauss, G. Development of microstructural banding in low-alloy steel with simulated Mn segregation, *Metallurgical and Materials Transactions*, v.33A, n.6, p.1627-1637, jun. 2002.
- 14 Grange, R. A. Effect of microstructural banding in steel. *Metallurgical Transactions*, v.2, p.417-426, feb. 1971.
- 15 Barreiro, J. A. *Tratamientos térmicos de los aceros*. 8ª ed. Madrid: Dossad, 1985. 534p.
- 16 Bastien, P. G. The mechanism of formation of banded microstructure. *Journal of the Iron and Steel Institute*, v.187, p.281-291, dec. 1957.
- 17 Gorni, A. A. Os Tratamentos Termomecânicos Garantem a Competitividade dos Produtos Planos de Aço. *Industrial Heating – Edição Brasileira*, 2012;16:67-71.
- 18 Miranda L. S. Estudo da Influência de Variáveis de Laminação em uma Linha de Laminação de Tiras a Quente Convencional nas Propriedades Mecânicas de um Aço Alto Nióbio da Classe API 5L X70. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2010.
- 19 Boratto, F. J. M.; Barbosa, R. A. N. M.; Santos, D. B. Fundamentos da Laminação Controlada, Apostila Fundação Christiano Ottoni, BH, 1989.
- 20 Ouchi, C.; Sampei, T.; Kozasu, I. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of Gama-Alfa Transformation after Hot Rolling. *Transactions ISIJ*, v. 22, p. 214-222, 1982.
- 21 Plaut R. L., Gorni A. A., Nakashima J. T., Pereira M. M., Silveira J. H. D. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço API X70 Produzidos Através de Laminação Controlada. 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2008, p.723-733.
- 22 Gorni, A. A.; et al. Estudo das Propriedades Mecânicas do aço API X70 Produzido por Laminação Controlada. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 6, n. 1, p. 7-12, 2009.
- 23 Barbosa, R. A. N. M.; Boratto, F. J. M.; Santos, D. B. Fundamentos da Laminação Controlada. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais [s.n.], 1989. 325 p.
- 24 Lino J. J. P. Laminação Controlada de um Microligado ao Nióbio Visando a Obtenção do Grau API X60 em Laminador Steckel. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- 25 Dieter, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. p. 282-90, p. 62-4, p. 319.
- 26 Haskel, H. L.; Pauletti, E.; Martins, J. P.; Carvalho, André, L. M. Microstructure and microtexture assessment of delamination phenomena in charpy impact tested specimens. *Materials Research JCR*, v. 17, p. 1238-1250, 2014.
- 27 Jun, Hu; Lin-Xiu, Du; Jian-Jun, Wang; Hui, Xie; Cai-Ru, Gao; R.D.K. Misra. Structure-mechanical property relationship in low carbon microalloyed steel plate processed using controlled rolling and two-stage continuous cooling, v. 585, p. 197-204, 2013.