

Ecomateriais e o estudo de caso da seleção de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga para o design de Estruturas Metálicas

A. Braun¹, E.L. Schneider^{2*}, A.B.D Moura²

¹Docente do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade FEEVALE, RS, Brasil

²Docentes do curso de Engenharia Mecânica e do curso de Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, da Universidade FEEVALE, RS, Brasil

(Recebido em 15/06/2016; revisado em 27/06/2016; aceito em 22/03/2017)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O uso de ecomateriais no desenvolvimento de produtos é uma forte tendência no mercado atual e deve-se principalmente a menor impacto ambiental e a extensão da vida útil que o emprego dos mesmos proporciona aos produtos. Neste trabalho, é feita uma análise do uso de aços de alta resistência e baixa liga (high strength low alloy steels- HSLA) para a construção de estruturas de menor secção. Através de revisão bibliográfica, são explanados os benefícios como o melhor aproveitamento de matérias primas, logístico e de distribuição mais inteligente, com mais insumos sendo transportados e manipulados pela mesma cadeia. Também é realizada uma comparação de materiais computadorizada com o software Cambridge Engineering Selector[®] a fim de comparar propriedades dos HSLA em relação a outros materiais. No projeto de produtos e estruturas metálicas, o uso dos aços HSLA permite associar elevada resistência mecânica, baixo consumo de elementos de liga e de energia em sua fabricação, bem como um elevado índice de reciclagem.

Palavras-chave: Ecomateriais, Aços de Alta Resistência e Baixa Liga, HSLA, Estrutura Metálica.

Abstract:

The use of ecomaterials in product development is a strong trend in the current market and is mainly due to lower environmental impact and the useful life extension that its use provides to the products. In this work, an analysis of the use of high strength and low alloy steels (HSLA) is done for a lower section structure construction. Through a bibliographic review, benefits such as better use of raw materials, logistics and smarter distribution are explained, with more inputs being transported and handled by the same chain. A computerized materials selection with the Cambridge Engineering Selector[®] software is also performed in order to compare HSLA properties with respect to other materials. In the product design and structures, the use of HSLA steels allows the association of high mechanical strength, low consumption of alloying elements and energy in its manufacture, as well as a high recycling rate.

Keywords: Ecomaterials, High Strength and Low Alloy Steels, HSLA, Metallic Structure.

1. Introdução

Conforme Yagi e Halada [1], os materiais sempre estiveram e sempre estarão a serviço da humanidade e, desde a construção da primeira ferramenta, arma ou ornamentação, os recursos naturais passaram a sofrer os efeitos da intervenção humana. Halada [2] cita que os processos de produção e aplicação de materiais envolvem, obrigatoriamente, etapas comuns de transformação de matérias-primas, de fabricação de artefatos ou dispositivos, de aplicação durante o ciclo de vida do material e, ao fim deste período, de descarte, reuso ou reciclagem. Umezawa [3] indica que todas as etapas do ciclo dos materiais podem exercer algum impacto sobre o ambiente e, de forma mais específica, podem-se destacar: extração de matérias-primas a partir de reservas naturais; emissões gasosas, líquidas e

sólidas durante o processo de manufatura; emissões ao ambiente durante o uso dos materiais; implicações energéticas de produção e uso; efeitos positivos ao ambiente durante o ciclo de vida do material, quando este é aplicado em descontaminação, remediação ou catálise; impactos ambientais do fim de ciclo do material (se necessita ser aterrado, incinerado, se é reciclável ou se pode ser reaproveitado).

Halada [2] afirma que é sabido que a Terra possui uma capacidade finita tanto para a disponibilidade de recursos como para o descarte dos resíduos, fato que acentua a importância da minimização de perdas ambientais, bem como do uso mais eficiente de recursos e de energia para um desenvolvimento sustentável das nações. Neste contexto, Hsien [4] demonstra que é evidente a necessidade de novas tecnologias para a produção de materiais ambientalmente

*Email: eduardoluis@feevale.br (E.L. Schneider)

adequados. Como resposta a essa necessidade, o conceito de ecomaterial foi proposto, segundo Halada [6], no início dos anos 90. Nos estágios iniciais do desenvolvimento da ideia de ecomateriais, três índices (Figura 1) foram sugeridos: 1. Desempenho: expandir as fronteiras humanas, atividades humanas objetivando desenvolvimento; 2. Meio ambiente: coexistência com a ecossfera, minimizando o impacto no meio ambiente; 3. Qualidade de vida: melhoria da qualidade de vida, criando conforto em simbiose com a natureza.

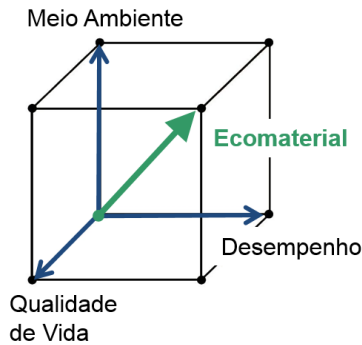


Figura 1. Direção dos Ecomateriais no desenvolvimento dos três índices. Adaptado de Halada [6].

Ferreira *et al.* [5] indicam que, em linhas gerais, além de serem benignos ao meio ambiente, os ecomateriais devem trazer benefícios em termos de conforto e qualidade de vida, devem ser compatíveis com o avanço tecnológico, mostrando que a expansão das fronteiras da humanidade pode e deve ser feita de forma tão segura quanto eficiente. Isto equivale a dizer que o desenvolvimento sustentável não é sinônimo de retrocesso e não impõe um modo de vida desconfortável e rústico, baseado no uso de materiais de qualidade inferior. Os ecomateriais são programados especificamente para minimizarem efeitos adversos ao meio ambiente, mantendo seu desempenho e preço competitivo.

2. Ecomateriais e estratégias para sua aplicação

Welford [7] cita que desde a Revolução industrial, a maior preocupação no processo de seleção de materiais foi costumeiramente feita por demandas técnicas, como custo, estabilidade à temperatura, massa específica, resistência do material, dureza, dentre outras. Holloway [8] indica que os designers e engenheiros sempre focaram na melhoria do desempenho de parâmetros como menor peso, menor custo de projeto e mínima deformação térmica. Entretanto, com a mudança das políticas ambientais para as indústrias nos anos recentes, a maior ênfase se dá agora na adoção de tecnologias para a redução dos aspectos ecológicos especialmente na seleção de materiais. Allenby e Richards [9] afirmam que as empresas entendem que a prevenção de poluição pode ser economicamente benéfica. Yagi [10] demonstra que de maneira a minimizar a carga ambiental na vida do produto como um todo, ecomateriais são considerados um conceito

importante. Conforme Ayres [11] já é claro que grandes quantidades de energia e matérias primas são perdidas durante a fabricação e transporte, incluindo materiais descartados e emissões, particularmente para produtos não reciclados. Hart [12] demonstra que no cenário atual, mesmo com as companhias almejando emissões zero, a Terra ainda pode sofrer com os efeitos das emissões realizadas até agora. Com a questão da poluição ambiental se tornando cada vez mais séria, os engenheiros e designers devem se concentrar nos efeitos que as decisões tomadas na seleção de materiais têm nos ecossistemas na nossa volta. Ashby [13] cita que, assim a seleção de materiais para certo produto é de vital importância, enquanto que o material determina o uso de nossos recursos naturais assim como a quantidade de energia necessária para a fabricação e uso do produto final.

Allione *et al.* [14] indicam que as três estratégias principais incluem diretrizes, como a seguir:

- Uso de materiais com baixo impacto ambiental: essa estratégia aponta diretamente para a minimização do consumo de recursos e emissões ao longo do ciclo de vida do produto. Isto inclui diversas diretrizes para a seleção de materiais, que podem atuar de maneira sinérgica, como por exemplo, a ecoeficiência, uma curta cadeia de distribuição, o emprego de recursos renováveis e a toxicidade para a saúde do homem e o meio ambiente.

- Extensão da vida do produto: essa estratégia é diretamente focada na fase do fim da vida porque está direcionada a postergar o momento de disposição final enquanto evita o uso de novos recursos para a manufatura de um novo material. Dessa maneira, o objetivo final de reduzir o consumo de recursos naturais e emissões associadas pode ser indiretamente atingido. De acordo com essa estratégia, duas novas diretrizes aparecem, durabilidade dos materiais e uma abordagem top-down para o fim da vida do material.

- Políticas e ética dos fabricantes de materiais: esta estratégia é direcionada para a criação de consciência entre os fabricantes de materiais da sua responsabilidade ambiental e da valorização daqueles que adotam um comportamento ambiental adequado. As diretrizes resultantes levam a escolha de materiais cujos fabricantes conseguem demonstrar suas emissões ambientais pela apresentação de certificados da manufatura de seus produtos.

Essas estratégias e diretrizes podem atuar de maneira sinérgica para melhorar o desempenho ambiental, mas algumas vezes os engenheiros e designers podem encontrar situações contraditórias na escolha de materiais, por exemplo, esses podem escolher um material que garanta boa durabilidade, mas que tenha um alto valor de energia incorporada. A Figura 2 mostra as estratégias e diretrizes indicadas anteriormente em conjunto com os parâmetros e critérios associados a cada item. Assim, ficam claras as métricas aplicadas na definição dos parâmetros quantitativos, além da visualização dos qualitativos e de sua inter-relação com as diretrizes apresentadas.



Figura 2. Sistema multicritério, feito de parâmetros qualitativos e quantitativos utilizado para avaliação do perfil ambiental do material de acordo com a abordagem do ciclo de vida. Allione et al [14].

Nesse contexto, conforme indicam Yagi e Halada [15], com o desenvolvimento de materiais com propriedades de alta resistência e vida útil longa, podem-se projetar e construir veículos mais leves, pontes mais longas, edifícios maiores, dentre outros. Isto pode contribuir para a conservação de recursos e energia, reduzindo a carga ambiental associada. Os aços de alta resistência e baixa liga (high strength low alloy – HSLA) se enquadram nesses materiais, pois tem elevada resistência, minimizam o uso de elementos de liga e consomem menor quantidade de energia em sua fabricação, além de possuírem alta capacidade de reciclagem.

2.1 Aços de alta resistência e baixa liga (HSLA)

O aço é uma liga metálica de ferro e carbono. Pannoni [16] cita que uma liga consiste da união íntima de dois ou mais elementos químicos onde pelo menos um é um metal e onde todas as fases existentes têm propriedades metálicas. Chiaverini [17] define o aço como sendo uma liga de elementos secundários (como silício, manganês, fósforo e enxofre), presentes devido aos processos de fabricação. Ramos [18] afirma que o ferro, que não existe puro na natureza, é encontrado em toda a crosta terrestre associado ao oxigênio e à sílica. O carbono é também relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado em diversas formas. Na siderurgia, o carbono é obtido do carvão mineral, e em alguns casos do carvão vegetal. Dessa forma, as matérias primas necessárias para fabricação do aço são relativamente abundantes na natureza e podem ser encontradas em diversas formas.

Askeland [19] afirma que um tipo de aço a ser selecionado para uma determinada aplicação deve reunir

características adequadas para as condições de trabalho. Inicialmente devem ser identificadas as características mais importantes que o material deve apresentar. Gorni [20] afirma que os produtos planos de aço possuem aplicação praticamente universal, graças à capacidade que têm de assumir os mais variados perfis de propriedades através da escolha criteriosa dos elementos de liga e da aplicação de tratamentos termomecânicos, térmicos ou termoquímicos específicos. Misra *et al.* [21] apontam que existe atualmente um forte interesse no uso de aços laminados a quente nos setores automotivos e metalúrgicos no lugar de aços temperados e revenidos, pelas considerações de custo e de energia e que o uso de aços HSLA com espessura reduzida permitem a redução de peso em aplicações dessas indústrias.

2.1.1 Tipos de aço e influência dos elementos de liga

As principais características do aço, conforme Beer *et al.* [22] que possibilitam seu uso em estruturas metálicas são a resistência, chamada também de rigidez, que é a resistência à deformação permanente; a resistência ao impacto, chamada também de resistência a fratura, medida com o ensaio de Charpy; a dureza, usada para descrever a resistência ao riscamento ou abrasão; a fragilidade, que descreve a tendência do material a quebrar antes de dobrar ou deformar plasticamente; a plasticidade que significa a capacidade de se moldar, dobrar ou deformar de maneira a não retornar ao seu formato original; a elasticidade, que é a habilidade de deformar, dobrar, comprimir ou alongar e retornar ao formato original uma vez que o esforço é removido; a resistência ao desgaste onde o material tem resistência à erosão, adesão ou fricção e a integridade estrutural que é a habilidade de resistir

à carga máxima prevista enquanto resiste a fratura e a fadiga, produzindo um mínimo de flexão ou deflexão, provendo uma vida de serviço longa.

Ara [23] indica a seguinte distinção entre os aços carbono comum e os aços ligados:

- Aços-carbono são ligas de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação, que podem ser divididos em:

- Aços de baixo teor de carbono, com C menor que 0,30%, são aços que possuem grande ductilidade, bons para o trabalho mecânico e soldagem (construção de pontes, edifícios, navios, caldeiras e peças de grandes dimensões em geral). Estes aços não são temperáveis;

- Aços de médio carbono, com teores de carbono de 0,30 a 0,70%, são aços utilizados em engrenagens, bielas, etc.. São aços que, temperados e revenidos, atingem boa tenacidade e resistência;

- Aços de alto teor de carbono, com carbono maior que 0,70%. São aços de elevada dureza e resistência após a tempera, e são comumente utilizados em molas, engrenagens, componentes agrícolas sujeitos ao desgaste, pequenas ferramentas, etc..

- Aço-liga são os aços carbono que contém outros elementos de liga, ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais.

Os aços-liga, por sua vez, podem ser subdivididos em dois grupos:

- Aços de baixo teor de ligas, contendo menos de 8% de elementos de liga;

- Aços de alto teor de ligas, com elementos de liga acima de 8%.

A AMC [24] indica a influência dos elementos de liga para os aços e, de acordo com a mesma, o carbono tem a maior influência nas propriedades do aço. Ele é o elemento primário para o endurecimento da liga. A dureza e a tensão de ruptura aumentam na medida em que aumenta a quantidade de carbono, até cerca de 0,85%. A ductibilidade e a soldabilidade

diminuem com o aumento do carbono. Para os aços HSLA, alguns elementos são utilizados para favorecer o refino dos grãos da microestrutura do aço. Constitui-se na prática de se adicionar pequenas quantidades de elementos, como o nióbio (Nb), o titânio (Ti) e o vanádio (V), onde esses combinam preferencialmente com o carbono e/ou nitrogênio formando uma fina dispersão de partículas precipitadas na matriz do aço. Ainda a AMC [24] indica que o nióbio aumenta o limite de ruptura e em menor grau a tensão de escoamento do aço carbono, o titânio é usado para retardar o crescimento dos grãos, aumentar a resistência e também para melhorar as características das inclusões, onde esse faz com que essas sejam globulares ao invés de alongadas, aumentando a resistência e ductibilidade na dobra transversal. Por fim, o vanádio aumenta a tensão de escoamento e de ruptura, melhorando significativamente a resistência dos aços. Outros elementos, como o manganês, que aumenta a qualidade superficial, força e dureza e o alumínio, que tem função de desoxidante e de controle de crescimento do grão de austenita, são usados nas composições desses tipos de aço.

Santos [25] cita que são impurezas as substâncias estranhas que fazem parte dos metais produzidos através de processos metalúrgicos. Elas são de 0,01% a 2,0% do peso do metal e são de difícil remoção durante a fabricação, modificando algumas propriedades mecânicas da liga em questão. Alguns elementos residuais são o manganês, silício, fósforo e o enxofre, formando inclusões na matriz do aço.

Merlin *et al.* [26] citam que nos últimos 60 anos os aços HSLA são usados em um grande campo de aplicações onde os benefícios econômicos de redução de peso juntamente com outras características específicas como resistência ao desgaste, resistência a corrosão atmosférica, resistência a fratura e soldabilidade podem ser atingidas simultaneamente. Patel *et al.* [27] citam que os aços HSLA oferecem a vantagem da redução de peso e economia de custos, comparados aos aços comuns.

A Tabela 1 mostra a composição química típica de um HSLA.

Tabela 1. Composição química típica para um aço microligado de alta resistência (% peso). SSAB [28].

C máx	Si máx	Mn máx	P máx	S máx	Al min	Nb máx	V máx	Ti máx
0.12	0.10	2.10	0.025	0.010	0.015	0.09	0.20	0.15

A composição química pode variar, incluindo outros elementos de liga, dependendo de quais propriedades são desejadas no aço em questão. AMC [24] cita que os aços de baixa liga e alta resistência (HSLA) ou aços microligados são concebidos para obter melhores propriedades mecânicas que os aços carbono convencionais. Sua fabricação é orientada para a obtenção de propriedades específicas, ao invés de uma composição química padronizada. Para os HSLA a composição química pode variar para diferentes espessuras de chapa, para obter as propriedades mecânicas necessárias. Gentile e Button [29] indicam que os aços microligados são constituídos por um grupo específico de aços com composição química especialmente desenvolvida para alcançar elevados valores de propriedades mecânicas. Os HSLA tem uma baixa

quantidade de carbono (0,50 a 0,25%) para garantir formabilidade e soldabilidades adequadas e tem quantidade de manganês na casa de 2,0%.

Patel *et al.* [27] analisaram as possibilidades de redução de peso obtida pela seleção de um aço microligado em uma estrutura com perfis de diferentes geometrias comparados a um aço de 200 MPa de resistência, para diversas situações de carregamento.

Cada caso particular deve ser analisado na tomada de decisão quanto ao uso e redução da secção do material de construção da estrutura. Eckerlid *et al.* [30] demonstram que a introdução de um aço HSLA em um chassis de semi-reboque possibilitou a redução do peso da estrutura de aço de 3200 kg para 2520 kg, correspondendo a uma redução de

21%. Sperle [31] indica que o uso dos aços de alta resistência possibilita a redução da espessura do material e do peso próprio da estrutura, que pode ser revertido em maior capacidade de carga. Menores pesos na produção levam a diminuir os custos de manuseio e materiais e menor deposição de material em operações de soldagem. Adicionalmente, os aços de alta resistência modernos combinam propriedades favoráveis, tais como elevada resistência, soldabilidade, excelentes características de conformação e de punção e de pequenas variações nas propriedades físicas.

2.2 Comparação de eco propriedades do HSLA

Com objetivo de analisar diversos materiais em comparação aos HSLA, realizou-se uma seleção de materiais computadorizada com o software Cambridge Engineering Selector® (CES EduPack 2015) a fim de verificar se há outros materiais que possam apresentar melhores eco propriedades. Este software possibilita realizar, de modo virtual, o cruzamento de propriedades de materiais, onde, a partir de um banco de dados, se faz a triagem dos materiais coincidentes aos requisitos solicitados, eliminando os que não atendem os requisitos em questão. Assim, foram elaborados dois gráficos comparando alguns materiais, um em termos de pegada de

carbono (relacionada com a liberação de CO₂ na atmosfera em kg/kg) versus preço e outro em termos de tensão de escoamento (para comparar os valores até onde o material suporta de esforços antes que uma deformação irreversível possa ocorrer) versus energia incorporada (energia que deve ser empregada para criar 1 kg de material utilizável).

Através da análise dos gráficos gerados pelo software CES e mostrado nas Figuras 3 e 4, pode-se perceber que não existe uma relação direta entre preço e liberação de CO₂ na atmosfera em kg/kg, nem de tensão de escoamento com a energia incorporada. O custo por Kg de material cresce exponencialmente quando observamos as outras opções de materiais analisadas, inclusive o aço inoxidável representado pelo AISI 430. Nestes critérios, os HSLA, representados pelo YS550, só perdem para os aços baixo carbono, representados aqui pelo AISI 1020 e para os ferros fundidos, representados pelo ferro fundido cinzento. Porém, analisando a Figura 4, pode-se verificar que quando a tensão de escoamento é analisada em função da energia incorporada, os HSLA apresentam valores muito superiores e com a menor energia incorporada de todos. O material que se aproxima em termos de resistência ao escoamento é o alumínio 7075 T6, mas o valor da sua energia incorporada é da ordem de dez vezes maior.

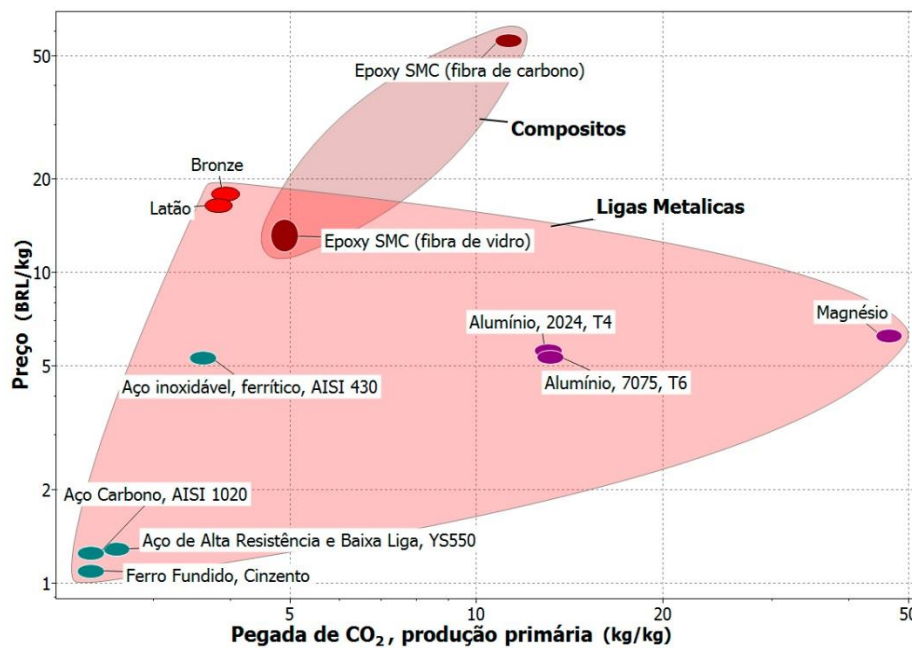


Figura 3. Gráfico de seleção de materiais comparando preço e liberação de CO₂ na atmosfera em kg/kg.

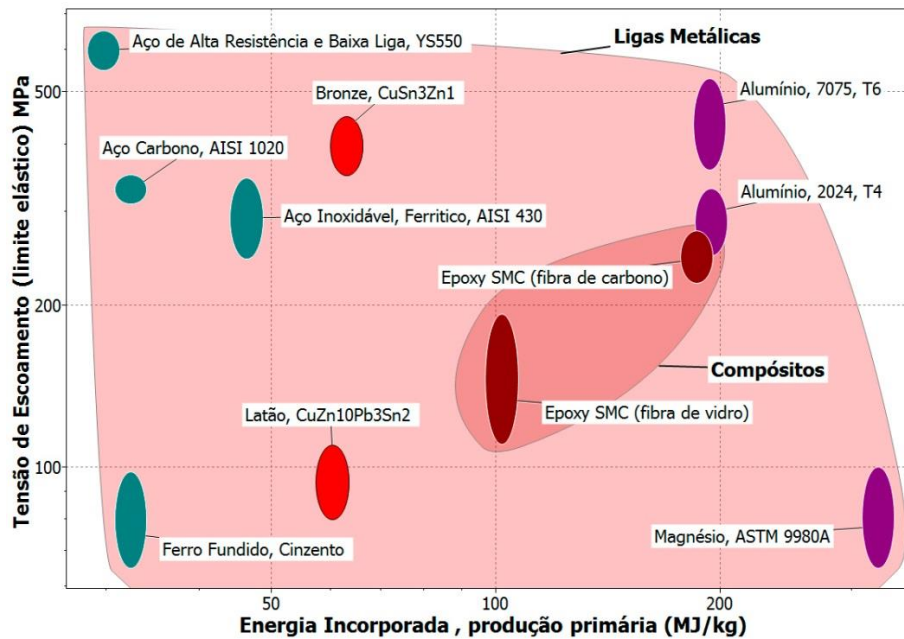


Figura 4: Gráfico de seleção de materiais comparando tensão de escoamento e energia incorporada empregada para criar 1 kg de material utilizável.

2.2.1 Fabricação dos aços HSLA

Senuma [32] indica que os mecanismos de endurecimento de metais propiciam obter ligas com elevada resistência mecânica, conjugada com alta tenacidade. As técnicas de endurecimento em metais contam com princípios simples: quanto maior for a restrição ao movimento de discordâncias, maior será a resistência de um material metálico.

Os principais mecanismos de endurecimento de metais segundo Kern *et al.* [33] podem ser resumidos em endurecimento pela redução do tamanho de grão, pela formação de solução sólida, por encruamento, por dispersão de partículas e por transformação de fase. Para os HSLA, Davis [34] cita que em um metal policristalino, o tamanho dos grãos exerce influência sobre as propriedades mecânicas. Grãos adjacentes possuem diferentes orientações cristalinas e um contorno de grão em comum. Como os grãos possuem orientações diferentes, uma discordância que se movimenta de um grão A para um grão B, deve mudar sua direção de movimento. A desordem atômica na região de um contorno de grão resulta em uma descontinuidade do plano de escorregamento de um grão para o outro. Portanto, as discordâncias não ultrapassam contornos de grão de alto ângulo, mas a tensão gerada no plano de escorregamento de um grão pode ativar fontes de novas discordâncias. Materiais com grãos finos são mais resistentes que materiais com grãos grosseiros porque há maior quantidade linear de contornos de grão e isso dificulta a movimentação de discordâncias.

No caso dos HSLA, o processo de fabricação é muito importante e foi desenvolvido para maximizar os efeitos dos elementos (V, T e Nb) aditivos que são utilizados na liga. Yoshie [35] afirma que o recente aumento na demanda de estruturas de aço e o aumento da severidade nas condições de serviço promoveram o desenvolvimento de tecnologias para muitos tipos de controle de microestruturas, o que possibilita a melhoria nos projetos de ligas de aço. Nishioka e Ichikawa [36] citam que os aços fabricados por controle de processo termomecânico resfriado a água (water-cooled thermomechanical control process - TMCP) possibilitam boa soldabilidade, sendo muito valorizados nas empresas de construção naval, estruturas marítimas, tubulações e construção civil. Já foi antecipado que os consumidores de aço irão requer maiores valores de resistência mecânica e ao desgaste, assim como novas propriedades, onde o desenvolvimento do TMCP é muito importante. Yoshie e Sasaki [37] indicam que o TMCP permite o controle microestrutural e de laminação e transformação de fase para materiais resfriados com água. Esse processo tem muitas vantagens que podem ajudar a superar os problemas relacionados com a adição de elementos de liga e tratamentos térmicos convencionais.

Os aços HSLA fabricados pelo processo TMCP foram desenvolvidos para tratar os requisitos conflitantes de resistência, dureza e soldabilidade através do refinamento de grão. A Figura 5 mostra de maneira simplificada a linha de fabricação dos HSLA.

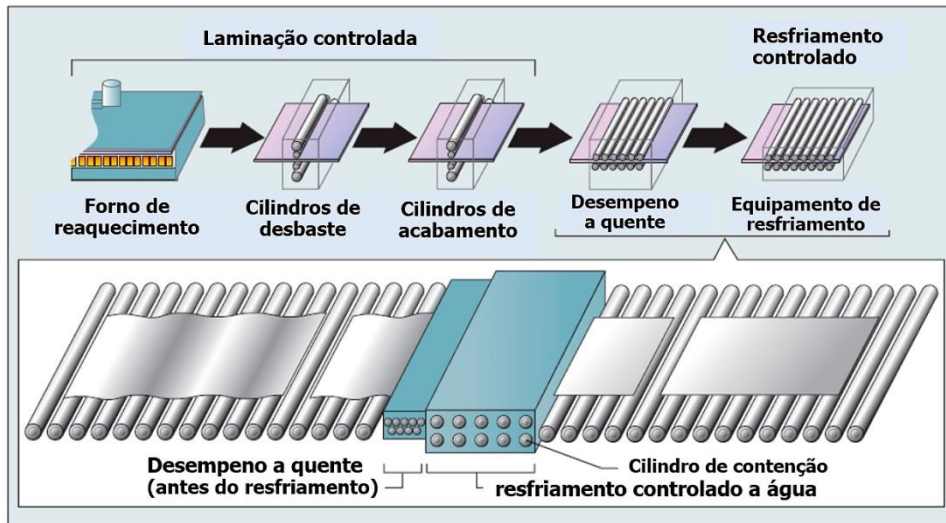


Figura 5: Esquema de linha de TMCP para fabricação de aços planos. Nishioka e Ichikawa [36]

Conforme Nishioka e Ichikawa [36], o TMCP obtém alta resistência pela utilização da transformação da ferrita e bainita para melhorar a resistência. O processo de resfriamento acelerado permite aumentar a produtividade comparado com a laminação intercrítica (fase austenita+ferrita) e minimiza qualquer perda de resistência ao impacto pelo fenômeno de separação. O TMCP consiste em dois estágios em série, laminação controlada e subsequente resfriamento acelerado. Durante o processo de laminação, os grãos de austenita são alongados em um formato de panqueca, o que introduz descontinuidades cristalográficas como falhas e bandas de deformação. Essas permanecem até que o processo de resfriamento acelerado inicia, quando a temperatura de laminação é suficientemente baixa (abaixo de 800°C). A recrystalização ocorre quando a temperatura é suficientemente alta (acima de 900°C), onde a maioria das falhas e bandas de deformações induzidas pela laminação desaparecem. As falhas e bandas de deformação remanescentes podem agir como área potencial de nucleação heterogênea para a transformação da austenita em ferrita e contribuem para o refinamento de grão. Singh e Bhadeshia [38] ressaltam que a deformação heterogênea da austenita aumenta a área de superfície do grão e o comprimento das bordas dos grãos por unidade de volume, enquanto não ocorrem mudanças no número de cantos dos grãos por unidade de volume.

A Figura 6 mostra o resultado esperado quando são fabricados aços HSLA, onde o tamanho de grão é muito refinado, através do uso de elementos de liga específicos e de um grande controle de parâmetros de processo e de fabricação. Kobayashi [40] indica que o TMCP efetivamente possibilita a redução da temperatura de pré-aquecimento, diminuindo o custo de fabricação, bem como elimina a necessidade de tratamentos térmicos posteriores.

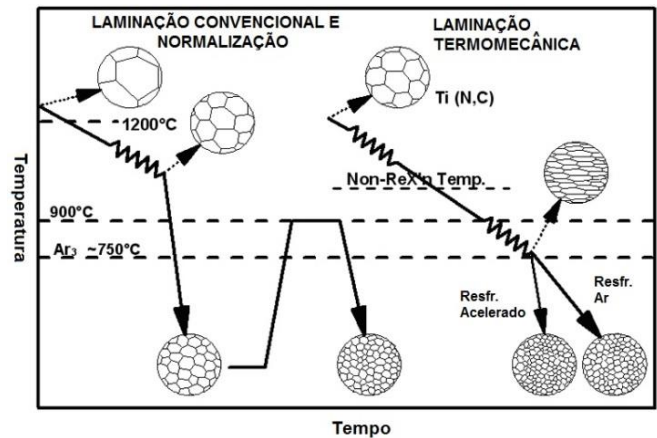


Figura 6. Conceito de controle da microestrutura pelo TMCP e comparação com o processo de laminação normal. Xlerplate [39].

Para exemplificar, a Figura 7 mostra a microestrutura de um aço fabricado por TMCP comparado com um aço laminado em processo convencional. Fica evidente que a microestrutura do aço TMCP é muito fina e uniforme.

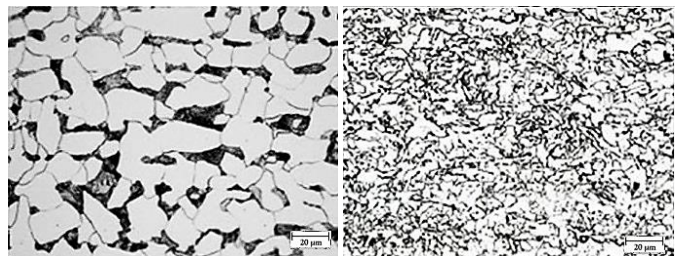


Figura 7. Microestrutura de aço de baixo carbono fabricado por laminação convencional (esquerda) e TCMP (direita). Key to Metals [41].

Considerações Finais

O uso dos aços HSLA incorre em diversos benefícios, desde a economia de recursos até a facilidade de

transformação na indústria, passando pela redução de emissões, redução da energia necessária para fabricação. As estratégias de uso de materiais de baixo impacto ambiental, baixo nível de emissões, melhorias na cadeia logística, extensão da vida do produto através da melhoria de características do material, postergando a destinação final da estrutura e das políticas e ética dos fabricantes de materiais citadas anteriormente são constantemente remetidas quando se analisam as propriedades e melhorias disponibilizadas por esse tipo de material.

As características dos aços HSLA com as estratégias de seleção de ecomateriais estão bastante alinhadas. As matérias primas consumidas são reduzidas, pelo baixo teor de elementos de liga, bem como os níveis de emissões são menores, pela redução de consumo de energia no processo de fabricação, trazendo também uma menor energia incorporada ao material. A vida da estrutura é prolongada, pelas características de maior resistência e robustez, além do aumento da qualidade do material e do processo de solda na estrutura. Em relação às emissões realizadas na logística do material (transporte e manipulação) são também minimizadas, pela característica de menor secção do material. Para o fim da vida da estrutura, existe uma grande possibilidade de reciclagem do aço, pelo diminuto percentual de elementos de liga, tornando possível seu uso em praticamente qualquer processo de fabricação de um novo aço em siderúrgicas. Além disso, a maioria dos fabricantes e consumidores desse tipo de material já aponta os aços HSLA como uma alternativa ecológica, trazendo a consciência e da responsabilidade ambiental.

Referências

- [1] Yagi, K.; Halada, K. Em European White Book on Fundamental Research in Materials Science; Rühle, M.; Dosch, H.; Mittermeijer, E.; Van de Voorde, M. H., eds.; Max-Planck Institute für Metall-forschung: Stuttgart, 2002, cap. 6.
- [2] Halada, K.; Curr. Opin. Solid St. Mater. Sci. 2003, 7, 209.
- [3] Umezawa, O.; Halada, K.; Sugi, Y.; Mater. Trans. 2005, 46, 2549.
- [4] Hsien, C. C.; Lee, L. C.; Mater. Des. 2001, 22, 129.
- [5] Ferreira, O.P; Alves, O.L.; Macedo, J.S.; Gimenez I.A.; Barreto, L.S. Ecomateriais: Desenvolvimento a aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental. Quim. Nova, Vol. 30, No. 2, 464-467, 2007
- [6] Halada K. Ecomaterials. Bull Jpn Inst Metals;31:505–12. 1992
- [7] Welford RJ. Regional development and environmental management: new opportunities for cooperation. Scand J Manage 1996;12(3):347–57.
- [8] Holloway L. Material selection for optimal environmental impact in mechanical design. Mater Des 1998;19:133–43.
- [9] Allenby B, Richards D, editors. The greening of industrial ecosystems. Washington (DC): National Academy Press; 1994.
- [10] Yagi K. Consider materials development in a global scale-concept of ecomaterials and development of metallic materials. Kinzoku 1993;63(6):5–10.
- [11] Ayres RU. Metals recycling: economic and environmental implications. Resour Conserv Recy 1997;21:145–73.
- [12] Hart SL. Beyond greening: strategies for a sustainable world. Harward Bus Rev 1997;75(1):66–76.
- [13] Ashby, M.F. Materials selection in mechanical design. 2nd ed. Oxford: Butterworth; 1999.
- [14] Allione, C., Giorgi, C., Lerma, B., Petruccielli, L. From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. Energy 39, page 90 e 99.2012
- [15] Yagi, K., Halada, K, Materials development for a sustainable society, Materials & Design, Volume 22, Issue 2, 2001, Pages 143-146,
- [16] Pannoni, F. D. "Aços estruturais". USP. 2010.
- [17] Chiaverini, V. "Aços e ferros fundidos". Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7 ed. p. 22. 2002.
- [18] Ramos, R. A. "Um sistema para auxílio no sequenciamento de um laminador de tiras a quente em uma usina siderúrgica integrada". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2002.
- [19] Askeland, D. R. "The Science and Engineering of Materials". Wadsworth Publishing Company. 1994.
- [20] Gorni, A. A. "Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas". 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais. São Paulo. 2009.
- [21] Misra, R.D.K., Nathani, H., Hartmann, J.E., Siciliano, F. "Microstructural evolution in a new 770MPa hot rolled Nb–Ti microalloyed steel". Materials Science and Engineering A 394 339–352. 2005.
- [22] Beer, Ferdinand P. Johnston, E. Russel Jr. DeWolf, John T. Mazurek, David F. "Mecânica dos Materiais". Editora Mcgraw Hill. 5 ed. 2011.
- [23] Ara, M. H. "Princípio da ciencia dos materiais aplicados aos materiais de construção civil". Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.
- [24] AMC Metallurgical Consultants. 2012, "Steel Alloys". 16 de fevereiro de 2013 <<http://www.materialsengineer.com/E-Alloying-Steels.htm>>.

- [25] Santos, D.D.A. Elementos de Liga e sua influencia nas propriedades dos materiais. UPE/POLI. Pernambuco. 2007.
- [26] Merlin, M. Baldo, S. Garagnani, G.L. “Effect of micro-alloying elements Nb and V on microstructural and mechanical properties of HSLA forming steels”. Proceedings of 32° AIM National Conference, Ferrara. 2008.
- [27] Patel, J. Klinkenberg, C. Hulka, K. “Hot rolled HSLAA strip steel for automotive and construction applications”. Niobium Products Company GmbH. Germany. 2005.
- [28] SSAB. ”Domex 700 MC Hot rolled, extra high strength, cold forming steel” Borlänge. Sweden. 2003.
- [29] Gentile, F. C. Button, S. T. “Estudo Do Processo De Cross-Wedge Rolling Para A Produção De Eixos Escalonados Com Aços Microligados”. Trabalho apresentado no XXI Senafor. Gramado. RS. 2001.
- [30] Eckerlid, J., Åsell, M., Ohlsson, A. Use of vanadium high-strength low alloy steels in trailers-a case study. The Steel Company Tunnplåt AB. Sweden. 2008.
- [31] Sperle, J. “High strength sheet and plate steels for optimum structural performance”. SSAB Tunnplåt AB, Borlänge, Sweden. 2005.
- [32] Senuma, T. “Present status of and future prospects for precipitation research in the steel industry”. Japan. 2001.
- [33] Kern, A. Degenkolbe, B. Schriver, U. “Computer modeling for the prediction of microstructure development and mechanical properties of HSLA steel plates”. Germany. 1991.
- [34] Davis, J.R. ”High-strength low-alloy steels”. ASM International. USA. 2001.
- [35] Yoshie , A. Techno Marine No. 885 (Tokyo: The Society of Naval Architects of Japan) p 331. 2005.
- [36] Nishioka, K. Ichikawa, K. “Progress in thermomechanical control of steel plates and their commercialization”. Sci. Technol. Adv. Mater. 13 023001 p20. 2012.
- [37] Yoshie, A. Sasaki, J. “Niobium Bearing Structural Steels” ed G J Steven and P Jitendra (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society) p 291. 2010.
- [38] Singh, S. B. Bhadeshia H. K. D. H. 1998. Mater. Sci. Technol. 14 832
- [39] Xlerplate. “Plate supply condition”. 9 de maio de 2013.< <http://www.xlerplate.com.au/news/plate-supply-condition>>.2009.
- [40] Kobayashi, E. “TMCP no Yousetsu-Yakin, Symp., Yousetuyakin-Kenkyuu-Iinkai”. Dai-100-Kinen (The Japan Welding Society) p 177. 1985.
- [41] Key to metals. “Thermo-Mechanical Control Process: Part One”. <<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=366>>.2012.
-