

RESFRIAMENTO ACELERADO DE CHAPAS GROSSAS: O FUTURO CHEGOU¹

Antonio Augusto Gorni

Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA
gorni@cosipa.com.br

José Herbert Dolabela da Silveira

Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA
herbert@cosipa.com.br

O resfriamento acelerado de chapas grossas imediatamente após sua laminação produz combinações inéditas de propriedades mecânicas

ABSTRACT

The accelerated cooling of steel plates is an already standardized process that increases the competitiveness of this product and its users through a more rational alloy design and the development of new property combinations. This paper is a status report about this technology and its future developments.

O advento da laminação controlada permitiu reduzir o carbono equivalente de chapas grossas estruturais sem afetar suas características mecânicas, uma vez que o efeitos dos elementos de liga eram substituídos por um intenso refino do tamanho de grão. De fato, esse recurso permite aumentar simultaneamente o limite de escoamento e a tenacidade, mas não eleva tão intensamente o limite de resistência, fato que limita as possibilidades de adoção de composições químicas mais leves [1-3].

O próximo passo nessa evolução foi o resfriamento acelerado de chapas grossas após a laminação através da aplicação de água. Este recurso metalúrgico somente foi viabilizado após a resolução de diversos problemas técnicos complexos. Isso somente ocorreu no início da década de 1980, graças aos esforços de diversas usinas, principalmente japonesas [4]:

- Garantia de boa planicidade no esboço para evitar acúmulos irregulares de água;
- Superfície do laminado totalmente isenta de carepa grosseira para manter o resfriamento uniforme;
- Nível adequado de automação da linha para se garantir precisão e uniformidade na temperatura do esboço antes do resfriamento acelerado;
- Desenvolvimento de sistemas de controle de aplicação de água que apresentassem taxas de resfriamento consistentes e uniformes através de todo o esboço.

Hoje o *uso de água como elemento de liga* é uma tecnologia consagrada, como demonstra a disseminação das linhas de resfriamento acelerado pelo mundo todo. Esse

¹ Caderno Técnico da Revista Metalurgia e Materiais, 63:564, Março 2006, pág. 103-105.

processo permite a obtenção sob medida das microestruturas mais adequadas em função das características mecânicas requeridas, além de proporcionar redução adicional nos teores de elementos de liga e, eventualmente, tornar menos rígido o processo de laminação controlada, contribuindo para aumentar a produtividade da linha de chapas grossas.

Aspectos Metalúrgicos Básicos do Resfriamento Acelerado

A figura 1 mostra a evolução histórica observada do desenvolvimento dos processos de laminação controlada e resfriamento acelerado, bem como os mecanismos de endurecimento envolvidos [1,2].

Ano	1970	1980	1990	2000
<u>Processos Termo-Mecânicos</u>	Laminação Controlada	Laminação Intercrítica SHT	OLAC Resfriamento Acelerado Têmpera Direta	TMCP Modelamento Matemático da Laminação a Quente P&D sobre Aço com TG Ultra-Fino
<u>Mecanismos de Endurecimento</u>	Refino de Grão Endurecimento por Precipitação	Endurecimento por Encruamento	Endurecimento por Martensita ou Bainita Endurecimento por Transformação	Endurecimento por Ultra-Refino de Grão
<u>Normas</u>			ASTM A841 (Aço Resf. Acel.)	JIS-SN (Constr. Civil)

Figura 1: Evolução histórica do desenvolvimento dos processos de laminação controlada e resfriamento acelerado, juntamente com os mecanismos de endurecimento e normas técnicas envolvidos [1].

As diversas variantes do processo de resfriamento acelerado podem ser vistas na figura 2 [3,4]:

- **Resfriamento Acelerado Interrompido:** inicia-se logo após o término da laminação e termina numa temperatura intermediária, seguindo-se resfriamento ao ar. É o caso mais comum, sendo geralmente aplicado entre 800 e 500°C;
- **Têmpera Direta:** neste caso o resfriamento ocorre de forma mais intensa, terminando sob temperaturas relativamente baixas, geralmente de forma a viabilizar a obtenção de uma microestrutura martensítica. Esta variante é geralmente aplicada entre 900 e 200°C.

- **Têmpera Direta mais Auto-Revenido:** esta abordagem aproveita a recalescência da chapa promovida pelo seu núcleo ainda aquecido para proporcionar um tratamento de revenido direto ao produto.

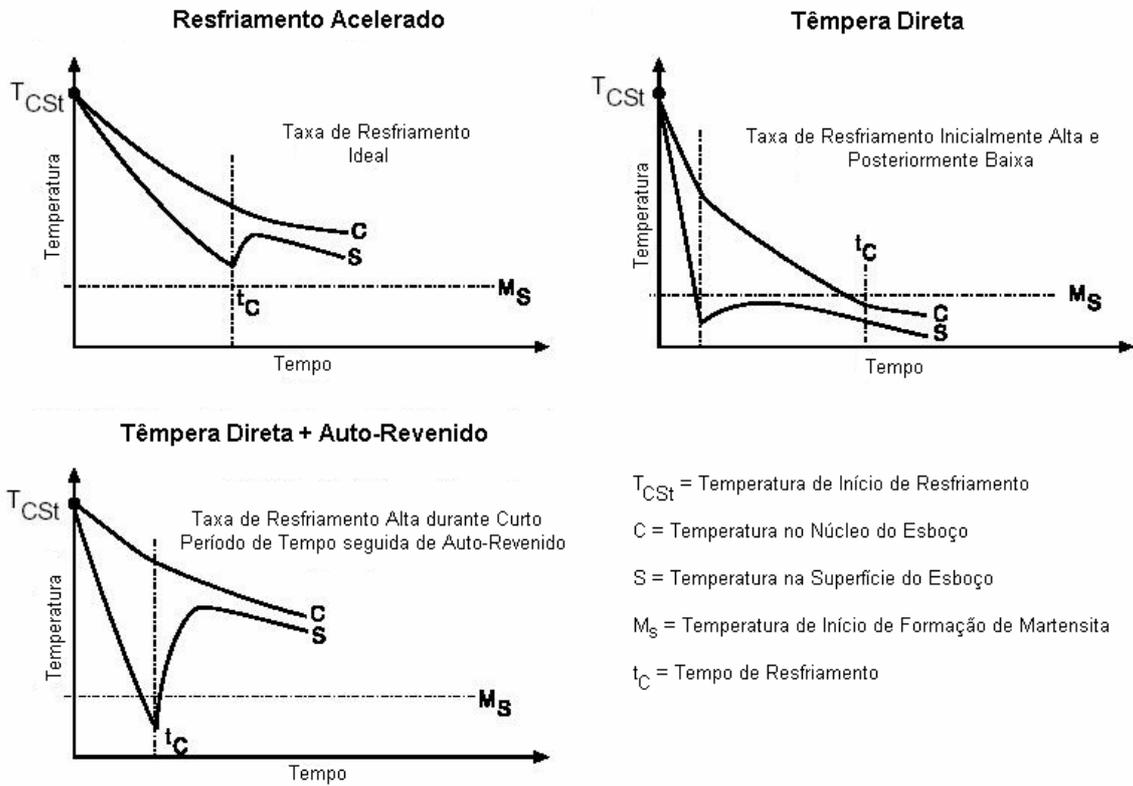


Figura 2: Variantes do processo de resfriamento acelerado: a) resfriamento acelerado interrompido; b) têmpera direta; c) têmpera direta mais auto-revenido [3].

A figura 3 mostra o efeito dessas variantes de processo sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de um aço ao NbV. A substituição da normalização pelo resfriamento acelerado interrompido reduziu o tamanho de grão da microestrutura de 8/9 para 10/11 Unidades ASTM, com a microestrutura passando de ferrita e perlita para ferrita, perlita e bainita. O uso de têmpera direta reduziu ainda mais o tamanho de grão, para 11/12 Unidades ASTM, com a microestrutura passando a ser constituída de bainita, martensita e ferrita [3].

O uso do resfriamento acelerado também está sendo benéfico na produção de chapas grossas extra-pesadas. A fabricação desse tipo de produto tornou-se mais difícil depois que as placas passaram a ser produzidas quase que exclusivamente por lingotamento contínuo, pois neste caso a espessura do semi-produto bruto de fusão diminui drasticamente, reduzindo o grau de deformação total aplicado abaixo de níveis recomendáveis (3:1) [6]. O refino de grão promovido pela têmpera direta é mais uma das possibilidades disponíveis para se compensar essa insuficiência no grau total de redução a quente [1].

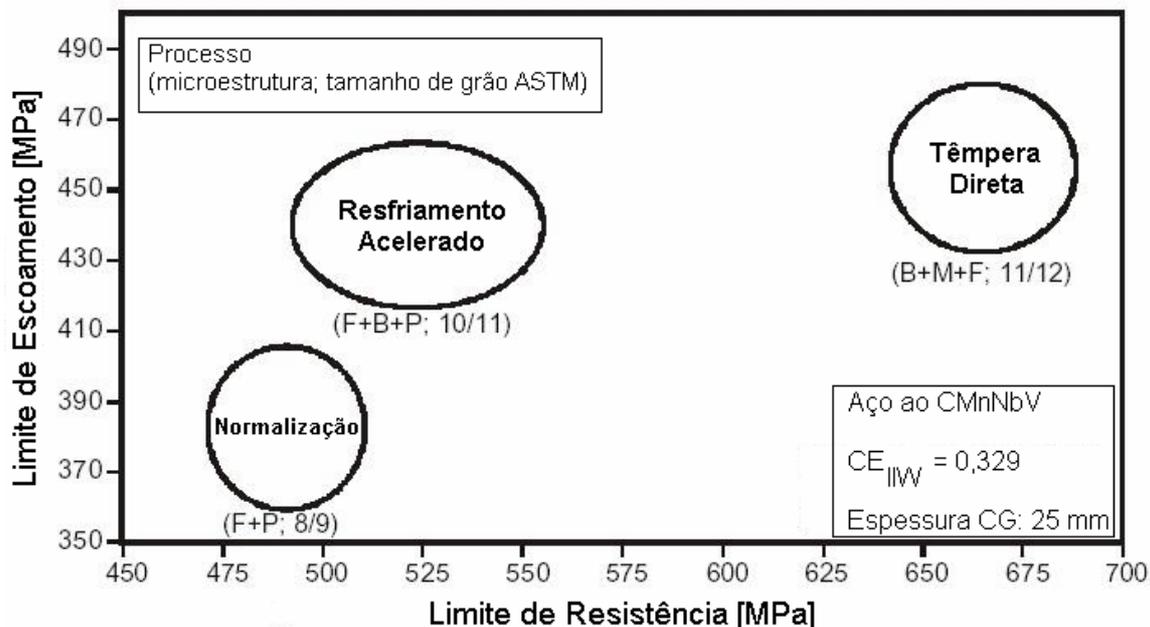


Figura 3: Efeito da rota de fabricação sobre os limites de escoamento e resistência de uma chapa de aço microligado ao NbV com 25 mm de espessura. Legendas: N = normalização; RAC = resfriamento acelerado interrompido; TD = têmpera direta.

O Mercado para Chapas Grossas Produzidas por Resfriamento Acelerado

Já em 1985 a ASTM incluiu em sua norma A841 o resfriamento acelerado como um processo padronizado para fabricação de chapas grossas destinadas a vasos de pressão. Seu aval promoveu a rápida disseminação comercial desse novo processo. Novo estímulo ocorreu em 1993, quando a ASME aceitou o uso desse material em seu código para vasos de pressão. Isso permitiu a consolidação desse processo para chapas com espessuras de até 100 mm [1]. A tabela I mostra a aplicação e nível de resistência mecânica de chapas grossas produzidas pelo processo de resfriamento acelerado. Atualmente essa rota responde por 20% das chapas grossas produzidas no Japão; esse percentual dobra no caso de material com alta resistência, ou seja, limite de resistência igual ou maior a 490 MPa [2].

Construção Naval. O uso de chapas grossas submetidas a resfriamento acelerado expandiu-se rapidamente nesse campo, tendo ainda viabilizado o uso de aços com alta resistência. Elas agregam competitividade aos estaleiros, já que o uso desses materiais permite reduzir as dimensões dos componentes navais sem afetar seu desempenho, reduzindo o custo operacional da embarcação. A aplicação do resfriamento acelerado permite manter baixos os teores de C e demais elementos de liga, facilitando sobremaneira sua soldagem, processo extremamente oneroso que pode responder por mais de 50% dos custos totais de um navio [7]. O uso de materiais com limite de escoamento de 315 ou 355 MPa produzidos por essa nova rota iniciou-se em 1982; hoje eles representam 50% do aço usado num navio. Versões ainda mais resistentes, com 390

MPa, começaram a ser comercializadas em 1985; hoje elas respondem por 30% do aço presente no navio. Ou seja, 80% das chapas grossas usadas em navios passam pelo resfriamento acelerado. Este processo também viabilizou o aparecimento de um novo produto que apresenta superfície com alta tenacidade para uso em cascos de petroleiros, cujo rompimento pode dar origem a catastróficos desastres ecológicos. Neste caso específico o resfriamento acelerado é aplicado logo no início do processo de laminação, de forma rápida e muito intensa, promovendo a transformação de austenita a ferrita nas camadas superficiais do esboço. Estas superfícies se reaquecem ao longo do restante do processo de laminação, ocorrendo então recristalização da ferrita deformada com a conseqüente formação de microestrutura com grãos ultra-finos e textura bem desenvolvida. Essa microestrutura ultra-refinada superficial possui alta tenacidade, mesmo após uma eventual deformação plástica decorrente de colisão no casco [1,2].

Aplicação	Limite de Resistência [MPa]				
	490	590	690	780	950
Naval	RAC				
Plataforma Marítima	RAC	RAC			
Tubos de Grande Diâmetro	RAC	RAC	RAC		
Construção Civil	RAC	TD	TD	TD	
Pontes	RAC	TD	TD	TD	
Adutoras para Hidrelétricas	RAC	TD	TD	TD	TD
Tanques para Baixa Temperatura	RAC	TD			
Tanques Criogênicos	RAC *		TD **		
Máquinas Pesadas	RAC	TD	TD	TD	TD

Tabela I: Requisitos em termos de resfriamento acelerado (RAC) ou têmpera direta (TD) para diferentes aplicações e níveis de resistência mecânica. * = baixo Ni; ** = 9% Ni [2].

Construção Civil. No Japão 10% das chapas grossas usadas nessa aplicação passam pelo resfriamento acelerado, especialmente as que apresentam limite de resistência de 780 MPa, material de alta soldabilidade usado na construção de pontes com longos vãos e edifícios altos. Nesse país há a necessidade de que os aços usados em construção civil apresentem baixa razão elástica para que as edificações possuam uma *reserva plástica* para suportar a ação dos freqüentes terremotos que lá ocorrem. Neste caso usa-se o resfriamento acelerado conjugado com uma composição química balanceada de forma a produzir microestrutura bifásica de ferrita e bainita/martensita, a qual apresenta as características desejadas. Em determinados casos usa-se também o endurecimento por precipitação de Cu para se poder minimizar ainda mais o teor de C do aço. O resfriamento acelerado também é benéfico neste caso, uma vez que sua aplicação intensifica a resposta do tratamento subsequente de envelhecimento, pois neste caso não há perda de Cu por precipitação durante o resfriamento da chapa ao ar após sua laminação [1,2].

Tubos de Grande Diâmetro. A figura 4 a evolução das chapas grossas grau API para a fabricação de tubos com grande diâmetro ao longo dos últimos 40 anos. Pode-se observar que o uso de laminação controlada, a qual foi posteriormente complementada com resfriamento acelerado, permitiu uma progressiva redução do teor de C, ao mesmo tempo em que a resistência mecânica do material se elevou do grau X52 para X100 [3-5].

O aumento da resistência mecânica do material permite reduzir a espessura do tubo - por exemplo, ao se passar do aço API X70 para X120, consegue-se uma redução de 39%. Tubos mais leves possuem transporte mais fácil e barato, diminuindo também as dimensões das obras para assentamento dos dutos. A área a ser soldada fica menor, reduzindo os custos desse oneroso processo, os quais já eram menores em função do menor teor de C desse aço. Além disso, o uso do resfriamento acelerado reduz o tempo disponível para a difusão do C durante a transformação da austenita. Isso evita a segregação desse elemento para a parte central da chapa grossa, minimizando a formação de microconstituintes duros que são um ponto fraco para a ocorrência de fragilização por hidrogênio em tubulações que conduzem óleo com alto teor de H₂S. Esta nova rota de processo é bastante promissora para a produção de chapas grossas de grau API com maior resistência mecânica e imunidade ao HIC [3-5,8].

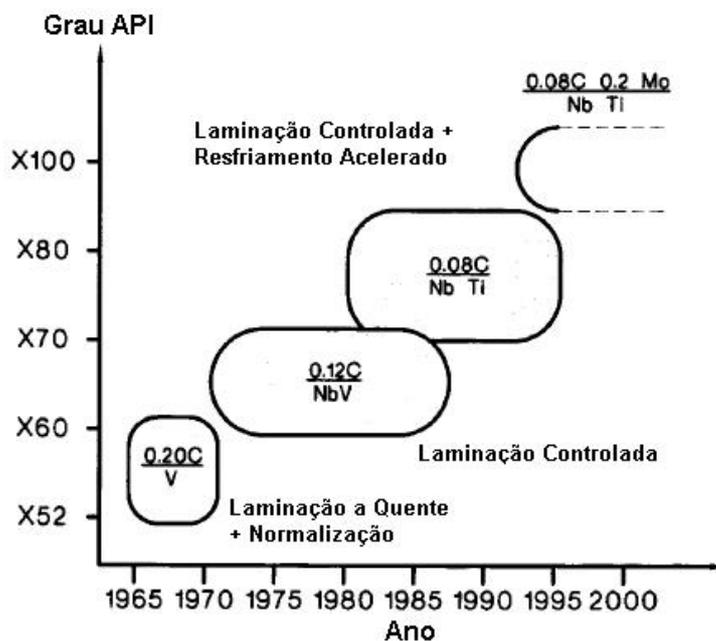


Figura 4: Dependência do valor do limite de escoamento em função da intensidade do resfriamento acelerado e do teor de elementos de liga presente no aço [4].

Adutoras para Usinas Hidrelétricas. Esta é uma aplicação que exige máxima resistência mecânica em chapas grossas ultra-pesadas. Até hoje estão sendo usados materiais com 780 MPa de limite de resistência, mas já se pensa em se elevar esse valor para 950 MPa em chapas com 100 mm de espessura para se atender às maiores pressões de água existentes em grandes usinas hidrelétricas. Esta é uma típica aplicação para uso conjugado da laminção controlada mais têmpera direta. Esse material não pode ser produzido usando-se o tratamento térmico de têmpera convencional, pois as taxas de resfriamento disponíveis são insuficientes para garantir as propriedades mecânicas necessárias ao longo de toda a sua espessura. Já durante a têmpera direta o condicionamento da austenita mostra-se ideal, pois tem-se grãos refinados na superfície da chapa e grãos mais grosseiros em seu interior. Ou seja, a chapa apresenta menor temperabilidade na superfície, onde o resfriamento atua mais fortemente, e maior

temperabilidade no seu núcleo, onde a extração de calor é mais difícil. Isto contribui para equalizar as propriedades mecânicas ao longo da espessura da chapa.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OUCHI, C. ISIJ International, June 2001, 542-553.
2. NISHIOKA, K. Steel World, 5:1, 2000, 61-67.
3. STREIßELBERGER, A., SCHWINN, V. & HUBO, R. In: Niobium 2001 – Science & Technology. Proceedings. The Metals Society-Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2001, 625-646.
4. EVANS, J.F. & CLARK, M.T. AISE Steel Technology, June 2002, 49-53.
5. KIRSCH, H.J., FLÜß, P., SCHÜTZ, W. & STREIßELBERGER, A. Stahl und Eisen, 119:3, März 1999, 57-65.
6. GORNI, A.A., REIS, J.S.S. & SILVEIRA, J.H.D. Millennium Steel, 2000, 200-203.
7. MONTEMARANO, T.W. e outros. Journal of Ship Production, 2:3, Aug. 1986, 145-162.
8. HILLENBRAND, H.G. e outros. In: 4th Int. Conf. on Pipeline Technology, Ostend, May 2004.