

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE PLACAS PRODUZIDAS POR LINGOTAMENTO CONTINUO¹

Flávio Costalonga²
Markezan Basílio Serafim³
Júlio Cezar Bellon⁴

Resumo

O atual cenário siderúrgico mundial está cada vez mais competitivo em função das mega fusões que estão acontecendo. Esta condição, faz com que todas empresas se engajem cada vez mais no processo de melhoria continua de forma a conseguirem impactos significativos nos seus custos de produção. Este trabalho tem como objetivo apresentar um método simples e prático, para otimização do processo de resfriamento de placas produzidas via lingotamento contínuo, para isto foram selecionados 3 aços típicos de resfriamento controlado (AISI 1016, AISI 1212 e AISI 1547) e analisadas suas curvas de resfriamento contínuo e avaliada a propensão à geração de tensões de origem térmica de cada um dos 3 aços na forma de placas com espessuras de 200, 225 e 250mm.

Palavras-chave: Resfriamento de placas; Trincas térmicas e estrutura inadequada.

OPTIMIZATION OF THE CONTINUOUS CASTED SLABS COOLING PROCESS

Abstract

The present steelmaking world scenario is becoming more and more competitive as a result of the recents major aquisitions. This condition pushes the companies to perform better aiming to reduce significantly the production costs towards the continuous improvement. This paper objective is to present a simple and handy methodology for optimization of the continuous casted slabs cooling process. For this matter were selected three typical grades requiring controled cooling (AISI 1016, AISI 1212 and AISI 1547) which were analyzed, havind its continuous cooling curves ploted as well as evaluated its propension to thermal tensions of each of all three selected steel grades devided by thickness: 200, 225 e 250mm.

Key-words: Slab cooling; Thermal cracks and improper structure.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Graduado em Eng^a de Produção com ênfase em Metalurgia e Materiais, UCL – Faculdade do Centro Leste*

³ *Graduado em Eng^a de Produção com ênfase em Metalurgia e Materiais, UCL – Faculdade do Centro Eng^o Metalurgista (CST- Arcelor Brasil), Msc (orientador)*

1 INTRODUÇÃO

O aço é fator básico no processo de desenvolvimento de um país e a ele se acha estreitamente ligado.

O desenvolvimento econômico, fundamentado na industrialização e baseado no modelo metal-mecânico teve no aço o seu insumo por excelência. Como matéria-prima, permitiu a combinação de propriedades como resistência, ductilidade, flexibilidade, conformabilidade, essenciais ao modelo.

No atual cenário mundial, em que as relações produção versus consumo de aço, se mostram cada vez mais acirradas, pois os preços são ditados pelo próprio mercado e não por quem produz (por se tratar de um mercado commodities), as empresas do setor siderúrgico se vêem cada vez mais pressionadas a reduzir seus custos de produção, otimizando seus processos produtivos e de compras de matérias-primas. No intuito de absorverem melhor a oscilação do mercado, tanto na compra de matérias-primas, quanto nas vendas de seus produtos, as mesmas estão aderindo ao processo de fusão corporativa, tornando-se grandes conglomerados. Contudo, com o aumento do consumo mundial de aço, essas mesmas empresas não estão preparadas para atenderem a esta crescente demanda. Desta forma terão que investir na expansão de suas plantas produtivas e na aquisição de novas tecnologias, que venham a permitir a sua permanência estável no mercado de produtos semi-acabados de aço.

Uma das etapas que exerce maior influência na produtividade do processo de produtos semi-acabados de aço é o processo de resfriamento de produtos. O processo de resfriamento de produtos semi – acabados de aço, é considerado um dos principais gargalos das usinas siderúrgicas, pois os produtos devem ser resfriados até a temperatura ambiente, para que as etapas seguintes (inspeção, condicionamento e preparação para despacho) sejam executadas.

Em geral, os processos de resfriamentos das placas de aço são realizados, em função da composição química do material, levando-se em consideração os valores de carbono equivalente, as quais são calculadas via diversas expressões matemáticas. Contudo, existem condições de resfriamento que precisam ser revisadas para um melhor controle sobre o surgimento de trincas, uma vez que as mesmas são causadas por uma combinação de tensões excessivas e estrutura inadequada. Essas condições influem diretamente na produtividade do processo de resfriamento.

Os processos de resfriamento são classificados da seguinte forma:

- *Processo de resfriamento rápido* é aplicado a aços com baixos teores de carbono ($\%C < 0,15$) e manganês ($\%Mn < 0,80$), consiste no resfriamento forçado com um tempo total de resfriamento inferior à 1 hora.
- *Processo de resfriamento moderado* é aplicado às placas de aço de médio carbono ($0,15 \% C < 0,40$) e manganês ($0,80 < \%Mn < 1,20$), sendo o material resfriado ao ar até a temperatura ambiente e/ou acelerado com jatos de água.
- *Processo de resfriamento lento* é empregado, às placas de aço altos teores de carbono ($\%C > 0,40$), manganês ($\%Mn > 1,20$) e outros elementos de liga. Este processo consiste no resfriamento das placas em uma campânula revestida internamente com tijolos refratários.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base na literatura existente sobre os principais métodos de resfriamento e nas projeções de demanda de aço no mundo, foram selecionados os aços AISI 1016, AISI 1547 e AISI 1212.

Tabela 1 – Composição química

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S
AISI 1016	0,160	-	0,800	-	-
AISI 1547	0,460	0,250	1,800	0,020	0,015
AISI 1212	0,100	0,200	1,100	0,020	0,250

Fonte: www.matweb.com

O presente trabalho é composto basicamente pela análise das curvas de resfriamento contínuo e pela avaliação da geração de tensões térmicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise das Curvas de Resfriamento Contínuo

Durante o processo de determinação do método de resfriamento adequado a um determinado material, o fator mais importante a ser controlado é a geração de trincas e conseqüente quebra das placas. As trincas que ocorrem durante o resfriamento de placas são normalmente originadas por tensões provenientes de transformação de fase (estrutura inadequada) conjugadas com tensões térmicas causadas por elevados gradientes de temperatura no material.⁽¹⁾

A transformação de fase que ocorre durante o resfriamento dos aços carbono e baixa liga, é sempre acompanhada por uma variação volumétrica, sendo este efeito mais pronunciado durante a transformação da austenita para martensita. Os fatores que influenciam a tendência ao trincamento do aço, aumentam para crescentes teores de carbono no material. Desta forma, para se evitar as tensões provocadas pela transformação martensítica, é necessário que o resfriamento seja lento o suficiente para permitir que a austenita se transforme completamente em ferrita e perlita. O exemplo da Figura 1 apresenta as 4 etapas da análise das curvas de resfriamento contínuo. São elas:

- 1 – Determinação da temperatura inicial de resfriamento (temperatura da placa na saída da máquina de lingotamento contínuo) que é de aproximadamente 800 °C (linha azul);
- 2 – Determinação da menor temperatura de formação de estrutura frágil que dependerá da composição química do material (linha azul);
- 3 – Determinação da curva de resfriamento praticada, onde a taxa de resfriamento média para métodos de resfriamento controlados (moderados e lentos) é de no máximo 1 °C/minuto (linha verde);
- 4 – Determinação da curva de resfriamento crítica (linha vermelha).

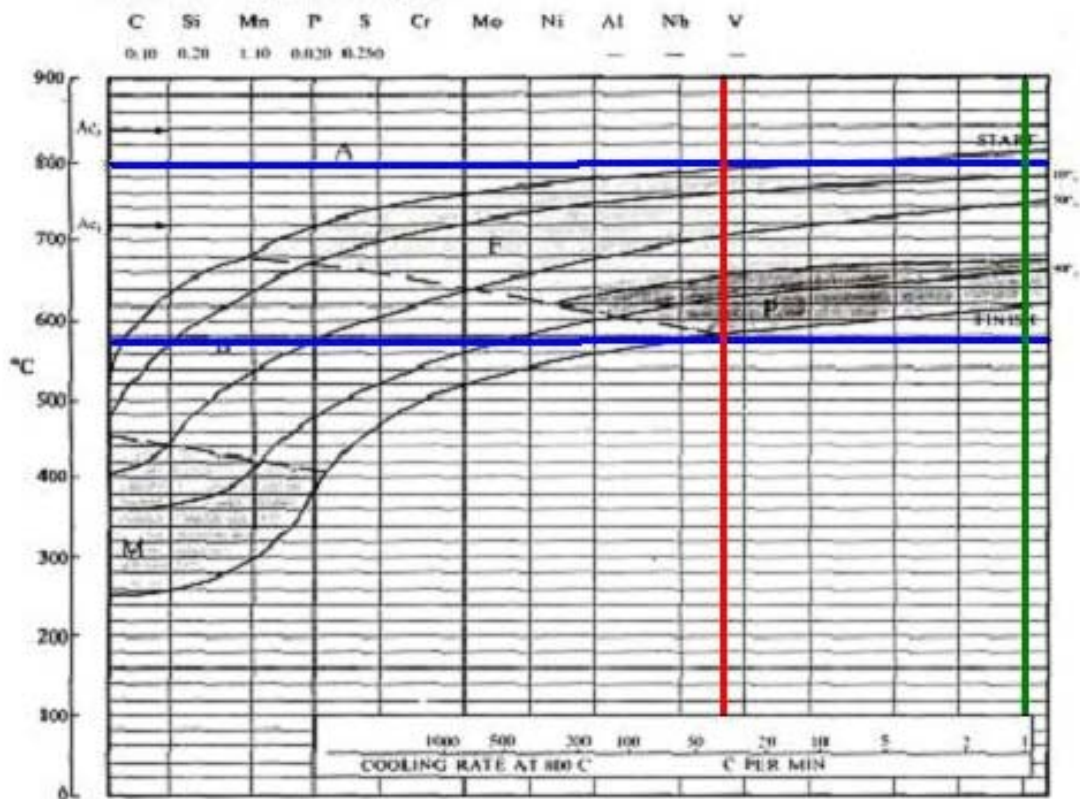


Figura 1 – Representação das 4 etapas da análise da curva de resfriamento contínuo para o AISI 1212.⁽²⁾

Através desta análise gráfica foi possível notar que às temperaturas de transformação crítica variam entre 500 e 600 °C para os três aços selecionados e o tamanho do gap entre a velocidade de resfriamento praticada e a crítica.

3.2 Avaliação da Geração de Tensões Residuais (Térmicas)

Mesmo em temperaturas abaixo da transformação da austenita, o resfriamento rápido da placa ainda pode resultar em fragilização do material, devido ao surgimento de tensões térmicas em níveis elevados, que resultam em tensões residuais no material à temperatura ambiente. Os principais fatores que afetam a magnitude destas tensões residuais são a espessura do material e o gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da placa durante o resfriamento.

Conforme citado, os fatores mais influentes na susceptibilidade ao trincamento são a espessura do material e a temperatura de início de resfriamento forçado, sendo assim, serão adotadas as dimensões de 200, 225 e 250mm como espessura de placa e a temperatura de 500 °C como de início de resfriamento forçado. Agora na ausência de transformações, existirão apenas às tensões internas geradas pelo gradiente térmico. Para tanto, será considerado que o sistema de transferência de calor neste caso ocorre através da *condução multidimensional em regime permanente*.

Em função dos diferentes valores de extração de calor ao longo de seção transversal de uma placa, será adotado o ponto de encontro entre a face larga e a face estreita como ponto de referência. Considerando que taxa de resfriamento será igual em todas as faces, a velocidade de resfriamento no ponto crítico será determinada pela equação (valores obtidos na Tabela 2:

(Equação 1)
$$V_T = V_r \sqrt{2}$$

Tabela 2 - Velocidades de Resfriamento

Velocidade de Resfriamento (°C / min.)							
V_r	1	2	5	10	15	20	25
V_T	1,4	2,8	7,1	14,1	21,2	28,3	35,4

Como as equações (ΔT , τ_{rr}) que serão apresentadas foram deduzidas para um corpo cilíndrico, foi feita uma analogia entre o raio do cilindro e ponto crítico de resfriamento da placa, conforme Figura 2 e valores na Tabela 3.



Figura 2 – Analogia da geometria da placa

Tabela 3 - Relação geométrica estabelecida para determinação da distância crítica

Espessura (mm)	Distância superfície-centro (mm)	
	r	d
200	100,0	141,4
225	112,5	159,1
250	125,0	176,8

1º Passo - Como garantia que o material esteja sofrendo apenas tensões devido ao gradiente térmico, será calculado o gradiente de temperatura entre a superfície e o centro, de modo que a temperatura encontrada no centro seja inferior a temperatura de resfriamento forçado (500 °C). Através da equação 2, onde será substituído r por d , para garantir a equivalência geométrica, portanto:

(Equação 2)

$$\Delta T = \frac{d^2}{4K} V_T$$

Através da equação citada acima, foram encontrados os valores expressos na Tabela 4:

Tabela 4 - Cálculo do máximo gradiente térmico

E (mm)	ΔT_m (°C)								E (mm)
200	19,9	39,8	99,4	198,8	298,2	397,5	496,9	200	
225	25,2	50,3	125,8	251,6	377,4	503,1	628,9	225	
250	31,1	62,1	155,3	310,6	465,9	621,2	776,4	250	
	1	2	5	10	15	20	25		
Velocidade de resfriamento nas faces (°C / min.)									

2º Passo - análise da susceptibilidade ao trincamento, sendo a mesma determinada através de um modelo (equação 3) de transferência de calor e de tensões residuais de caráter teórico e prático.⁽³⁾ Neste modelo, a susceptibilidade ao trincamento (S_T) é avaliada pela seguinte relação:

(Equação 3)
$$S_T = \frac{\Delta T_{\text{máximo}}}{\Delta T_{\text{crítico}}}$$

onde:

$\Delta T_{\text{máximo}}$, corresponde ao gradiente térmico máximo entre a superfície e centro da placa, resultante do resfriamento forçado;

$\Delta T_{\text{crítico}}$, corresponde ao gradiente térmico máximo suportado pelo material até a ruptura.

O gradiente térmico $\Delta T_{\text{máximo}}$ é função das relações geométricas da placa, de sua temperatura no início do resfriamento forçado e da taxa de resfriamento, e foi determinado com base em equações matemáticas clássicas aplicadas à transferência de calor.⁽³⁾

O gradiente térmico $\Delta T_{\text{crítico}}$, depende da composição química, da estrutura interna e das relações geométricas da placa, e foi obtido da literatura.⁽³⁾ Valores de S_T superiores a 1 indicam elevada probabilidade de ruptura da placa durante o resfriamento e S_T iguais ou menores indicam a geração de tensões residuais ao final do processo, cuja magnitude é diretamente proporcional ao parâmetro S_T .⁽¹⁾

Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Cálculo da Susceptibilidade ao trincamento

E (mm)	$S_T (\Delta T_c = 561 \text{ }^\circ\text{C})$							E (mm)
200	0,04	0,07	0,18	0,35	0,53	0,71	0,89	200
225	0,04	0,09	0,22	0,45	0,67	0,90	1,12	225
250	0,06	0,11	0,28	0,55	0,83	1,11	1,38	250
	1	2	5	10	15	20	25	
Velocidade de resfriamento nas faces ($^\circ\text{C} / \text{min.}$)								

3º Passo - determinar os níveis de tensões para determinadas variações, condições e temperaturas de resfriamento, a equação abaixo será utilizada. Como na Equação 2, ao invés de usar r que equivale à metade da espessura do material, será usado d , a diagonal da face do cubo imaginário ao qual foi inscrito o círculo do cilindro. Desta forma a fórmula ganha a seguinte configuração:

(Equação 4)
$$\tau_{rr} = -\frac{E}{16(1-\nu)} \frac{\alpha d^2}{K} V_T$$

Isto dará um fator de segurança que garantirá que um valor estimado de tensão permita definir as estratégias de resfriamento de forma mais segura, já que a região utilizada como referência para a análise da relação tensão-resfriamento é conhecida por ser o principal ponto concentrador de tensões nas placas.

(Equação 5)
$$\tau_{rr} = -\frac{E \alpha \Delta T}{4(1-\nu)}$$

Os valores obtidos são mostrados na Tabela 6:

Tabela 6 - Cálculo da tensão gerada pelo gradiente térmico

E (mm)	τ_{rr} (MPa)							E (mm)
200	19,04	38,09	95,22	190,45	285,67	380,89	476,12	200
225	24,10	48,21	120,52	241,03	361,55	482,07	602,59	225
250	29,76	59,51	148,79	297,57	446,36	595,15	743,93	250
	1	2	5	10	15	20	25	
	Velocidade de resfriamento nas faces (°C / min.)							

Se for determinado que a tensão máxima permitida gerada durante o processo de resfriamento forçado será igual ao **limite de ruptura do material**, será obtida a seguinte situação:

Tabela 7 – Limite de ruptura em Mpa⁽⁴⁾

AISI 1016	AISI 1212	AISI 1547
380	385	650

Fonte: www.matweb.com

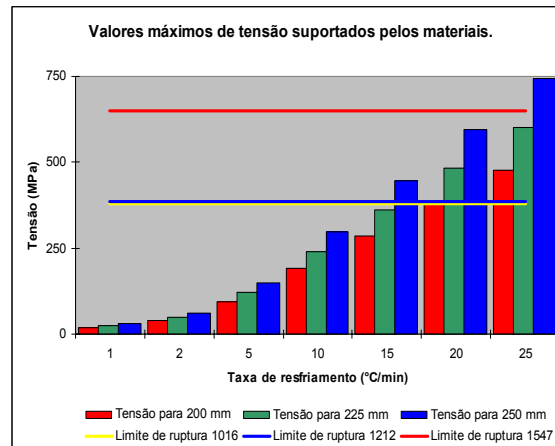


Figura 3 - Comparativo entre o limite de ruptura e o nível de tensão calculado (à esquerda)

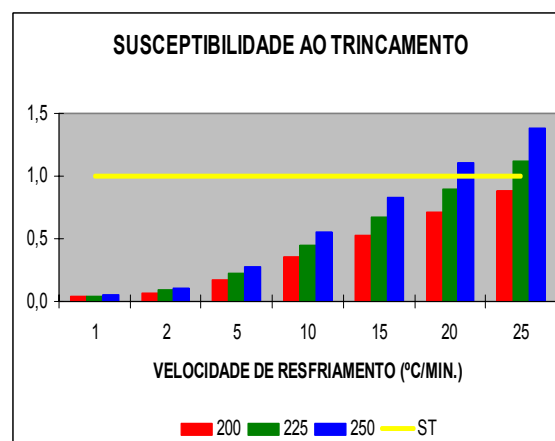


Figura 4 - Avaliação do ST em função da taxa de resfriamento (à direita)

3.3 Otimização dos Métodos de Resfriamento

Nas três curvas de resfriamento contínuo (Figuras 5, 6 e 7) a linha vermelha representa a velocidade crítica de resfriamento, onde acima da qual a probabilidade de formação de estruturas frágeis como a martensita e a bainita é alta e as linhas azuis delimitam o início e o fim de transformação das fases.

Com base nos resultados obtidos será possível flexibilizar as práticas de resfriamento da seguinte forma:

1 - resfriar o material a uma taxa de 1°C/min (linha verde cheia) até alcançar a temperatura de 500°C (linha verde pontilhada), garantindo assim que não existam interferências de tensões geradas por transformações de fases, ou seja, **ausência de transformações**.

2 - aplicar as taxas de resfriamento máximas (diferenciadas) que foram determinadas através da análise do **ST** e da τ_{rr} (a partir de 500 °C). As linhas de cor marrom, amarela e laranja indicam a taxa de resfriamento máxima que poderá ser submetido o material de acordo com a sua espessura.

Foi observado que para os aços **AISI 1016** e **AISI 1212** as taxas de resfriamento impostas são as mesmas configurando curvas de resfriamento semelhantes, no caso destes aços, configuraram-se duas estratégias de resfriamento. Já o **AISI 1547** possui três linhas distintas com taxas crescentes de resfriamento (em função da espessura do material). Todos os valores de taxas de resfriamento estão condizentes com os valores calculados de tensões térmicas geradas pelo gradiente térmico entre o centro e a superfície das placas, estando sempre abaixo das tensões de ruptura dos materiais e com valores de susceptibilidade ao trincamento menores que 1, o que garante que não haverá quebra de material.

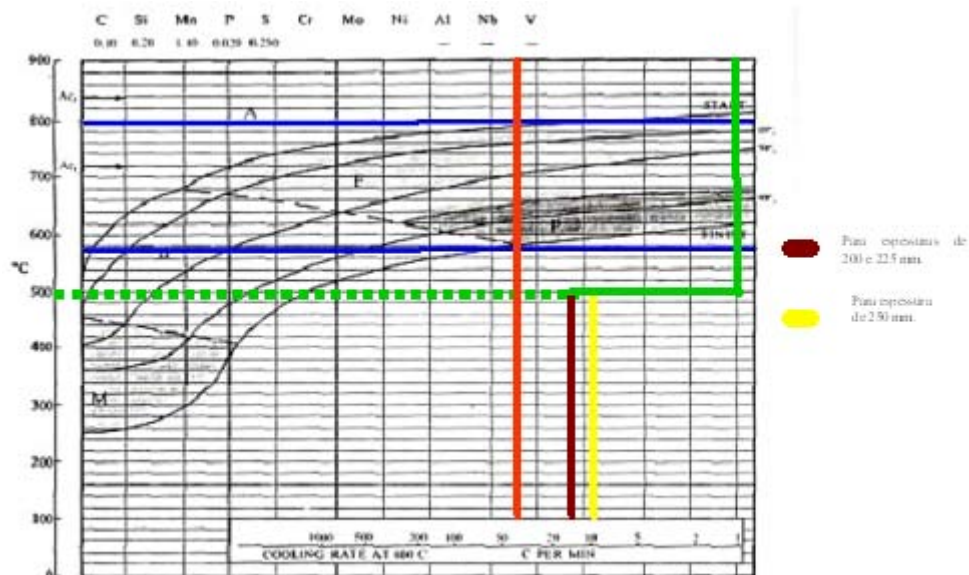


Figura 5 - Curva de resfriamento para um aço AISI 1016, mostrando a proposta de otimização do resfriamento desse material. ⁽²⁾

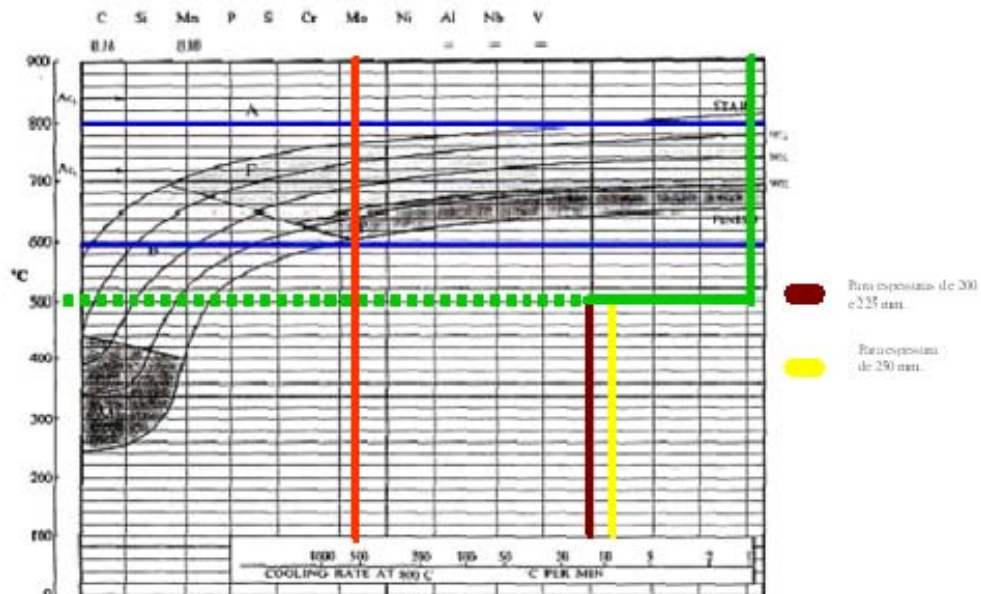


Figura 6 - Curva de resfriamento para um aço AISI 1212, mostrando a proposta de otimização do resfriamento desse material ⁽²⁾

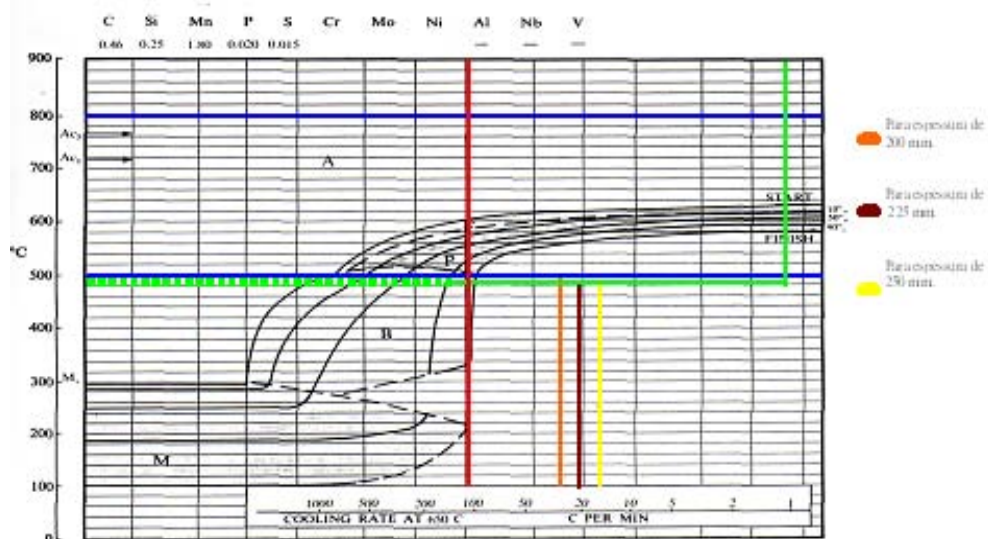


Figura 7 - Curva de resfriamento para um aço AISI 1547, mostrando a proposta de otimização do resfriamento desse material ⁽²⁾

3.3 Avaliação do Impacto das Novas Práticas no Processo Produtivo

Para uma melhor comparação entre as novas estratégias de resfriamento e as estratégias atualmente praticadas, o processo de resfriamento de placas será dividido em 2 etapas:

- **1ª Etapa (TR1):** resfriamento lento (até 1°C/min.) de 800 a 500°C para possibilitar a completa transformação de fase. Cabe destacar que o tempo de resfriamento considerado nesta etapa é de 300 minutos.

- **2ª Etapa (TR2):** resfriamento acelerado ou forçado (a partir de 1°C/min.) de 500 a 50°C para possibilitar a disponibilização do material para as etapas seguintes de processamento da linha de produção.

A Figura 8 apresenta o impacto da variação da velocidade de resfriamento da 2ª etapa do processo na produtividade. Foi observado que com o aumento da velocidade de resfriamento existe a possibilidade de um ganho máximo de até 58%. A variação de TR2 entre as práticas conservadoras e as novas sugestões de arrefecimento chega à ordem de 432 minutos, dinamizando não só o processo de resfriamento, como também, tendo uma participação positiva na logística de todo o processo produtivo da usina. O TR_total é a soma de TR1 e TR2. Para melhor ilustração, o ganho de produtividade para os aços AISI 1016, AISI 1212 e AISI 1547 são mostrados nas Figuras 9 e 10.

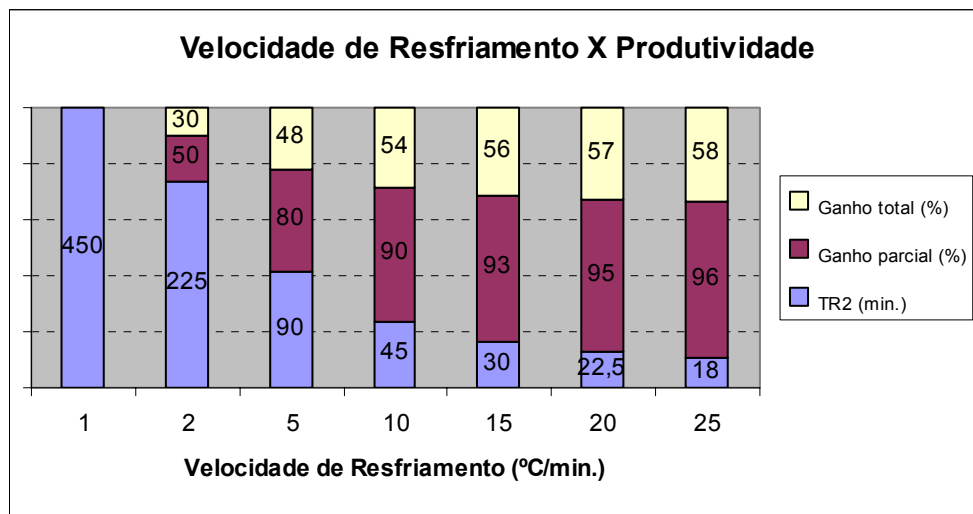


Figura 8 - Comparativo do impacto da variação de velocidade de resfriamento na produtividade

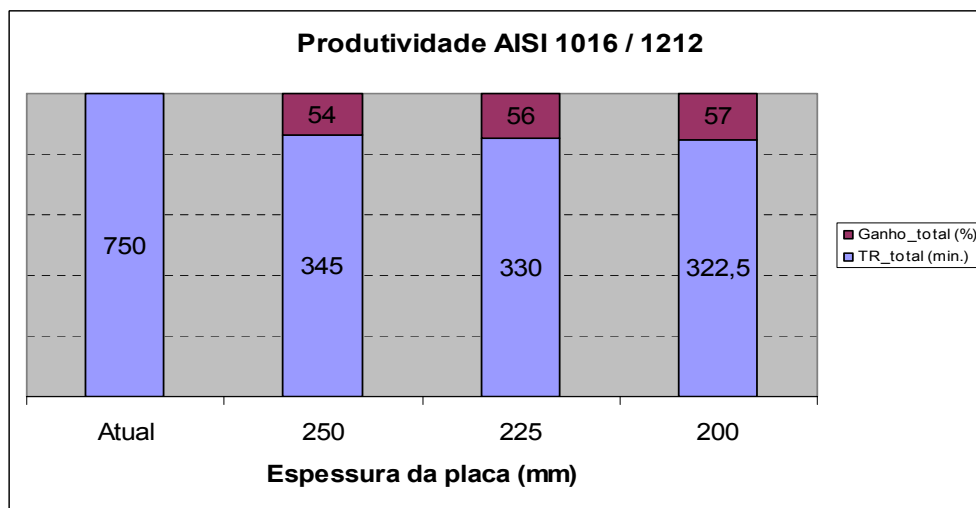


Figura 9 – Ganho de produtividade para os aços AISI 1016 e AISI 1212

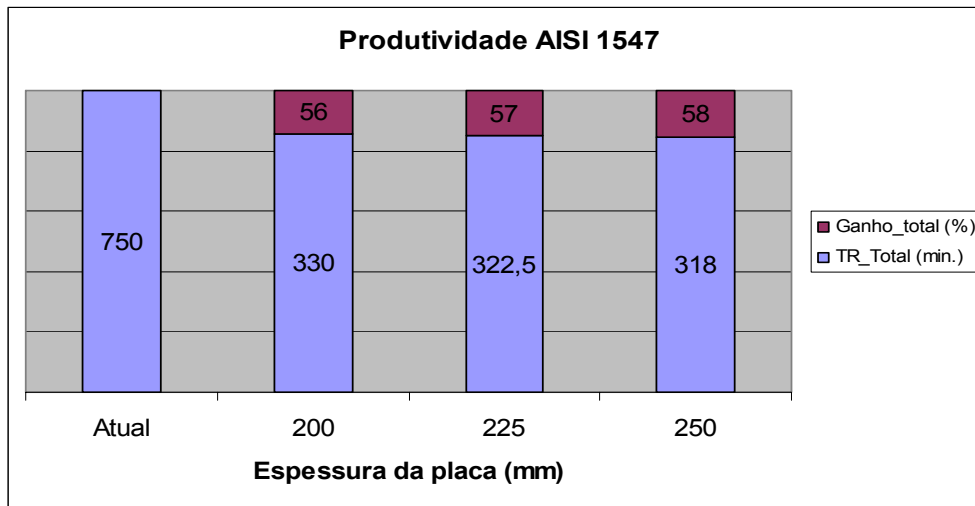


Figura 10 – Ganho de produtividade para o aço AISI 1547

4 CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi possível evidenciar a viabilidade da otimização das práticas de resfriamento de produtos semi-acabados de aço (especificamente placas), dinamizando o processo, assegurando níveis de tensões internas (térmicas e de transformação) suportáveis pelo material, com a formação de estruturas adequadas.

As novas práticas de resfriamento sugeridas neste trabalho, permitem uma considerável redução no período de resfriamento, implicando em maior rotatividade dos “leitões”, acarretando menores investimentos em maquinários para manuseio e área física para estocagem do material em processo, alcançando uma notória elevação da produção.

Por fim, cabe destacar o grau de importância deste estudo, pois se trata de um tema pouco explorado academicamente, sendo a maior parte dos estudos realizados dentro das empresas.

Apesar dos ótimos resultados obtidos, são necessárias pesquisas mais aprofundadas sobre este tema, através de softwares (simuladores) avançados para análise de transferência de calor, análises laboratoriais e de campo. Desta forma, serão obtidos resultados mais seguros que possibilitarão práticas ainda mais ousadas que as propostas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 BELLON, J. C. et al. **Otimização de métodos de resfriamento de produtos semi-acabados**. Contribuição técnica para o In: SEMINÁRIO SOBRE LAMINAÇÃO, (COLAM / ABM). Porto Alegre: 1992.
- 2 ATKINS, M. **Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels**. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Ohio, 1980.
- 3 GOLOVANOV, S.G. **Calculating heating conditions for steels to avoid thermal stress cracks**. BISITS, 1588, Feb. 1961.
- 4 <http://www.matweb.com> Acesso em: 01 de agosto de 2006.