

EFEITO DA ALTERAÇÃO NA ESPESSURA DE ESPERA DURANTE A LAMINAÇÃO CONTROLADA SOBRE OS PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS DE CHAPAS GROSSAS NAVAIS⁽¹⁾

Antonio Augusto Gorni ⁽²⁾
Jackson Soares de Souza Reis ⁽³⁾
Carlos Noberto Paula da Silva ⁽⁴⁾
Celso Gomes Cavalcanti ⁽⁵⁾

- RESUMO

Uma das últimas inovações implementadas no processo de laminação controlada de chapas grossas navais da COSIPA foi o aumento da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera. Foi estudado o efeito dessa alteração no processamento sobre a microestrutura de um aço ao nióbio-titânio. Conforme previsto teoricamente, a elevação na espessura de espera levou a um refino microestrutural generalizado. Não foram observadas alterações na fração de perlita presente na microestrutura. A análise estatística revelou que o grau de refino na microestrutura foi influenciado de forma acentuada pelo grau de deformação total aplicado ao esboço, particularmente durante a fase de acabamento. O abaixamento da temperatura de final de laminação também contribuiu neste sentido, ainda que em menor grau. Essas alterações microestruturais se refletiram nas propriedades mecânicas: houve aumento nos limites de escoamento e resistência, bem como diminuição do alongamento total. Não houve efeito significativo na resistência ao impacto determinado pelo ensaio Charpy a -20⁰C.

Palavras-Chave: Chapas Grossas Navais; Laminação Controlada; Microestrutura.

¹ Trabalho a ser apresentado no 50^o Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Pedro SP, 01 a 04 de Agosto de 1995.

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia, Gerência de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA

³ Engenheiro Metalurgista, Gerência de Suporte Técnico de Laminação, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA

⁴ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, Gerência de Assistência Técnica e Garantia da Qualidade, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA

⁵ Técnico em Siderurgia, Gerência de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA.

- INTRODUÇÃO

É fundamental que, numa época de competição exacerbada, busque-se sempre a maximização da produtividade dos processos siderúrgicos. Essa diretriz é particularmente válida no caso da laminação controlada, processo que dá origem a produtos nobres, mas que também exerce efeito desfavorável na produtividade do laminador de chapas grossas. Essa desvantagem decorre da necessidade de se obedecer a um *período de espera* para ajuste da temperatura do esboço entre as fases de acabamento e esboçamento. Neste ínterim, o material não pode sofrer deformação, o que implica na paralisação momentânea do equipamento por períodos de até quatro minutos, conforme a espessura do produto que está sendo laminado.

Uma série de inovações vem sendo implementadas na COSIPA com o objetivo de se aumentar a produtividade da laminação controlada. Algumas delas já foram descritas em trabalhos anteriores [1,2]. Todas foram previamente testadas antes de serem incorporadas à rotina operacional, verificando-se particularmente seu impacto sobre a qualidade do material. De fato, é vital que se assegure o binômio produtividade e qualidade para que se obtenha a produção econômica de material plenamente adequado aos clientes, dentro de um prazo de entrega mínimo.

Uma das últimas alterações feitas no processo de laminação controlada de chapas grossas navais da COSIPA foi o aumento da espessura do esboço intermediário durante sua fase de espera. Essa medida permite reduzir o comprimento do esboço intermediário durante a fase de espera o qual, obviamente, passa a ocupar menos espaço na mesa de rolos. Desse modo, passa a ser possível a laminação conjunta de duas ou mais placas, dentro do esquema conhecido como *laminação em tandem*. Ela se caracteriza pelo aproveitamento do período de espera de um dado esboço para se iniciar e/ou continuar o processamento de outro laminado. Desse modo, a cadeira de laminação não mais fica ociosa durante os períodos de espera, aumentando significativamente sua produtividade.

O objetivo deste trabalho foi verificar as possíveis conseqüências dessa alteração de processo sobre as características microestruturais do produto final.

Na realidade, a alteração na espessura de espera de um dado produto implica numa alteração da distribuição de deformação total entre as fases de esboçamento

e acabamento. Quando essa espessura é aumentada, ocorre diminuição no grau de deformação aplicado durante o esboçamento, acompanhada do correspondente aumento no grau de deformação aplicado no acabamento.

O maior grau de deformação aplicado na faixa de temperaturas onde a austenita não mais se recristaliza se reflete, obviamente, num maior nível de encruamento no final da laminação. Pode-se, portanto, esperar o surgimento de microestrutura final mais refinada, em decorrência da maior quantidade de contornos e subcontornos de grão disponíveis para a transformação da austenita. Além disso, essa estrutura terá maior nível de defeitos cristalinos, o que poderá concorrer para uma aceleração ainda maior da transformação ferrítica [3]. Para que esse refino seja máximo, a espessura de espera utilizada deve permitir que o grau de deformação aplicado na fase de esboçamento seja de pelo menos 60%, garantindo-se assim a obtenção de austenita recristalizada com tamanho de grão mínimo por ocasião do início da fase de espera [3,4].

De fato, há evidências de que o aumento da espessura de espera leva ao refino da microestrutura final do esboço, em maior ou menor grau, em função da composição química do aço, grau de deformação total, temperatura de acabamento, velocidade de resfriamento após a deformação, etc. [3].

Já o efeito do aumento da espessura de espera sobre as propriedades mecânicas não é tão óbvio. O refino microestrutural decorrente dessa medida deveria, a princípio, levar à elevação da resistência mecânica e tenacidade do produto. Seu efeito, contudo, pode ser superado por outros efeitos microestruturais, como alteração da morfologia dos constituintes, redução do potencial de endurecimento por precipitação, etc. [3]. Logo, a alteração desse parâmetro de processo deve ser feita com cautela, analisando-se previamente as condições de processo, de maneira global.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material estudado neste trabalho apresentou composição química dentro das faixas constantes na tabela I. Trata-se de aço microligado ao nióbio-titânio, normalmente utilizado na produção de chapas grossas para a indústria naval.

Foram laminados 39 esboços desse material, a partir de placas lingotadas continuamente com idênticas dimensões. Para se tornar o estudo mais genérico, foram produzidos laminados com espessura final de 12,7 mm (14 unidades), 25,4 mm (12) e 32,0 mm (13).

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti
0,11- 0,15	0,90- 1,10	0,25- 0,35	0,025 máx	0,015 máx	0,020- 0,060	0,015- 0,025	0,008- 0,020

Tabela I: Faixas de composição química do aço estudado no presente trabalho, percentagem em peso.

A espessura máxima do esboço intermediário durante a fase de espera foi limitada em 100 mm, em função da potência do laminador e dos problemas potenciais de heterogeneidade térmica, fatores que certamente seriam mais críticos para maiores espessuras. Outro cuidado observado foi manter o grau de deformação aplicado durante a fase de esboçamento acima de 60%, conforme recomendado pela literatura. Assim sendo, foram testadas as seguintes espessuras de espera:

$$\cdot h_f = 12,7 \text{ mm} \rightarrow h_{esp} = 2 h_f, 3 h_f, 4 h_f, 5 h_f$$

$$\cdot h_f = 25,4 \text{ mm} \rightarrow h_{esp} = 2 h_f, 3 h_f, 4 h_f$$

$$\cdot h_f = 32,0 \text{ mm} \rightarrow h_{esp} = 2 h_f, 3 h_f.$$

onde h_f é a espessura final do esboço e h_{esp} é a correspondente espessura na fase de espera.

A evolução de temperaturas ao longo da laminação ocorreu de acordo com as normas operacionais da COSIPA, sendo mantida tão constante quanto possível para cada classe de espessura de produto.

Foram retiradas amostras longitudinais dos esboços assim obtidos para análise metalográfica e ensaios mecânicos. A microestrutura ferrítico-perlítica dos corpos de prova foi analisada quantitativamente, sendo determinados parâmetros como fração

volumétrica de perlita (f_v); tamanho de grão global (TG); tamanho de grão (TG_α), distância livre média (λ_α) e grau de adjacência (C_α) ferríticas; e tamanho de grão perlítico (TG_β), conforme a metodologia descrita em [5]. A fim de se evitar a influência da segregação central do esboço nestas medidas, restringiu-se a área analisada entre a região superficial sem descarbonetação até $\frac{1}{4}$ da espessura do esboço. Foram examinadas as seções transversais do material. Em cada caso, foi efetuado número de contagens suficientes para se atingir uma precisão mínima de $\pm 5\%$ nos parâmetros microestruturais.

Os ensaios mecânicos foram executados conforme a metodologia rotineira para liberação de material naval utilizada na COSIPA. Foram efetuados ensaios de tração nas amostras com o objetivo de se determinar seus limites de escoamento e resistência, razão elástica e alongamento total. Foram ainda realizados ensaios Charpy a -20°C para se determinar a energia absorvida pelo material durante o impacto.

Os resultados assim obtidos foram analisados estatisticamente, através de correlação (simples, múltipla e “stepwise”), teste t de Student para médias, análise de variância (ANOVA) e de componentes principais, utilizando-se o software *SYSTAT*.

- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em primeiro lugar, será analisado o efeito da deformação total sobre a microestrutura, sem se discriminar o efeito da espessura de espera. A figura 1 mostra “*boxplots*” dos diversos parâmetros microestruturais, arranjados conforme a espessura do produto final. Uma análise visual desses gráficos parece indicar que a microestrutura do esboço mais leve é consistentemente mais refinada que a das outras duas classes de produto, mais espessas. Note-se, contudo, que essa diferença é muito pequena em termos absolutos. Por exemplo, o tamanho de grão global máximo dos esboços com espessura final de 12,7 mm foi igual a $5,8\ \mu\text{m}$, enquanto que para os outros tipos de produto ele assumiu os valores de $6,9\ \mu\text{m}$ ($h_f = 25,4\ \text{mm}$) e $7,0\ \mu\text{m}$ ($h_f = 32,0\ \text{mm}$) - uma redução de aproximadamente 17%.

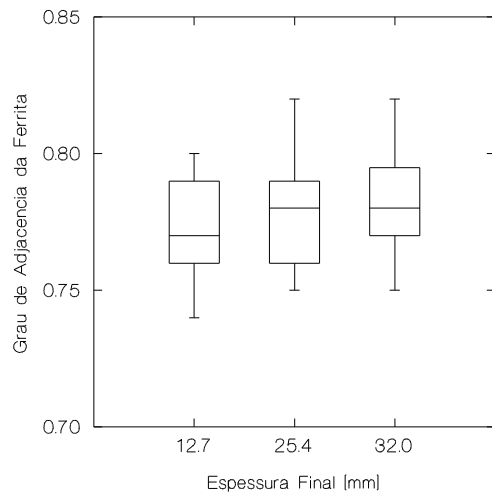
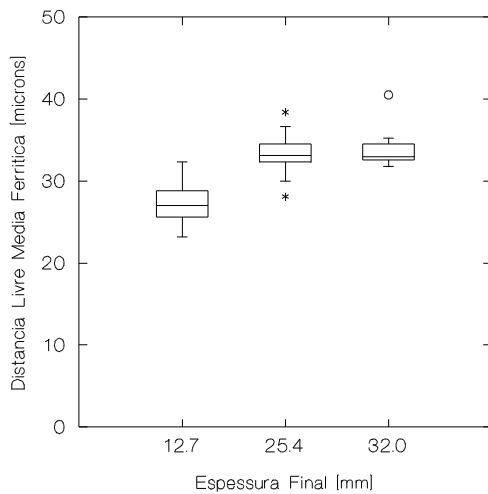
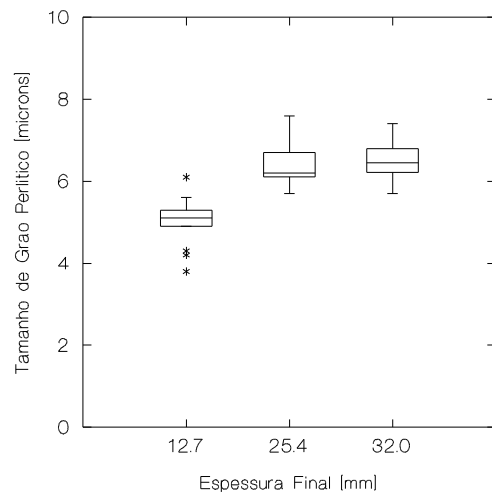
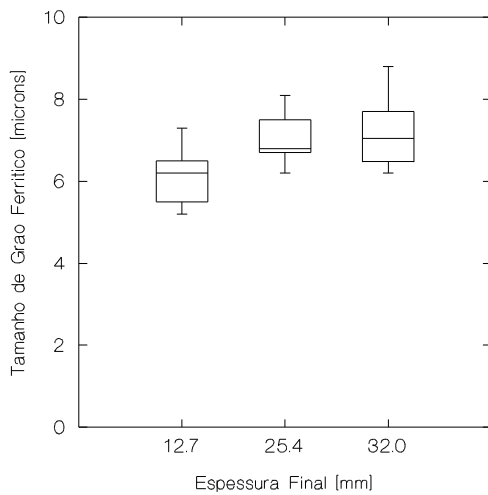
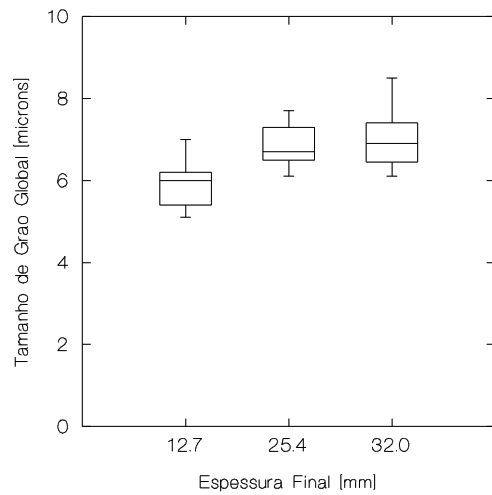
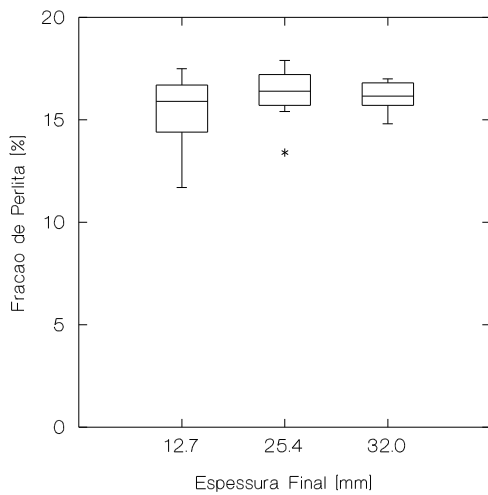


Figura 1: Efeito do grau de deformação total sobre os diversos parâmetros microestruturais dos esboços.

A tabela II mostra os resultados da análise de variância e testes de média relativos aos resultados da figura 1. A análise de variância englobou os dados relativos às três classes de produto, enquanto que no teste de média foram analisados os resultados pertinentes aos dois esboços mais pesados. Os resultados dessa análise iniciaram que o esboço mais leve efetivamente apresentou estrutura mais refinada que os outros dois materiais mais espessos. Estes, por sua vez, não apresentaram diferenças significativas entre si, do ponto de vista microestrutural. Além disso, foi confirmada a constatação visual relativa à não-influência do grau de deformação total sobre a fração volumétrica de perlita e o grau de adjacência da ferrita, para as três classes de produto estudadas.

	f_v	TG	TG_α	TG_β	λ_α	C_α
ANOVA	IGUAIS	DIFERENTES	DIFERENTES	DIFERENTES	IGUAIS	DIFERENTES
Todas as espessuras	72,2%	100%	100%	100%	61,4%	100%
Teste t de Student	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS
25,4 e 32,0 mm	15,4%	37,6%	29,7%	40,4%	27,1%	43,9%

Tabela II: Resultados da análise de variância e do teste de médias efetuado para os dados da figura 1, em função das espessuras dos produtos finais em estudo. Também está indicado o grau percentual de confiança associado. Grau de confiança mínimo adotado: 95%.

Será analisado agora o efeito da espessura de espera sobre os parâmetros microestruturais dos esboços. As figuras 2, 3 e 4 mostram as alterações observadas, para produtos com espessura final de 12,7, 25,4 e 32,0 mm, respectivamente. O exame visual desses gráficos indica que, conforme previsto na literatura [3], o aumento da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera levou a um progressivo refino da microestrutura. O tamanho de grão global e ferrítico foi reduzido em todas as classes de espessura final. A diminuição absoluta, contudo, não foi muito grande, apesar de sua consistência estatística. De fato, o tamanho de grão global, por exemplo, foi reduzido em

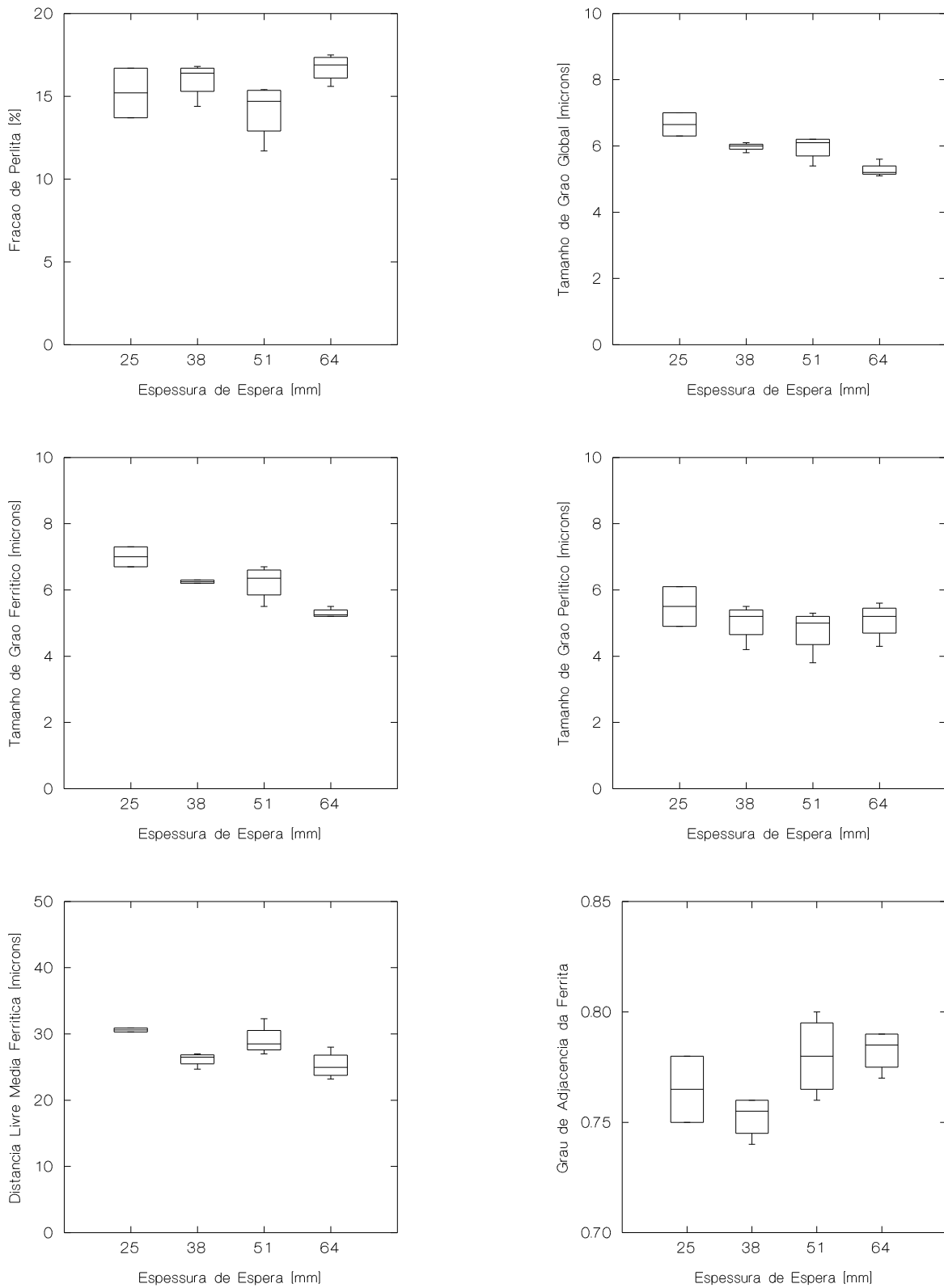


Figura 2: Efeito da alteraao da espessura do esboço intermediario durante a fase de espera sobre a microestrutura, para chapas grossas com espessura final de 12,7 mm.

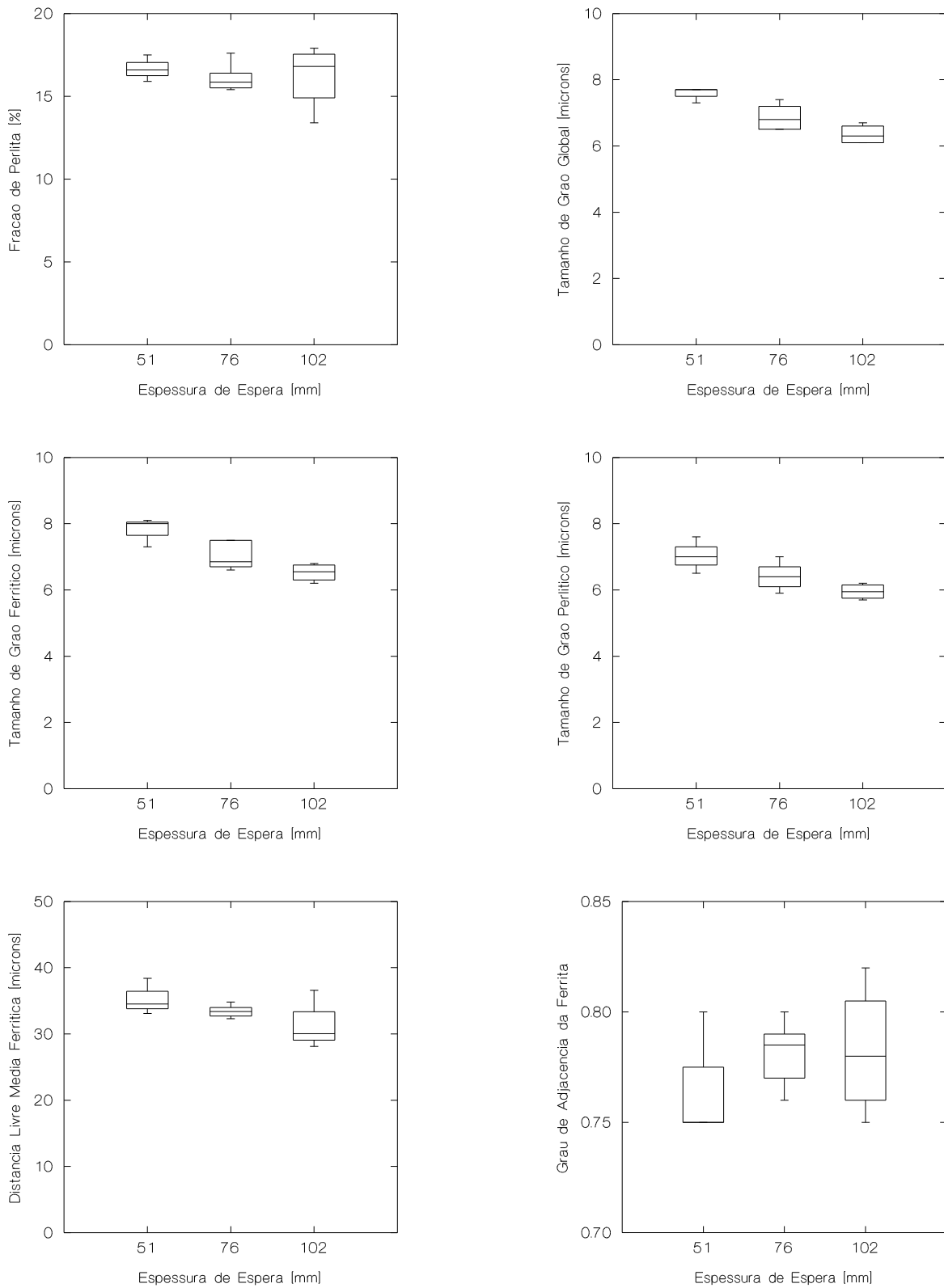


Figura 3: Efeito da alteração da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera sobre a microestrutura, para chapas grossas com espessura final de 25,4 mm.

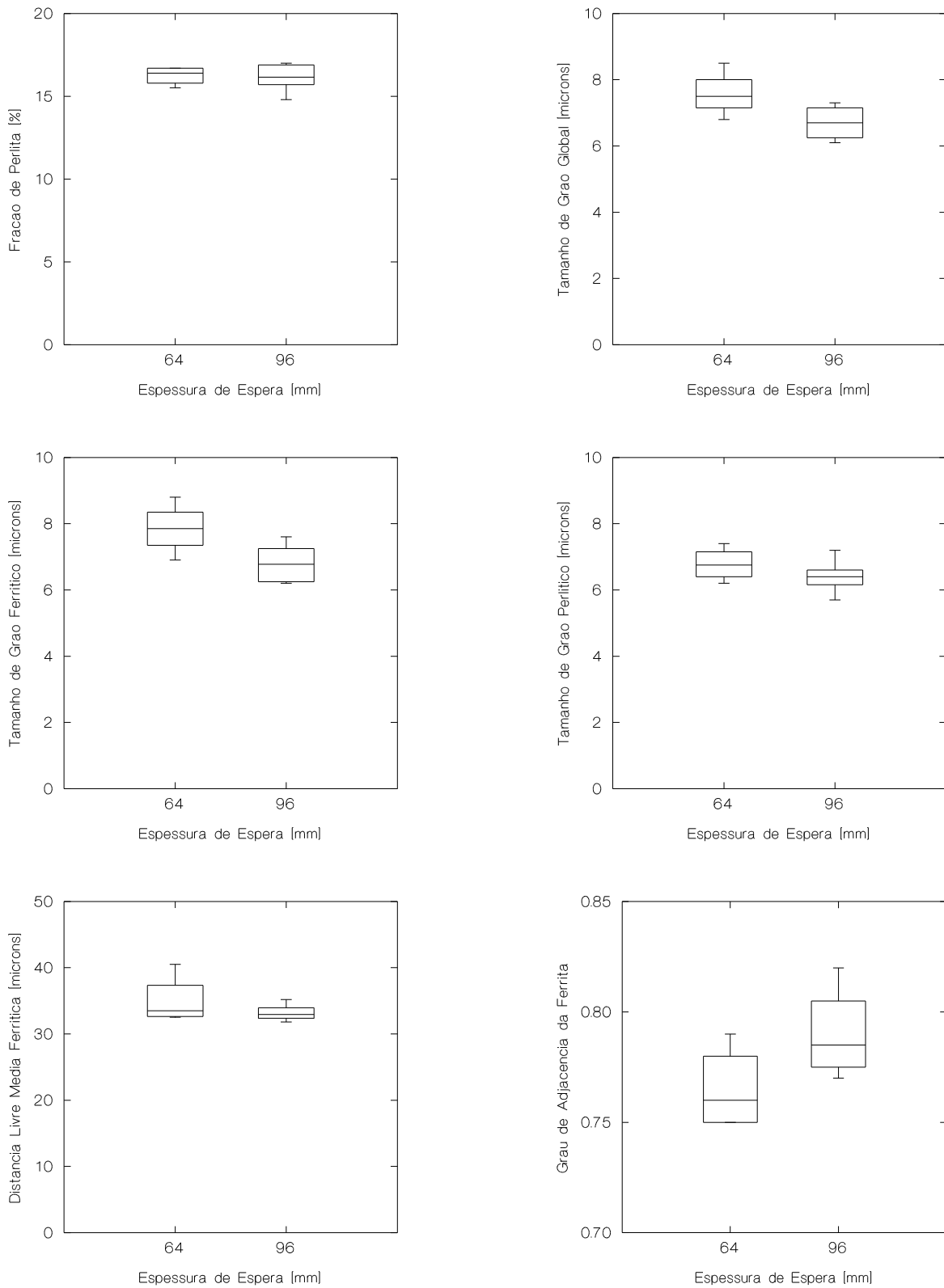


Figura 4: Efeito da alteração da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera sobre a microestrutura, para chapas grossas com espessura final de 32,0 mm.

1,4 μm ($h_f = 12,7$ mm), 1,2 μm ($h_f = 25,4$ mm) e 0,9 μm ($h_f = 32,0$ mm). Em termos percentuais, 21%, 16% e 12%, respectivamente.

Já outros parâmetros microestruturais não apresentaram uma tendência tão firme nesse sentido. No caso do esboço mais fino, o tamanho de grão perlítico e a distância livre média ferrítica não apresentaram uma diminuição consistente. Por sua vez, a fração volumétrica de perlita e o grau de adjacência da fase ferrítica não apresentaram alterações significativas, qualquer que fosse a espessura de produto considerada.

É conveniente confirmar as constatações visuais acima através da análise de variância e do teste de médias. A tabela III mostra os resultados obtidos por esses procedimentos para os dados das figuras 2, 3 e 4. Essa análise estatística confirmou as observações deduzidas visualmente, com algumas exceções. Não se conseguiu provar o efeito da espessura de espera sobre o tamanho de grão perlítico para $h_f = 12,7$ e 32,0 mm, embora neste último caso a excessiva dispersão neste parâmetro possa estar mascarando sua real tendência. Fato semelhante parece ter ocorrido também com a distância livre média ferrítica. Já o eventual efeito da espessura de espera sobre o grau de adjacência da ferrita, apontado pela análise de variância para as chapas com $h_f = 12,7$ mm, perde seu significado físico quando se constata que o erro associado às medidas é maior que a diferença entre elas.

	f_v	TG	TG_α	TG_β	λ_α	C_α
ANOVA	IGUAIS	DIFERENTES	DIFERENTES	IGUAIS	DIFERENTES	DIFERENTES
$h_f = 12,7$ mm	89,7%	99,8%	99,9%	36,7%	98,6%	95,4%
ANOVA	IGUAIS	DIFERENTES	DIFERENTES	DIFERENTES	IGUAIS	IGUAIS
$h_f = 25,4$ mm	19,7%	99,8%	99,5%	98,2%	86,5%	38,0%
<i>t</i> de Student	IGUAIS	DIFERENTES	DIFERENTES	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS
$h_f = 32,0$ mm	15,4%	97,3%	98,0%	78,4%	77,5%	94,6%

Tabela III: Resultados da análise de variância e do teste de médias efetuados para os dados das figuras 2, 3 e 4, em função da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera, para cada classe de espessura de produto. Também está indicado o grau percentual de confiança associado. Grau de confiança mínimo adotado: 95%.

A figura 5 mostra o diagrama gerado pela Análise dos Componentes Principais, onde se objetivou estabelecer correlações entre os parâmetros de processo da laminação controlada e a microestrutura obtida no produto final. A partir deste diagrama pode-se observar que alguns parâmetros microestruturais, tais como tamanhos de grão global e ferrítico, estão agrupados no canto superior direito do gráfico, enquanto que alguns outros, como tamanho de grão perlítico e distância livre média ferrítica, se encontram nessa região, mas mais próximos da região intermediária. Já o grau de deformação aplicado na fase de acabamento está nas proximidades do quadrante inferior esquerdo. Isto sinaliza uma forte correlação inversa desse parâmetro de processo com os tamanhos de grão global e ferrítico, e uma correlação um pouco mais fraca com o tamanho de grão perlítico e distância livre média ferrítica. Note-se que o grau de deformação total se encontra na região intermediária à esquerda do gráfico, o que indica uma correlação, ainda que bem mais fraca, com o tamanho de grão global e ferrítico.

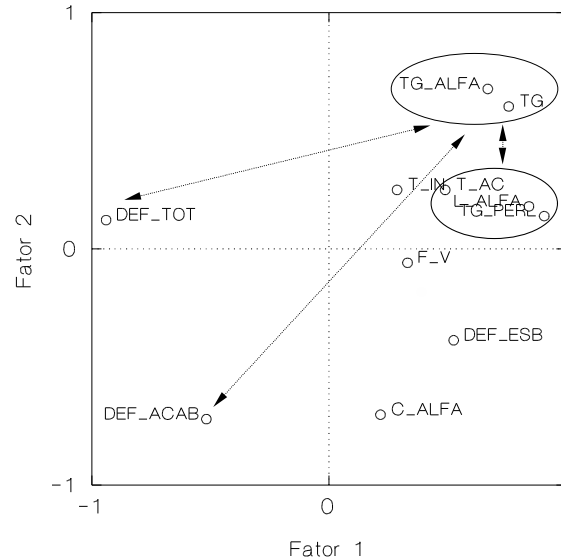


Figura 5: Gráfico gerado pela Análise dos Componentes Principais, considerando-se as variáveis ligadas ao processo de laminação controlada e à microestrutura. O significado das siglas utilizadas nesta figura pode ser visto na tabela IV.

SIGLA	SIGNIFICADO
ALONG	Alongamento Total
C_ALFA	Grau de Adjacência da Ferrita
CHARPY	Energia Absorvida no Ensaio de Impacto Charpy
DEF_ACAB	Grau de Deformação Aplicado na Fase de Acabamento
DEF_ESB	Grau de Deformação Aplicado na Fase de Esboçamento
DEF_TOT	Grau de Deformação Total (Placa → Esboço)
F_V	Fração Volumétrica de Perlita
L_ALFA	Distância Livre Média Ferrítica
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de Ruptura
RE	Razão Elástica
T_AC	Temperatura de Acabamento
T_IN	Temperatura de Início de Laminação
TG	Tamanho de Grão Global
TG_ALFA	Tamanho de Grão Ferrítico
TG_PERL	Tamanho de Grão Perlítico

Tabela IV: Significado das siglas utilizadas nas figuras 5 e 6.

Este diagrama permite ainda verificar que a temperatura de acabamento apresenta correlação direta com os mesmos parâmetros microestruturais citados no parágrafo acima, uma vez que suas posições no gráfico são relativamente próximas. Finalmente, note-se que a fração volumétrica de perlita e o grau de adjacência da ferrita não apresentaram correlação com nenhum dos parâmetros de processo observados. Por sua vez, a temperatura de início de laminação e o grau de deformação aplicado na fase de esboçamento não apresentaram correlação com nenhuma variável microestrutural. De fato, a ausência de efeito por parte deste último parâmetro já era previsível, uma vez que foi garantido que o grau de deformação aplicado na fase de esboçamento sempre seria superior a 60%.

Devido às limitações presentes de espaço não serão apresentados neste trabalho os resultados obtidos em termos de propriedades mecânicas dos esboços estudados. Este assunto deverá ser objeto de um próximo artigo a ser publicado brevemente. Por ora, foi incluído aqui um diagrama obtido pela Análise de Componentes Principais, considerando-se parâmetros microestruturais e propriedades mecânicas, o qual

pode ser visto na figura 6. Este gráfico mostra que há dois grupos de parâmetros microestruturais nas proximidades da região intermediária direita do gráfico. Um deles engloba os tamanhos de grão global e ferrítico, enquanto que o outro inclui o tamanho de grão perlítico e a distância média livre ferrítica. Esses dois grupos estão diametralmente opostos a um outro grupo de parâmetros que refletem a resistência do material, ou seja, os limites de escoamento e resistência, e a razão elástica. Isto evidencia uma forte correlação negativa desses grupos de variáveis microestruturais com a resistência mecânica do material. Note-se também que o alongamento total está próximo ao grupo que contém o tamanho de grão perlítico e a distância livre média ferrítica, o qual sinaliza correlação direta entre esses parâmetros. Ou seja, ao menos aparentemente, quanto mais dispersa estiver a perlita, maior o alongamento do material.

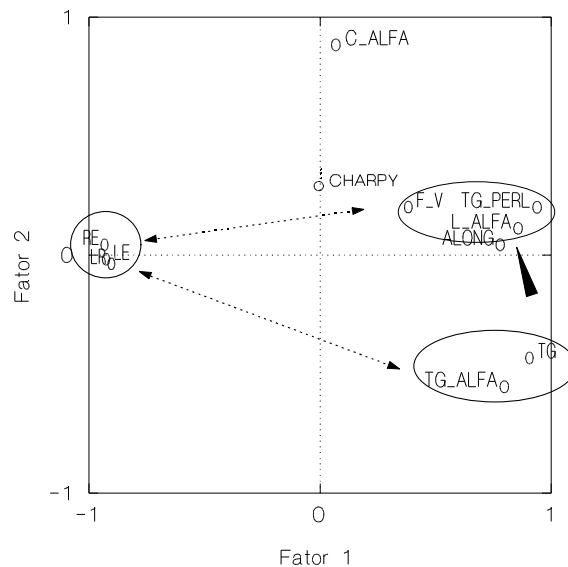


Figura 6: Gráfico gerado pela Análise dos Componentes Principais, considerando-se as variáveis microestruturais e as propriedades mecânicas. O significado das siglas utilizadas nesta figura pode ser visto na tabela IV.

Por sua vez, a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy não apresentou correlação significativa com nenhuma variável microestrutural. Isto é estranho,

uma vez que o refino da microestrutura deveria ter levado a alguma melhoria na tenacidade do material. Uma possibilidade para justificar este fato está na significativa dispersão dos valores de energia absorvida, que pode ter mascarado algum efeito decorrente do refino microestrutural.

Finalmente, verificou-se que tanto a fração volumétrica de perlita como o grau de adjacência da ferrita não influenciaram as propriedades mecânicas do material. Na verdade, a estreita faixa de variação desses parâmetros pode não ter permitido a uma influência mais significativa nas características do produto.

- CONCLUSÕES

- O aumento do grau de deformação total (placa → esboço) levou a um refino generalizado da microestrutura, exceto em termos da distância livre média ferrítica, vale dizer, do espaçamento entre os grãos de perlita;
- O aumento da espessura de espera levou ao refino da microestrutura do produto final em termos dos tamanhos de grão ferrítico e global. Sua influência sobre outros parâmetros microestruturais, como o tamanho de grão perlítico e distância livre média ferrítica, não ficou clara, provavelmente em função do expressivo grau de dispersão estatística observado nessas variáveis;
- A fração volumétrica de perlita e grau de adjacência da ferrita não sofreram alterações, em função tanto do grau de deformação total ou da variação da espessura de espera;
- A Análise de Componentes Principais indicou que o grau de deformação aplicado na fase de acabamento, o grau de deformação total e a temperatura de acabamento - em ordem decrescente de influência - exerceram efeito relevante no refino microestrutural.

- Foram observadas correlações entre o tamanho de grão do material e sua resistência mecânica e alongamento. Aparentemente a distribuição da perlita ao longo da microestrutura exerceu algum efeito sobre essa propriedade. Já a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy não apresentou correlação com nenhum parâmetro microestrutural neste estudo, provavelmente devido à significativa dispersão estatística observada nesta propriedade dos esboços.

- BIBLIOGRAFIA

1. STUART, M.A. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Anais. Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, Novembro 1991, 354-373.
2. SILVA, J.M.S. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Anais. Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, Novembro 1991, 337-353.
3. HAUMANN, W. e outros. Verringerung der Streubreite der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Warmgewaltzen Baustählen. Bundersministers für Forschung und Technologie, Bonn, April 1983. 139 p.
4. SILVA, V.R. Efeito do Tamanho de Grão Austenítico e da Deformação sobre a Evolução do Tamanho de Grão Austenítico Recristalizado, durante o Primeiro Estágio da Laminação Controlada de um Aço Microligado ao Nióbio-Vanádio. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da U.S.P., 1989. 167 p.
5. GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. Revista Pesquisa & Tecnologia - FEI, Fev. 1995, 31-36.

- ABSTRACT

**CHANGES ON MICROSTRUCTURAL PARAMETERS
OF SHIPBUILDING PLATE STEELS CAUSED BY MODIFICATION OF
STRAIN DISTRIBUTION BETWEEN ROUGHING AND FINISHING STAGES
DURING CONTROLLED ROLLING**

In this work it was studied the effect of the strain distribution between roughing and finishing stages during the controlled rolling of a Nb-Ti shipbuilding plate steel. As stated before in the literature, the elevation of the strain degree applied during the finishing stage led to a general refining of the microstructure. This was particularly evident for the ferritic phase, but it was not very clear regarding to pearlite. It was not observed any modification in the pearlite fraction present in the microstructure. The statistic analysis revealed that the microstructural refining was mainly influenced by the total strain degree applied to the rolling stock, specially during the finishing stage. The lowering of the finishing temperature also displayed a similar effect, but in a less evident way. The observed microstructural alterations reflected on the mechanical properties of plate. The grain refining effect led to a increase in the yield and tensile stress, and a decrease in the total elongation. However, it was not detected any significant change in the impact strength determined by the Charpy impact tests performed at -20°C .

Keywords: Shipbuilding Plate Steels; Controlled Rolling; Microstructure