

OTIMIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO CONTROLADA 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

Chapas grossas grau DH-36, destinadas à indústria naval, requerem teor de manganês relativamente alto, o que acarreta uma série de problemas durante a elaboração desse material na aciaria. Foi desenvolvido um novo aço para essa aplicação, com menor teor desse elemento de liga, com o objetivo de se minimizar tais inconvenientes e, conseqüentemente, facilitar seu processo de produção. A fim de se compensar a perda de propriedades mecânicas decorrente dessa alteração na liga, decidiu-se aumentar a espessura do esboço intermediário durante a fase de espera da laminação controlada. Foi verificado que tanto o aumento do grau de deformação total (placa → esboço) como o da espessura de espera concorreram para o aumento da resistência mecânica do esboço, mas não afetaram significativamente o alongamento total e a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. O efeito da elevação da espessura de espera diminuiu a medida que se aumentou o grau de deformação total, ou seja, ao se diminuir a espessura final do esboço, sendo praticamente nulo para esboços finos. De todo modo, o ganho proporcionado pelo aumento da espessura de espera não foi suficiente para compensar a perda no limite de resistência decorrente da diminuição de 20 a 40% no teor de manganês.

Palavras-Chave: Chapa Grossa Naval; Laminação Controlada; Propriedades Mecânicas.

¹ Trabalho a ser apresentado no 32º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curitiba (PR), 6 a 8 de Novembro 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

No mundo competitivo de hoje, uma empresa só garante sua fatia de mercado se conseguir fornecer seus produtos com nível de qualidade perfeitamente adequado às necessidades do cliente, a um preço menor que o da concorrência e dentro de um prazo de entrega previamente combinado. Tais requisitos vem se tornando cada vez mais severos, pois eles são fundamentais para que o próprio cliente assegure competitividade em seu nicho de mercado.

O caso da siderurgia é exemplar: o surgimento de materiais alternativos, a enorme expansão da capacidade instalada e contingências sócio-econômicas tornaram este campo extremamente competitivo. A resposta dos líderes mundiais veio na forma de um intenso desenvolvimento de produtos e processos, cujo objetivo final nada mais é do que aumentar cada vez mais o grau de satisfação de seus clientes. Além disso, processos convencionais vem sendo continuamente refinados, passando a contar com novos sistemas de controle e apoio. Isto eventualmente inclui o uso de instrumentação avançada e automação em todos os níveis.

Apesar de grandes investimentos e aperfeiçoamentos serem necessários e até mesmo vitais dentro do atual quadro da siderurgia brasileira, pequenos aperfeiçoamentos em processos e produtos continuam sendo particularmente bem vindos. De fato, eles podem contribuir significativamente para o aumento do nível de competitividade de uma usina, sem que sejam necessários grandes investimentos.

Este trabalho tem como objetivo relatar os resultados de um projeto desenvolvido na COSIPA com o objetivo de se otimizar a composição química e o processo de laminação controlada de um aço microligado ao nióbio-titânio, destinado à produção de chapas grossas navais.

Alguns tipos deste produto são muito espessos e/ou devem apresentar maior resistência mecânica, como os que devem atender à norma DH-36, por exemplo. Neste caso, tais características são garantidas, em parte, através do emprego de maior teor de elementos de liga, entre eles, o manganês. Esse elemento possui vários mecanismos de ação sob este ponto de vista:

- . Redução da temperatura de transformação da austenita, refinando a microestrutura do produto final [1];
- . Aumento da fração de perlita na microestrutura [1];
- . Elevação da solubilidade do nióbio na austenita, possibilitando que maiores teores desse elemento estejam disponíveis para retardar sua recristalização durante a laminação controlada e aumentar o potencial de endurecimento por precipitação na ferrita [2].

Por outro lado, esse maior teor de manganês cria alguns problemas no processo de aciaria. Uma vez que a quantidade de ferro-liga a ser adicionada na panela será maior, torna-se necessário elevar as temperaturas de fim de sopro e vazamento, de modo a garantir a plena dissolução e homogeneização do manganês. Esse aumento de temperatura provoca alguns inconvenientes [3]:

- . Refosforação do banho metálico;
- . Perda de rendimento metálico devido ao alto nível de oxidação;
- . Maior intensidade de ataque aos refratários do conversor e panela.

Além disso, a elevação do teor de manganês, aliado ao teor relativamente baixo do silício do aço, intensifica, por si só, o ataque ao refratário sílico-aluminoso das panelas, prejudicando o nível de limpeza interna do metal [4].

Todos esses inconvenientes são causas potenciais de desvios e retrabalho ao longo do processo siderúrgico. Conseqüentemente, eles podem levar à elevação nos custos de produção e atrasos no cronograma de entrega do material.

Assim sendo decidiu-se, numa primeira etapa, reduzir de 20 a 40% o teor de manganês nos aços microligados para chapas grossas navais que apresentassem maiores teores desse elemento. Tal medida deve, a princípio, facilitar o processamento

desse material na aciaria, além de reduzir o custo da liga em si, em função de seu menor teor de manganês.

Por outro lado, deve-se considerar agora os possíveis reflexos dessa alteração na composição química original sobre as propriedades do produto. A princípio, a redução no teor de manganês deve levar a um maior tamanho de grão e menor fração de perlita na microestrutura, além de menores teores de nióbio dissolvido na austenita durante a laminação controlada. Tais fatores deverão concorrer para uma queda na resistência mecânica do material. Adicionalmente, a elevação do tamanho de grão pode concorrer para uma queda na sua tenacidade.

De fato, fórmulas empíricas indicam uma redução no limite de escoamento da ordem de 3 a 4 MPa para cada 0,1% de manganês subtraído na composição química, considerando-se apenas seu efeito sobre o endurecimento da ferrita proporcionado por solução sólida [1,5]. Por outro lado, isso corresponde a uma redução de aproximadamente 0,017% no carbono equivalente do aço, o que não deixa de ser um indicativo de melhor soldabilidade.

Uma solução proposta para se compensar essa perda de resistência mecânica foi a elevação na espessura do esboço intermediário durante a fase de espera da laminação controlada. 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 [6]. 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 [6,7].

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. [6].

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. [6]. 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, cujo teor de manganês foi otimizado.

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.

Foram laminados 39 esboços desse material, a partir de placas lingotadas continuamente com aproximadamente a mesma espessura e largura. Para se tornar o estu-

do mais genérico, foram produzidos laminados com espessura final de 12,7 mm (14 unidades), 25,4 mm (12) e 32,0 mm (13).

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:

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

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

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

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. 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 (LE) e resistência (LR), razão elástica (RE) e alongamento total (A_l). Foram ainda realizados ensaios Charpy a -20°C para se determinar a energia absorvida pelo material durante o impacto (RI).

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 do grau de deformação total sobre as propriedades mecânicas, sem se discriminar o efeito da espessura de espera. A figura 1 mostra “*boxplots*” dos resultados obtidos para cada classe de espessura de produto. O material mais fino ($h_f = 12,7$ mm) apresentou maior resistência mecânica e menor alongamento total. As diferenças observadas em relação ao material mais pesado ($h_f = 32,0$ mm) foram: ΔLE , + 55 MPa (14%), ΔLR , +30 MPa (6%), ΔRE , + 6% (8%), ΔA_l , - 4,3% (18%). Por outro lado, não foram observadas alterações em termos da resistência absorvida no ensaio Charpy para as três classes de espessura. De fato, seus valores médios foram praticamente iguais: 139, 145 e 144 J, para $h_f = 12,7$, 25,4 e 32,0 mm, respectivamente.

As tendências inferidas visualmente podem ser confirmadas através da análise de variância e teste de médias, gerados a partir dos dados da figura 1, cujos resultados podem ser vistos na tabela II. Como se pode observar, os resultados dessa análise confirmaram plenamente as conclusões deduzidas anteriormente. O esboço mais fino apresentou propriedades mecânicas nitidamente diferentes em relação aos outros dois esboços mais pesados, com exceção dos valores de energia absorvida no ensaio Charpy. Por outro lado, não houve diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades mecânicas dos dois esboços mais pesados ($h_f = 25,4$ e 32,0 mm).

Será analisado agora o efeito da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera da laminação controlada sobre as propriedades mecânicas do produto.

	LE	LR	RE	A_l	RI
ANOVA	DIFERENTES	DIFERENTES	DIFERENTES	DIFERENTES	IGUAIS
Todas as espessuras	100%	100%	100%	100%	14,8%
Teste <i>t</i> de Student	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS	IGUAIS
25,4 e 32,0 mm	63,1%	40,8%	37,5%	47,1%	88,0%

Tabela II: Resultados da análise de variância e do teste de médias efetuados 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%.

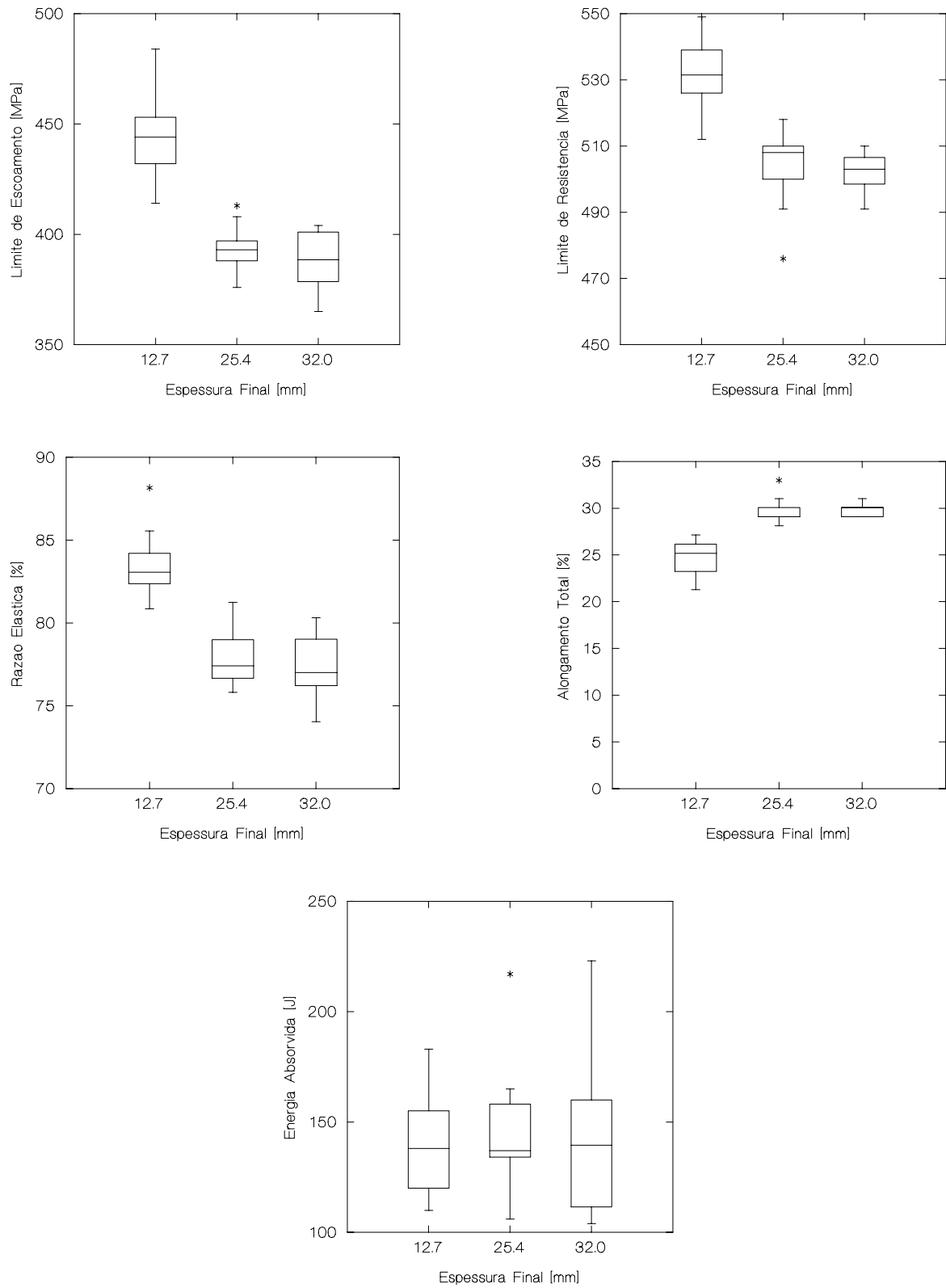


Figura 1: Efeito do grau de deformação total (placa → esboço) sobre as propriedades mecânicas dos esboços estudados neste trabalho.

As figuras 2, 3 e 4 ilustram visualmente as alterações observadas, para esboços com espessura final de 12,7, 25,4 e 32,0 mm, respectivamente. No caso do esboço mais fino, as mudanças observadas nas propriedades mecânicas foram ambíguas, de pequena magnitude e apresentaram significativo nível de dispersão. Para as outras duas classes de espessura, mais elevadas, houve um consistente aumento de resistência mecânica, ainda que não muito elevado. No caso específico do esboço com $h_f = 25,4$ mm, pode-se observar que não ocorreram diferenças significativas nas propriedades mecânicas ao se elevar a espessura de espera de 76 para 102 mm (3 para 4 h_f).

Quanto ao alongamento total, o significativo grau de dispersão observado e a pequena magnitude das alterações ocorridas não permitiram que se determinasse alguma tendência, qualquer que fosse a espessura final considerada. O mesmo ocorreu para a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy, exceto no caso do esboço mais pesado ($h_f = 32,0$ mm), onde ocorreu nítida elevação desse parâmetro, associada com o aumento da espessura de espera.

Uma vez que a representação gráfica levou a alguma controvérsia sobre os efeitos da espessura de espera, decidiu-se examiná-los através da análise de variância e do teste (t de Student) para médias, para se verificar quantitativamente a influência da espessura de espera sobre as propriedades mecânicas, considerando-se cada classe de espessura final. Os resultados desses procedimentos estão mostrados na tabela III.

	LE	LR	RE	Al _t	RI
ANOVA $h_f = 12,7$ mm	IGUAIS 58,7%	IGUAIS 47,5%	IGUAIS 60,1%	IGUAIS 38,8%	IGUAIS 12,4%
ANOVA $h_f = 25,4$ mm	DIFERENTES 98,3%	IGUAIS 92,4%	IGUAIS 50,2%	IGUAIS 71,2%	IGUAIS 22,2%
t de Student $h_f = 32,0$ mm	DIFERENTES 99,4%	DIFERENTES 99,9%	DIFERENTES 98,9%	IGUAIS 83,6%	DIFERENTES 98,9%

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%.

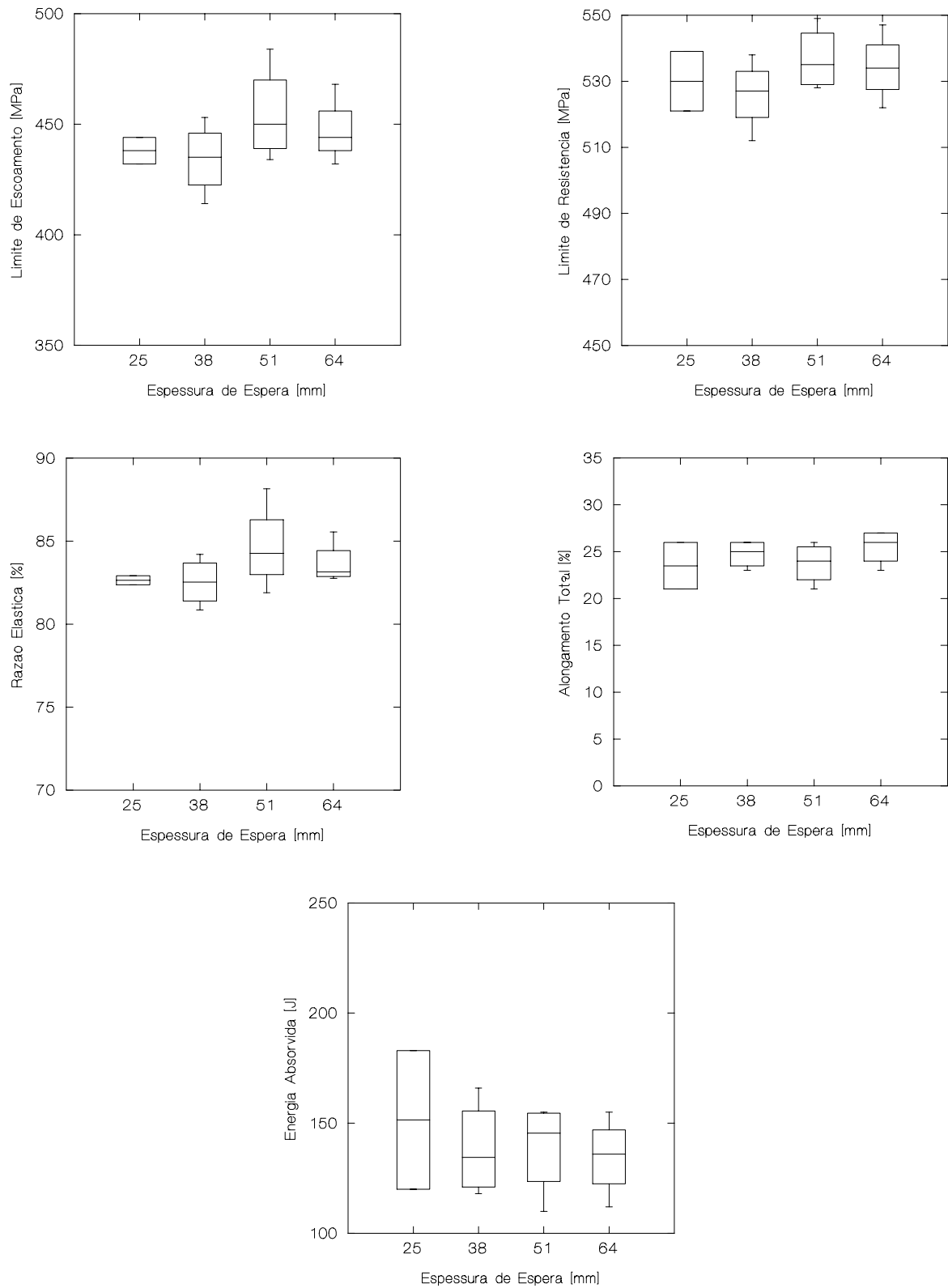


Figura 2: Efeito da alteração da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera na laminação controlada sobre as propriedades mecânicas, para chapas grossas com espessura final de 12,7 mm.

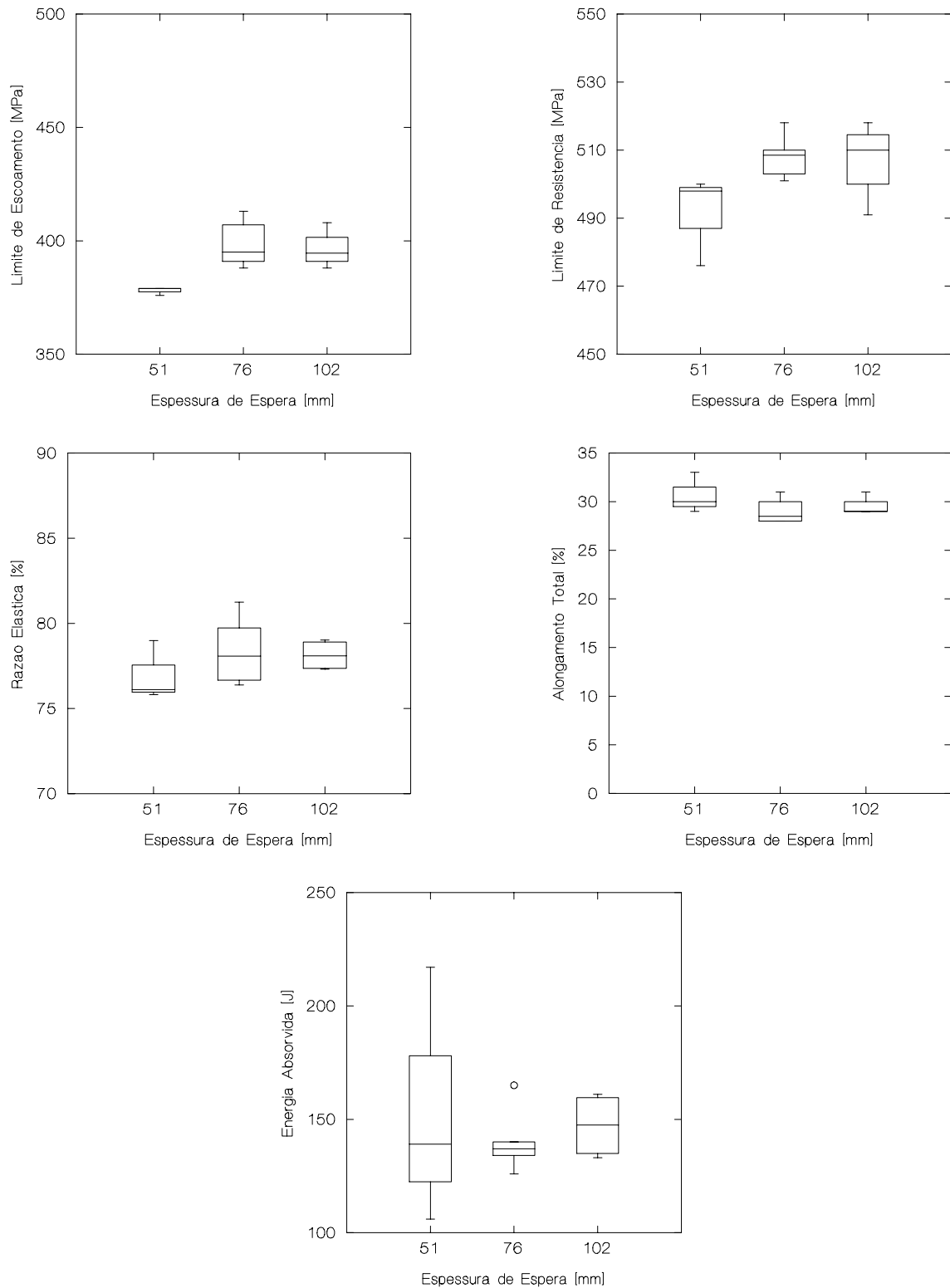


Figura 3: Efeito da alteração da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera na laminação controlada sobre as propriedades mecânicas, para chapas grossas com espessura final de 25,4 mm.

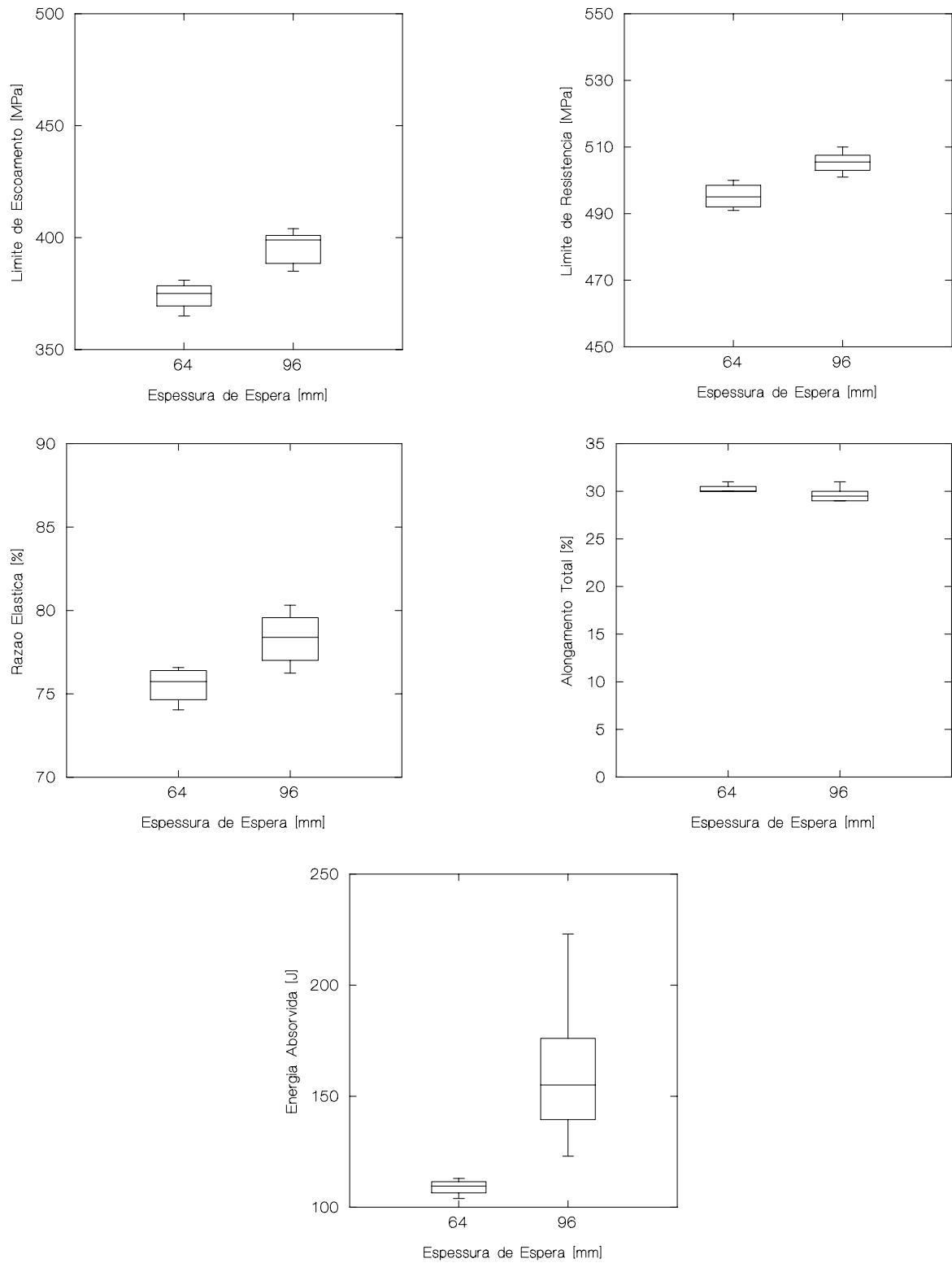


Figura 4: Efeito da alteração da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera na laminação controlada sobre as propriedades mecânicas, para chapas grossas com espessura final de 32,0 mm.

Os resultados desses procedimentos estatísticos corroboraram as tendências inferidas visualmente. A utilização de maior espessura de espera somente exerceu efeito na resistência mecânica dos esboços mais pesados. Note-se, entretanto, que, nos esboços com espessura final de 25,4 mm, a passagem da espessura de espera de 51,0 mm para 76,0 mm realmente não implicou em alterações significativas nas propriedades mecânicas, conforme mostra o teste de médias da tabela IV. Ou seja, o efeito do grau de redução na fase de acabamento durante a laminação controlada sobre as propriedades mecânicas passa a ser constante após atingir um certo valor limite.

LE	LR	RE	Al _t	RI
IGUAIS 24,2%	IGUAIS 12,9%	IGUAIS 17,2%	IGUAIS 47,3%	IGUAIS 57,6%

Tabela IV: Resultados do teste de médias feito para os esboços com espessura final de 25,4 mm e espessura de espera igual a 51 e 76 mm, em relação às suas propriedades mecânicas. Também foi incluído o valor dos respectivos graus de confiança. Grau de confiança mínimo adotado: 95%.

O efeito do aumento da espessura de espera parece ter sido maior sobre o limite de escoamento do que sobre o de resistência. Essa constatação advém do fato de a espessura de espera não ter afetado o limite de resistência do esboço com espessura final de 25,4 mm, e também pelos maiores valores dos graus de confiança associados ao limite de escoamento, listados na tabela III. Foi confirmada a ausência de alterações significativas nos valores de alongamento total advindas do aumento da espessura de espera, para todas as classes de espessura final. Fato similar ocorreu para a energia absorvida durante o ensaio de impacto Charpy, embora no caso do esboço mais pesado ($h_f = 32,0$ mm) há evidências de um efeito mais intenso da espessura de espera sobre esse parâmetro.

A partir desses resultados pode-se chegar à conclusão de que, a medida que o grau de deformação total (placa → esboço) cresce, diminui a influência da espessura de espera utilizada. Ou seja, a distribuição de deformação entre as etapas de esboçamento e acabamento não influi nas propriedades do produto acima de um certo grau de

deformação total. Esta conclusão é justificada pela evolução decrescente dos graus de confiança da tabela III a medida que se reduziu a espessura final do produto.

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 as propriedades mecânicas do produto final. A partir dessa análise, pode-se verificar que os limites de escoamento e de resistência, bem como a razão e-lástica, apresentaram:

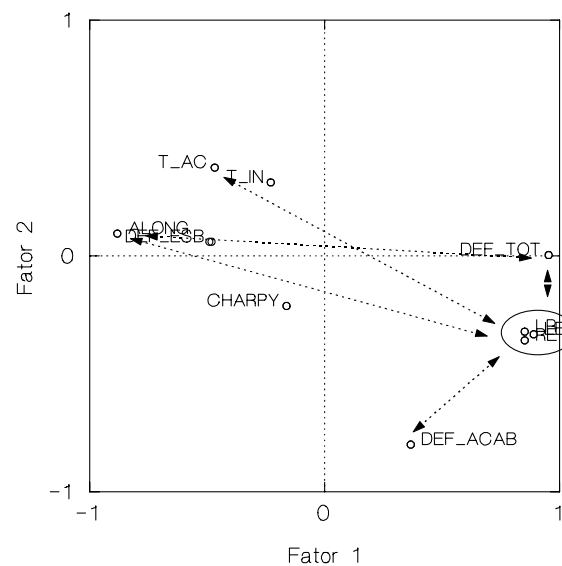


Figura 5: Gráfico gerado pela Análise dos Componentes Principais, considerando-se as variáveis ligadas ao processo de laminação controlada e às propriedades mecânicas. O significado das siglas utilizadas nesta figura pode ser visto na tabela V.

- correlação positiva relativamente forte com o grau de deformação total;
- correlação positiva, mais fraca, com o grau de deformação na fase de acabamento;
- correlação negativa, relativamente forte, com o alongamento total do material;

- correlação negativa, mais fraca, com a temperatura de acabamento.

SIGLA	SIGNIFICADO
ALONG	Alongamento Total
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)
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Ruptura
RE	Razão Elástica
T_AC	Temperatura de Acabamento
T_IN	Temperatura de Início de Laminação

Tabela V: Significado das siglas utilizadas na figura 5.

Tais correlações foram deduzidas a partir das posições relativas dessas variáveis ao longo do diagrama. Variáveis próximas entre si apresentam alto índice de correlação positiva, enquanto que as que se encontram diametralmente opostas no gráfico tem alto índice de correlação negativa.

Os resultados desse diagrama ainda indicam que o alongamento total apresenta correlação com o grau de deformação total, ainda que esta não seja tão forte. Por sua vez, a energia absorvida durante o ensaio Charpy não apresentou correlação com nenhum parâmetro de processo. Tal fato parece ter ocorrido em função do excessivo grau de dispersão experimental associado a essa energia, o que deve ter mascarado a eventual influência de alguma variável operacional sobre essa propriedade.

Outras variáveis de processo, como a temperatura de início de laminação e o grau de deformação aplicado durante a fase de esboçamento, não influenciaram as características mecânicas do material.

O efeito do grau de deformação total e da alteração da espessura do esboço intermediário sobre a microestrutura já foi discutido em trabalho anterior [8]. Foi verificado naquela oportunidade que o aumento da espessura de espera levou ao refino do tamanho de grão global do esboço. Contudo, a partir dos efeitos aqui levantados sobre as

propriedades mecânicas, pode-se concluir que a redução obtida no tamanho de grão não foi suficiente para alterar de modo significativo as propriedades mecânicas do esboço mais fino ($h_f = 12,7$ mm). Já para esboços com espessura final mais elevada parece ocorrer maior efeito do tamanho de grão. É intrigante notar que, apesar do grau percentual de refino ter sido menor para esboços mais pesados, o efeito sobre as propriedades mecânicas foi bem maior, conforme mostra a tabela VI.

h_f [mm]	ΔTG [μm]	ΔLE [MPa]	ΔLR [MPa]	ΔRE [%]	ΔAlt [%]	ΔRI [J]
12,7	-1,4	+9	+4	+1	+2,0	-17
	21%	2,1%	0,8%	1,2%	8,5%	11,2%
25,4	-1,2	+18	+16	+2	-1,2	+7
	16%	4,8%	3,3%	2,6%	3,9%	4,5%
32,0	-0,9	+22	+10	+2	-0,6	+52
	12%	5,9%	2,0%	2,6%	2,0%	47,7%

Tabela VI: Amplitude absoluta e percentual dos valores médios de tamanho de grão global [8] e propriedades mecânicas dos esboços estudados, decorrentes do aumento da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera na laminação controlada. Os dados em itálico correspondem a diferenças estatisticamente não significativas, de acordo com as análises de variância e testes de média mostrados na tabela III.

A norma DH-36 estabelece os seguintes requisitos de propriedades mecânicas:

- . LE: ≥ 355 MPa
- . LR: 495 ~ 620 MPa
- . Al_t : $\geq 19\%$
- . RI: ≥ 34 J a -20°C (cp longitudinal).

Portanto, ao se observar os resultados obtidos nas figuras 1 a 4, nota-se que o aumento da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera da laminação controlada não foi suficiente para compensar a redução no teor de manganês da liga,

no caso dos esboços mais pesados ($h_f = 25,4$ e $32,0$ mm). Nestas classes de produto, os valores médios do limite de resistência atenderam à norma, mas apresentaram dispersão excessiva. Isto permite prever que, em produção sob escala industrial, uma fração excessiva das chapas produzidas com essa liga seria desviada caso se objetivasse atender à norma DH-36 para espessuras iguais ou superiores a $25,4$ mm.

Por outro lado, essa nova liga com menor teor de manganês foi aprovada para a produção de chapas grossas com espessura final de $12,7$ mm, independentemente da espessura de espera utilizada.

A partir dos resultados aqui obtidos, são necessários agora desenvolver-se trabalhos complementares, para se atender a dois objetivos básicos:

- Determinação da espessura máxima de produto que pode ser feito com essa nova liga, atendendo consistentemente à norma DH-36;
- Verificar se uma redução nas atuais temperaturas de acabamento poderia fazer com que esboços mais pesados dessa nova liga pudessem atender à essa norma.

- CONCLUSÕES

- O aumento do grau de deformação total (placa → esboço) levou a um aumento da resistência mecânica do esboço. Não houve alteração nos valores de alongamento total e energia absorvida no ensaio de impacto Charpy;
- O aumento da espessura de espera levou a um nítido acréscimo na resistência mecânica e da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para o esboço mais pesado ($h_f = 32,0$ mm);
- A medida que se reduziu a espessura final do esboço (ou seja, para graus de deformação total crescentes), a influência da espessura de espera foi reduzida no

caso da resistência mecânica e praticamente desapareceu quanto à energia no ensaio Charpy. No caso do esboço mais fino ($h_f = 12,7$ mm), a alteração na espessura de espera não exerceu efeito significativo nas propriedades mecânicas em geral;

- Os valores de alongamento total não se alteraram em função da variação na espessura de espera, qualquer que fosse a espessura final do esboço;
- As propriedades mecânicas tenderam a se manter estáveis acima de um certo valor de espessura de espera (h_{esp} maior que 76 mm para $h_f = 25,4$ mm);
- A Análise de Componentes Principais revelou que o grau de deformação total, o grau de deformação aplicado na fase de acabamento e a temperatura de acabamento - em ordem decrescente de influência - são os principais parâmetros de processo que afetam as propriedades mecânicas;
- O refino de grão proporcionado pelos maiores graus de deformação total e espessuras de espera nem sempre se refletiu nas propriedades mecânicas do material, devido à interferência de outros fatores;
- O aumento da espessura de espera não foi suficiente para contrabalançar a diminuição do limite de resistência decorrente da redução de 20 a 40% do teor de manganês da liga. A única exceção ocorreu para o material mais fino ($h_f = 12,7$ mm), onde o valor da espessura de espera não exerceu efeito significativo sobre as propriedades mecânicas.

- BIBLIOGRAFIA

1. DESFORGES, C.D. Manganese in Ferrous Metallurgy. Institute International du Manganèse, Paris, Mai 1976. 87 p.
2. DUMORTIER, C. et al. La Revue de Metallurgie - CIT, Nov. 1992, 1015-1023.
3. MCGANNON, H.E. (editor). The Making, Shaping and Treating of Steel. U.S. Steel, Pittsburgh, 1970. 1420 p.
4. GORNI, A.A. Fundição e Serviços, Fev/Mar 1992, 24-31.
5. PICKERING, F.B. In: TOWARDS IMPROVED DUCTILITY AND TOUGHNESS. Proceedings. The Iron and Steel Institute of Japan - Climax Molybdenum Corp., Tokyo, 1971, 9-31.
6. HAUMANN, W. e outros. Verringerung der Streubreite der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Warmgewalzten Baustählen. Bundersministers für Forschung und Technologie, Bonn, April 1983. 139 p.
7. 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.
8. GORNI, A.A. et al. A ser apresentado no 50º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Pedro SP, Agosto de 1995.

- ABSTRACT

OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION AND CONTROLLED ROLLING PROCESS OF SHIPBUILDING PLATE STEELS

DH-36 grade shipbuilding steel plates require a relatively high manganese content, which leads to some problems during the steelmaking process. This work describes the development of a new alloy with a slight reduced manganese level, in order to facilitate the processing of this kind of steel. The decrease in manganese content results in lower plate strength; so it was decided to compensate this decrease with an increase in the strain degree applied during the finishing stage of controlled rolling. This increase in the finishing strain degree led to an increase in plate strength, but the total elongation and toughness showed no significant changes. The effect of total strain degree (slab → plate) was similar. However, the changes derived from the alteration of the finishing strain degree decreased as product thickness lowered and, in fact, it is negligible for thin plates. This effect also tended to stabilize above a limit value of finishing strain degree. Finally, it was verified that the strength increase promoted by the elevation of the finishing strain degree did not fully compensate the effect of a 20 to 40% decrease in the manganese content.

Keywords: Shipbuilding Plate Steels; Controlled Rolling; Mechanical Properties