

ESTUDO SOBRE AS CAUSAS DA OCORRÊNCIA DE
PONTA ALTA NUM LAMINADOR DE CHAPAS GROSSAS⁽¹⁾

Antonio Augusto Gorni⁽²⁾

Celso Gomes Cavalcanti⁽³⁾

José Herbert Dolabela da Silveira⁽⁴⁾

Marcos Antonio Stuart⁽⁵⁾

Jackson Soares de Souza Reis⁽⁵⁾

RESUMO

Um problema potencialmente sério na Laminação de Chapas Grossas é o encurvamento da ponta do esboço para cima ou para baixo, o qual pode eventualmente acarretar grandes prejuízos por danos ao equipamento ou paralisação do processo. O objetivo deste trabalho foi identificar as causas deste problema e, a partir destas informações, sugerir contra-medidas para saná-lo. Concluiu-se, a partir das experiências efetuadas, que há faixas de deformação críticas, onde a ocorrência do defeito é mais provável. Logo, uma das soluções propostas para minimizar esse defeito é evitar essas faixas críticas ao se conceber ou aplicar o esquema de passes no laminador.

(1) Trabalho a ser apresentado no Seminário de Laminação da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, Novembro de 1992.

(2) Membro da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M.Sc., Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(3) Membro da A.B.M. Técnico de Siderurgia, Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(4) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Divisão de Metalurgia e Qualidade da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(5) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, Divisão de Metalurgia e Qualidade da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

- INTRODUÇÃO

A ocorrência de curvamento para cima ou para baixo das pontas do esboço na saída do Laminador de Chapas Grossas - respectivamente, defeito ponta alta ou ponta baixa - deve ser minimizada, uma vez que, se o grau de encurvamento for acentuado, ele pode causar danos consideráveis ao equipamento e, conseqüentemente, paralisação na operação ou comprometimento da qualidade do produto. A figura 1 mostra, de forma esquemática, o que é o defeito ponta alta.

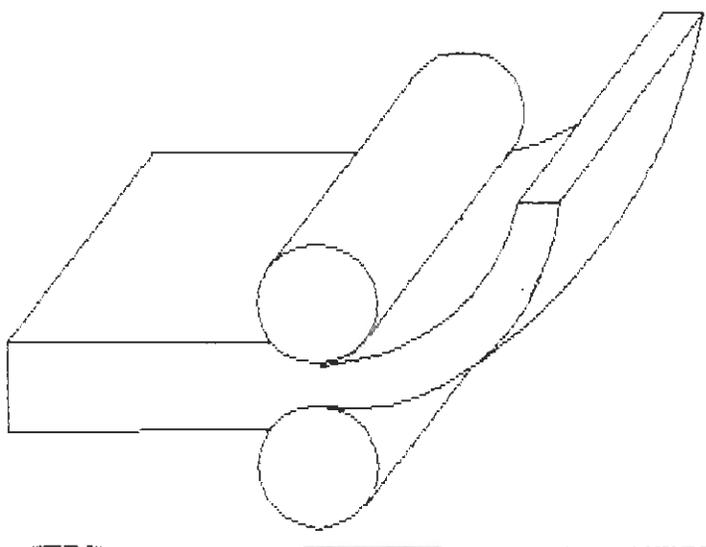


Figura 1: Esquema do defeito ponta alta.

A ponta baixa, sem dúvida, pode levar a problemas mais sérios que a ponta alta. Mesmo quando ocorre com baixa intensidade, pode ocorrer colisão do esboço com a mesa de rolos, danificando-a ou reduzindo sua vida útil. Em casos extremos, pode levar à entrada do esboço por baixo dela, impondo uma parada na linha para a retirada do laminado, o qual geralmente é sucitado.

Logo, a ocorrência de ponta alta com pequena intensidade é até desejável em laminadores reversíveis, uma vez que não afetará as condições de mordida do passe seguinte e não chegará a colidir com o equipamento. Contudo, quando ela atinge grande intensidade, pode ocorrer choque do esboço com o coletor do sistema de descamação ("header"), ou, o que é mais grave, com o equipamento de medição da espessura do esboço por raio gama. Em ambos os casos os danos causados poderão ser de grande monta.

O defeito ponta alta é mais acentuado neste caso específico do que a ponta baixa. Logo, o objetivo primordial deste trabalho foi identificar suas causas, para embasar o processo de seleção de contra-medidas a serem adotadas para suprimir ou minimizar a ocorrência de ponta alta com intensidade crítica.

Tanto a prática industrial como os modelos físicos ou matemáticos identificaram uma série de causas para a ocorrência de ponta alta. Praticamente todo fator que possa comprometer a simetria geométrica e mecânica do processo de laminação é uma causa potencial deste defeito. Sua análise é muito complexa e os resultados obtidos muitas vezes são surpreendentemente diferentes do que se poderia esperar intuitivamente.

De maneira geral, podem ser apontadas as seguintes causas de ocorrência de ponta alta ou baixa:

- Diferença entre as velocidades periféricas dos cilindros de trabalho superior e inferior [1-10];
- Diferença entre os coeficientes de atrito do esboço com os cilindros de trabalho superior e inferior [2-4,6,7,10];
- Distribuição heterogênea de resistência à deformação a quente ao longo da espessura do esboço, devido a aquecimento irregular ou segregação direcionada na placa [2,4,7,10];

- Ângulo de entrada do esboço desfavorável, o qual é função do degrau de laminação ("pass-line") da cadeira [2,5-7,10].

Do ponto de vista industrial, a equalização de velocidades entre os cilindros superior e inferior tem sido a contramedida mais adotada para eliminar os defeitos ponta alta ou baixa. Como se sabe, os motores elétricos do tipo "twin-drive", presentes nos modernos laminadores reversíveis industriais, podem ser controlados de acordo com duas abordagens: equalização de velocidades ou de torques entre os motores. A primeira estratégia de controle é mais favorável no sentido de minimizar o aparecimento de ponta alta ou baixa, mas leva a uma distribuição irregular de torque entre os motores, não permitindo o aproveitamento pleno da potência do conjunto. Isto só é conseguido através do controle dos motores por equalização de torque, o qual gera velocidades diferentes entre os cilindros superior e inferior, podendo levar à ocorrência desses defeitos [1].

Uma solução de compromisso pode estar num esquema de controle híbrido: controle por velocidade no início e fim do passe, onde o encurvamento da ponta é mais provável e o controle por carga não é possível, e adoção automática, pelo laminador, do controle por carga acima de um determinado valor de corrente que sinaliza a região plena do passe. Diferenças nos diâmetros dos cilindros ou heterogeneidades térmicas dos esboço podem ser corrigidas impondo-se um diferencial de velocidade entre os dois cilindros [1].

A ocorrência de carepa incrustada no laminado pode efetivamente levar a sérios problemas de distorção no laminado. Se ela estiver presente ao longo de todo seu comprimento, o encurvamento poderá ocorrer em todo o esboço e não apenas em sua ponta, conforme verificado experimentalmente [2]. Por outro lado, a prática incorreta de descamação também pode induzir ao encurvamento do esboço. É importante dominar efetivamente o processo e as características do laminador, de modo a se evitar que a descamação seja efetuada em passes críticos, onde a ocorrência de en-

curvamento é mais fácil [10].

Foi verificado em laminadores desbastadores e esboçadores que um ângulo muito acentuado de entrada do laminado - ou seja, um degrau de laminação ("pass-line") excessivo - pode levar à formação de ponta baixa. A razão para este fenômeno estaria no maior comprimento do arco de contato superior em relação ao inferior, provocado pelo ângulo excessivo de entrada do laminado [2]. Em Laminadores de Chapas Grossas modernos, o degrau de laminação é alterado automaticamente passe a passe, garantindo sempre que o laminado entre na cadeira paralelamente à mesa de rolos, ou seja, sob ângulo zero. Dessa forma, um fator de assimetria geométrica da laminação é eliminado, reduzindo a possibilidade de ocorrência de encurvamento da ponta do laminado [10]. Contudo, a influência do ângulo de laminação em escala industrial ainda não está clara. Aparentemente, o dimensionamento correto do degrau de laminação deve depender das condições específicas de cada equipamento e seu modo de operação, incluindo as demais causas que possam provocar o defeito.

O grau de penetração da deformação m também afeta o grau e direção da curvatura provocada por diferenças de velocidade entre os cilindros de trabalho inferior e superior, conforme mostra a figura 2 [10]. Logo, esse parâmetro deve ser considerado ao se determinar o esquema de passes a ser aplicado num Laminador de Chapas Grossas. Este fator m é uma medida da heterogeneidade da deformação nas camadas centrais do laminado [11], e é definido como

$$m = \frac{l_d}{h_m} = \frac{3\sqrt{R \Delta h}}{h_1 + 2h_0} \quad (1)$$

onde: l_d = comprimento do arco de contato [mm];

h_m = espessura média ponderada [mm];

$$h_m = \frac{h_1 + 2h_0}{3} \quad (2)$$

- h_0 = espessura do laminado na entrada [mm];
- h_1 = espessura do laminado na saída [mm];
- R = raio do cilindro de trabalho [mm];
- $\Delta h = h_0 - h_1$ [mm].

Pode-se observar na figura 2 que a direção e grau de encurvamento das pontas do laminado apresentam caráter periódico em função do grau de penetração de deformação \underline{m} , como já havia sido previsto teoricamente por outros autores [9]. Note-se que os máximos de curvatura do laminado ocorrem para $\underline{m} = 0,9$ e $\underline{m} = 2,6 - 3,0$, com inversão na direção de curvatura para $\underline{m} = 1,4-1,7$ [10]. Verifica-se desse modo que, sob condições industriais, realmente pode ser interessante conceber esquemas de passe que evitem valores de \underline{m} críticos para o aparecimento de ponta alta ou baixa.

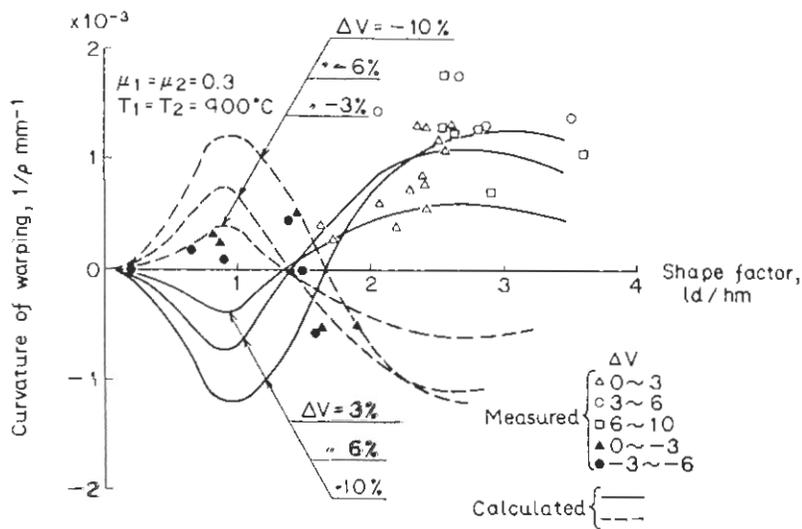


Figura 2: Comparação entre os valores de raio de curvatura da ponta do laminado obtidos num Laminador de Chapas Grossas e os previstos por um modelo matemático [10].

Finalmente, deve-se admitir também que hajam causas mecânicas para a ocorrência de encurvamento das pontas dos laminados. Por exemplo, desalinhamentos entre os mancais dos cilindros de trabalho poderão levar à alterações no formato e perímetro dos arcos de contato durante a laminação, que eventualmente poderão causar o defeito [12].

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A partir dos subsídios obtidos através da revisão da literatura, foram planejadas e desenvolvidas diversas atividades experimentais no Laminador de Chapas Grossas da COSIPA com o objetivo de se confirmar o efeito de várias delas no surgimento do defeito, e de forma quantitativa, quando possível.

A monitoração da velocidade, corrente elétrica e voltagem dos motores superior e inferior do Laminador de Chapas Grossas foi efetuada com auxílio de um registrador gráfico de seis canais. Foi caracterizado o comportamento dos motores sob as seguintes condições:

- a) Alterando-se a distribuição de torques entre eles, desde 1,15:0,85 em favor do motor superior, até 1,30:0,70, em favor do motor inferior;
- b) Impondo-se uma diferença de velocidade angular entre os cilindros superior e inferior, através do uso do compensador da diferença de diâmetro entre os cilindros. Conseguiu-se assim uma redução máxima de 10% na velocidade angular do cilindro inferior.

O fato da ocorrência de ponta alta ser mais frequente em aços de alta resistência levantou a suspeita de que as placas desse material apresentassem padrão de segregação assimétrico em

relação ao eixo transversal, o que poderia gerar heterogeneidades locais na resistência a deformação a quente. Para se confirmar essa hipótese, foram coletadas amostras de placas de aços de baixa liga e alta resistência, ao Ni-Nb e ao Ti, cujas composições químicas podem ser vistas na tabela I. As amostras foram coletadas ao longo da espessura: três na metade da largura e três em cada extremidade da placa, conforme mostra a figura 3. Todas as amostras foram submetidas à análise macrográfica, utilizando-se ataque com Nital 15% ou reativo de iodo. Também foi realizado exame microestrutural, utilizando-se ataque de Nital 5%. Mediu-se ainda sua dureza, utilizando-se a escala Rockwell B, com carga de 100 kg.

AÇO	C	Mn	Si	Cu	Ni	Nb	Ti	Al
Ni-Nb	0,12	1,45	0,30	0,25	0,35	0,03	----	0,04
Ti	0,16	1,45	0,40	----	----	----	0,01	0,04

Tabela I: Composição química nominal dos aços estudados [porcentagem em peso].

As temperaturas nas faces superior e inferior dos esboços foram medidas em alguns casos selecionados, com o objetivo de se verificar a influência da diferença de temperatura entre elas sobre o aparecimento do defeito ponta alta. Tais medições foram efetuadas simultaneamente com dois pirômetros de contato "Land", operados manualmente, quando os esboços se encontravam na mesa de entrada do Laminador de Chapas Grossas. As temperaturas

foram tomadas por ocasião dos passes onde o defeito se apresentou com maior grau de intensidade.

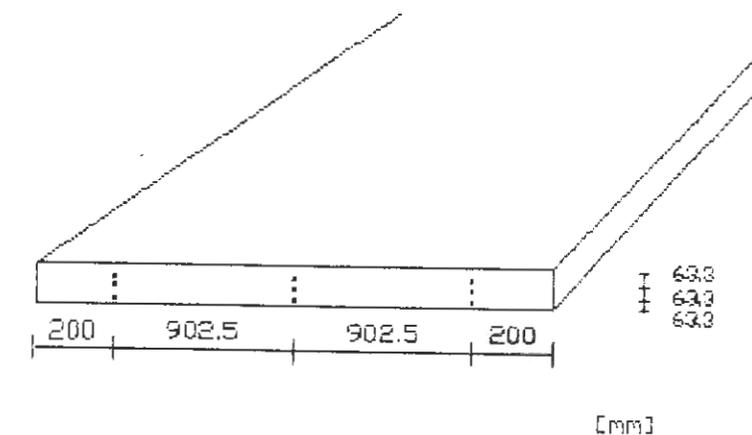


Figura 3: Esquema da amostragem utilizado nas placas.

Durante os diversos levantamentos experimentais efetuados no Laminador de Chapas Grossas, observou-se casualmente que a ocorrência da ponta alta era mais frequente em alguns passes, qualquer que fosse o aço laminado. A partir desta constatação, decidiu-se efetuar um levantamento extensivo de parâmetros significativos de laminação e correlacioná-los com o grau de ponta alta observado. Foram coletados os seguintes dados: grau de ponta alta; abertura objetivada entre os cilindros de trabalho; carga de laminação; velocidade angular dos cilindros; carbono equivalente do aço; temperatura do passe; espessura de entrada, e largura final do esboço. O defeito ponta alta foi quantificado através da definição de uma escala arbitrária, que variava desde 0 (esboço totalmente plano) até 5 (curvatura extremamente acentuada).

A partir destes dados foram calculados os seguintes parâmetros: grau de deformação verdadeira; grau de penetração da deformação, \underline{m} , definido pela fórmula (1); grau de heterogeneidade

da deformação ao longo de toda a espessura [11], n :

$$n = \frac{L}{h_1} \quad (3),$$

onde L é a largura e h_1 é a espessura inicial do laminado; termo adimensional que caracteriza as configurações geométricas de laminação onde ocorre grau máximo de ponta alta ou baixa [8], o :

$$o = \frac{R}{h_1} \quad (4),$$

e rigidez do laminado S [5]:

$$S = L h_f^2 \quad (5),$$

onde h_f é a espessura final do laminado, [mm].

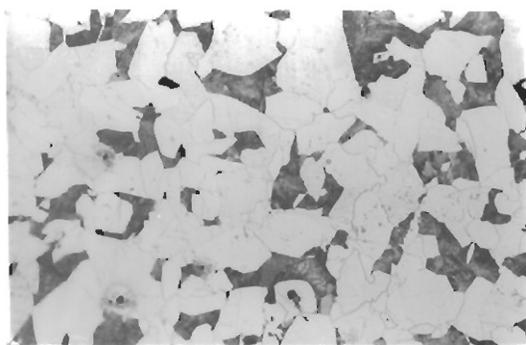
A deformação logarítmica e os adimensionais m , n e o , que basicamente definem o grau de penetração e homogeneidade da deformação ao longo da espessura, foram incluídos nesta análise a partir da constatação de que o aumento do grau de redução nos passes críticos levava à redução ou mesmo supressão do defeito. A rigidez do laminado também foi considerada, uma vez que foi verificado que a ocorrência de ponta alta é inversamente proporcional a ela [5].

Todos os dados obtidos e parâmetros calculados foram analisados estatisticamente com o objetivo de se determinar correlações entre eles e o defeito ponta alta. Com este objetivo, foram empregadas várias técnicas, como regressão linear múltipla comum e "stepwise", determinação da matriz de Pearson e regressão polinomial.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Tanto a alteração na distribuição de torques entre os motores, como a imposição de diferença entre as velocidades angulares dos cilindros, dentro das faixas permissíveis pelo púlpito de controle, não provocaram qualquer efeito sobre a ocorrência de ponta alta ou baixa, ao contrário do que se esperava [1-10]. Provavelmente a magnitude dessas alterações não foi suficiente para provocar o defeito. Por outro lado, não foi possível detectar nenhuma anormalidade nos valores de voltagem, corrente elétrica e velocidade dos cilindros por ocasião do aparecimento da ponta alta, dentro dos limites de precisão do registrador utilizado.

As macroestruturas das placas dos dois tipos de aço, reveladas a partir de ataque com Nital 15% ou reativo de todo, não apresentaram qualquer sinal de segregação diferenciada relevante. O aspecto das superfícies após o ataque foi muito uniforme e homogênea. Já as microestruturas das placas foram extremamente semelhantes entre si, sem qualquer diferença em termos qualitativos, qualquer que fosse o tipo de aço e posição das amostras das placas. Em todos os casos analisados a microestrutura era composta de ferrita com pequena fração de perlita, conforme mostra a figura 4.



a) Aço Ni-Nb



b) Aço Ti

Figura 4: Microestrutura típica das placas estudadas. Ataque: Nital 5%. Aumento: 200 vezes.

Os resultados dos ensaios de dureza nas amostras extraídas de diversas posições da placa também apresentaram valores muito uniformes, conforme mostra a figura 5. A diferença máxima verificada foi de apenas 2,5% no pior caso. Além disso, as variações nos valores de dureza ao longo da espessura ou largura foram aleatórias, sem que qualquer tendência se mostrasse evidente.

<i>78</i>	77	77	79
<i>77</i>	76	75	79
<i>78</i>	78	78	79
	<i>77</i>	<i>77</i>	<i>79</i>

a) Aço Ni-Nb

<i>79</i>	78	80	80
<i>81</i>	81	80	81
<i>80</i>	80	80	81
	<i>80</i>	<i>80</i>	<i>81</i>

b) Aço Ti

Figura 5: Valores de dureza Rockwell B ao longo da espessura e largura das placas estudadas. Os valores em itálico são médias ao longo da largura ou espessura.

Os resultados das análises macro e microestrutural e dos ensaios de dureza permitem concluir que as placas de aço de alta resistência e baixa liga não apresentam qualquer segregação localizada que poderia alterar, de forma heterogênea, a resistência à deformação a quente a ponto de provocar o aparecimento do defeito ponta alta.

A figura 6 mostra a relação entre a diferença das temperaturas superior e inferior do esboço e a ocorrência de ponta alta, no caso de passes que se revelaram críticos para a ocorrência do defeito. Foram efetuadas dezessete medidas. Em nove delas ocorreu a formação de ponta plana; neste caso, a diferença de temperatura variou de 0 a 30°C, em favor da superfície superior do esboço. Por outro lado, em oito medidas ocorreu o aparecimento de ponta alta, com a diferença de temperatura em favor da superfície superior oscilando entre -20 e +20°C, incluindo três casos onde a diferença foi nula.

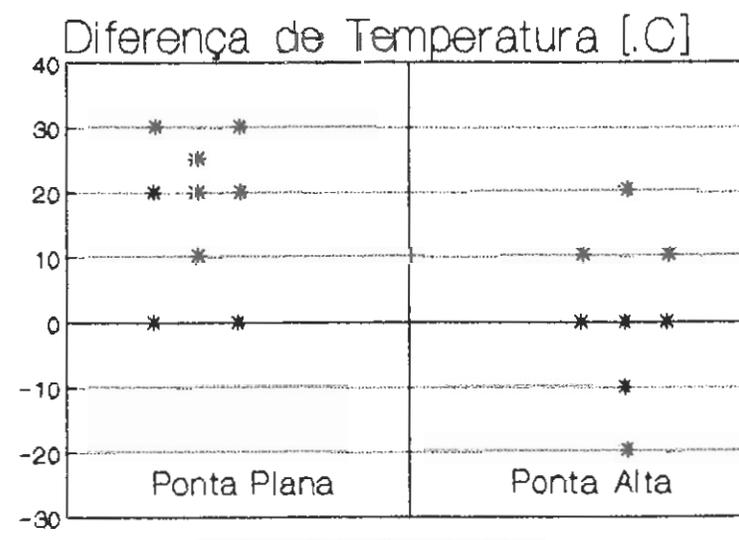


Figura 6: Relação entre a diferença de temperatura entre a face superior e inferior do esboço e a ocorrência de ponta alta. Os valores positivos neste gráfico indicam face superior com maior temperatura.

A partir destes resultados pode-se observar que houve ligeira tendência ao aparecimento de ponta alta quando a temperatura da face inferior foi maior, o que é intuitivamente correto. Contudo, a separação das faixas de temperatura que determinam o surgimento da ponta alta é muito difusa, não havendo um valor limite nítido. É possível que as diferenças de temperatura observadas tenham sido muito pequenas para a ocorrência efetiva de ponta alta. Isto parece ser confirmado pelos resultados de YOSHII e outros [10], os quais mostram que o grau de curvatura do esboço obtido por diferenças de temperatura da ordem de 20°C é relativamente pequeno.

Os resultados da análise estatística de regressão linear múltipla "stepwise" apontou como variáveis significativas em relação à ponta alta a abertura objetivada entre os cilindros, teor de carbono equivalente, grau de penetração da deformação \underline{m} , temperatura de laminação e rigidez do laminado \underline{S} , obtendo-se coeficiente de correlação $r^2 = 0,86$. Já as cinco variáveis mais significativas, de acordo com a análise por matriz de Pearson, foram: abertura objetivada entre os cilindros (44,0%), espessura inicial do laminado (43,9%), grau de heterogeneidade da distribuição de deformação \underline{n} (43,0%), grau de penetração da deformação \underline{m} (39,5%) e velocidade angular dos cilindros (37,5%).

Os gráficos dos adimensionais \underline{m} , \underline{n} e \underline{q} versus o grau de ponta alta observado demonstram claramente que há uma faixa de valores desses parâmetros onde a ocorrência do defeito é mais crítica. Estes gráficos estão mostrados nas figuras 7, 8 e 9. A partir deles é possível observar que o grau de defeito é mais intenso nos seguintes intervalos: $1,25 < \underline{m} < 2,00$; $40 < \underline{n} < 150$; e $5 < \underline{q} < 18$.

Além disso, equações de regressão polinomiais, em função dos adimensionais e da abertura objetivada dos cilindros, apresentaram bom nível de ajuste estatístico, com coeficiente de correlação r^2 superior a 0,86.

É interessante notar que YOSHII e outros [10] também verificaram a influência do adimensional \underline{m} sobre o grau de ponta alta. Eles verificaram que o defeito ocorre com maior intensidade

quando m assume valores próximos de 2,0. A partir desses fatos, e da constatação de que este parâmetro leva em conta maior número de variáveis de laminação, pode-se propor o uso da equação polinomial em função de m para estabelecer condições de laminação que minimizem o defeito ponta alta. Isto pode ser feito modificando-se tal equação de modo a isolar a abertura objetivada dos cilindros em função do grau de defeito admissível, da espessura inicial do laminado e do raio dos cilindros.

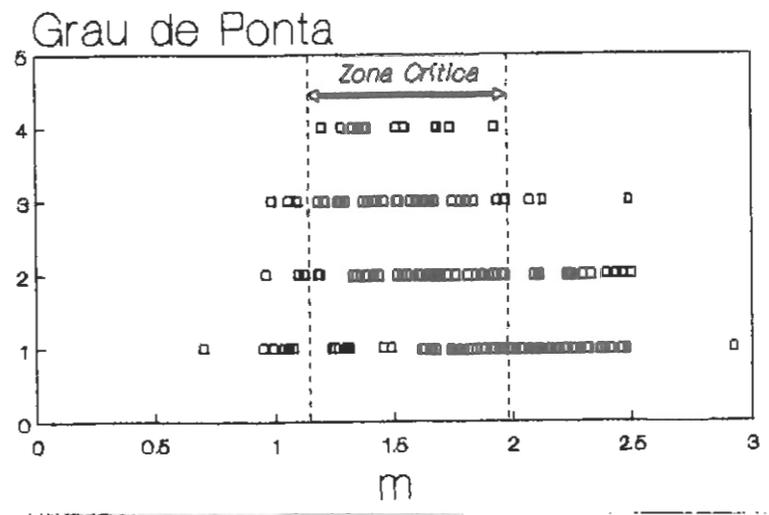


Figura 7: Influência do adimensional m sobre o grau de ponta alta.

A figura 10 mostra como essa equação pode ser utilizada para prever o grau de ponta alta para um dado passe, onde a é a espessura inicial do esboço. Podemos observar que o grau de defeito será zero se a abertura entre os cilindros for igual a a ou c , e atingirá valor máximo quando ela for igual a b . O primeiro caso implica em redução nula, o que é absurdo. Obviamente não se deve adotar abertura entre os cilindros igual a b , uma vez que ocorrerá grau máximo de defeito. Já o valor de c eventualmente pode implicar numa redução impossível de ser efetuada, por falta

de condições para ocorrer mordida ou por exceder a capacidade da cadeira em termos de carga e potência. Neste caso, deve ser adotado um valor de abertura de cilindros que implique num compromisso entre um grau admissível de ponta alta e valores adequados de carga e potência da cadeira.

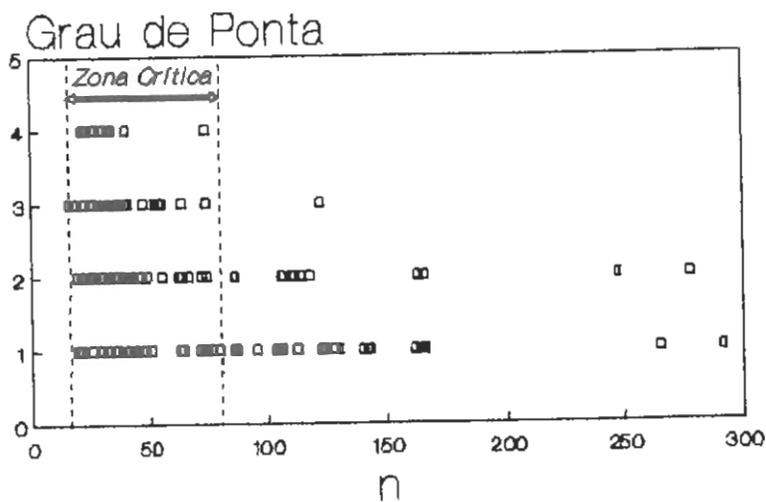


Figura 8: Influência do adimensional n sobre o grau de ponta alta.

- CONCLUSÕES

As alterações na distribuição de torques entre os motores e na diferença entre as velocidades angulares dos cilindros inferior e superior, dentro das faixas de alteração possibilitadas pelo púlpito de operação do Laminador de Chapas Grossas, não exerceram qualquer efeito sobre a ocorrência de ponta alta.

A análise da macro e microestrutura, bem como o levantamento do perfil de dureza de placas ao longo de sua espessura e largura, mostraram que elas são relativamente homogêneas mesmo nos aços mais críticos quanto ao aparecimento do defeito.

Logo, não há segregação que possa alterar acentuadamente a resistência à deformação a quente de forma localizada, descartando assim mais um possível motivo para formação de ponta alta.

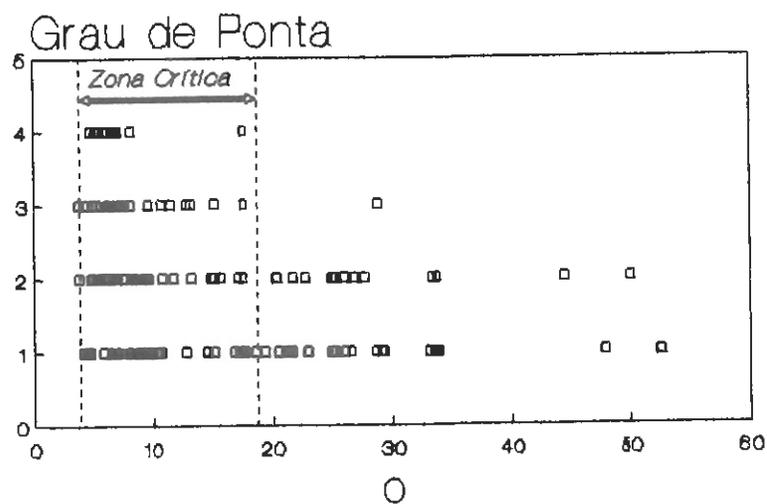


Figura 9: Influência do adimensional q sobre o grau de ponta alta.

A diferença de temperatura entre a face superior e inferior dos esboços variou entre -20 e $+30^{\circ}\text{C}$, em favor da superfície superior. Foi constatado que maiores temperaturas na face inferior do laminado tendem a provocar ponta alta, mas a faixa de transição de diferenças de temperatura que determina a ocorrência do defeito é muito difusa.

Finalmente, há forte correlação estatística entre o grau de ponta alta e o grau de penetração e heterogeneidade de deformação, definidos pelos adimensionais m , n e q . Assim, foi possível estabelecer faixas de redução críticas, onde a incidência do defeito é mais grave e frequente, e que, a princípio, devem ser evitadas quando ao se dimensionar o esquema de passes. Isto pode ser feito a partir de equações de regressão polinomial, que permitem prever o grau de defeito passe a passe, possibili-

tando escolher as reduções mais favoráveis quanto à eliminação ou minimização do defeito.

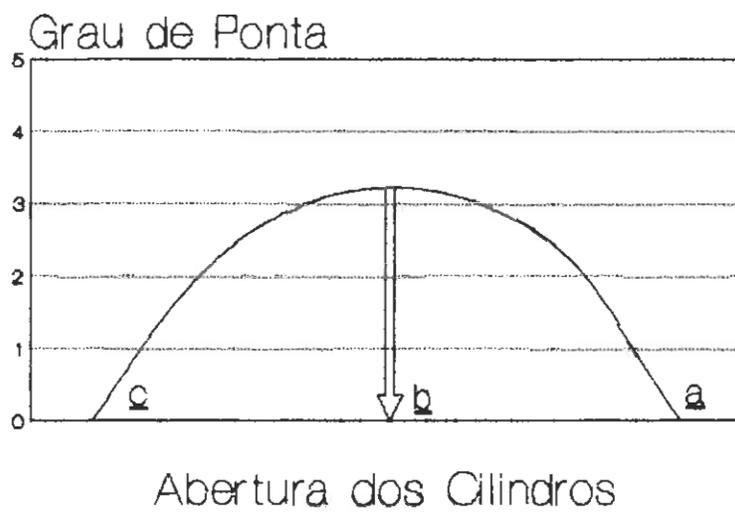


Figura 10: Relação entre a abertura entre os cilindros e o grau de ponta alta previsto pela equação de regressão polinomial. A espessura inicial do laminado é a . O grau máximo de defeito é atingido para abertura entre os cilindros igual a b , e assume valor nulo quando essa abertura é igual a a ou c .

- AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento aos operadores da cabine do Laminador de Chapas Grossas por sua plena colaboração em todas as experiências na área industrial, bem como a VICENTE TAKESHI KAWAMOTO, da Equipe de Apoio Técnico do Laminador de Chapas Grossas e Desbastador, pela adaptação e instalação do registrador gráfico na Sala Elétrica do Laminador de Chapas Grossas, e a ANIVALDO SEMAHIM, pelo apoio e sugestões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARTIN, D. Stahl und Eisen, 77(22):1607-1610, 31 Oktober 1957.
2. KENNEDY, G.E. & SLAMAR, F. Iron and Steel Engineer Yearbook, 1958, 233-241.
3. JOHNSON, W. & NEEDHAM, G. International Journal of Mechanical Science, 8:443-455, 1966.
4. TSELIKOV, A. Stress and Strain in Metal Rolling. Mir Publishers, Moscou, 1967. 475 p.
5. DANTHINE, A. & BOELENS, J. C.R.M. Metallurgical Reports, (25):29-34, December 1970.
6. BUXTON, S.A.E. & BROWNING, S.C. Journal of Mechanical Engineering Science, 14(4):245-254, 1972.
7. HEIPLE, C.R. Journal of Engineering Materials and Technology, April 1973, 103-106.
8. DEWHURST, P. e outros. International Journal of Mechanical Science, 16:389-397, 1974.
9. COLLINS, I.F. & DEWHURST, P. International Journal of Mechanical Science, 17:643-651, 1975.
10. YOSHII, M. e outros. ISIJ International, 31(9):973-978, September 1991.
11. POLUKHIN, P.I. e outros. Steel in the USSR, (7):75-78, July 1975.
12. HAYNES, C.G. & STANCKER, J.S. Iron and Steel Engineer, (1):35-38, January 1984.