

REDIMENSIONAMENTO DA COROA DOS CILINDROS DE TRABALHO NUM LAMINADOR DE CHAPAS GROSSAS⁽¹⁾

Jackson Soares de Souza Reis⁽²⁾

Antonio Augusto Gorni⁽³⁾

Marco Antonio Nogueira Alves⁽⁴⁾

Anivaldo Semahim⁽⁵⁾

Celso Gomes Cavalcanti⁽⁶⁾

RESUMO

Os requisitos cada vez mais severos em termos da planicidade das chapas grossas vem motivando o desenvolvimento de normas operacionais mais rígidas no Laminador de Chapas Grossas da COSIPA para se garantir esta característica de qualidade. Este trabalho objetivou estudar o efeito do coroamento dos cilindros de trabalho sobre o aplainamento dos esboços, sendo a continuação de um desenvolvimento mais abrangente sobre o assunto, que foi iniciado com o estudo da influência do esquema de passes. Verificou-se que o referido coroamento se encontrava superdimensionado, provocando ocorrência excessiva de ondulação central no esboço. Uma leve redução naquele parâmetro foi suficiente para provocar sensível redução dos defeitos de forma, minimizando-se ainda as flutuações na consistência do processo sob este aspecto. Esta linha de desenvolvimento deverá ter continuidade, objetivando-se alcançar níveis cada vez mais avançados de planicidade nos esboços.

(1) Trabalho a ser apresentado no XXXI Seminário de Laminação da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Juiz de Fora, Novembro de 1994.

(2) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, Gerência de Suporte Técnico de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(3) Membro da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Gerência de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(4) Membro da A.B.M. Técnico em Siderurgia da Gerência de Laminação de Chapas Grossas da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(5) Membro da A.B.M. Técnico Mecânico da Gerência de Suporte Técnico de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

(6) Membro da A.B.M. Técnico em Siderurgia da Gerência de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

- INTRODUÇÃO

A busca constante na redução dos custos de fabricação e no atendimento das exigências dos clientes, em termos da precisão dimensional dos laminados planos, são fatores decisivos para se garantir a competitividade das usinas siderúrgicas. Tal conjuntura vem propiciando o desenvolvimento de inúmeros trabalhos visando melhor nível de controle da planicidade de tiras e chapas [1].

Um parâmetro essencial para o controle da planicidade de uma chapa é a sua **coroa**, ou seja, a diferença de espessura entre sua borda e centro. Ela é definida a cada passe por três fatores básicos [2,3]: deflexão mecânica do conjunto cilindros de trabalho/encosto provocada pela carga de laminação; dilatação térmica superfície do cilindro de trabalho em contato com o laminado; e desgaste da superfície do cilindro de trabalho ao longo de sua utilização. A fim de se uniformizar o perfil de espessura do laminado, impõe-se uma coroa ao cilindro de trabalho durante sua retífica, cujo valor deve ser similar à resultante da somatória das contribuições acima.

SHOHET & TOWNSEND [4] verificaram que a planicidade de um laminado fica garantida desde que a seguinte relação seja satisfeita, passe a passe:

$$\frac{\Delta c}{\Delta h} = \text{constante} \quad (1)$$

onde Δc é a variação na coroa do laminado e Δh é a diferença de espessura do laminado, entre o passe atual e o anterior. Tal regra já foi adaptada para o caso específico da laminação de chapas grossas da COSIPA [5]. Nessa oportunidade, foram definidas as faixas operacionais adequadas desses parâmetros para se obter boa planicidade.

Uma alternativa avançada para o cálculo de esquemas de passe, levando-se em conta inclusive a planicidade do material, é a utilização de uma **rede neural artificial**. Este recurso de inteligência artificial consegue deduzir automaticamente as relações entre planicidade e esquemas de passe através de um processo de "aprendizado", que é feito a partir da apresentação de dados reais à rede neural. Foram desenvolvidas redes neurais para o cálculo da abertura dos cilindros nos últimos três passes do esquema de laminação de chapas grossas da COSIPA [6]. Os resultados obtidos por este modelo foram auspiciosos: o erro máximo entre os valores calculados e reais de abertura entre os cilindros para o último passe - que é o mais crítico - ficou praticamente dentro da tolerância admitida para o produto chapas grossas, que oscila entre -0,25 mm e + 0,60 mm.

Contudo, tanto a fórmula (1) como a rede neural devem ser usados com cautela, uma vez que elas foram determinados empiricamente para condições muito específicas de processo. Qualquer alteração nos parâmetros que foram mantidos constantes ao longo do levantamento de dados pode invalidar esses modelos. Neste caso, há a necessidade de se proceder a um novo ajuste nesses algoritmos, considerando-se as novas condições de processo, para que os modelos venham a refletir fielmente a resposta em termos da planicidade do produto em função do esquema de passes aplicado.

Os parâmetros relevantes do ponto de vista da planicidade que foram mantidos constantes ao longo do levantamento de dados utilizados na calibração dos modelos acima citados foram: **cones de laminação, nível de chanframento dos cilindros de encosto e coroas aplicadas durante a retífica nos cilindros de trabalho e encosto**. A obtenção de um bom nível de planicidade no esboço é função da interação complexa entre os fatores acima, cujo balanceamento deve ser cuidadoso [7].

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do coroamento imposto por retífica aos cilindros de trabalho sobre a planicidade das chapas grossas. A decisão de se estudar inicialmente esse parâmetro é baseada no fato de que ele é um fator de grande importância sobre a planicidade e de alteração relativamente fácil.

- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente decidiu-se caracterizar o nível de qualidade atual em termos do aplainamento de chapas grossas. Nesta etapa inicial, foram acompanhados detalhadamente 33 programas de laminação com o objetivo de se obter informações sob diferentes condições de processo. O levantamento foi feito de modo a abranger todas as possíveis condições que podem apresentar as seguintes variáveis: **tipo de cone de laminação, diâmetro e coroa do cilindro de trabalho imposta na retífica**.

As variáveis incluídas no levantamento foram as seguintes:

- Tipo de cone de laminação;
- Tonelagem de esboços laminada;
- Índice percentual de envio de laminados para a desempenadeira a frio

(D.F.), em função do tipo de defeito identificado visualmente (abaulamento, acanoamento, ondulação central, ondulação lateral, ondulação total envio total);

- Comprimento relativo e participação na mistura do programa, conforme a espessura do produto (fino, médio, grosso e total);
- Dados dos cilindros de trabalho superior e inferior (coroa e diâmetro iniciais, desgaste e coroa após o programa de laminação, diâmetro inicial e dureza Shore);
- Dados dos cilindros de encosto superior e inferior (coroa e diâmetro iniciais, tonelagem acumulada e dureza Shore).

Os dados assim obtidos foram analisados estatisticamente com o objetivo de se determinar correlações entre eles e os índices de desvio para a desempenadeira a frio. Note-se que tais índices são um fiel indicador do nível de planicidade das chapas grossas. Entre as técnicas empregadas estão o teste de médias **t de Student**, a análise de variância (**ANOVA**), análise de componentes principais, determinação da matriz de **Pearson** e regressão *stepwise*, entre outras.

A partir dos resultados desta análise, foi redefinido o coroamento dos cilindros de trabalho para se objetivar melhoria no nível de planicidade do esboço, vale dizer, redução no nível de envio de chapas para a desempenadeira a frio. Após a implantação da contra-medida, foi repetido o mesmo procedimento de coleta de dados/análise estatística já descrito, para verificar o real efeito da modificação do processo no nível de aplainamento do material.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A distribuição dos tipos de defeitos de planicidade observada no levantamento da situação original pode ser vista na figura 1. O principal defeito observado, com destaque, foi ondulação central do esboço. A seguir, veio a ondulação lateral. Os demais defeitos de forma se apresentaram com nível de intensidade praticamente igual.

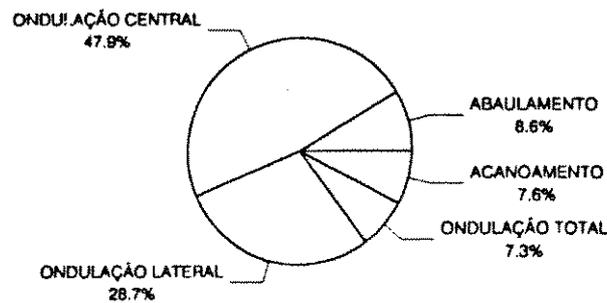


Figura 1: Distribuição percentual dos envios para a desempenadeira a frio, discriminada pelos tipos de defeito de aplainamento, observada no primeiro levantamento de dados.

Foi efetuada uma Análise das Componentes Principais a partir da massa dos dados levantados para a situação original, cujo resultado pode ser visto na figura 2. A partir dela pode-se observar que as variáveis levantadas se agruparam em quatro classes:

- (I) Envios para a desempenadeira a frio por defeitos de ondulação;
- (II) Comprimento, tonelagem laminada e desgaste dos cilindros de trabalho;
- (III) Coroas dos cilindros de trabalho após o desgaste;
- (IV) Dureza e diâmetro dos cilindros de trabalho e encosto.

A mesma análise indicou ainda correlação inversa entre os grupos II e III/IV. De fato: a coroa após desgaste é inversamente proporcional ao desgaste sofrido pelo cilindro que, por sua vez, é proporcional ao comprimento ou tonelagem de laminados. O desgaste dos cilindros de trabalho é inversamente proporcional à dureza dos mesmos. Esta característica é proporcional a seus diâmetros, pois os cilindros de trabalho do laminador de chapas grossas são feitos em ferro fundido coquilhado de dupla fusão, o qual apresenta gradiente de dureza ao longo de seu raio.

Um fato interessante revelado por esta análise é que os envios para a desempenadeira a frio por acanoamento e abaulamento se encontram separados dos

envios atribuídos aos defeitos de ondulação. Isto sugere que suas origens são diferentes. De fato, acredita-se que o abaulamento e acanoamento surjam em virtude da formação de gradientes térmicos ao longo da espessura do esboço, e não em função de seu coroamento [8].

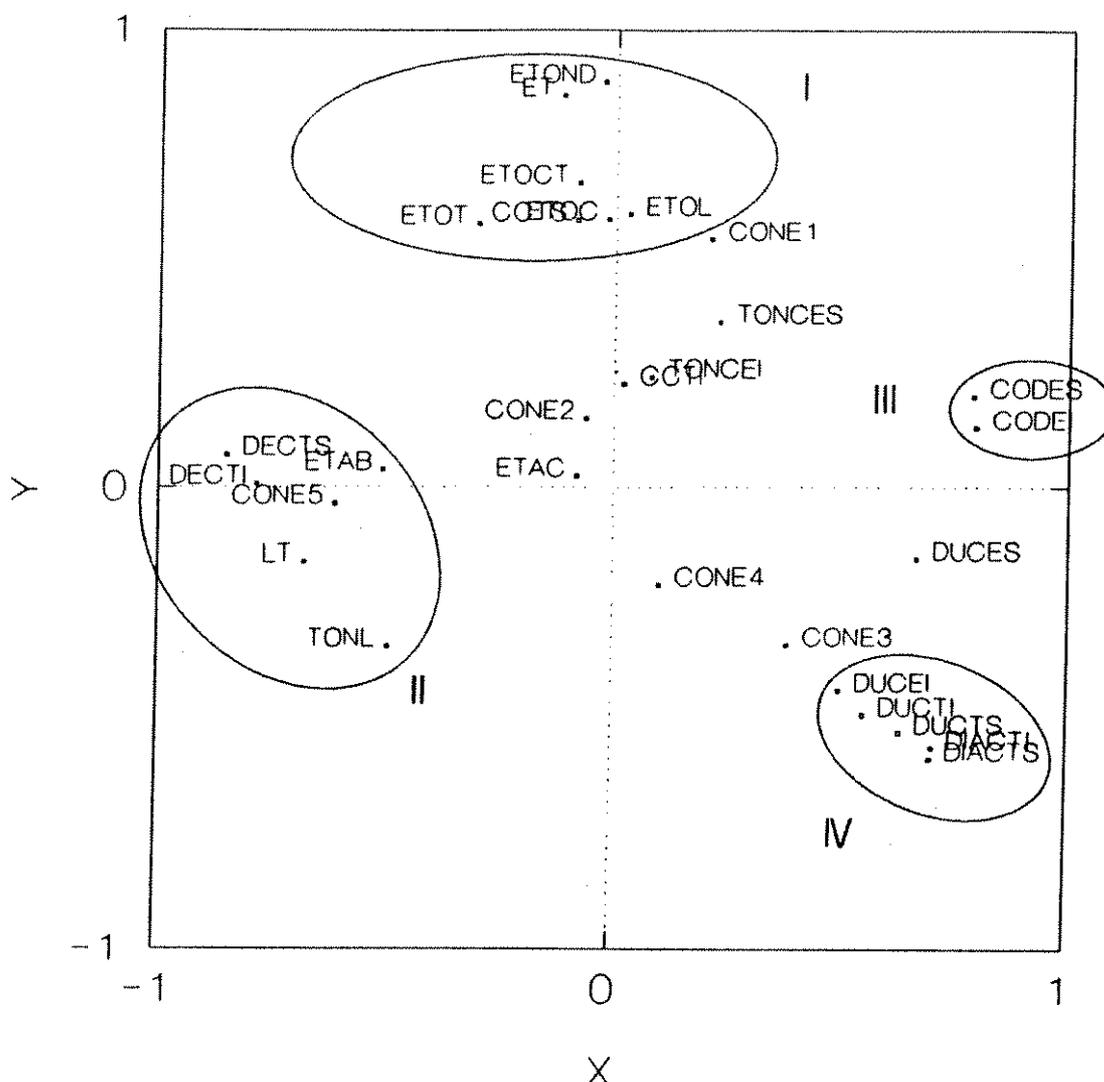


Figura 2: Diagrama gerado pela Análise de Componentes Principais a partir da massa de dados do primeiro levantamento. As siglas que identificam as variáveis estudadas podem ser vistas na tabela I.

Serão descritas a seguir as correlações encontradas a partir da análise estatística efetuada nos dados do primeiro levantamento.

A figura 3 mostra a influência das coroas dos cilindros de trabalho, impostas pela retífica, sobre o envio à desempenadeira a frio ocasionado por defeitos de

ondulação. Nota-se que o coroamento do cilindro inferior aparentemente não exerce influência, ao contrário do relativo ao cilindro superior. De fato, esta é uma primeira indicação de que o coroamento deste cilindro se encontrava super-dimensionado, corroborando a constatação anterior sobre a participação preponderante dos defeitos de ondulação central como causa do envio de chapas à desempenadeira a frio.

SIGLA	SIGNIFICADO
CCTI	Coroa do cilindro de trabalho inferior
CCTS	Coroa do cilindro de trabalho superior
CONE 1 a 5	Cone de laminação utilizado
CODEI	Coroa do cilindro de trabalho inferior após desgaste
CODES	Coroa do cilindro de trabalho superior após desgaste
DECTI	Desgaste verificado no cilindro de trabalho inferior
DECTS	Desgaste verificado no cilindro de trabalho superior
DIACTI	Diâmetro do cilindro de trabalho inferior
DIACTS	Diâmetro do cilindro de trabalho superior
DUCEI	Dureza do cilindro de encosto inferior
DUCES	Dureza do cilindro de encosto superior
DUCTI	Dureza do cilindro de trabalho inferior
DUCTS	Dureza do cilindro de trabalho superior
ET	Índice de envio total à desempenadeira a frio (D.F.)
ETAB	Índice de envio à D.F. por abaulamento
ETAC	Índice de envio à D.F. por acanoamento
ETOC	Índice de envio à D.F. por ondulação central
ETOCT	Índice de envio à D.F. por ondulação central e total
ETOL	Índice de envio à D.F. por ondulação lateral
ETOND	Somatória do índice de envio à D.F. por ondulação
ETOT	Índice de envio à D.F. por ondulação total
LT	Somatória dos comprimentos dos laminados do programa
TONCEI	Tonelagem acumulada pelo cilindro de encosto inferior
TONCES	Tonelagem acumulada pelo cilindro de encosto superior
TONL	Tonelagem total processada no programa de laminação

Tabela I: Significado das siglas utilizadas nos diagramas gerados pela Análise das Componentes Principais.

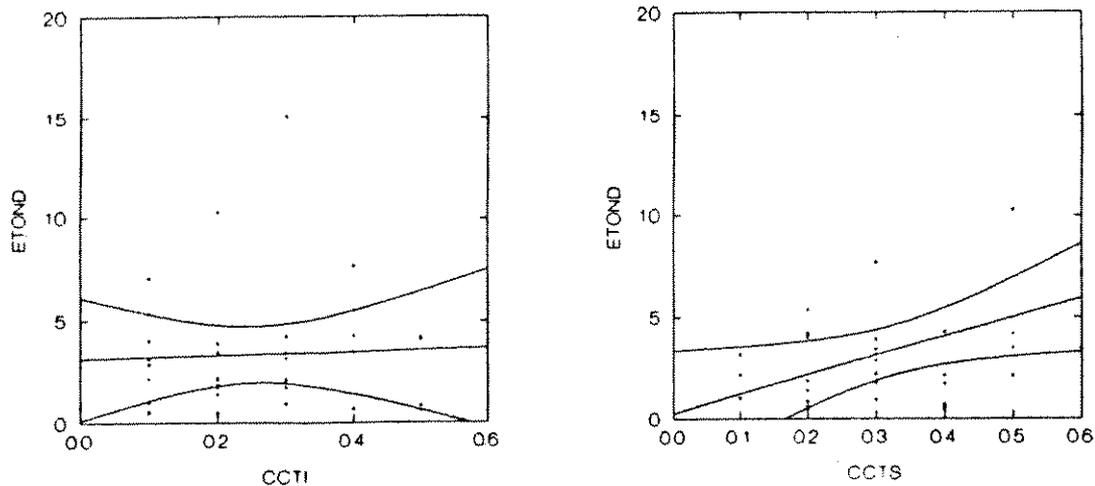


Figura 3: Efeito do coroamento imposto durante a retífica aos cilindros de trabalho sobre o envio à desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação. Para esta e as demais figuras: esquerda, cilindro inferior; direita, cilindro superior. Dados do primeiro levantamento.

Uma evidência adicional para se confirmar a suspeita de que o coroamento do cilindro de trabalho superior estava excessivo se encontra no declínio do índice de envio por defeitos de ondulação a medida que se aumentou a tonelagem laminada durante o programa de laminação, conforme mostra a figura 4. Ou seja, quanto maior for a tonelagem laminada, maior o desgaste do cilindro de trabalho, contribuindo para a redução da coroa resultante imposta ao esboço e, conseqüentemente, reduzindo a probabilidade da ocorrência de ondulação central.

Ainda há outra evidência nesse sentido: o índice de envio por defeitos de ondulação é nitidamente maior para cilindros com menor diâmetro, conforme mostra a figura 5. Tal constatação passa a fazer sentido quando se lembra que o coroamento imposto aos cilindros de trabalho fica maior a medida que seu diâmetro diminui, conforme estabelecido pela norma operacional em vigor. Este procedimento é adotado pois, uma vez que o diâmetro do cilindro diminui, sua deflexão sob uma mesma carga de laminação se torna maior. E mais: a intersecção com o eixo y da reta correspondente ao cilindro superior é maior que a observada para o cilindro inferior, confirmando a suspeita levantada.

A partir das evidências sobre o excesso de coroamento do cilindro de trabalho superior, decidiu-se reduzir entre 0,10 e 0,20 mm sua coroa imposta durante a retífica. Após a implantação dessa contra-medida, foi efetuado um novo levantamento de dados, similar ao já descrito, em 28 programas de laminação.

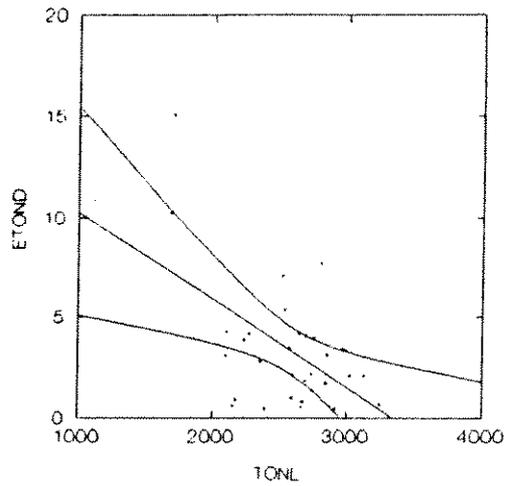


Figura 4: Efeito da tonelagem laminada durante o programa de laminação sobre o envio à desempenadeira a frio por defeitos de ondulação. Dados do primeiro levantamento.

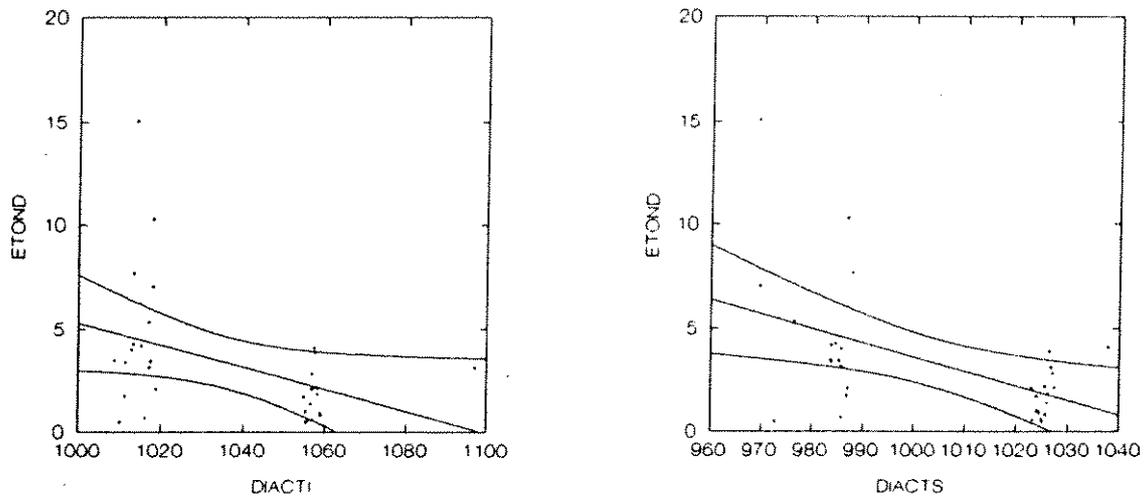


Figura 5: Efeito do diâmetro dos cilindros de trabalho sobre o envio à desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação. Dados do primeiro levantamento.

Os resultados da Análise das Componentes Principais efetuada para os dados obtidos para a nova condição de coroamento dos cilindros de trabalho está apresentada na figura 6. Ela mostrou algumas poucas alterações em relação aos resultados obtidos anteriormente. Houve uma certa troca de posições entre os grupos

II, III e IV. Além disso, o grupo II se desmembrou em dois, enquanto que os III e IV se aglutinaram. De forma geral, as relações entre as variáveis não se alteraram significativamente entre um levantamento e outro.

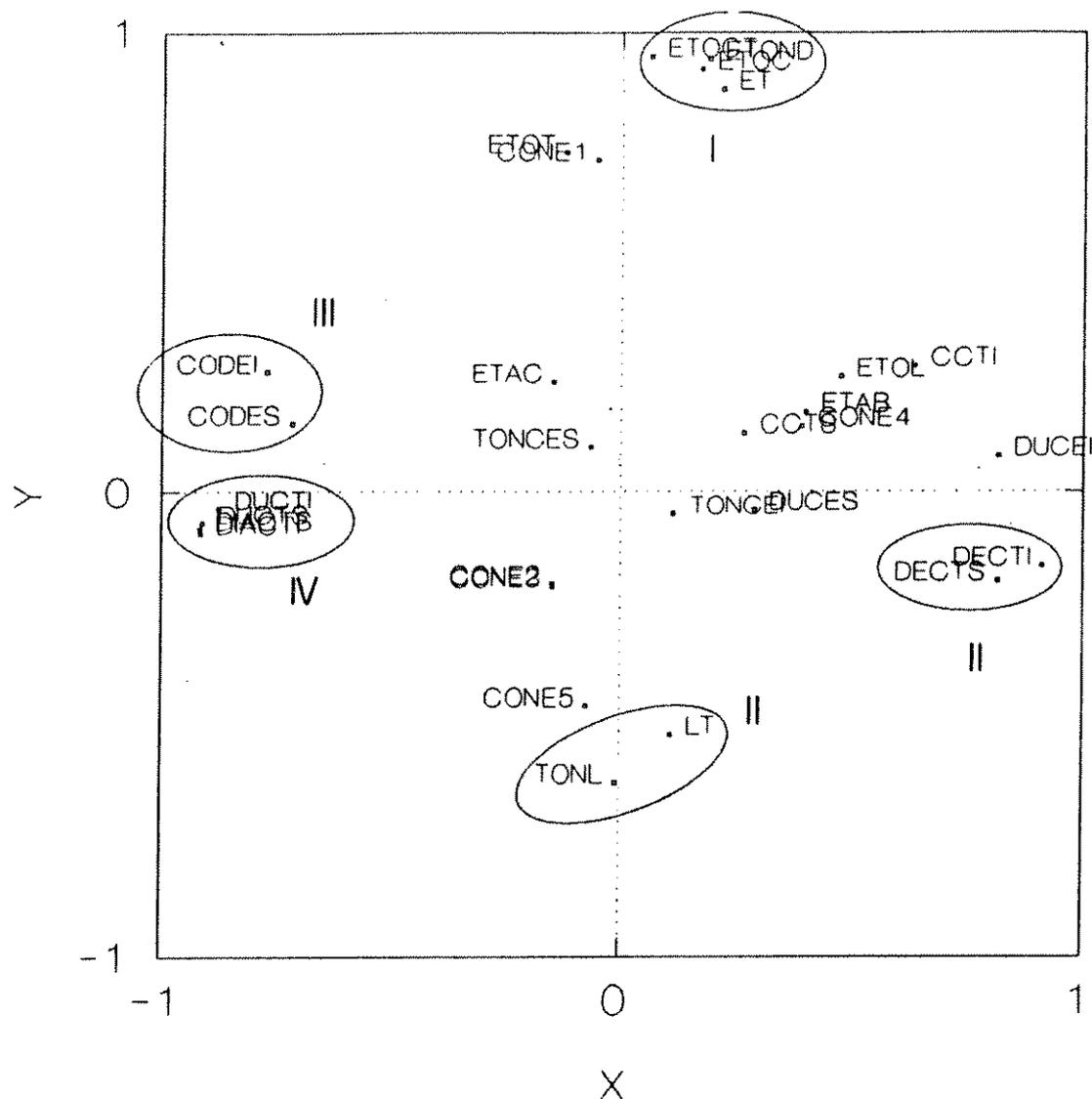


Figura 6: Diagrama gerado pela Análise de Componentes Principais a partir da massa de dados do segundo levantamento.

A tabela II mostra a declividade e o coeficiente de correlação das regressões lineares estabelecidas entre os índices de envio à desempenadeira a frio atribuídos a defeitos de ondulação e variáveis relevantes do ponto de vista da planicidade, determinadas para os dois levantamentos efetuados. A primeira conclusão que se

pode tirar destas informações é que, após a redução no coroamento dos cilindros de trabalho, as regressões com variáveis ligadas aos cilindros de trabalho apresentaram nível de confiança estatística abaixo de 95%. Ou seja, não há garantia estatística plena de que essas correlações existam, indicando que o coroamento dos cilindros já não provoca o surgimento defeitos de aplainamento no laminado.

VARIÁVEL INDEPENDENTE	COROA ORIGINAL		COROA MODIFICADA	
	DECLIV.	<i>r</i>	DECLIV.	<i>r</i>
Cor. Cil. Trab. Inf.	<i>0,910</i>	<i>0,040</i>	<i>3,214</i>	<i>0,274</i>
Cor. Cil. Trab. Sup.	9,484	0,452	2,165	0,188
Tonelagem Laminada	-0,004	0,535	-0,002	0,531
Diam. Cil. Trab. Inf.	-0,054	0,419	-0,008	0,201
Diam. Cil. Trab. Sup.	-0,516	0,516	-0,008	0,201

Tabela II: Declividades e coeficientes de correlação *r* entre os índices de envio para a desempenadeira a frio atribuídos a defeitos de ondulação e variáveis relevantes do ponto de vista da planicidade. Os valores em *itálico* são os casos em que a análise de variância (ANOVA) indica que há mais de 5% de probabilidade do valor da declividade ser igual a zero, ou seja, da correlação ser nula.

De fato, a figura 7 mostra que ocorreu significativa redução na magnitude do desvio por ondulação central, bem como em sua sensibilidade em relação ao valor da coroa do cilindro de trabalho superior. Basta comparar estes novos resultados com os da figura 3. Por outro lado, aparentemente o coroamento do cilindro de trabalho inferior passou a exercer efeito desfavorável; contudo, uma vez que essa correlação se mostrou estatisticamente duvidosa, essa evidência deve ser encarada com cuidado. Do mesmo modo, os efeitos da tonelagem laminada no programa e do diâmetro dos cilindros de trabalho também diminuíram significativamente, conforme mostram as figuras 8 e 9, respectivamente.

A figura 10 mostra o efeito dos cones de laminação sobre o envio à desempenadeira a frio por defeitos de ondulação, para os dois levantamentos efetuados. Esses dados confirmam a redução no nível de envio para a desempenadeira a frio após a redução no coroamento dos cilindros de trabalho. Pode-se observar também

redução na faixa de dispersão associada ao nível de defeitos. Ou seja, as contramedidas adotadas provocaram não só melhoria no nível de planicidade do produto, como também aumentou o grau de consistência com que ele é obtido.

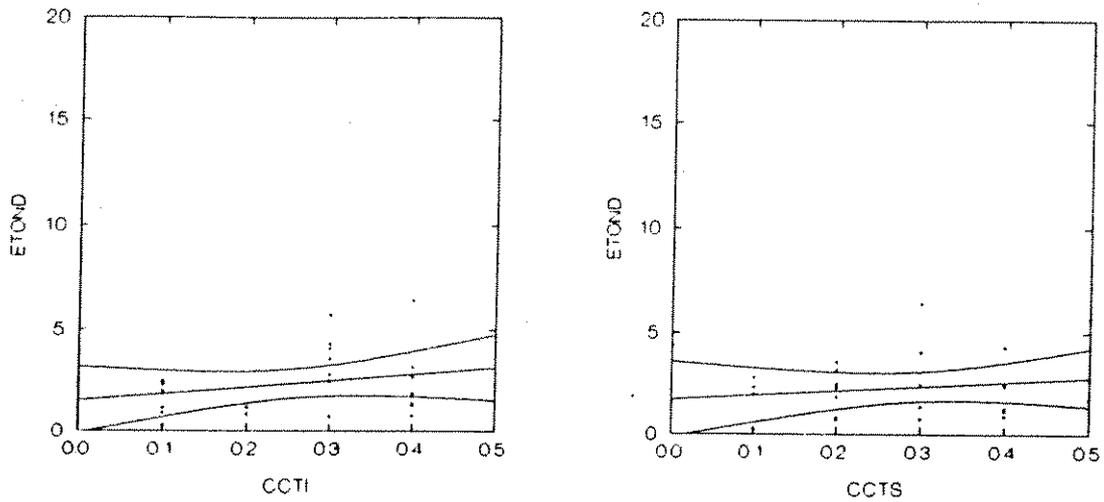


Figura 7: Efeito do coroamento imposto durante a retífica aos cilindros de trabalho sobre o envio à desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação. Dados do segundo levantamento.

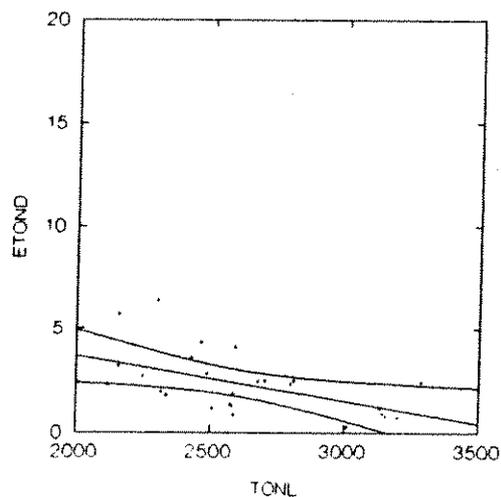


Figura 8: Efeito da tonelagem laminada durante o programa de laminação sobre o envio à desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação. Dados do segundo levantamento.

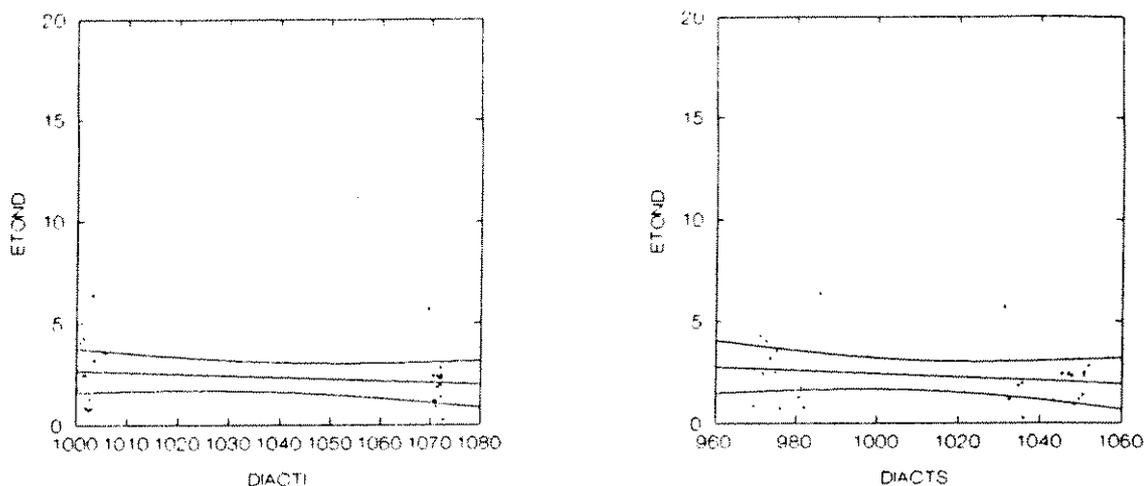


Figura 9: Efeito do diâmetro dos cilindros de trabalho sobre o envio à desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação. Dados do segundo levantamento.

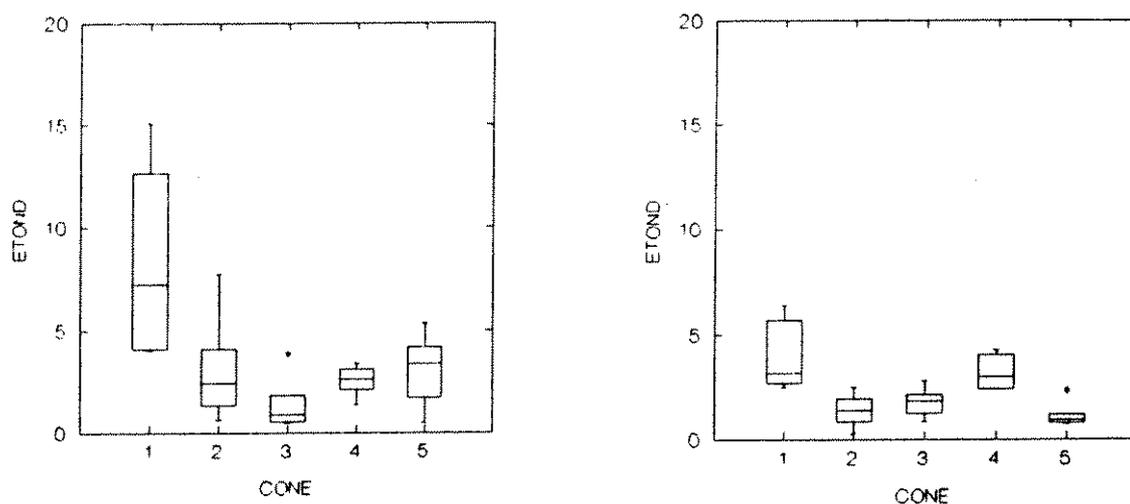


Figura 10: "Boxplot" do nível de envio para a desempenadeira a frio em função dos defeitos de ondulação, para os cones de laminação utilizados. Aqui e na figura 9: esquerda, primeiro levantamento; direita, segundo levantamento de dados.

A influência conjunta dos cones de laminação e o coroamento do cilindro de trabalho superior sobre o nível de envio para a desempenadeira a frio pode ser visto na figura 11, para as duas condições de processo utilizadas. Mais uma vez, ficou confirmada a influência do coroamento excessivo do cilindro de trabalho superior e do cone 1 sobre a ocorrência de ondulação central.

Em termos do efeito dos cones de laminação, o cone 1 revelou-se o pior deles; os demais apresentaram índices semelhantes de envios para a desempenadeira a frio atribuídos a defeitos de ondulação. O cone 1 é utilizado na produção de material fino por laminação controlada, que é crítico em termos de planicidade em função de sua pequena espessura e pela ausência de recristalização na fase da laminação de acabamento do esboço, o que tende a suprimir a relaxação das tensões residuais decorrentes da deformação [1].

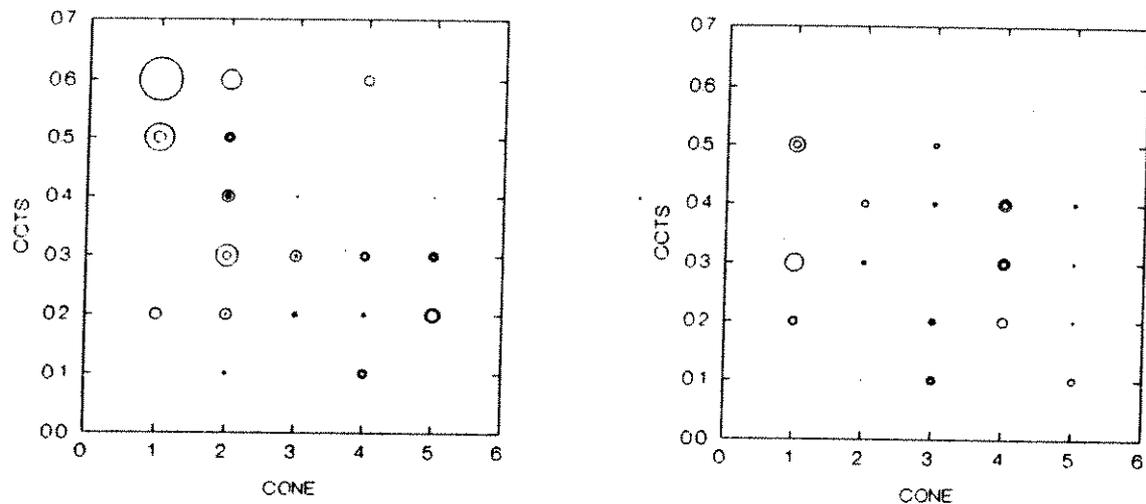


Figura 11: "Bubble Plot" dos cones de laminação e a coroa do cilindro de trabalho superior. O diâmetro das circunferências é proporcional ao índice de envio para a desempenadeira a frio atribuído a defeitos de ondulação.

As constatações acima mencionadas, as quais foram levantadas a partir dos acompanhamentos específicos, foram confirmadas pelos dados de envio total real feito à desempenadeira a frio relativos à produção efetiva da laminação de chapas grossas, conforme mostra a figura 12.

Como se pode observar dos dados apresentados, uma pequena variação na coroa dos cilindros, de implantação relativamente fácil, apresentou reflexos muito benéficos na planicidade do material. Não obstante os resultados animadores obtidos por esse trabalho, os esforços para a melhoria de planicidade do produto chapas grossas terão continuidade para que esta característica de qualidade atinja níveis ainda melhores, uma vez que este é um dos requisitos mais exigidos pelos clientes. Para tal, não só o coroamento dos cilindros de trabalho continuará sendo aperfeiçoado, como também todos os outros parâmetros de processo que possam influenciar a planicidade

sofrerão refino permanente.

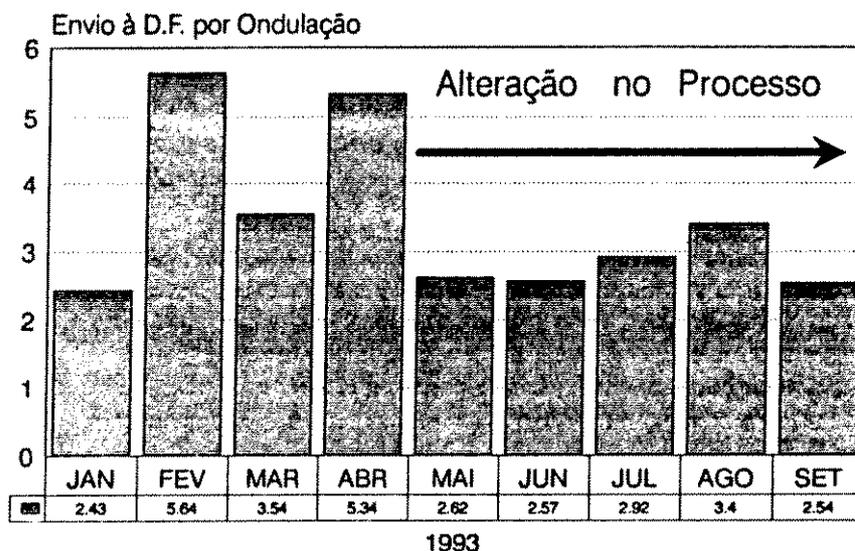


Figura 12: Evolução do envio total à desempenadeira a frio em relação à produção global da laminação de chapas grossas em 1993.

- CONCLUSÕES

- Uma das características mais críticas em termos da qualidade das chapas grossas é sua planicidade, que se tornou uma das exigências mais severas feitas pelos clientes. Tal situação vem motivando o ajuste das normas operacionais para a operação da laminação de chapas grossas da COSIPA, bem como fomentando o desenvolvimento de trabalhos com o objetivo de se dominar ao máximo a influência dos parâmetros operacionais sobre a planicidade.

- Este trabalho teve por objetivo quantificar a influência do coroamento dos cilindros de trabalho sobre a planicidade. Foi verificado que ele se encontrava super-dimensionado, levando à ocorrência excessiva de ondulação central no esboço. Uma pequena redução no coroamento dos cilindros de trabalho foi suficiente para reduzir significativamente a ocorrência desse defeito e aumentar o nível de

consistência do nível de planicidade conseguido, conforme demonstrado por extensa análise estatística.

- A contínua melhoria da planicidade das chapas grossas é uma prioridade dentro do aumento das características de qualidade deste produto, na medida que este requisito continua sendo crítico em função das necessidades dos nossos clientes. Para tanto, as normas operacionais da COSIPA estão sofrendo contínuo e cuidadoso aprimoramento, incorporando resultados efetivamente seguros decorrentes de experiências visando o refino dos parâmetros operacionais.

- ABSTRACT

The more and more stringents requisites about the flatness of plates are encouraging the development of rigid operational standards at COSIPA in order to reach the specified levels specified by the customers. The objective of this work was to study the effect of the work roll crowns over the plate flatness. It is a continuation of a more global work that was begun with the study of the influence of the pass schedule over flatness. It is shown here that the former values of these crowns were excessive, as the occurrences of the middle waveness defect were significant, requiring additional cold levelling of the plate. A slight reduction of the values of the work rolls crowns was sufficient to reach a sensible reduction in these shape defects, further increasing the consistence of the shape uniformity of the plate. This work about the control of the plate shape is to be continued, in order to achieve a higher level of quality in the COSIPA's plates.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GINZBURG, V.B. Steel Rolling Technology: Theory and Practice. Marcel Dekker Inc., New York, 1991, 791 p.
2. EMICKE, O. & LUCAS, K.H. Neue Hütte, März 1956, 257-274.
3. MANTYLA, P. e outros. Iron and Steel Engineer, November 1989, 48-54.
4. SHOHET, K.N. & TOWNSEND, N.A. Journal of the Iron and Steel Institute, October 1971, 769-775.
5. REIS, J.S.S. e outros: 48º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Anais. Rio de Janeiro, Julho de 1993.

6. GORNI, A.A. A ser apresentado no Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Outubro de 1994.
7. MASUDA, S. e outros. Tetsu-to-Hagané, Dezembro 1981, 177-186 (Tradução CIT-COSIPA nº 948).
8. BOURGON, Y. e outros. Revue de Metallurgie - CIT, Avril 1993, 537-544.