

INCREMENTO DA PRODUTIVIDADE NA LAMINAÇÃO A FRIO DE PRODUTOS PLANOS ATRAVÉS DA SEQUÊNCIA DE PASSES.

Maria da Penha de Campos Vieira<sup>(1)</sup>

Horacio Helman<sup>(2)</sup>

Ingo Piorko<sup>(3)</sup>

Resumo

No presente trabalho analisa-se a influência da sequência de passes na produtividade da laminação a frio de produtos planos, através da minimização do tempo de produção e da objetivação do processo.

Faz-se um estudo comparativo dos tempos necessários para sequências com diferentes números de passes, em condições de velocidade de laminação constante e variável em cada passe. Analisa-se também a influência da distribuição das deformações dentro da sequência sobre o tempo de laminação.

Destaca-se a importância do conhecimento da curva de fluxo na elaboração de uma sequência de passes e fazem-se diversas considerações acerca da problemática envolvida no seu cálculo.

(1) Eng<sup>o</sup> Metalurgista - Pesquisadora do Departamento de Engenharia Metalúrgica UFMG.

(2) Eng<sup>o</sup> Mec. e Eletr., D.I.C., Ph.D. - Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFMG - Membro da ABM.

(3) Dr. Ing. - Prof. Visitante do Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFMG. Membro da ABM.

## Abstract

In the present work an analysis has been made on the influence that the sequence of passes has on the productivity of the cold rolling of flat products through the minimization of the production time and the objetification of the process.

A comparative study has been made of the time required for schedules with different number of passes, under conditions of constant and variable rolling speed in each pass, including also the influence of the distribution of deformations within the sequence.

The importance of the knowledge of the yield curve on the determination of the rolling schedules has been remarked and several considerations on the general problems surrounding such determinations have been made.

# Incremento da Produtividade na Laminação a Frio de Produtos Planos pelo Cálculo da Sequência de Passes. Parte I.

## 1 - Introdução

A Produtividade de um laminador na produção de produtos planos em vários passes é determinada principalmente pelo programa da produção. Neste aspecto, a sequência de passes tem uma importância destacada.

Somente através do conhecimento do comportamento do material durante o processo de laminação e das características mecânicas (carga máxima, potência admissível, rigidez, etc) do laminador é possível a obtenção de uma sequência de passes otimizada. Essas considerações são válidas tanto para a laminação a quente, quanto para a laminação a frio, em trens contínuos ou laminadores reversíveis.

Diversos trabalhos realizados no Departamento de Engenharia Metalúrgica da EE.UFMG abordaram o assunto da sequência de passes (1), (2), (3), segundo um enfoque mecânico. O presente trabalho pretende mostrar como a sequência de passes pode incrementar a produtividade na laminação a frio de produtos planos em laminadores reversíveis. Em outro trabalho (4) é abordado este problema aplicado à laminação contínua.

## 2 - Produtividade

A produtividade de um laminador será definida como a relação entre o peso de produtos vendíveis e a quantidade total de horas-homem empregadas no processo de laminação da matéria prima inicial.

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Peso de produtos vendíveis}}{\text{horas-homem}} \quad (1)$$

Sendo o "Peso de produtos vendíveis" dado pela diferença entre os pesos da matéria prima inicial, das perdas e dos produtos desviados para outros fins (por exemplo, consumo interno).

Isto é :

$$\text{Produtos vendíveis} = \text{Matéria prima inicial} - \text{Perdas} - \text{Desvios}$$

A Minimização do tempo de produção e a Objetivação do processo de laminação podem ser alcançadas através de uma análise comparativa das possíveis sequências de passes. Através deste estudo pode-se selecionar uma sequência que eleve a produtividade do laminador sem comprometer a qualidade do produto.

### 2.1 - Incremento da Produtividade através da Minimização do Tempo de Laminação

Na laminação reversível existem duas possíveis formas de operação :

- a - laminação da totalidade da tira, ou
- b - laminação de uma parte da tira cujos extremos ficam presos nas bobinadeiras.

No caso de chapas muito finas (folhas) o caso a não é adequado devido ao elevado tempo requerido para a montagem da folha no laminador. Esse tempo extra, em relação à forma de operação b, pode resultar mais oneroso do que a quantidade de chapa perdida quando a laminação é feita desta forma.

Entende-se por tempo de laminação de um passe ( $t_p$ ) o tempo necessário para que o comprimento a ser laminado passe totalmente através dos cilindros de laminação, acrescentado do tempo consumido na preparação da máquina para aquele passe.

O comprimento total da tira ( $L_{tot}$ ) em função do seu peso e da sua geometria é dado, para o caso de bobinas de aço, por:

$$L_{tot} = \frac{128,2 \cdot P}{B \cdot H} \quad [m] \quad (2)$$

Sendo : P = peso da tira em kgf

B = largura em mm

H = espessura em mm

Se se trabalha na forma b o comprimento útil da tira para a laminação, ( $L_u$ ), é função do seu comprimento total, da distância entre o centro da bobinadeira e o centro dos cilindros de trabalho, ( $L_A$ ), e do perímetro do cilindro da bobinadeira ( $L_B$ ).

Isto é :

$$L_u = L_{tot} - 2 (L_A + L_B) \quad [m] \quad (3)$$

e em função do peso laminável em kgf(P') :

$$L_u = \frac{128,2 \cdot P'}{B \cdot H} \quad [m] \quad (4)$$

O tempo por passe ( $t_p$ ) compõe-se do tempo de laminação ( $t_c$ ) a velocidade constante ( $V$ ), do tempo para a aceleração (positiva e negativa), ( $2 t_a$ ), e do tempo necessário para reverter o sentido de laminação ( $t_s$ ),

Isto é :

$$t_p = 2 t_a + t_c + t_s \quad [min] \quad (5)$$

Sendo :

$$t_a = \frac{V}{a \cdot 60^2} \quad [min] \quad (6)$$

$$t_c = \frac{L_u - L_a}{V} \quad [min] \quad (7)$$

Onde :

$a$  = aceleração em  $m/s^2$

$L_a$  = comprimento da tira laminado durante a aceleração, em m

$V$  = velocidade da tira na saída, em m/min

Sendo  $\epsilon$  a deformação logarítmica e  $H_0$  a altura inicial da tira resulta :

$$\epsilon = \ln \frac{H_0}{H} \quad (8)$$

ou

$$H = H_0 \exp(-\epsilon) \quad [mm] \quad (9)$$

e substituindo em (4) resulta:

$$L_u = \frac{128,2 \cdot P'}{B \cdot H_0} \exp(\epsilon) \quad [m]$$

$$\text{Chamando } C_1 = \frac{128,2 \cdot P'}{B \cdot H_0} \quad [m]$$

$$\text{Resulta : } L_u = C_1 \cdot \exp(\epsilon) \quad (10)$$

Por outra parte, chamando

$$C_2 = \frac{2}{a \times 60^2} \quad [ \text{min}^2/\text{m} ]$$

$$C_3 = t_s \quad [ \text{min} ]$$

obtem-se finalmente para o tempo por passe a expressão :

$$t_p = C_1 \cdot \frac{\exp(\epsilon)}{V} + V \cdot C_2 + C_3 \quad [ \text{min} ] \quad (11)$$

Normalmente adotam-se valores médios para a aceleração e o tempo necessário para reverter o sentido de laminação.

O tempo total ( $t_{\text{tot}}$ ) necessário para  $n$  passes pode ser escrito como :

$$t_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n t_{pi} = C_1 \sum_{i=1}^n \frac{\exp(\sum_{j=1}^i \epsilon_j)}{V_i} + C_2 \sum_{i=1}^n V_i + n C_3 \quad [ \text{min} ] \quad (12)$$

Onde  $\epsilon_j$  é a deformação logarítmica do passe.

Em seguida serão deduzidas algumas conclusões derivadas de análises da equação (12) aplicadas aos seguintes casos particulares :

- i - comparação de seqüências de dois e três passes com velocidade de laminação constante.
- ii - comparação de seqüências de dois e três passes com velocidades variáveis.
- iii - comparação de seqüências de três passes com diferentes distribuições de deformações

#### i - Velocidade de laminação constante

Nestas condições o tempo total de laminação é dado pela seguinte expressão :

$$t_{\text{tot}} = C_1' \sum_{i=1}^n \exp(\sum_{j=1}^i \epsilon_j) + n C_2'$$

onde  $C_1' = \frac{C_1}{V} \quad [ \text{min} ]$

$$C_2' = (C_2 V + C_3) \quad [\text{min}]$$

Calcula-se a seguir o tempo necessário para obter uma mesma deformação total ( $\epsilon_t$ ) em dois ou três passes.

a) Laminação em três passes :

$$tp_1 = C_1' \exp(\epsilon_1) + C_2'$$

$$tp_2 = C_1' \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) + C_2'$$

$$tp_3 = C_1' \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) + C_2'$$

$$t_{\text{tot}(3)} = C_1' \left[ \exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] + 3 C_2'$$

$$t_{\text{tot}(3)} = C_1' \left[ \exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \exp(\epsilon_t) \right] + 3 C_2' \quad (13)$$

b) Laminação em dois passes (\*) :

$$t_{p1}^* = C_1' \exp(\epsilon_1^*) + C_2'$$

$$t_{p2}^* = C_2' \exp(\epsilon_1^* + \epsilon_2^*) + C_2'$$

$$t_{\text{tot}(2)}^* = C_1' \left[ \exp(\epsilon_1^*) + \exp(\epsilon_1^* + \epsilon_2^*) \right] + 2 C_2'$$

$$t_{\text{tot}(2)}^* = C_1' \left[ \exp(\epsilon_1^*) + \exp(\epsilon_t) \right] + 2 C_2' \quad (14)$$

efetuando a diferença (13) - (14), obtêm-se :

$$\Delta t = t_{\text{tot}(3)} - t_{\text{tot}(2)}^* = C_1' \left[ \exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \exp(\epsilon_1^*) \right] + C_2' \quad (15)$$

A expressão (15) avalia, então, a diferença de tempo obtida quando se lamina com seqüência de dois e três passes. Observa-se que, nas condições estabelecidas, esta diferença é independente do último passe de ambas as seqüências. Nas condições usuais de laminação o termo entre colchêtes é sempre positivo e, sendo

as constantes  $C'_1$  e  $C'_2$  também positivas, a expressão (15) será positiva, significando que, nessas condições, uma sequência de três passes consome mais tempo do que uma sequência de dois passes.

Se se procuram condições para que esta expressão seja nula, tem-se :

$$C'_1 \left[ \exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \exp(\epsilon_1^*) \right] + C'_2 = 0$$

$$\therefore \left[ \exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \exp(\epsilon_1^*) \right] = - \frac{C'_2}{C'_1}$$

Isto é, o termo entre colchêtes deve ser negativo e de valor  $C'_2/C'_1$ . Como  $C'_2$  é maior ou, no mínimo, igual a zero é suficiente estudar a igualdade :

$$\exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \exp(\epsilon_1^*) = 0 \quad (16)$$

para ter-se uma idéia dos níveis de deformação envolvidos quando a diferença de tempo entre as duas sequências é nula.

A tabela 1 mostra exemplos numéricos onde se calcula, para determinados  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , qual deve ser  $\epsilon_1^*$  que anule a expressão (16).

Vê-se que estes valores são altos não correspondendo a condições normais de laminação.

A figura 1 ilustra a resolução gráfica da expressão (16). Representa-se no eixo vertical a deformação acumulada nos dois primeiros passes da sequência de três passes ( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ ) e no eixo horizontal a deformação no primeiro passe da sequência de dois passes.

A família de retas mostrada representa lugares geométricos onde se tem a mesma deformação no segundo passe da sequência de três passes ( $\epsilon_2$ ). Pontos  $((\epsilon_1 + \epsilon_2), \epsilon_1^*)$  sobre uma reta anulam a expressão (16). Cada uma destas retas representa, então, o limite entre regiões onde esta expressão é positiva (a esquerda) ou negativa (à direita da reta).

Seja por exemplo :  $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 1,2$  e  $\epsilon_2 = 0,1$ . Da figura obtém-se  $\epsilon_1^* = 1,49$ .

		2 passes								1 passe			
Aço Fe-Si	H <sub>0</sub> (mm)	H <sub>1</sub> (mm)	H <sub>2</sub> (mm)	e <sub>1</sub> <sup>(1)</sup> (%)	ε <sub>1</sub>	e <sub>2</sub> (%)	ε <sub>2</sub>	e <sub>tot</sub> (%)	ε <sub>tot</sub>	H <sub>1</sub> <sup>*</sup> (mm)	e <sub>1</sub> <sup>*</sup> (%)	ε <sub>1</sub> <sup>*</sup>	
3,2% Si	0,280	0,254	0,225	9,3	0,097	11,4	0,121	19,6	0,219	≤ 0,119	≥ 57,4	≥ 0,853	mais 5 pas- ses
0,98%Si	0,115	0,055	0,025	52,2	0,738	54,5	0,788	78,26	1,526	≤ 0,017	≥ 85,1	≥ 1,901	mais 4 pas- ses

TABELA 1 - Exemplos numéricos de condições para  $(\exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \exp(\epsilon_1^*)) \leq 0$

(1) e = deformação convencional

$$e = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

Nos exemplos seguintes ilustra-se a utilização das expressões deduzidas até aqui aplicadas a condições específicas de laminação.

Exemplo 1 :

Laminador MKW

$$P' = 5000 \text{ kgf}$$

$$B = 350 \text{ mm}$$

$$H_0 = 4,0 \text{ mm}$$

$$V = 120 \text{ m/min}$$

$$a = 0,11 \text{ m/s}^2$$

$$t_s = 18 \text{ s}$$

desta maneira

$$C'_1 = 3,815 \text{ min}$$

$$C'_2 = 0,906 \text{ min}$$

A tabela 2 mostra os tempos por passe e os tempos totais de laminação necessários às sequências de dois e de três passes para uma deformação total,  $\epsilon_t = 0,470$  ( $e_t = 0,375$ ).

Desta forma, tem-se :

$$\Delta t = 5,59 \text{ min}$$

o que representa  $\approx 44\%$  do tempo necessário à sequência de dois passes.

Exemplo 2 :

. Laminador de "folhas" 20 rolos (tipo Rohn)

Sequência de dois passes				Sequência de três passes			
H [mm]	e	$\epsilon$	t [min]	H [mm]	e	$\epsilon$	t [min]
H <sub>0</sub> =4,0 H <sub>1</sub> =3,2	e <sub>1</sub> =0,200	$\epsilon_1=0,223$	t <sub>1</sub> =5,67	H <sub>0</sub> =4,0 H <sub>1</sub> =3,5	e <sub>1</sub> =0,125	$\epsilon_1=0,134$	t <sub>1</sub> =5,27
H <sub>1</sub> =3,2 H <sub>2</sub> =2,5	e <sub>2</sub> =0,220	$\epsilon_2=0,247$	t <sub>2</sub> =7,01	H <sub>1</sub> =3,5 H <sub>2</sub> =3,0	e <sub>2</sub> =0,143	$\epsilon_2=0,154$	t <sub>2</sub> =5,99
				H <sub>2</sub> =3,0 H <sub>3</sub> =2,5	e <sub>3</sub> =0,167	$\epsilon_3=0,182$	t <sub>3</sub> =7,01
	e <sub>t</sub> =0,375	$\epsilon_t=0,470$	t <sub>tot</sub> =12,68		e <sub>t</sub> =0,375	$\epsilon_t=0,470$	t <sub>tot</sub> =18,27

TABELA 2 - Tempos de laminação para sequência de dois e de três passes.

$$\begin{aligned}
 P' &= 20 \text{ kgf} \\
 B &= .100 \text{ mm} \\
 H_0 &= 0,37 \text{ mm} \\
 V &= 60 \text{ m/min} \\
 a &= 0,08 \text{ m/s}^2 \\
 t_s &= 5 \text{ s}
 \end{aligned}$$

desta maneira :

$$\begin{aligned}
 C'_1 &= 1,155 \text{ min} \\
 C'_2 &= 0,5 \text{ min}
 \end{aligned}$$

A tabela 3 mostra os tempos por passe e os tempos totais de laminação necessários para seqüências de sete e de oito passes para uma deformação total  $\epsilon_t = 2,92$  ( $e_t = 0,95$ ).

Desta forma tem-se que a diferença de tempo entre as seqüências de oito e de sete passes é :

$$\Delta t = 12,32 \text{ min}$$

O que representa  $\cong 21,6\%$  do tempo necessário à seqüência de sete passes.

Nº do Passe	Seqüência de 7 passes		Seqüência de 8 passes	
	H [ mm ]	t [ min ]	H [ mm ]	t [ min ]
1	0,296	1,94	0,296	1,94
2	0,222	2,42	0,207	2,56
3	0,155	3,26	0,145	3,45
4	0,093	5,09	0,094	5,05
5	0,056	8,13	0,061	7,51
6	0,031	14,28	0,040	11,18
7	0,020	21,87	0,028	15,76
8	-	-	0,020	21,87
$t_{tot} = 57 \text{ min}$			$t_{tot} = 69,32 \text{ min}$	

TABELA 3 - Tempos de laminação para seqüências de sete e de oito passes

ii - Velocidades de laminação diferentes

Mostra-se a seguir exemplos aplicados a condições de laminação nas quais as velocidades nos passes são diferentes:

Retomando as expressões (11) e (12) e aplicando-as às sequências de dois e três passes, obtêm-se para os tempos totais :

- sequência de três passes :

$$t_{\text{tot}} = C_1 \left[ \exp(\epsilon_1)/V_1 + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2)/V_2 + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/V_3 \right] + C_2(V_1 + V_2 + V_3) + 3 C_3 \quad (17)$$

- sequência de dois passes :

$$t_{\text{tot}}^* = C_1 \left[ \exp(\epsilon_1^*)/V_1^* + \exp(\epsilon_1^* + \epsilon_2^*)/V_2^* \right] + C_2(V_1^* + V_2^*) + 2C_3 \quad (18)$$

e a diferença de tempo entre as duas sequências :

$$\Delta t = t_{\text{tot}} - t_{\text{tot}}^* \quad (19)$$

Para efeito de comparação dos tempos exigidos por estas sequências para uma mesma deformação total ( $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_1^* + \epsilon_2^*$ ) igualam-se as velocidades no último passe ( $V_3 = V_2^*$ ) e a expressão (19) torna-se :

$$\Delta t = C_1 \left[ \exp(\epsilon_1)/V_1 + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2)/V_2 - \exp(\epsilon_1^*)/V_1^* \right] + C_2(V_1 + V_2 - V_1^*) + C_3 \quad (20)$$

A expressão acima, quando resolvida para  $\Delta t = 0$  e em condições nas quais conhecem-se todas as deformações envolvidas ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_1^*$ ) e as velocidades nos passes da sequência de três passes, fornece então valores de  $V_1^*$  que igualam o tempo do primeiro passe da sequência de dois ao tempo dos dois primeiros passes da sequência de três.

A tabela 4 exemplifica o uso desta equação quando se tem as seguintes condições de laminação para as duas sequências :

$$P' = 3500 \text{ kgf}$$

$$\begin{aligned}
 B &= 350 \text{ mm} \\
 H_0 &= 4,0 \text{ mm} \\
 C_1 &= 320,5 \text{ m} \\
 C_2 &= 0,0051 \text{ min}^2/\text{m} \\
 C_3 &= 0,5 \text{ min} \\
 a &= 0,11 \text{ m/s}^2 \\
 V_3 &= V_2^*
 \end{aligned}$$

Fazendo-se variar as velocidades nos passes da seqüência de três passes <sup>(I)</sup> e as velocidades e deformações nos passes da seqüência de dois passes <sup>(II)</sup> mos - tram-se, então, doze casos nas quais a velocidade no 1º passe de uma seqüência de dois passes é a necessária para igualar os tempos das duas seqüências.

Exemplificando : Uma comparação dos casos Ib e IIb mostra que a igualdade do tempo de laminação é atingida através de uma velocidade de 32,47 m/min no primeiro passe do caso II2b quando no caso Ib se tem velocidades de 60 e 90 m/min no primeiro e segundo passe respectivamente.

Caso						Velocidades (m/min)			
	H[mm]	$\epsilon_p$	$\epsilon$ acum.	$\epsilon_p$	$\epsilon$ acum.	a	b	c	d
I	2,96	0,26	0,26	0,30	0,30	60	60	60	120
	2,19	0,26	0,45	0,30	0,60	60	90	120	120
	1,53	0,30	0,62	0,36	0,96	120	120	120	120
II1	2,96	0,26	0,26	0,30	0,30	24,11	29,37	32,44	43,35
	1,53	0,49	0,62	0,66	0,96	120	120	120	120
II2	2,68	0,33	0,33	0,40	0,40	26,65	32,47	35,88	48,00
	1,53	0,43	0,62	0,56	0,96	120	120	120	120
II3	2,43	0,39	0,39	0,50	0,50	29,41	35,85	39,63	53,07
	1,53	0,37	0,62	0,46	0,96	120	120	120	120
II4	2,20	0,45	0,45	0,60	0,60	32,52	39,65	43,84	58,79
	1,53	0,30	0,62	0,36	0,96	120	120	120	120

TABELA 4 - Condições de velocidades para igualdade de tempo de seqüências de dois e três passes.

Comparando os valores de velocidades fornecidos na tabela 4 nota-se que as velocidades  $V_1^*$  necessárias à igualdade de tempo das duas seqüências são relativamente pequenas (em relação às outras velocidades) e como não representam condições reais de laminação tem-se confirmado o fato de que uma seqüência de dois passes consome menos tempo do que uma seqüência de três passes.

### iii - Diferentes distribuições de deformação

Outro parâmetro de interesse no cálculo de uma seqüência de passes é a influência no tempo de laminação da distribuição de deformações nos passes.

Para exemplificar, suponha seqüências de três passes com distribuições diferentes para uma mesma deformação total e em condições de mesma velocidade nos passes.

Isto é :

$$\text{Seqüência I : } \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

$$\text{Seqüência II : } \epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3 \quad (21)$$

$$\text{Seqüência III : } \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$$

$$\text{onde } \sum_{i=1}^3 \epsilon_i = \epsilon_{\text{tot}} .$$

desta forma, retomando a expressão (12), tem-se :

$$(t_{\text{tot}})_i = \frac{C_1}{V} \left[ \exp(\epsilon_1)_i + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2)_i + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)_i \right] + 3 C_2 V + 3 C_3$$

$$i = \text{I, II e III}$$

Onde  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $V$  são constantes para as três seqüências.

Devido às condições estabelecidas em (21), tem-se :

$$(\epsilon_1)_{\text{II}} > (\epsilon_1)_{\text{I}} > (\epsilon_1)_{\text{III}}$$

$$(\epsilon_1 + \epsilon_2)_{\text{II}} \geq (\epsilon_1 + \epsilon_2)_{\text{I}} \geq (\epsilon_1 + \epsilon_2)_{\text{III}}$$

Distribuição Decrescente			Distribuição Decrescente			Distribuição constante			Distribuição crescente			Distribuição crescente		
H (mm)	$\epsilon_p$	t (min)												
2,96	0,30	6,26	3,12	0,25	6,00	3,27	0,20	5,77	3,44	0,15	5,54	3,62	0,10	5,32
2,43	0,20	7,39	2,55	0,20	7,09	2,68	0,20	6,80	2,82	0,20	6,52	2,96	0,20	6,26
2,20	0,10	8,04	2,20	0,15	8,04	2,20	0,20	8,04	2,20	0,25	8,04	2,20	0,30	8,04
$t_{tot} = 21,69 \text{ min}$			$t_{tot} = 21,13 \text{ min}$			$t_{tot} = 20,62 \text{ min}$			$t_{tot} = 20,10 \text{ min}$			$t_{tot} = 19,63 \text{ min}$		

TABELA 5 - Influência da distribuição de deformações no tempo de laminação.

e por isto

$$(\epsilon_1 + (\epsilon_1 + \epsilon_2))_{II} > (\epsilon_1 + (\epsilon_1 + \epsilon_2))_I > (\epsilon_1 + (\epsilon_1 + \epsilon_2))_{III}$$

desta forma

$$t_{(tot)II} > t_{(tot)I} > t_{(tot)III}$$

Isto é, para as condições mostradas, uma sequência que tenha distribuição decrescente de deformações por passe é a que requer mais tempo de laminação.

A tabela 5 ilustra o que foi dito acima mostrando os tempos de laminação necessários às três sequências citadas. No caso de distribuição crescente e decrescente mostra-se também a influência das deformações parciais através de variações das mesmas.

Os tempos calculados correspondem às seguintes condições de laminação :

$$H_0 = 4,00 \text{ mm}$$

$$B = 350 \text{ mm}$$

$$P' = 5000 \text{ kgf}$$

$$a = 0,11 \text{ m/s}^2$$

$$V = 120 \text{ m/min}$$

$$C_3 = 0,5 \text{ min}$$

$$\epsilon_t = 0,60$$

## 2.2 - Incremento da Produtividade através da Objetivação do processo de Laminação mediante o Cálculo da Sequência de Passes

Entende-se por objetivação do processo de laminação a eliminação da influência do operador na condução do processo deixando a seu critério somente aqueles aspectos imprevisíveis ou de difícil descrição por um modelo matemático (5) (por exemplo a formação de ondas nos meios e nas bordas da chapa, primeiro passe, etc).

Desta forma, o resultado do cálculo da sequência de passes será simultaneamente especificação e instrução para os operadores do laminador com respeito às seguin

tes grandezas :

- número de passes
- deformação por passe
- ajustagem das tensões a frente e a ré, e
- regulagem das velocidades.

Neste sentido são necessários a observação e o registro permanente da carga de laminação e da potência elétrica exigida, para verificar o grau de certeza dos parâmetros pré-calculados.

A elaboração de uma sequência de passes não é somente o resultado de uma tarefa matemática. Outros fatores envolvidos são a experiência e o conhecimento dos operadores do laminador, possibilitando um aproveitamento permanente dos conhecimentos teóricos e empíricos.

A objetivação do processo é então necessária para garantir um nível de qualidade constante dos produtos no que diz respeito às dimensões, à planicidade, à qualidade superficial e às propriedades mecânicas.

O processo de objetivação deve envolver também a especificação da matéria prima adequada e, no caso de material já existente, deve determinar as necessárias condições de produção.

#### A importância da curva de fluxo

Além de informações que possibilitem o uso otimizado do laminador, um requisito preliminar de grande importância é conhecer o comportamento do material durante o processo de laminação.

Esta informação é obtida através da "curva de fluxo" que representa a relação entre a tensão de escoamento e a deformação do material, em determinadas condições de temperatura e velocidade de deformação.

No caso de laminação a frio de aços ela é, em geral, independente da velocidade de deformação, dependendo fundamentalmente da composição química do aço e das condições de processamento de matéria prima inicial (Laminação a quente, tratamentos térmicos, etc).

Tem-se comumente três tipos de curvas de fluxo como é mostrado na figura 2.

Por não existir um conhecimento completo dos mecanismos físicos envolvidos no processo de deformação, não se tem um modelo capaz de descrever integralmente a curva de fluxo de um material em qualquer circunstância. Na área de conformação mecânica a frio dos metais razoáveis aproximações são obtidas através do uso de relações tais como :

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (\text{Hollomon})$$

$$\sigma = A + B \epsilon^m \quad (\text{Ludwik})$$

$$\sigma = \sum_{i=0}^n K_i \epsilon^i \quad (\text{forma polinomial})$$

cujos coeficientes são características do material. Existem numerosos métodos de ensaio para a determinação da curva de fluxo. Num trabalho posterior (6) será analisado pelo menos um método realizável em condições industriais.

A curva de fluxo deve ser associada ao material com que foi determinada e não se deve extrapolar sua validade para mesmos materiais provenientes de diferentes fornecedores, especialmente para aços de alto carbono.

Na figura 3 são mostradas duas curvas de fluxo de um aço de mesma composição química fornecido por duas empresas diferentes. Observa-se que as curvas diferem muito entre si evidenciando as diferentes condições de processamento a que foram submetidos os materiais.

Se, por exemplo, se deseja obter, a partir destes materiais, um produto de espessura final 1,95 mm e tensão de escoamento em torno de 100 kgf/mm<sup>2</sup> (faixa hachurada do desenho), observa-se o seguinte :

Utilizando o material A é necessária uma deformação total ( $\epsilon_t$ ) de 30%. Nestas condições nunca é atingida a tensão de escoamento desejada.

O conhecimento prévio deste fato evitaria sua utilização na produção de uma chapa com características mecânicas inaceitáveis para o cliente e as óbvias consequências na queda da produtividade.

Por outro lado, utilizando o material B observa-se que após obter a espessura

final desejada ( $e_t = 25\%$ ) a tensão de escoamento do material ultrapassa a faixa de tolerância. A efeito de satisfazer o cliente e tentar "salvar" o material são necessárias etapas adicionais de processamento tais como recozimento e, muitas vezes, por exigências de acabamento superficial, mais um passe de laminação. Isto acarreta gastos adicionais e maiores tempos de processamento com a consequente diminuição da produtividade.

O exemplo mostrado ilustra claramente a necessidade do conhecimento das curvas de fluxo de cada material particularmente em casos nos quais as condições de processamento na etapa de laminação a quente podem diferir de fornecedor a fornecedor.

Deve ser observado que somente o valor da tensão de escoamento inicial da matéria prima não basta para fazer uma previsão do comportamento mecânico do material durante a laminação.

Desta forma, a curva de fluxo, tem-se mostrado de grande utilidade na seleção da matéria prima inicial para a obtenção de um determinado produto. Além do mais o seu conhecimento é necessário para o cálculo da sequência de passes. Como mostrado anteriormente uma divisão adequada dos passes permite uma minimização do tempo de laminação.

Em um próximo trabalho (6) será mostrada a forma de utilização de uma curva de fluxo no cálculo de uma sequência de passes.

#### Alguns aspectos sobre a problemática do cálculo da sequência de passes

Foi mostrado que a otimização da sequência de passes é um instrumento hábil para planejar e dirigir a produção na laminação. É errôneo interpretar que esta tarefa seja de exclusividade do engenheiro da produção; pelo contrário, deve ser o resultado de uma estreita colaboração entre todas as áreas envolvidas. Isto significa uma participação dos setores de compra e venda, de preparação da produção, de controle da qualidade e da produção. Além do mais a sequência de passes deve estar em constante revisão e aprimoramento visando sempre o incremento da produtividade.

É fundamental que a participação mencionada seja feita através de um modelo organizacional claramente estabelecido para obter o sucesso esperado no aumento da

produtividade através do cálculo da sequência de passes. Não existe para isto nenhuma regra universal desde que cada usina tem equipamentos e características individuais.

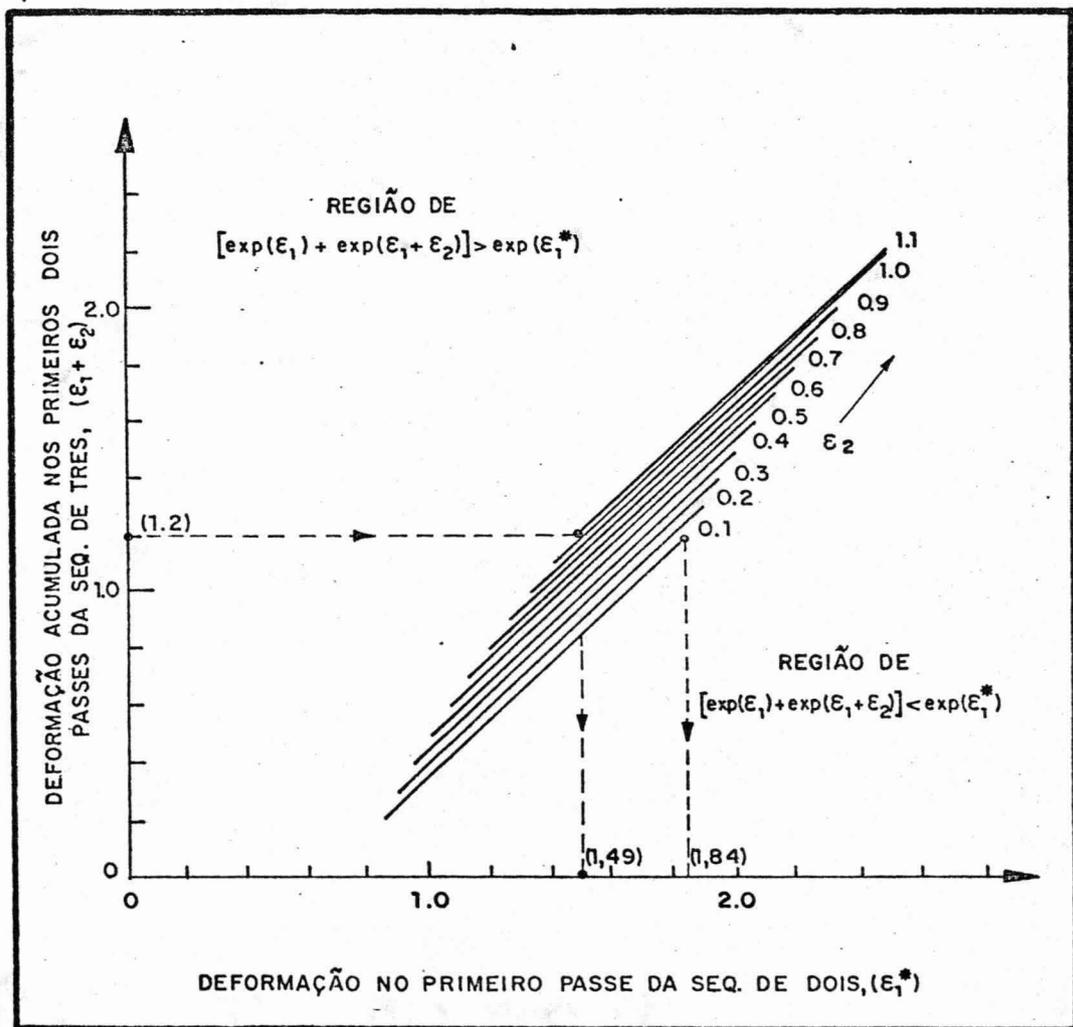
Existem diversos modelos matemáticos de possível aplicação no cálculo da sequência de passes, citam-se (7), (8) e (9), que podem ser instrumentados em um microcomputador. Dependendo do tipo e instrumentação do laminador disponível, das características dos produtos e da experiência e conhecimento das pessoas envolvidas pode ser recomendado um modelo : teórico, teórico-empírico ou puramente empírico.

Finalmente destaca-se que deve ser feita uma integração do cálculo da sequência de passes no sistema de previsão e controle da produtividade desde que ela afeta os custos. Naturalmente o objetivo é fazer o máximo possível com o mínimo necessário.

### 3 - Referências Bibliográficas

- 1 - R.A. da Cunha Peixoto, H.Helman. Otimização da sequência de passes na laminação a frio de chapas. Metalurgia - ABM, Vol. 35, nº 263, pp. 667-671, Outubro 1979.
- 2 - J.M.R.Caccioppoli - Sequência de passes na laminação de chapas. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Novembro 1980.
- 3 - R.C.Ribeiro da Silva, H.Helman. Determinação da sequência de passes na laminação a quente de placas de aço. Metalurgia - ABM, Vol.39, nº 306, pp.267-271, Maio 1983.
- 4 - M.P.C.Vieira, H.Helman, I.Piorko. Incremento da produtividade na laminação contínua de produtos planos. A ser publicado.
- 5 - I.Piorko. Das Berechnen von Stichplänen beim Kaltwalzen dünner Bänder, Grenzen des Rechneinsatzes. (Cálculo da sequência de passes na laminação de chapas finas, limitação da aplicação do computador). Z. Metallkde, Vol.63, nº 11, pp. 690-697, 1972.

- 6 - M.P.C.Vieira, H.Helman, I.Piorko. Incremento da produtividade na laminação a frio de produtos planos pelo cálculo da sequência da passes. Parte II. A ser publicado.
- 7 - E.Orowan. The calculation of roll, in hot and cold flat rolling. Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 150, nº 152, pp. 140-167, 1943.
- 8 - D.R.Bland, H.Ford. The calculation of roll force and torque in cold strip rolling with tensions. Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 159, pp. 144-153, 1948.
- 9 - S.Ekelund. The analysis of factors influencing rolling pressure and power consumption in the hot rolling of steel. Steel, Vol. 93, nºs 8-14, 1933.



FIGURÁ 1

Resolução gráfica de  $\exp(\epsilon_1) + \exp(\epsilon_1 + \epsilon_2) = \exp(\epsilon_1^*)$

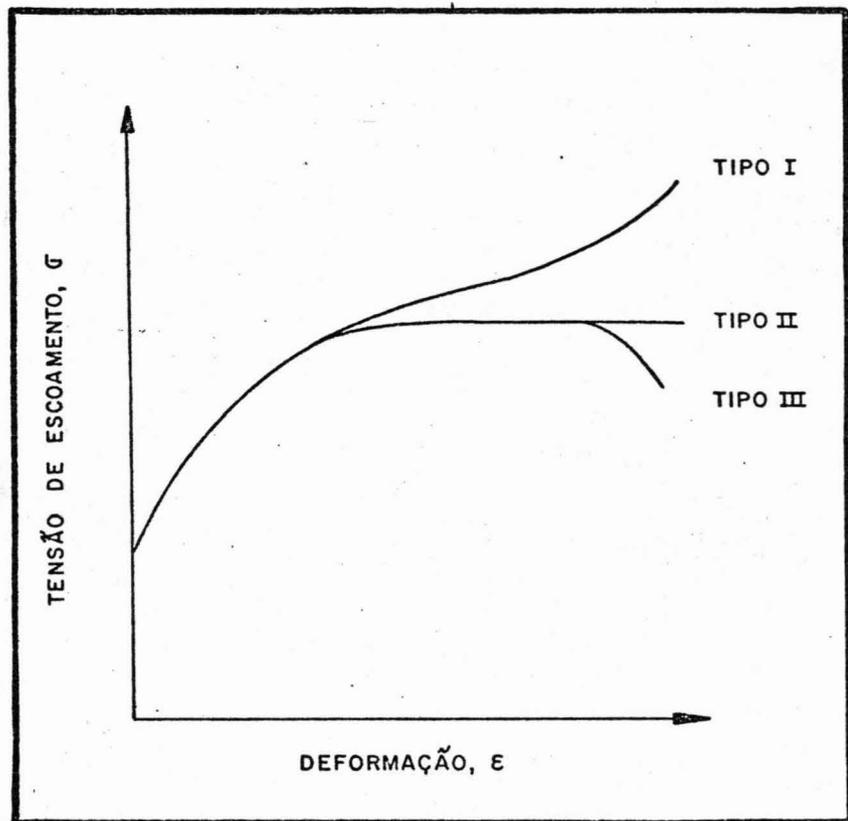


FIGURA 2

Diferentes tipos de curvas de fluxo.

D-85					
C	Si	Mn	P	S	N
0,86	0,22	0,50	0,028	0,030	0,006

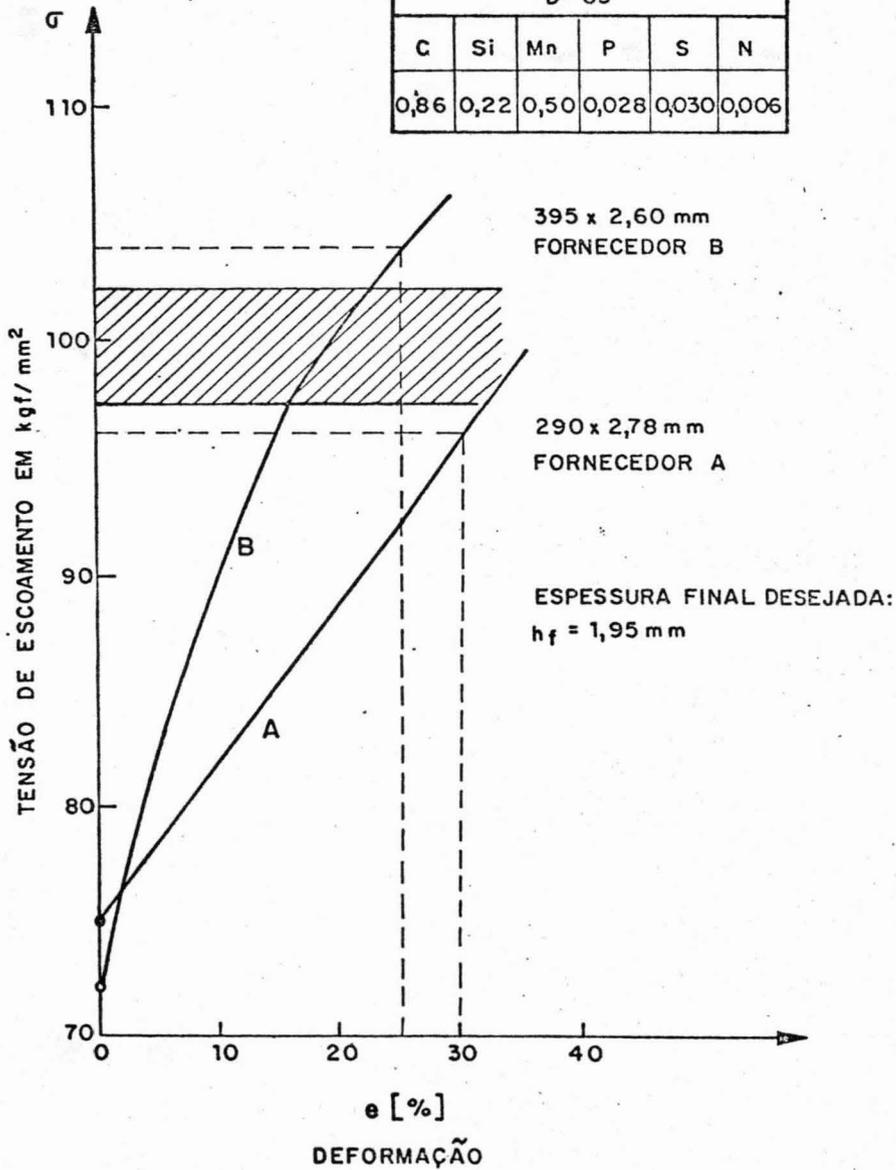


FIGURA 3

Diferentes curvas de fluxo correspondentes a um mesmo tipo de aço.