

EXEMPLO DE CÁLCULO DE UMA ESCALA DE PASSES PARA LAMINADOR DE PLACAS (1)

Edmar José Machado Correa (2)

Hermínio de Oliveira Fernandes (3)

Júlio Maria Campos (4)

José Carlos Machado (5)

Adilson de Paula Roque (6)

R E S U M O

Apresenta-se a estruturação de um roteiro de cálculo convencional de escala de passes para um laminador de placas e aplica-se este roteiro em um exemplo projetado para o laminador universal de placas da CST.

-
- (1) Trabalho a ser apresentado no Simpósio de Laminação da COLAM, no Rio de Janeiro, em setembro de 1981
 - (2) Membro da ABM, Engº Mecânico, Área de Laminação da CST
 - (3) Membro da ABM, Engº Metalurgista, Área de Laminação da CST
 - (4) Membro da ABM, Técnico Industrial Mecânico, Área de Laminação da CST
 - (5) Membro da ABM, Técnico Industrial, Área de Laminação da CST
 - (6) Membro da ABM, Engº Metalurgista, Área de Laminação da CST

1 - INTRODUÇÃO

Na estruturação de um roteiro de cálculo de uma escala de passes de ve-se considerar os seguintes fatores:

- características do laminador;
- características do material a laminar;
- premissas operacionais, baseadas na experiência da equipe encarregada dos cálculos, visando obter bons índices de produtividade e qualidade, respeitadas as limitações do equipamento.

Da conjugação destes fatores surge o roteiro, às vezes aperfeiçoado para a forma de modelo.

A CST poderá utilizar o modelo de uma de suas empresas associadas para cálculo, via computador, das escalas de passes que precisar. O roteiro que ora se apresenta será utilizado para verificação daquele modelo e para alterações de escalas que se julgarem necessárias quando do início de operação. Deverá também servir de ponto de partida para, no futuro, se desenvolver um modelo de cálculo na empresa.

2 - CARACTERÍSTICAS DO LAMINADOR

- Laminador universal formado por uma cadeira vertical e uma horizontal, duo, reversível
- Distância entre cadeiras 2650 mm
- Cadeira horizontal locada após a cadeira vertical
- Características da cadeira vertical:
 - . Acionamento: um motor de 4500 HP, transmissão através de eixos e caixa redutora com razão de redução 1,48/1
 - . Faixa de diâmetros dos cilindros: 1015 mm a 940 mm
 - . Comprimento útil dos cilindros: 1955 mm
 - . Aberturas entre cilindros: 510 mm a 2335 mm
 - . Pressão máxima sobre os cilindros: 2000 t
 - . Mill modulus médio: 800 t/mm

- . Velocidade básica do motor: 70 RPM (151 MPM com cilindros novos)
- . Velocidade máxima do motor: 140 RPM (302 MPM com cilindros novos)
- . Não foi projetada para laminar nos passes de reversão
- Características da cadeira horizontal:
 - . Acionamento: dois motores de 6500 HP cada, um motor por cilindro, razão da redução 1/1
 - . Faixa de diâmetros dos cilindros: 1270 mm a 1145 mm
 - . Comprimento útil dos cilindros: 2.435 mm
 - . Aberturas entre cilindros: zero a 2250 mm
 - . Pressão máxima sobre os cilindros: 6000 t
 - . Mill modulus médio 1600 t/mm
 - . Velocidade básica dos motores: 35 RPM (139,5 MPM com cilindros novos)
 - . Velocidade máxima dos motores: 70 RPM (279 MPM com cilindros novos)
 - . Tempo de aceleração de zero até a velocidade básica: 1s
 - . Tempo de aceleração de 35 até 70 RPM: 2s
- Tempo de manipulação para um lingote: 6s
- Tempo de reversão: 6s
- Tempo de intervalo entre lingotes(gap time): 15s
- Carga máxima temporária suportável pelos motores: 225 %
- Carga máxima instantânea suportável pelos motores: 275 %

3 - ENUNCIADO DO EXEMPLO E CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL A LAMINAR

- Lingote de aço efervescente, baixo carbono, dimensões médias 880 mm esp. x 1075 mm larg. x 2600 mm comp. peso 16,48 t, a ser transformado em placa de secção a quente 206 mm x 761 mm
- Peso específico do lingote frio: $6,7 \text{ kg/dm}^3$
- Peso específico da placa fria : $7,68 \text{ kg/dm}^3$
- Razão de dilatação linear entre a temperatura ambiente até a de laminação: 15/1000

- Redução máxima admissível de secção em cada passe: 35 %
- Ângulo de mordida máximo: 22°

4 - PREMISSAS BÁSICAS

- Utiliza-se o peso específico de 6,7 kg/dm³ nos passes 1 a 3, 7,1 nos passes 4 a 6, 7,4 nos passes 7 a 9 e $7,68 \div (1,015)^3 = 7,5$ do passe: 10 em diante
- A cadeira mestra é a horizontal. A velocidade para mordida será em todos os passes 35 RPM (139,5 MPM) e a de laminação 70 RPM (279 MPM) A cadeira vertical estará sempre ajustada de modo a acompanhar a horizontal
- A laminação será dividida em duas fases, desbaste e acabamento. O limite entre elas é estabelecido mais à frente
- A potência dos motores, o ângulo de mordida máximo e a redução máxima por passes limitam a magnitude de cada passe. Na fase de desbaste procura-se, exceto no primeiro passe, aplicar no laminador horizontal 90% da redução absoluta máxima que o ângulo de mordida permite $(0,9 \text{ Diâm. Cil. Horiz. } [1 - \cos 22^\circ] = 84 \text{ mm})$. Se a potência dos motores ou a redução máxima foram ultrapassados recalcula-se com $0,9 \times 0,84 \approx 76 \text{ mm}$ e assim sucessivamente até atingir um valor igual ou menor ao máximo. No primeiro passe aplica-se $0,65 \times 93 \approx 60 \text{ mm}$ (para evitar incrustações de carepa, rompimento de pele e acentuação do rabo de peixe).

No laminador vertical inicia-se com 50% da redução absoluta máxima $(0,5 \text{ Diam. Cil. Vert. } [1 - \cos 22^\circ] = 0,5 \times 74 = 37 \text{ mm})$ e aumenta-se 10% a cada passe. No caso da potência ou redução máxima serem ultrapassados recalcula-se com 10% menos. Adota-se como carga máxima nos motores 160%.

Na fase de acabamento não há tais problemas pois as reduções são leves.

- Inicia-se a laminação com dois passes de largura no laminador horizontal, tomba-se o lingote e prossegue-se com um passe vertical, dois horizontais e assim sucessivamente. Quando a espessura estiver em torno de 450 mm, a largura à saída do próximo passe com o laminador vertical deve ser igual à largura nominal (761 mm) $\pm \frac{0}{35}$; se for superior, aplica-se tantos passes consecutivos de redução de largura quantos forem necessários para atingir aquela faixa. Em seguida, prossegue-se normalmente.
- O tempo do laminador vertical é considerado incluído no tempo de reversão

5 - FÓRMULAS E SÍMBOLOS UTILIZADOS

- Δh = redução absoluta no passe
- Δl = alargamento = $0,35 \frac{\Delta h}{h_1} \times \sqrt{R \times \Delta h}$, (Siebel), sendo:
 h_1 = espessura à entrada;
 R = raio dos cilindros;
- Δe = alargamento de espessura
- t/HEF = tonelagem produzida por hora efetiva de laminação = esp. à saída do passe (m) x larg. à saída do passe (m) x veloc. periférica cils. (M P M) x 60 x peso específico (kg/dm^3)
- Relação de áreas = $\frac{\text{secção à saída do passe}}{\text{secção inicial do lingote}} \times 100$
- HHT = HP hora consumido para a redução da secção do lingote à secção considerada; é obtido na curva HHT em função da relação de áreas
- ΔHHT = HHT no passe n menos HHT no passe n-1
- HP requerido para o passe = $t/HEF \times \Delta HHT$
- Carga nos motores = $\frac{\text{HP requerido para o passe}}{\text{potência nominal}} \times 100$
- Relação de áreas no passe = $\frac{\text{secção à saída do passe}}{\text{secção à entrada do passe}} \times 100$

- Redução de área no passe = 100 - Relação de áreas no passe
- Sincronismo de velocidades entre cadeiras:
 veloc. cils. vert. (MPM) = Veloc. Cil. Horiz. (MPM) x

$$\frac{\text{Largura saída lam. horiz. x esp. saída lam. horiz.}}{\text{Largura saída lam. vert. x esp. saída lam. vert.}}$$
- Alongamento = $\frac{1}{\text{relação de áreas}} \times 100$
- Arco de contato = $\sqrt{R \times \Delta h}$
- Área de contato = largura x $\sqrt{R \times \Delta h}$
- Força de laminação (t) = $P = \frac{30 \times 745,6 \times \text{HP requerido}}{9,81 \times \pi \times N(\text{RPM}) \times \text{arco de contato (mm)}}$,
 sendo "N" o número de RPM dos cilindros
- Cedimento elástico = $P \div \text{Mill Modulus}$
- Pre Set = dimensão calculada - cedimento elástico
- Torque (t x m) = $T = 2 \times \text{coef.do braço de torque} \times P = 2 \times 0,5 \times$
 $\text{arc.cont.} \times P = \text{arco cont.} \times P$
- $v = v_0 + at$ e $e = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$, equações do movimento uniformemente
 acelerado, utilizadas para o cálculo do tempo de contato entre ci
 lindros e material em laminação
- h_n = espessura nominal da placa a quente
- b_n = largura nominal da placa a quente
- x = fator de compensação do cedimento elástico no passe de acaba -
 mento da espessura
- A = fator de compensação do alargamento sob o último passe de aca
 bamento da espessura

6 - DETERMINAÇÃO DO LIMITE ENTRE AS FASES DE DESBASTE E ACABAMENTO

O limite entre as fases de desbaste e acabamento ocorre quando se su
 bstitui a eficiência de produção no aproveitamento máximo da capacida
 de do Laminador pelo refino das reduções na obtenção de uma melhor -
 conformação final da placa.

Determinou-se que uma boa conformação final seria obtida pelo refino

das reduções dos quatro últimos passes de acabamento (dois de acabamen
to da espessura e dois de acabamento da largura).

Logo, o limite entre as fases é determinado pelos penúltimos passes de
acabamento de espessura e de largura, respectivamente.

Por outro lado, o cálculo dos passes de acabamento é feito por regres
são, a partir do último passe, forçando o ajuste no limite das fases.

7 - CÁLCULO DOS PASSES DE DESBASTE

Passo 1 H: $\Delta h = 60 \text{ mm} \therefore \text{larg. saída} = 1075 - 60 = 1015 \text{ mm}$

$$\Delta e = 0,35 \times \frac{60}{1075} \times \sqrt{635 \times 60} = 4 \text{ mm} \therefore \text{Esp. Saída} = \\ 880 + 4 = 884 \text{ mm}$$

$$t/\text{HEF} = 1,015 \times 0,884 \times 279 \times 60 \times 6,7 = 100635$$

$$\text{Rel. áreas} = \frac{1015 \times 884}{1075 \times 880} \times 100 = 95\%$$

$$\therefore \text{HHT} = 0,15 = \Delta\text{HHT} \text{ (por ser o primeiro passe)}$$

$$\therefore \text{HP Req.} = 100635 \times 0,15 = 15095$$

$$\therefore \text{Carga mots.} = \frac{15095}{13000} \times 100 = 116\%$$

$$\text{Rel. áreas no passe} = \text{rel. áreas (por ser o 1º passe)} = 95\%$$

$$\therefore \text{Red. passe} = 5\%$$

$$\text{Alongamento} = \frac{1075 \times 880}{1015 \times 884} = 1,05$$

$$\text{Arco de contato} = \sqrt{635 \times 60} = 195 \text{ mm}$$

$$\text{Área de contato} = 195 \times 884 = 172380 \text{ mm}^2$$

$$P = \frac{30 \times 745,6 \times 15095}{9,81 \times 3,14 \times 70 \times 195} = 803 \text{ t}$$

$$\text{Ced. elástico} = 803 \div 1600 = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Pre Set} = 1015 - 0,5 = 1014,5 \text{ mm}$$

$$\text{Torque} = 0,195 \times 803 = 157 \text{ t/m}$$

Tempo de contato:

Aceleração entre 35 e 70 RPM (139,5 a 279 MPM):

$$\frac{279}{60} = \frac{139,5}{60} + a \times 2 \therefore a = 1,1625 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Comprimento total laminado} = 2,6 \times 1,05 = 2,73 \text{ mm}$$

$$\text{Comp.lam.do se atingir 279 MPM} = \frac{139,5}{60} \times 2 + \frac{1}{2} \times 1,1625 \times x^2 = 6,97$$

Vê-se portanto que este passe termina antes de se atingir a velocidade máxima. Vejamos o tempo gasto:

$$2,73 = \frac{139,5}{60} \times t + \frac{1}{2} \times 1,1625 \times t^2 \therefore t = 0,9 \text{ s}$$

Para os demais passes segue-se o mesmo roteiro, respeitando-se as limitações dos equipamentos e do material. No caso do cálculo do tempo de contato, a partir de certo ponto o passe só termina após se atingir a velocidade máxima. Nestes passes o tempo de contato será 2 segundos mais o tempo necessário para laminar o comprimento restante à velocidade constante de 279 MPM.

8 - CÁLCULO DOS PASSES DE ACABAMENTO

8.1 - Determinação unidimensional à saída dos passes

Para o cálculo regressivo dos passes de acabamento, partiu-se do princípio de que a espessura de saída do último passe de acabamento (15 H) seria igual à espessura nominal a quente (h_n). Assim, pode-se estabelecer a espessura de saída no penúltimo - passe de acabamento da espessura (14 H) e a largura de saída no último passe de acabamento da largura (15 V), considerando-se um alargamento fixo de 5 mm sob a redução do último passe de espessura (15 H).

Logo, temos que:

a) Passe 15 H = espessura de saída = 206 mm

b) Passe 15 V = largura nominal - A = 761 - 5 = 756 mm

c) Passe 14 H = 15 H + 12 $\left(\frac{0,8 b_n - 0,4 h_n}{1000} \right) =$
 $= 206 + 12 \left(\frac{0,8 \times 761 - 0,4 \times 206}{1000} \right)$

$$= 206 + 12 \times 0,52 = 212 \text{ mm}$$

Nota: A fórmula $12 \left(\frac{0,8 \text{ bn} - 0,4 \text{ hn}}{1000} \right)$ é o determinante do

Δh para se obter um alargamento ≈ 5 mm sob o último-passe de acabamento da espessura (15 H)

d) Passe 16 V

No caso do exemplo em pauta, o último passe de acabamento é de espessura. Se o cliente exigisse um passe de largura como último passe de acabamento, a largura de saída no passe 15 V seria igual à largura nominal (fator A = 0), como penúltimo passe. A largura de saída no passe 16 V (último passe) seria igual à do 15 V.

e) Embora não pertença a fase de acabamento, o passe 13 V precisa ser determinado, como transição de fases, em função do penúltimo (ou último). Isso seria, como dito anteriormente, um ajuste na fase de desbaste.

Para que não haja alargamento excessivo da espessura quando do passe 15 V, o Δh entre os passes 13 V e 15 V deverá ficar em torno de 35 mm, considerando-se o alargamento (da largura) sob as reduções dos passes 13 H e 14 H.

Assim, para o nosso exemplo, determinou-se que a largura de saída no passe 13 V seria:

$$(\text{Passe 13 V}) = \text{Largura nominal} - 10 \text{ mm} = 761 - 10 = 751 \text{ mm}$$

8.2 - Determinação da seção de saída nos passes de acabamento

a) Passe 14 H

. Espessura de saída = 212 mm

. Largura de saída = largura de entrada + $\Delta l =$

$$= 763 + \frac{300 \Delta h}{0,8 \text{ larg. ent.} - 0,4 \text{ esp. saída}} \quad (*)$$

$$= 763 + \frac{300 \times 51}{0,8 \times 763 - 0,4 \times 212} = 763 + 29 = 792 \text{ mm}$$

b) Passe 15 V

. Largura de saída = 756 mm

. Espessura saída = espessura entrada + Δe

$$= 212 + 0,35 \frac{\Delta h}{h_1} \sqrt{R \Delta h} (**)$$

$$= 212 + 0,35 \frac{36}{792} \sqrt{635 \times 36}$$

$$= 212 + 2 = 214 \text{ mm}$$

c) Passe 15 H

. Espessura de saída = 206 mm

. Largura de saída = largura de entrada + $\Delta \ell$

$$= 756 + \frac{300 \times 8}{0,8 \times 756 - 0,4 \times 206} (*)$$

$$= 756 + 4,59 = 760,59 \text{ mm}$$

Nota:

(*) - Fórmula empírica para cálculo do alargamento, adaptada da prática de algumas siderúrgicas japonesas, aplicável somente ao alargamento da largura e nas fases de acabamento:

$$\Delta \ell = \frac{0,3 \Delta h}{0,8 b_n - 0,4 h_n} = \frac{300 \Delta h}{0,8 b_n - 0,4 h_n} \cdot \frac{1}{1000}$$

(**) - Fórmula de Siebel

8.3 - A determinação dos demais valores do exemplo de cálculo foram efetuadas seguindo o mesmo roteiro do passe 1 H.

9 - CÁLCULO DO TEMPO DE LAMINAÇÃO E DA TONELAGEM HORÁRIA

O quadro de resultados dos cálculos mostra que o tempo de contato entre laminado e cilindros para um lingote é de 30 segundos, o de reversão e manipulação 102 segundos e o total 132 segundos.

A cada lingote deve-se acrescentar 15 segundos de tempo de intervalo entre lingotes.

Tem-se então para laminação simples (1 lingote por vez) a produção de

$$\frac{16,48 \times 60 \times 60}{147} \cong 404 \text{ t/hora útil.}$$

Para laminação em tandem ter-se-ã $\frac{2 \times 16,48 \times 60 \times 60}{177} \cong 670 \text{ t/hora}$ útil.

10 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS

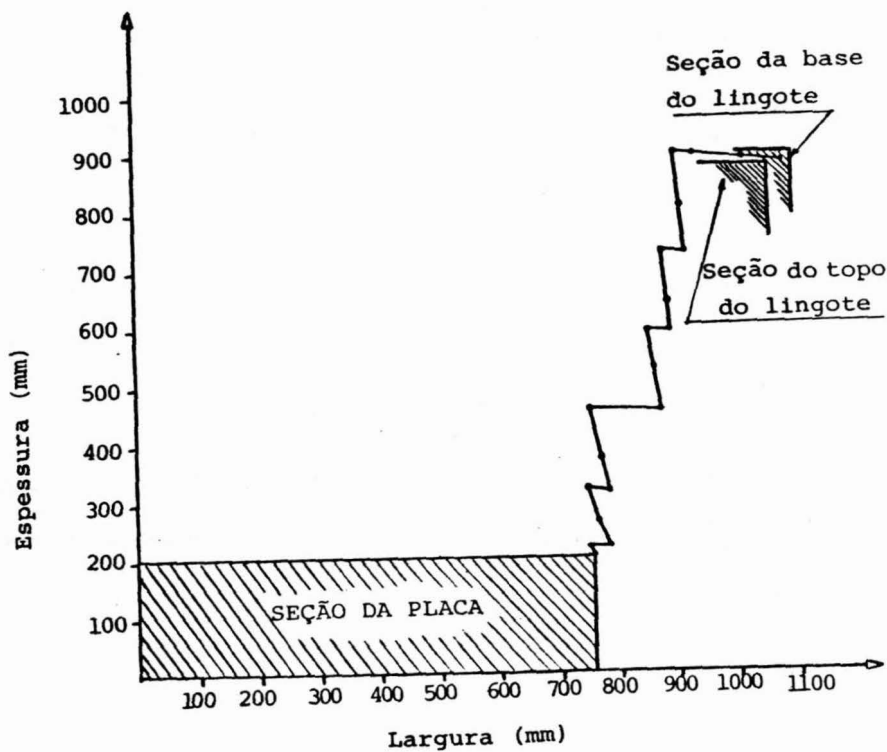
PASSE	FASE	RPM CIL.	MPM CIL.	LARG. SAÍDA (mm)	ESP. SAÍDA (mm)	Δh (mm)	HP REQUE- RIDO	CARGA MOTS. (%)	RED. ÁREA (%)	ALONG. ACUMUL.	ARCO CONT. (mm)	ÁREA CONT. (mm²)	FORÇA LÁMIN. (t)	PRESET (mm)	TORQUE (t x m)	TEMPO (SEGUNDOS)				OBSERVAÇÕES
																CONT	REV.	MANIP.	TOTAL	
1 H	D E S B A S T E	70	279	1015	884	60	15095	116	5	1,05	195	172380	803	1014,5	157	0,9	6	-	6,9	Passé larg.lam.horizont.
2 H		70	279	931	891	84	13955	107	8	1,14	231	205521	627	930,6	145	1	6	-	7	" " "
3 V		80	255	901	893	30	5773	128	3	1,18	123	109839	426	900,5	52	-	-	6	6	Tombamento do lingote
3 H		70	279	909	809	84	15732	121	9	1,29	231	209979	706	808,6	163	1,12	6	-	7,12	" " "
4 H		70	279	917	725	84	20544	158	10	1,42	231	211827	923	724,4	213	1,22	6	-	7,22	" " "
5 V		78	249	880	727	37	6108	136	4	1,48	137	99599	415	879,5	57	-	-	-	-	" " "
5 H		70	279	889	643	84	20535	158	11	1,65	231	205359	922	642,4	213	1,34	6	-	7,34	" " "
6 H		70	279	894	593	50	20358	157	7	1,78	178	159132	1186	592,3	211	1,46	6	-	7,46	" " "
7 V		78	249	857	595	37	5660	126	4	1,85	137	81515	385	856,5	53	-	-	-	-	" " "
7 H		70	279	865	528	67	20643	159	10	2,07	206	178190	1039	527,4	214	1,64	6	-	7,64	" " "
8' H		70	279	876	452	76	19885	153	13	2,39	220	192720	938	451,4	206	1,83	6	-	7,83	" " "
9 H		70	279	819	456	57	8909	68	6	2,53	190	86640	486	818,7	92	1,91	6	-	7,91	Manipulação do esboço
10 H		70	279	761	461	58	6607	51	6	2,7	192	88512	357	760,8	68	2,01	6	-	8,01	Passé larg.lam.horizont.
11 H		70	279	776	377	84	20201	155	17	3,23	231	179256	907	376,4	209	2,31	6	-	8,31	" " "
12 H	70	279	787	318	59	17281	133	17	3,78	193	151891	929	317,4	179	2,61	6	-	8,61	Tombamento do lingote	
13 V	Ajuste	73	233	751	320	36	3779	84	4	3,94	135	43200	278	750,7	37	-	-	-	-	" " "
13 H	A C A B A M E N T O	70	279	763	263	57	20155	155	17	4,71	190	144970	1100	262,3	209	3,13	6	-	9,13	" " "
14 H		70	279	792	212	51	15810	122	16	5,63	180	142560	911	211,4	164	3,65	6	-	9,65	" " "
15 V		85	270	756	214	36	2948	65	4	5,85	135	28890	186	755,8	25	-	-	-	-	" " "
15 H		70	279	761	206	8	1968	15	3	6,03	71	54031	288	205,8	20	3,87	-	-	3,87	" " "
Produção por hora útil : - Laminação simples: 440 t																30	102	132		
- Laminação em Tandem: 670 t																				

11 - OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

O quadro de resultados dos cálculos mostra que a laminação do lingote em pauta terminará no passe 15 H. Para se chegar a este passe, a escala foi primeiramente calculada até a secção final procurando-se aproveitar a capacidade do equipamento e com a preocupação principal de não exceder a 160% de carga nos motores. Nestas condições verificou-se que se pode atingir a secção final (206 mm x 761 mm) no passe 15 V, mas analisando-se a magnitude das reduções dos quatro últimos passes concluiu-se que a bem da qualidade do produto seria conveniente introduzir mais um passe, o 15 H, e redistribuir as reduções nos passes 14 H e 15 V, conforme mostrado em 8.

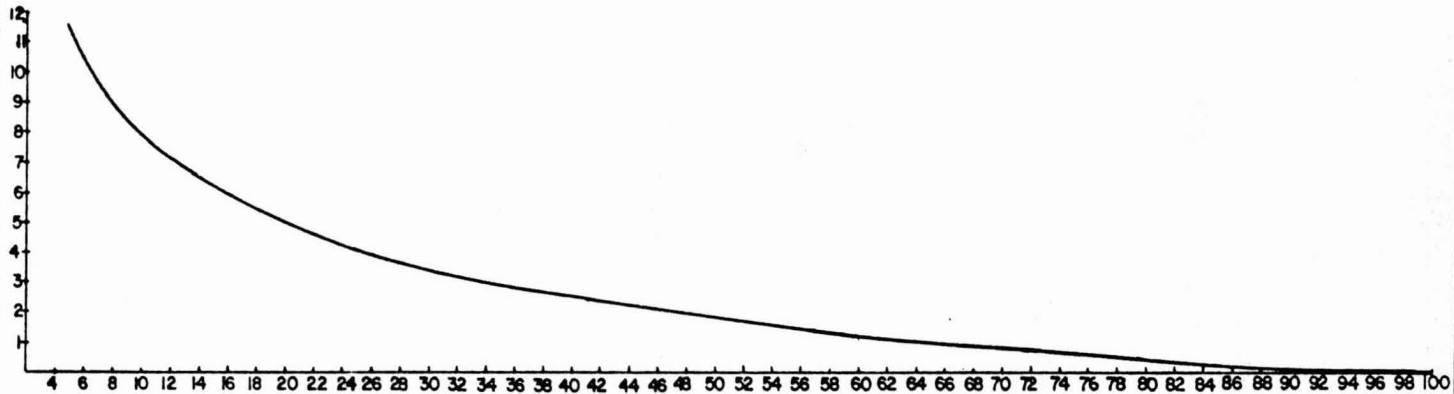
Além disto foi efetuado um ajuste no passe 13 V, conforme explicado no item 8.1.e, por ser este um passe de transição entre as fases de desbaste e acabamento.

Em anexo é mostrada uma representação gráfica da evolução da seção - de cada passe para melhor visualização do comportamento da escala de passes.



Representação gráfica da evolução da seção de saída a cada passe

CURVA HHT (HP HOUR PER NET TON) PARA LAMINAÇÃO
PLACAS DE AÇO COM CARBONO MÁXIMO 0,25%.



RELAÇÃO DE ÁREAS $\times 100 = \text{SEÇÃO TRANSVERSAL À SAÍDA DO PASSE} \times 100 \div \text{SEÇÃO TRANSVERSAL INICIAL}.$

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Kawasaki Steel Corporation
Slabbing Technique Training Text Book, 1981

- 2 - Associação Brasileira de Metais
Laminação dos Aços, 1975

- 3 - Pires, Ney Bonoso
Cálculo de um Roteiro para o Laminador de Tiras a Quente, ABM 1969

- 4 - Fazan, B
La Théorie du Laminage, IRSID/CESSID 1968