

CONTRIBUIÇÃO À DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE ACABAMENTO E DE ENROLAMENTO SÔBRE A ESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS CHAPAS FINAS LAMINADAS A QUENTE E A FRIO ⁽¹⁾

SYLVIO FRIEDRICH ⁽²⁾

RESUMO

O autor estudou a influência das temperaturas de acabamento e de enrolamento sôbre a estrutura e as propriedades mecânicas de chapas finas de aço extra-doce, laminadas a quente e a frio. Inicialmente acompanhou a laminação e retirou amostras de 139 bobinas laminadas a quente, constatando que baixas temperaturas de acabamento causam a ocorrência de granulação mista e propriedades mecânicas muito variadas nas chapas. A seguir acompanhou a laminação a quente e a frio de um segundo grupo de 10 bobinas, retirando amostras, as quais acusaram que a granulação mista das chapas finas a quente é quase totalmente eliminada pelas operações de laminação a frio e recozimento, e que o tamanho de grão da chapa laminada a frio e recozida não guarda relação com o da chapa fina a quente que lhe deu origem. Foi também constatado que os ensaios de dureza, embutimento e tração não permitem a determinação muito precisa da qualidade de estampagem, tanto das chapas finas a quente como a frio.

1. INTRODUÇÃO

É fato conhecido que as temperaturas de acabamento e de enrolamento, na laminação a quente, influenciam consideravelmente a estrutura e, em conseqüência, as propriedades das chapas finas de aço extra-doce destinadas à estampagem profunda, tanto no estado de laminadas a quente como também após subsequente laminação a frio e recozimento. O assunto tem sido

(1) Contribuição Técnica n.º 443. Apresentada ao XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, julho de 1961.

(2) Membro da ABM; Engenheiro de Minas e Metalurgista; Sub-Chefe do Departamento de Pesquisas da Cia. Siderúrgica Nacional — Volta Redonda, RJ.

muito estudado, e ainda continua a sê-lo, em diversos países, havendo regular número de trabalhos já publicados sôbre o mesmo, entre os quais podem ser citados os de D. T. Goettge e E. L. Robinson¹; A. K. Honeyman²; R. L. Rickett e F. C. Kristufek³; W. H. Richey⁴; M. L. Samuels e A. Boyles⁶ e M. L. Samuels⁵. Havendo, no entanto, vários pontos que ainda não foram completamente esclarecidos, e como também cada usina tem suas condições particulares, foi considerado interessante estudar-se o assunto para as condições da usina da Companhia Siderúrgica Nacional.

2. DESCRIÇÃO SUCINTA DO EQUIPAMENTO E DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO

A laminação de tiras a quente é feita na usina da Cia. Siderúrgica Nacional a partir de placas cuja espessura varia de 89 a 209 mm ($3\frac{1}{2}''$ a $8\frac{1}{4}''$) e cuja largura vai de 610 a 1219 mm ($24''$ a $48''$). A redução inicial das placas é feita em vários passes dados numa cadeira esboçadora quádrua reversível, que envia as chapas grossas semi-acabadas, com espessuras variáveis de 15,9 até 23,8 mm ($5/8''$ até $15/16''$), ao trem acabador contínuo constante de 6 cadeiras quádruas, do qual as tiras podem sair com espessura desde 1,35 até 4,78 mm ($0,053''$ até $0,188''$).

A velocidade da tira na saída do trem acabador pode variar desde 5,2 até 10,5 m/seg, sendo tanto maior quanto menor fôr a espessura final.

Na mesa de rolos (que liga o trem acabador às bobinadeiras) existe um conjunto de chuveiros superiores e inferiores, destinados a resfriar a tira com jatos d'água, de modo a se obter a temperatura mais apropriada para o bobinamento e, também, para tornar o óxido da superfície mais facilmente removível pela decapagem subsequente.

As bobinas a quente que se destinam à laminação a frio são decapadas em solução de ácido sulfúrico, indo depois a um dos dois trens de laminação contínua a frio, dos quais um consta de 4 e o outro de 3 cadeiras quádruas.

3. PROGRAMA DO ESTUDO

O estudo foi programado em duas partes. A primeira constaria da observação do processamento de um grande número de tiras laminadas a quente, pertencentes a corridas diferen-

tes, tôdas de aço extra-doce efervescente, destinadas a chapas finas a quente e a frio, tanto para estampagem profunda como também para outros usos. Dessas tiras seriam anotadas as temperaturas de acabamento e de enrolamento, e retiradas amostras, apenas no estado de laminadas a quente. As amostras seriam cortadas de extremidades que correspondessem à base ou ao meio dos lingotes, de modo a se evitar, tanto quanto possível, o efeito da segregação. Dessas amostras seriam recortados corpos de prova para exame ao microscópio e para ensaios de dureza e tração.

Para a segunda parte do estudo seria escolhido um item de laminação constante de placas de aço extra-doce efervescente para estampagem profunda, destinadas a serem laminadas a frio na bitola MSG-20, por ser essa a bitola de maior produção e por constituir uma espessura média. As peças desse item seriam cuidadosamente acompanhadas na laminação, anotando-se as temperaturas de acabamento e enrolamento, tirando-se amostras para estudo no estado de laminadas a quente e também após a laminação a frio.

Tanto na primeira como também na segunda parte do trabalho seriam anotadas igualmente as temperaturas das placas e das chapas grossas intermediárias, mais a título informativo, porém.

4. RESULTADOS DO ESTUDO DO PRIMEIRO GRUPO DE AMOSTRAS, DE TIRAS LAMINADAS A QUENTE

De acôrdo com a programação foram retiradas amostras de 139 tiras laminadas a quente, com espessuras de 1,70 — 1,91 — 2,03 — 2,16 e 3,05 mm (0,067" — 0,075" — 0,080" — 0,085" e 0,120"), pertencentes a diversas corridas de aço extra-doce e efervescente, acabadas e enroladas em temperaturas bastante diferentes. As amostras foram cortadas de extremidades correspondentes ou à base ou ao meio dos lingotes respectivos.

4.1. *Propriedades Mecânicas das Chapas Finas a Quente em Função das Temperaturas de Acabamento e Enrolamento* — Os resultados dos ensaios de dureza e de tração a que foram submetidos corpos de prova recortados das 139 amostras estão reproduzidos nos gráficos das figuras 1 a 4, tendo sido feita uma separação em dois grupos, o primeiro contendo as amostras mais finas, de 1,70 a 2,16 mm (0,067" a 0,085"), e o

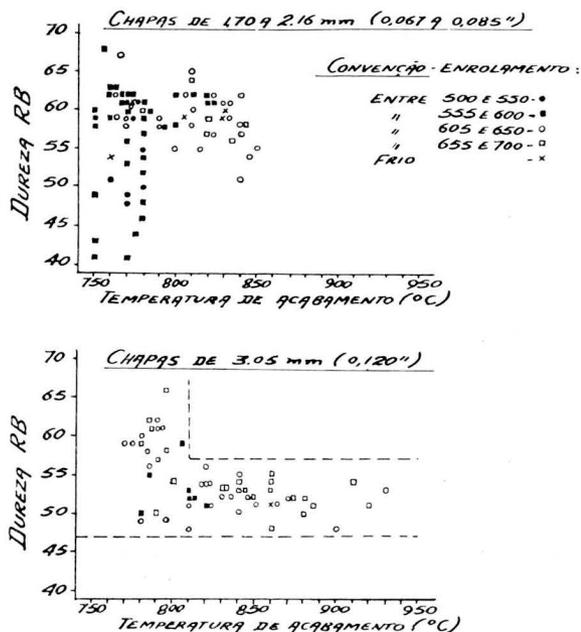


Fig. 1 — Dureza das chapas finas a quente em função das temperaturas de acabamento e enrolamento.

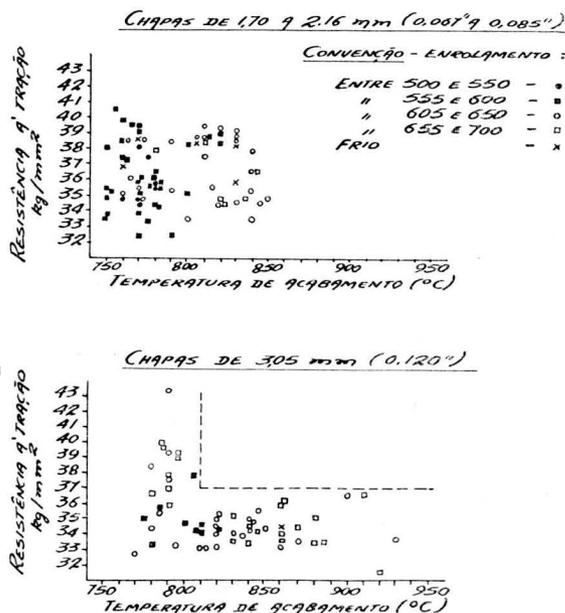


Fig. 2 — Resistência à tração das chapas finas a quente em função das temperaturas de acabamento e enrolamento.

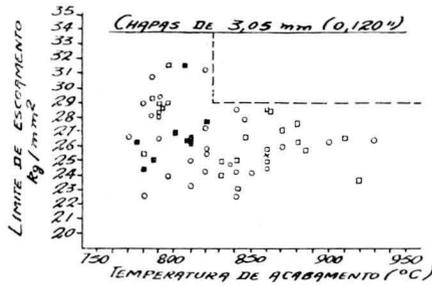
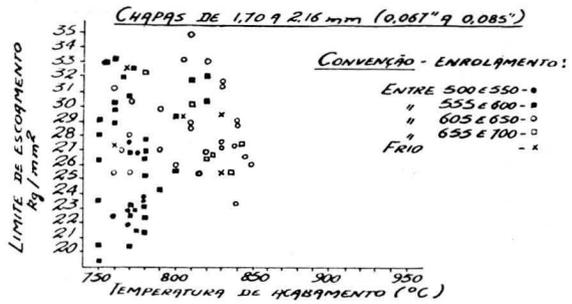


Fig. 3 — Limite de escoamento das chapas finas a quente em função das temperaturas de acabamento e enrolamento.

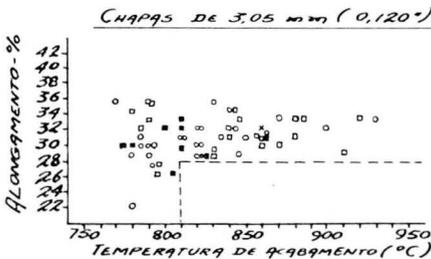
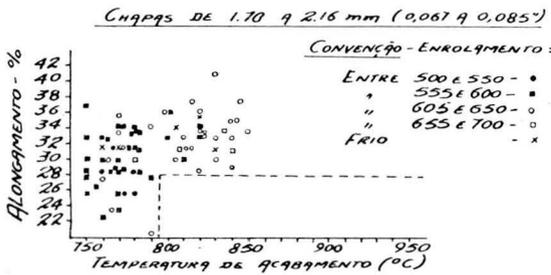


Fig. 4 — Alongamento das chapas finas a quente em função das temperaturas de acabamento e enrolamento.

segundo as amostras mais grossas, de 3,05 mm (0,120"). Essa separação foi feita por ser conhecido o efeito da espessura sobre as propriedades mecânicas das chapas.

Os gráficos da figura 1 dão a *dureza* Rockwell B em função das temperaturas de acabamento e enrolamento. Examinando-os nota-se o seguinte:

- a) As chapas de 1,70 a 2,16 mm, quando a temperatura é inferior a 790°C, apresentam dureza muito variada, desde 41 até 68 R_B , enquanto que as acabadas entre 790°C e 850°C têm dureza menos variada (51 a 65 R_B), com a média em torno de 58/59 R_B .
- b) As chapas de 3,05 mm, quando acabadas com menos de 810°C, mostram dureza variando entre 49 e 66 R_B , ao passo que, quando o acabamento ocorre de 810°C até 930°C, a dureza é baixa e muito uniforme, variando apenas entre 48 e 56 R_B .
- c) A temperatura de enrolamento pouco parece influir sobre a dureza das chapas.

Nos gráficos da figura 2 estão reproduzidos os valores obtidos para a *resistência à tração*. Os corpos de prova eram todos transversais à direção de laminação, e foram usinados de acordo com a norma DIN 50114. O exame dos dois gráficos permite as seguintes conclusões:

- a) Nas chapas de 1,70 a 2,16 mm de espessura os valores da RT variam bastante dentro da faixa de temperaturas de acabamento de 750°C a 850°C, sendo a oscilação um pouco maior nas amostras de chapas acabadas com menos de 800°C (desde 32,5 até 40,7 kg/mm²). Infelizmente não foi obtida nenhuma amostra desse material com acabamento acima de 850°C, de modo que não foi possível determinar-se os valores normais da RT para essas condições de laminação.
- b) Nas chapas de 3,05 mm, quando o acabamento ocorre a 800°C ou menos os valores da RT variam bastante, desde 32,8 até 43,3 kg/mm², enquanto que com acabamento a temperaturas de 810°C ou mais se obtêm valores muito uniformes para a RT, variáveis entre 31,5 e 36,6 kg/mm².
- c) A temperatura de enrolamento pouco parece influir sobre a RT.

Nos gráficos da figura 3 são dados os valores obtidos para o *limite de escoamento*. O exame dos mesmos mostra que a influência da temperatura de acabamento sobre o LE é seme-

lhante à que foi observada sôbre a RT, podendo-se afirmar o seguinte:

- a) Nas chapas de 1,70 a 2,16 mm os valores do LE oscilam grandemente quando a temperatura de acabamento varia de 750°C a 830°C, sendo essa oscilação mais ampla para as temperaturas de acabamento mais baixas (750°C a 780°C), que resultam em valores para o LE compreendidos entre 19,4 e 33,2 kg/mm². Já com temperaturas de acabamento de 835°C a 850°C os valores obtidos são bastante mais uniformes, variando apenas entre 23,4 e 29,2 kg/mm² (deve-se notar, contudo, que há sômente 8 dados).
- b) Nas chapas de 3,05 mm os valores do LE chegam a números maiores e oscilam mais (variam de 22,5 até 31,7 kg/mm²) quando o acabamento ocorre entre 770°C e 820°C. Já com acabamento desde 830°C até 930°C as amostras acusam valores mais uniformes e mais baixos para o LE, não ultrapassando 28,5 kg/mm² (que é um valor ainda bom para o LE em chapas finas a quente).
- c) A temperatura de enrolamento, também neste caso, pouca influência parece ter.

Nos gráficos da figura 4 são reproduzidos os valores obtidos para o *alongamento*, o qual foi medido de acôrdo com a norma DIN 50114, que prescreve a leitura do alongamento em 70 mm para 1,70 — 1,91 e 2,03 mm de espessura, e em 90 mm para 3,05 mm de espessura. O exame dos mesmos permite que se tire as seguintes conclusões:

- a) Independentemente da espessura (desde 1,70 até 3,05 mm) o alongamento é sempre superior a 28%, o que é um bom valor quando a temperatura de acabamento é maior do que 800/810°C. Quando o acabamento ocorre a temperaturas mais baixas o alongamento passa a ser bastante mais variado, especialmente nas amostras de chapas mais finas, nas quais chega a atingir 20%.
- b) A temperatura de enrolamento pouca influência acusou sôbre o alongamento obtido.

4.2. *Estrutura das Chapas Finas a Quente em Função das Temperaturas de Acabamento e Enrolamento* — Da parte central (centro em relação à largura da chapa) de cada uma das 139 amostras foi tirado um corpo de prova para exame ao microscópio em corte longitudinal, observando-se a granulação, a cementita terciária e a perlita. As inclusões não metálicas foram também examinadas, porém chegou-se à conclusão de que não exerceram influência perceptível sôbre as propriedades mecânicas das chapas, mesmo porque em nenhum caso houve ocorrência de inclusões em quantidade elevada.

No quadro da figura 5 são representados os dados da granulação, bem como a dureza média respectiva, estando as amostras ordenadas por temperaturas de acabamento crescentes, desde 750°C até 930°C.

Nº da amostra	Espes-sura (mm)	Temperaturas de acabamento e enrolamento (°C)	Dureza média RB	Grãos		
				Distri-buição	Tamanho	
					No cen-tro	Na super-fície
+ 42	1,91	750-590	49	mistos	5 a 8	3 a 7/2
+ 43	"	-590	43	"	5 a 8	3 a 7/3
+ 44	"	-580	41	"	6 a 8	3 a 7/3
64	2,16	-595	59	"	8 a 9	4 a 8/2
132	2,03	-560	60	"	8 a 9	6 a 9/2
135	"	-570	58	"	8 a 9	4 a 8/2
65	2,16	755-590	68	"	8 a 9	6 a 9/2
18	1,70	760-560	59	"	8 a 9	6 a 8/1
20	"	-fria	54	uniformes	7	7
23	"	-560	62	mistos	8 a 9	6 a 8/1
31	"	-610	61	"	8 a 9	7 a 9/1
37	1,91	-535	51	"	5 a 9	4 a 8/3
131	2,03	-560	63	"	8 a 9	6 a 9/2
133	"	-570	63	"	8 a 9	6 a 9/2
+ 139	"	-615	59	"	8 a 9	4 a 9/2
3	1,70	765-580	62	"	8 a 9	6 a 9/1
+ 137	2,03	-610	67	"	8 a 9	4 a 8/2
2	1,70	770-580	61	"	7 a 9	6 a 9/1
10	"	-620	59	"	8	6 a 8/1
15	"	-570	62	"	8 a 9	6 a 8/1
19	"	-fria	61	"	8 a 9	6 a 9/1
21	"	-570	61	"	8 a 9	6 a 9/1
30	"	-610	61	"	8 a 9	7 a 9/1
+ 33	1,91	-595	41	"	5 a 7	3 a 7/2
40	"	-560	56	"	5 a 9	4 a 8/3
41	"	-550	49	variados	4 a 8	4 a 8
45	"	-540	59	mistos	6 a 9	3 a 9/2
47	"	-550	48	"	6 a 8	3 a 8/3
+ 48	"	-590	53	"	5 a 9	5 a 8/3
51	3,05	-640	59	"	8 a 9	5 a 8/2
134	2,03	-570	60	"	8 a 9	6 a 9/2
136	"	-570	62	"	7 a 9	5 a 9/3
+ 138	"	-620	58	"	8 a 9	4 a 8/2
46	1,91	775-545	61	"	6 a 9	4 a 9/3
+ 49	"	-590	44	"	5 a 9	4 a 8/3
50	3,05	-640	59	"	8 a 9	5 a 8/2
14	1,70	780-580	61	"	8 a 9	6 a 8/1
+ 29	"	-660	60	"	8 a 9	7 a 9/1
+ 32	1,91	-600	46	"	6 a 8	3 a 7/2
+ 34	"	-600	48	"	4 a 8	3 a 8/3
35	"	-550	50	variados	3 a 8	3 a 8
36	"	-550	55	mistos	5 a 9	3 a 7/3
38	"	-560	54	"	7 a 9	3 a 7/2
39	"	-560	52	"	7 a 9	3 a 8/3
+ 55	3,05	-675	59	"	8 a 9	6 a 8/2

Fig. 5 — Dureza e granulação das chapas finas a quente em função das temperaturas de acabamento e enrolamento.

(Continua na página seguinte)

(Continuação da página anterior)

56	3,05	780-640	60	mistos	8 a 9	6 a 9/2
+ 99	"	-620	49	"	6 a 9	4 a 7/3
103	"	-570	50	"	8 a 9	5 a 8/2
126	2,03	-580	60	"	8 a 9	5 a 9/2
127	"	-580	59	"	8 a 9	5 a 9/2
129	"	-580	57	"	8 a 9	6 a 9/2
+ 58	3,05	785-675	62	"	8 a 9	5 a 8/2
63	"	-640	58	"	8 a 9	5 a 9/2
+ 98	"	-615	56	"	7 a 9	3 a 7/3
106	"	-580	55	"	8 a 9	3 a 7/3
11	1,70	790-620	58	"	8 a 9	5 a 8/1
52	3,05	-640	61	"	8 a 9	7 a 8/1
53	"	-640	61	"	8 a 9	5 a 8/3
+ 54	"	-670	61	"	8 a 9	6 a 9/2
+ 57	"	-675	57	"	8 a 9	5 a 8/2
+ 59	"	-650	62	"	8 a 9	5 a 8/2
+ 61	"	-670	50	"	8 a 9	5 a 9/3
+ 125	2,03	-635	59	"	8 a 9	5 a 9/2
128	"	-580	58	variados	6 a 9	6 a 9
+ 60	3,05	795-670	58	mistos	8 a 9	6 a 9/2
+ 62	"	-675	66	"	8 a 9	6 a 9/2
+ 105	"	-625	49	"	5 a 9	3 a 7/3
17	1,70	800-580	62	"	8 a 9	6 a 9/1
90	3,05	-600	54	"	8 a 9	3 a 7/3
124	2,03	-610	55	"	8 a 9	5 a 8/2
130	"	-570	58	"	8 a 9	6 a 9/2
9	1,70	805-605	62	"	7 a 8	6 a 9/1
12	"	-fria	59	"	9	6 a 8/1
93	3,05	-595	59	"	8 a 9	3 a 8/3
5	1,70	810-615	58	uniformes	7 a 8	7 a 8
8	"	-610	60	mistos	8 a 9	6 a 8/1
22	"	-580	62	"	9	6 a 9/1
25	"	-620	65	"	9	6 a 8/1
+ 28	"	-660	64	"	9	6 a 9/1
74	3,05	-595	52	"	8 a 9	3 a 7/3
+ 84	"	-640	48	"	6 a 8	4 a 8/3
88	"	-600	53	"	8	3 a 7/3
89	"	-600	52	"	8 a 9	3 a 8/3
+ 102	"	-650	51	"	8	6 a 8/2
+ 114	2,03	815-640	55	uniformes	8 a 9	8 a 9
1	1,70	820-595	61	mistos	7 a 9	5 a 8/2
16	"	-580	62	uniformes	8 a 9	8 a 9
24	"	-580	61	"	9	9
26	"	-620	62	mistos	8 a 9	6 a 7/2
73	3,05	-605	56	"	8 a 9	5 a 8/1
+ 85	"	-645	54	"	7 a 8	6 a 9/1
+ 87	"	-645	54	"	7 a 8	4 a 7/2
91	"	-635	54	"	8 a 9	5 a 8/2
92	"	-595	51	"	8 a 9	2 a 8/3
107	"	-620	51	"	8 a 9	3 a 8/3
+ 113	2,03	-665	57	"	8 a 9	5 a 8/1
115	"	-625	57	uniformes	8 a 9	8 a 9

(Conclui na página seguinte)

(Conclusão da página anterior)

+ 119	2,03	820-660	59	mistos	8 a 9	6 a 9/1
4	1,70	830-620	61	"	8 a 9	6 a 8/1
6	"	-fria	59	uniformes	8	8
7	"	-615	59	mistos	8 a 9	6 a 9/1
27	"	-610	61	"	8 a 9	6 a 7/1
+ 72	3,05	-645	52	"	8 a 9	6 a 8/1
+ 82	"	-660	53	uniformes	7 a 8	7 a 8
+ 83	"	-655	53	"	7 a 8	7 a 8
116	2,03	-fria	60	"	8 a 9	8 a 9
117	"	-630	59	"	8 a 9	8 a 9
80	3,05	835-625	52	"	7 a 9	7 a 9
+ 112	2,03	-670	56	"	8 a 9	8 a 9
13	1,70	840-620	57	mistos	9	5 a 7/2
+ 75	3,05	-660	54	uniformes	7 a 8	7 a 8
78	"	-640	53	"	7 a 9	7 a 9
+ 81	"	-660	53	"	7 a 8	7 a 8
+ 86	"	-650	55	mistos	8 a 9	4 a 7/2
100	"	-635	50	uniformes	7 a 9	7 a 9
111	2,03	-635	62	mistos	8 a 9	5 a 8/2
118	"	-630	58	uniformes	8 a 9	8 a 9
+ 120	"	-670	58	"	8 a 9	8 a 9
122	"	-630	51	"	8 a 9	8 a 9
69	3,05	845-640	52	mistos	8 a 9	3 a 7/3
+ 108	"	-655	52	uniformes	7 a 8	7 a 8
121	2,03	-630	54	"	8 a 9	8 a 9
66	3,05	850-650	51	"	7 a 9	7 a 9
123	2,03	-640	55	"	8	8
+ 70	3,05	860-670	53	"	7 a 8	7 a 8
+ 71	"	-670	54	mistos	8 a 9	3 a 7/2
76	"	-670	55	"	8 a 9	4 a 8/3
77	"	-fria	51	uniformes	7 a 9	7 a 9
+ 97	"	-670	48	"	7 a 8	7 a 8
101	"	-650	51	"	7 a 8	7 a 8
67	"	870-640	52	"	7 a 9	7 a 9
+ 68	"	-670	52	mistos	8 a 9	3 a 7/3
+ 79	"	880-670	52	uniformes	7 a 9	7 a 9
+ 109	"	-680	50	"	7 a 8	7 a 8
+ 104	"	885-675	51	"	7 a 8	7 a 8
110	"	900-650	48	"	7 a 8	7 a 8
+ 96	"	910-685	54	"	7 a 8	7 a 8
+ 94	"	920-680	51	"	7 a 8	7 a 8
95	"	930-650	53	"	7 a 8	7 a 8

Notas: (1) As designações "mistos", "variados" e "uniformes", usadas para informar sobre a distribuição dos grãos, têm os seguintes significados: *mistos* — grãos maiores na superfície do que no centro; *variados* — grãos de 4 ou mais tamanhos diferentes, distribuídos uniformemente desde a superfície até o centro; *uniformes* — grãos de no máximo 3 tamanhos diferentes, distribuídos uniformemente desde a superfície até o centro.

(2) As amostras assinaladas com + não foram resfriadas por água dos chuveiros na mesa de saída do LTQ. As que não estão assinaladas foram resfriadas.

No que diz respeito à granulação, foram anotados, nos casos de ocorrência de uma faixa de grãos maiores na superfície (granulação mista), separadamente os tamanhos no centro e na superfície, sendo que, para dar uma idéia da largura da faixa superficial de grãos mais grosseiros, foi adotada uma convenção de números 1, 2 e 3, correspondendo "1" a uma faixa bastante estreita, abrangendo, no máximo, $\frac{1}{4}$ do campo do microscópio, de 75 mm de diâmetro, observação feita com aumento de 100 vezes, "2" representando uma faixa de largura média, abrangendo entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do campo, e "3" correspondendo a uma faixa bastante larga, ocupando mais de metade do campo (ver fig. 6).

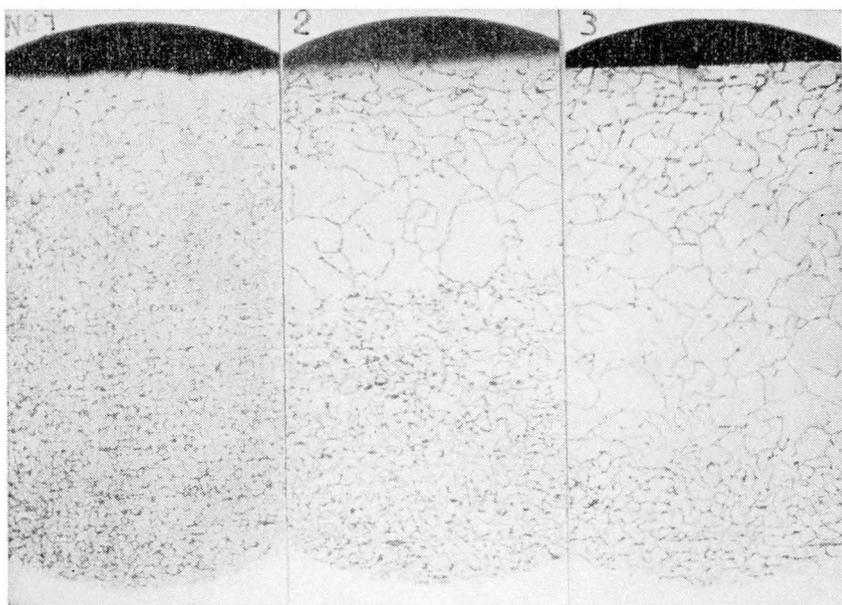


Fig. 6 — Convenção adotada para se representar a espessura da camada de grãos grosseiros superficiais das chapas finas a quente. Ataque com nital a 5%. Aumento: 100 \times .

Assim, por exemplo, a anotação "4 a 7/3" significa que os grãos da superfície possuem tamanho desde 4 até 7, abrangendo eles uma faixa de largura 3.

O quadro em questão revela que as tiras acabadas abaixo de 810°C, independentemente da temperatura de enrolamento, possuem, na quase totalidade dos casos, granulação mista. As únicas exceções constituem as amostras n.^{os} 20, 41, 35 e 128,

das quais a primeira acusou granulação uniforme e as três últimas grãos variados ao longo de toda a espessura.

Nas amostras acabadas entre 810°C e 870°C a granulação mostrou-se ora mista (30 amostras) ora uniforme (28 amostras).

Finalmente, as que foram acabadas com temperatura compreendida entre 880°C e 930°C (7 amostras) acusaram todas uma granulação uniforme. Esses resultados permitem que se afirme o seguinte:

- a) As tiras acabadas abaixo de 810°C ficam com granulação mista em quase todos os casos.
- b) Com acabamento entre 810°C e 870°C obtém-se material com granulação ora mista, ora uniforme.
- c) As tiras acabadas acima de 870°C (acima da zona crítica) apresentam sempre granulação uniforme. Deve-se ressaltar que apenas chapas de 3,05 mm (0,120") tiveram acabamento a 860°C ou mais.

A temperatura de enrolamento, pelos dados do quadro da figura 5, não tem influência definida sobre a dureza nem sobre o tamanho e a distribuição dos grãos. Note-se, no entanto, que a temperatura máxima de enrolamento foi de 685°C, que não é muito alta, pois o enrolamento é considerado "quente" quando a temperatura é de 700°C ou mais.

A *cementita terciária* e a *perlita* presentes nas amostras foram minuciosamente estudadas sob o microscópio. A conclusão a que se chegou foi que não é possível correlacionar-se as diferentes ocorrências de cementita terciária e de perlita com as temperaturas de acabamento e enrolamento quando as amostras são provenientes de uma série de corridas diferentes e de partes diversas dos lingotes, devido à variação bastante ampla do teor de carbono que ocorre entre amostras de corridas diferentes, e mesmo entre amostras de uma mesma corrida, porém provenientes de posições diversas dos lingotes. Assim, este assunto foi deixado para ser novamente estudado em trabalho futuro.

5. RESULTADOS DO ESTUDO DO SEGUNDO GRUPO DE AMOSTRAS, DE TIRAS LAMINADAS A QUENTE E TAMBÉM A FRIO

Para a segunda parte do estudo fôra planejada a retirada de amostras de tiras de aço extra-doce para estampagem, acabadas a quente a cerca de 880°C, 850°C, 820°C, 790°C e 760°C. Com acabamentos em cada uma dessas temperaturas seriam retiradas duas amostras, uma de tira resfriada com água dos chu-

veiros e outra de tira não resfriada, de modo a se obter duas temperaturas diferentes de enrolamento para cada temperatura de acabamento. Isso daria um conjunto de 10 amostras. Das mesmas tiras seriam cortadas amostras também após a laminação a frio até a bitola MSG-20, para se estudar a correlação de estruturas e propriedades das chapas a quente e a frio.

O item de laminação com o qual se conseguiu mais aproximadamente o que havia sido programado foi um constante de 10 placas da base de lingotes (2 placas por lingote), com dimensões de $0,144 \times 0,87 \times 3,30$ a $4,80$ m, as quais foram laminadas a quente até uma secção reta de $2,67 \times 850$ mm, e a frio até $0,91 \times 800$ mm, o que representa uma redução a frio de cerca de 66%.

A corrida que deu origem ao material estudado era de aço efervescente, com a seguinte análise, em %: C = 0,08; Mn = 0,32; P = 0,010 e S = 0,026.

As temperaturas de acabamento e enrolamento a quente foram as seguintes para as 10 tiras do item, ordenadas por temperaturas de acabamento crescentes:

N.º da tira	Temperaturas de		N.º da tira	Temperaturas de	
	Acabamento	Enrolamento		Acabamento	Enrolamento
10	775°C	555°C	6	830°C	580°C
1	790°C	570°C	9	835°C	580°C
2	795°C	575°C	8	835°C	580°C
5	830°C	580°C	3	860°C	600°C
7	830°C	575°C	4	880°C	600°C

Com tôdas as 10 tiras os chuveiros foram mantidos abertos, contrariamente ao que fôra programado, e isso foi feito por dois motivos:

- 1.º) Porque a quantidade de tiras do item era pequena, não permitindo a obtenção, para cada temperatura de acabamento, de duas temperaturas de enrolamento diferentes, uma conseguida com os chuveiros abertos e outra com êles fechados.
- 2.º) Porque as temperaturas de enrolamento obtidas foram desde o início um tanto baixas, não havendo possibilidade de se conseguir enrolamento acima de 700°C, como era esperado, para se poder fazer uma comparação do efeito de temperaturas de enrolamento elevadas com o de temperaturas mais baixas, de menos de 650°C.

De cada uma das 10 tiras foi cortada uma amostra na entrada da Decapagem Contínua, da extremidade correspondente ao meio do lingote (em relação à altura). Do centro dessas amostras (em relação à largura da tira) foram recortados corpos de prova para ensaios de dureza e resistência à tração, e para exames ao microscópio. Para ensaios de embutimento foi cortada uma tira transversal, abrangendo tôda a largura do material.

As 10 bobinas foram normalmente decapadas e laminadas posteriormente a frio até a bitola 20. Das bobinas n.^{os} 2, 3, 4, 5 e 10 foram retiradas novamente amostras após a laminação a frio, na mesma extremidade correspondente à parte superior das placas. A seguir são dados os resultados obtidos, tanto com as amostras laminadas a quente como com as laminadas a frio.

5.1. *Propriedades Mecânicas das Chapas Finas a Quente em Função da Temperatura de Acabamento* — Como já foi explicado, de cada uma das 10 bobinas laminadas a quente foi tomada uma amostra, da qual foram recortados corpos de prova para ensaios de tração, dureza e embutimento Olsen, e para exame ao microscópio.

No quadro da figura 7 estão reproduzidos os resultados médios dos ensaios de dureza, embutimento e tração, bem como a espessura média de cada amostra. A espessura e o embutimento foram determinados em 5 pontos distribuídos ao longo de tôda a largura original da tira, e a dureza foi obtida fazendo-se 7 determinações num corpo de prova de 10 × 20 cm,

Nº da tira	Temperaturas de acabamento e enrolamento (°C)	Espessura (mm)	Dureza RB	Embutimento Olsen (mm)	Resistência à tração (kg/mm ²)	Limite de escoamento (kg/mm ²)	Razão elástica LE/RT	Alongamento		Redução de largura (%)
								em 2" (%)	em 80 mm (%)	
10	775-555	3,01	47,8	14,65	33,4	20,6	0,62	32,9	27,9	36,2
1	790-570	3,04	49,0	14,89	33,4	21,2	0,63	42,2	33,8	38,2
2	795-575	3,04	58,9	14,88	36,2	27,9	0,77	30,9	25,0	40,1
5	830-580	2,85	55,6	15,03	32,3	24,6	0,76	44,3	37,1	42,7
6	830-580	2,88	52,9	15,16	32,8	27,4	0,84	45,6	37,1	49,2
7	830-575	2,91	54,6	15,07	33,7	25,2	0,75	45,4	38,3	52,2
8	835-580	2,89	55,1	14,79	34,1	26,4	0,77	44,2	35,0	47,0
9	835-580	2,92	55,4	14,68	35,0	26,9	0,77	42,3	35,9	46,0
3	860-600	3,01	53,9	14,40	34,8	27,9	0,80	44,7	36,2	31,3
4	880-600	2,78	56,2	14,89	33,2	27,2	0,82	39,8	33,1	46,2

Fig. 7 — Valores médios dos resultados dos ensaios de dureza, embutimento e tração das chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

recortado da parte central da tira. Para o ensaio de tração foram preparados, de cada amostra, 3 corpos de prova transversais à direção de laminação, usinados de acordo com a norma DIN 50114, sendo o alongamento medido em 2" e em

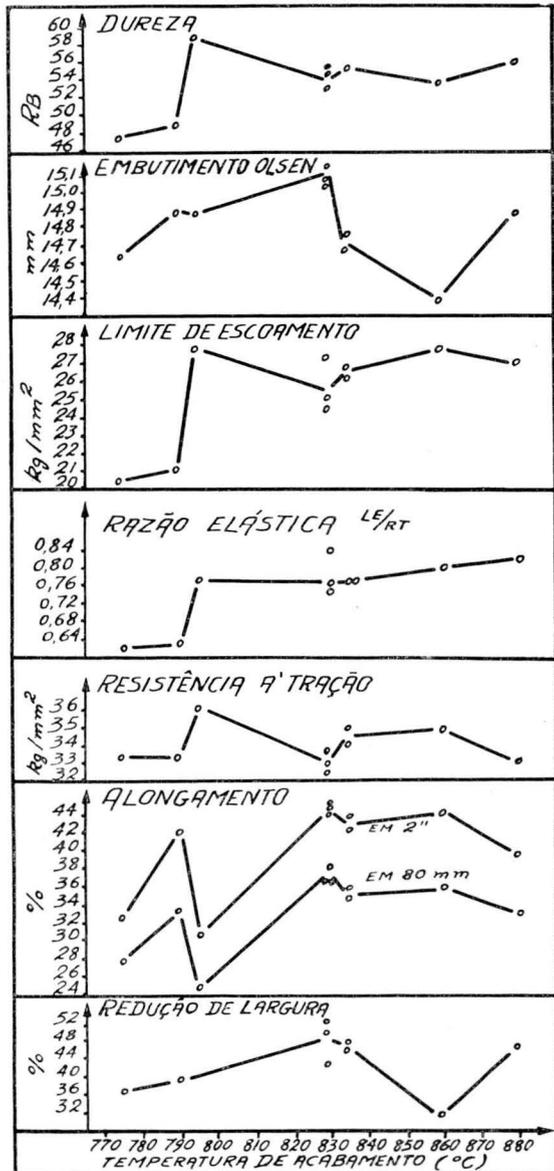


Fig. 8 Gráficos contendo os valores médios dos ensaios de dureza, embutimento e tração de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

80 mm. Na figura 8 êsses mesmos valores médios aparecem na forma de gráficos. Um exame do quadro e dos gráficos mostra o seguinte:

- a) A *dureza* é bastante influenciada pela temperatura de acabamento. As amostras acabadas a 775°C e 790°C acusaram dureza bastante baixa, de 47,8 e 49 R_B , enquanto que, com acabamento desde 795°C até 880°C, a dureza constatada é bem mais alta, variando os valores médios de 52,9 a 58,9 R_B , cabendo o maior valor à amostra acabada a 795°C.
- b) O embutimento não acusa influência bem definida da temperatura de acabamento.
- c) O *limite de escoamento* é bastante baixo (20,6 e 21,2 kg/mm²) nas amostras acabadas a 775°C e 790°C. Já com acabamento desde 795°C até 880°C, obtém-se para o LE valores mais altos e variando dentro de uma faixa estreita (24,6 a 27,9 kg/mm²).
- d) Sobre a *resistência à tração* a temperatura de acabamento mostrou influência pequena e não bem definida.
- e) A *razão elástica* (limite de escoamento sobre resistência à tração) mostra tendência de crescer com o aumento da temperatura de acabamento. As amostras acabadas a 775°C e a 790°C apresentam valores sensivelmente melhores do que as demais.
- f) O *alongamento* é bastante influenciado pela temperatura de acabamento. Os melhores valores foram obtidos com as amostras acabadas a 830°C, 835°C e 860°C.
- g) A *redução de largura* acusou valores cuja tendência não é clara.



Fig. 9 — Desenho ilustrativo da localização dos corpos de prova para exame ao microscópio.

5.2. *Estrutura das Chapas Finas a Quente em Função da Temperatura de Acabamento* — Para exame ao microscópio foram retirados 9 corpos de prova de cada uma das 10 amostras. O primeiro corpo de prova foi recortado a 1 cm da borda da tira original, o segundo a 6 cm, o terceiro a 11 cm, e os restantes, até o nono, distando sempre 5 cm do precedente,

como mostra a figura 9, de modo a cobrir metade da largura da tira. Dessa maneira foi obtida uma informação completa da estrutura das tiras ao longo de toda a secção reta. O polimento dos corpos de prova foi feito em secção longitudinal.

Nº da tira	Temperatura de acabamento	Tamanhos de grão limites (Nºs ASTM)																	
		CP nº 1		CP nº 2		CP nº 3		CP nº 4		CP nº 5		CP nº 6		CP nº 7		CP nº 8		CP nº 9	
		Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.	Cen-tro	Su-perf.
10	775	6-8	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8	7-9	6-8
1	790	6-8	6-8	7-8	6-8	6-8	5-8	6-8	6-8	6-8	5-8	5-8	5-8	6-8	5-8	6-8	5-8	6-8	5-8
2	795	5-9	7-8	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	8-9	6-9	8-9	6-9	8-9	6-9
5	830	5-9	6-8	9	6-9	9	6-9	5-9	5-9	7-9	6-9	7-9	5-9	8-9	5-9	8-9	5-9	7-9	6-9
7	830	8	8	8	8	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9
6	830	8-9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9	9	7-9
9	835	6-9	7-8	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	5-9	9	5-9
8	835	8-9	7-9	8-9	7-9	8-9	7-9	8-9	7-9	8-9	7-9	9	6-9	9	8-9	9	6-9	9	6-9
3	860	6-9	7-9	9	6-9	9	6-9	9	6-9	9	5-9	9	5-9	9	5-9	9	5-9	9	5-9
4	880	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9	8-9

Notas: (a) O CP (corpo de prova) n.º 1 foi cortado a 1 cm da borda e o CP n.º 9 do centro da tira. Os demais são intermediários, separados de 5 cm dos vizinhos.

(b) Tira 5, CP n.º 1: Na superfície grãos 6-8; na sub-superfície grãos 6-9, predominando 6; no centro grãos 5-9, predominando 9.

Fig. 10. — Tamanhos de grão limites determinados no centro e na parte superficial, ao longo da largura, em chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

A granulação observada ao microscópio nos 9 corpos de prova de cada uma das 10 amostras é dada no quadro da figura 10. Na figura 11 êsses mesmos dados são novamente reproduzidos na forma de gráficos. As conclusões a que se chega são as seguintes:

- Com acabamentos desde 795°C até 860°C a granulação obtida é mista, isto é, os grãos da superfície são sensivelmente maiores do que os do centro (centro em relação à espessura da amostra). A única exceção constitui a amostra n.º 7, acabada a 830°C, que acusou grãos uniformes de tamanho 8 a 9. Pode-se ver, além disso, que nas bordas das tiras os grãos da superfície tendem a ser menores do que no restante da largura, enquanto que os grãos do centro são, quase sempre, maiores nas bordas. De um modo geral percebe-se que, na maioria dos casos, há uma variação bastante acentuada do tamanho dos grãos desde a borda até o centro da tira, tanto na superfície como na parte interna.
- Nas amostras acabadas mais frias, a 775°C e 790°C, há uma diferença muito menor entre o tamanho dos grãos do centro e

da superfície, não havendo forte predominância de grãos pequenos no centro, como é comum nas amostras acabadas entre 795°C e 860°C. O maior tamanho de grão médio dessas amostras acabadas mais frias deve ser a causa de sua dureza mais baixa (ver fig. 7).

- c) A amostra acabada a 880°C acusou granulação uniforme e fina (grãos 8 a 9) ao longo de toda a largura.

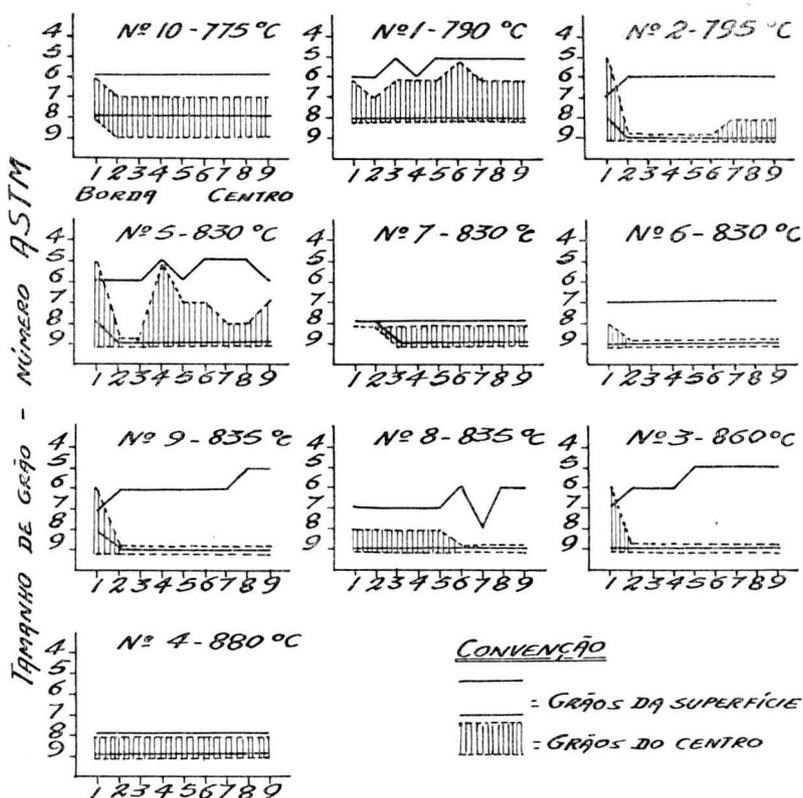


Fig. 11 — Representação gráfica dos tamanhos de grão máximos e mínimos observados na superfície e no centro das amostras de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas. Os números das abscissas representam a posição dos corpos de prova em relação à largura da tira.

Na figura 12 é mostrada a granulação, desde a borda até o centro, da parte superficial das amostras n.ºs 10, 2, 5, 3 e 4, acabadas, respectivamente, a 775°C, 795°C, 830°C, 860°C e 880°C. Foram fotografados apenas os corpos de prova n.ºs 1, 3, 5, 7 e 9.

Números das amostras e respectivas temperaturas de acabamento a quente

N.º 4 — 880°C

N.º 3 — 860°C

N.º 5 — 830°C

N.º 2 — 795°C

N.º 10 — 775°C



Fig. 12 — Aspecto da estrutura da parte superficial (as fotos abrangem um pouco menos de 1/6 da espessura) de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas). Os números 1, 3, 5, 7 e 9 correspondem aos corpos de prova longitudinais que foram recortados desde a borda até o centro da tira. Ataque c/ nital a 5%. Aumento de 100 ×.

procurar explicar o fenômeno, afirma que a velocidade de laminação, a temperatura intermediária (temperatura entre as cadeiras esboçadoras e acabadoras) e a temperatura de acabamento são os três fatores determinantes da formação de granulação mista ou uniforme. Declara que, para se ter uma estrutura de grão ideal, é necessário laminar o aço a uma temperatura intermediária relativamente alta, e acabar a laminação acima do ponto Ar_3 , ou seja aproximadamente $870^{\circ}C$. Os resultados que obteve levaram-no a afirmar que, com tiras de 1,9 a 3,0 mm (0,075" a 0,120"), de espessura final, um grão pequeno e muito uniforme pode ser conseguido com temperatura intermediária de $1040^{\circ}C$ a $1095^{\circ}C$, temperatura de acabamento de $845^{\circ}C$ a $870^{\circ}C$ e velocidade de laminação mínima de 6,4 m/min; reduzindo-se a velocidade mínima, mesmo que as temperaturas sejam mantidas, resultará invariavelmente uma estrutura não uniforme. O mesmo ocorre quando a temperatura intermediária cai abaixo do mínimo especificado, isto é, $1040^{\circ}C$.

R. L. Rickett e F. C. Kristufek⁴ estudaram o efeito da velocidade de resfriamento sobre a granulação, tendo constatado que ordinariamente as condições de resfriamento depois que a formação da ferrita está completada têm efeito pequeno sobre a estrutura de grão ferrítica. No entanto, se o resfriamento através da zona de formação da ferrita é feito rapidamente, o aço pode ficar tensionado suficientemente para causar crescimento exagerado de grão quando mantido subsequente a uma temperatura bastante alta ou quando resfriado muito devagar.

M. L. Samuels⁵ demonstrou que mesmo resfriamento ao ar (normalização) pode produzir tensionamento suficiente para causar crescimento de grão exagerado em recozimento posterior. M. L. Samuels e A. Boyles⁶, em um estudo sobre chapas finas de aço extra-doce produzidas em laminadores a quente não contínuos, constataram que um recozimento a $735^{\circ}C$ dado a uma chapa semi-acabada de 4,8 mm (3/16"), efetuado após a laminação a quente, dá como resultado um crescimento exagerado dos grãos superficiais, permanecendo os da parte central pequenos, quase inalterados. A chapa semi-acabada, antes de ser recozida, apresentou granulação normal e uniforme em toda a secção. Eles atribuem o maior crescimento dos grãos superficiais ao fato de a parte superficial ficar tensionada pelo resfriamento por água de refrigeração.

A *cementita terciária* também foi estudada sob o microscópio, constatando-se que ela ocorre fina e bem dispersa nas amostras acabadas mais frias, enquanto que nas amostras acabadas em temperaturas mais altas, sua ocorrência é na forma de partículas maiores e mais afastadas entre si. Na figura 13 é mostrado o aspecto da cementita na parte central das amostras n.ºs 10 e 4, acabadas e enroladas a 775-555°C e 880-600°C, respectivamente. Nas restantes amostras, acabadas desde 790°C até 860°C, o aspecto da cementita muda gradualmente, passando ela de fina e bem dispersa a um tanto grossa e mais espalhada.

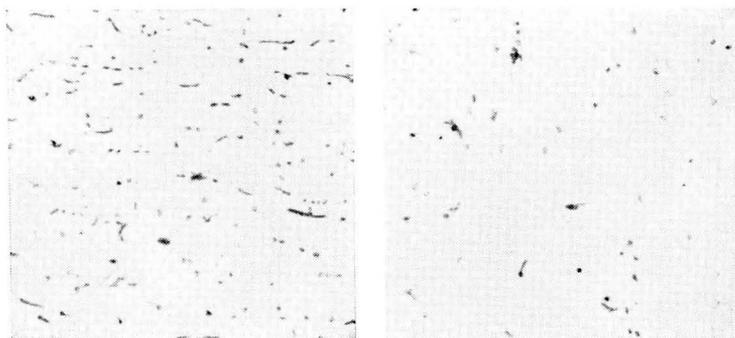


Fig. 13 — Aspecto da cementita terciária no corpo de prova n.º 5 das amostras de chapa fina a quente n.ºs 10 (à esquerda) e 4 (à direita). Ataque com picrato de sódio. Aumento : 250 ×.

5.3. *Ocorrência do Fenômeno de Granulação Mista nas Chapas Finas a Quente e suas Causas* — Um dos fenômenos mais interessantes que podem ocorrer na laminação a quente de chapas finas é o da granulação mista, isto é, na superfície formam-se grãos grosseiros e no centro grãos pequenos. Diversos pesquisadores já se ocuparam desse fenômeno, porém, poucos deles se preocuparam com a causa ou as causas do mesmo.

Assim, D. T. Goettge e E. L. Robinson¹ atribuem a ocorrência de granulação mista, quando o acabamento é feito abaixo de 850°C, ao fato de a deformação ser feita já com uma considerável porção do aço na forma de ferrita, pelo menos nas regiões próximas à superfície. A. J. K. Honeyman² aborda o assunto, porém não cogita das causas. W. H. Richey³, sem

M. M. Safian⁷ afirma que, se na laminação de tiras a quente o acabamento é feito em temperatura menor do que A_{r3} , deformações críticas provocam aumento do tamanho de grão, o que faz piorar a estampabilidade do aço. Ele declara ainda que, para receber estrutura do aço homogênea em tiras produzidas em laminadores contínuos, sem ter que recorrer a normalização ou recozimento posterior quando o acabamento ocorre abaixo de A_{r3} , muitas usinas usam resfriar rapidamente a tira, por meio de água de chuveiros, até cerca de 700°C.

O presente estudo mostrou que uma estrutura mista pode ocorrer em tiras acabadas a quente a temperaturas de 870°C ou menores, que a incidência dessa granulação mista aumenta com a diminuição da temperatura de acabamento, de tal modo que com acabamentos a 810°C ou menos é quase certa a sua ocorrência, e que com temperaturas de acabamento superiores a 870°C a granulação do aço é sempre uniforme.

O resfriamento ou não da tira na saída do laminador, por meio de chuveiros, não mostrou qualquer influência sobre o tipo de granulação, como se pode observar no quadro da figura 5, no qual se acham assinadas as amostras que foram resfriadas por chuveiros.

Com relação às causas desse fenômeno da granulação mista, o estudo mostrou, em primeiro lugar, que a temperatura de acabamento é fator preponderante. Não foi possível estudar-se o efeito da velocidade de laminação e da temperatura intermediária. A velocidade de laminação foi inferior à mínima de 6,4 m/seg, indicada por Richey³, apenas no caso das tiras de 3,05 mm (0,120") de espessura, em que atingiu cerca de 6,3 m/seg; com as demais espessuras sempre ultrapassou 6,4 m/seg, chegando a cerca de 8,3 m/seg nas tiras mais finas, de 1,7 mm (0,067"). A temperatura intermediária alcançou 1030°C até 1080°C nas amostras acabadas desde 850°C até 930°C, tendo sido anotados valores progressivamente menores nas amostras acabadas mais frias, até um valor extremo de 900°C em uma tira acabada a 750°C.

O efeito da temperatura de acabamento sobre o tipo de granulação deve ser explicado da seguinte maneira:

- a) Quando a laminação ocorre acima da zona crítica a deformação é feita estando toda a tira na forma austenítica, de modo que a recristalização se processa normalmente em toda a secção, dando como resultado uma granulação uniforme.

- b) Se, no entanto, a laminação é acabada em temperatura compreendida entre Ar_3 e Ar_1 , a deformação atinge uma estrutura composta por duas fases, austenita e ferrita, do que resulta uma estrutura final não totalmente livre de tensões, principalmente na parte superficial, onde o teor de carbono é sensivelmente menor do que no centro, em virtude da segregação originária do lingote e da descarbonetação que ocorre na laminação.

A parte superficial atinge, pois, a zona crítica antes da parte central, e deve ficar tensionada, porque a deformação ocorre sobre cristais de ferrita. Ora, é fato conhecido que o aço extra-doce apresenta o fenômeno do crescimento crítico quando recozido subseqüentemente a uma deformação compreendida aproximadamente entre 3% e 20%, e a recristalização que ocorre em aço recozido após deformação a frio é semelhante à que tem lugar quando se faz a laminação na temperatura de recozimento⁸, de modo que essa deve ser a causa da ocorrência de grãos grosseiros na superfície de chapas finas acabadas a temperaturas relativamente baixas, pois o resfriamento lento que tem lugar na tira na forma de bobina equivale a um recozimento sub-crítico.

Cumpra ainda lembrar que a camada superficial de uma tira de aço extra-doce efervescente é quase isenta de carbono e impurezas, e é sabido que o ferro puro, devido à sua alta capacidade de cristalização, quando essa não é prejudicada pela presença de impurezas, tende muito fortemente à formação de grãos grosseiros⁹. A ocorrência normal de grãos bastante pequenos na parte central da tira, nos casos de granulação mista, deve ser provocada pelo fato de o aço dessa região central se achar ainda em grande parte na forma austenítica, pois os cristais mistos γ impedem o crescimento de grãos da fase α .⁸

Igualmente as impurezas normais presentes nessa parte central da tira devem atuar como núcleos de recristalização, impedindo o crescimento dos grãos.

Com relação ao fenômeno da granulação mista resta ainda abordar um ponto, qual seja o de seu efeito sobre as propriedades das chapas finas e quente, especialmente a ductilidade. Os resultados dos ensaios efetuados, de dureza, tração e embutimento, não permitem qualquer conclusão sobre o assunto. A única conclusão a que se chega é que esses ensaios de dureza, tração e embutimento não dão informação suficientemente precisa sobre a ductilidade, no caso de chapas finas a quente, sendo impossível afirmar, com base nos resultados obtidos, se a granulação mista melhora ou piora essa propriedade. Em estudo futuro o autor pretende fazer uso do ensaio que mede a anisotropia plástica^{10, 11}, pois essa propriedade poderá talvez medir com precisão as variações da ductilidade e esclarecer melhor o assunto.

5.4. *Propriedades Mecânicas das Chapas Finas a Frio em Função da Temperatura de Acabamento a Quente* — Das bobinas n.ºs 2, 3, 5 e 10 foram retiradas amostras também após a laminação a frio na mesma extremidade correspondente à parte superior das placas de onde foram cortadas as amostras do material laminado a quente. Dessas amostras foram preparados corpos de prova para dureza, embutimento Erichsen, tração e exame ao microscópio, os quais foram recozidos no laboratório, sob vácuo, a uma temperatura de 680°C, com encharque de 10 horas.

Nº da tira	Temperatura de acabamento a quente (°C)	Espessura (mm)	Dureza R_B	Embutimento Erichsen (mm)	Resistência à tração (kg/mm^2)	Limite de escoamento (kg/mm^2)	Razão elástica LE/RT	Alongamento		Redução de largura (%)
								Em 2" (%)	Em 80 mm (%)	
10	775	0,94	40,5	10,7	29,1	24,0	0,82	48,2	40,3	49,9
2	795	0,89	30,0	10,5	28,2	19,3	0,68	48,6	1,0	50,4
5	830	0,94	44,5	10,5	30,3	27,6	0,91	47,6	39,5	50,8
3	860	0,94	41,8	10,4	30,1	25,3	0,84	46,0	38,8	51,1
4	880	0,97	44,5	10,6	29,7	23,4	0,79	47,2	38,9	54,3

Fig. 14 — Valores médios dos resultados dos ensaios de dureza, embutimento e tração das chapas finas a frio laminadas de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

No quadro da figura 14 são dados os valores médios obtidos nos ensaios de dureza, embutimento e tração, bem como a espessura média de cada amostra. A espessura e o embutimento foram determinados em 5 pontos distribuídos ao longo da largura original da tira, a dureza foi obtida fazendo-se 20 determinações num corpo de prova de 10 × 20 cm, recortado da parte central da tira, e para o ensaio de tração foram recortados 5 corpos de prova de cada amostra, da parte central da tira, transversalmente à direção de laminação. Esses corpos de prova para tração foram usinados de acordo com a norma DIN 50114. Na figura 15 os mesmos valores médios aparecem na forma de gráficos. Um exame do quadro e dos gráficos mostra o seguinte:

- A *dureza média* oscila apenas entre 40,5 e 44,5 R_B nas amostras acabadas a quente a 775°C, 830°C, 860°C e 880°C, enquanto que a amostra acabada a quente a 795°C acusa dureza média sensivelmente menor: 30,0 R_B .
- O *embutimento médio* decresce gradualmente com o aumento da temperatura de acabamento a quente desde 775°C até 860°C, subindo de novo um pouco na amostra acabada a quente a 880°C.

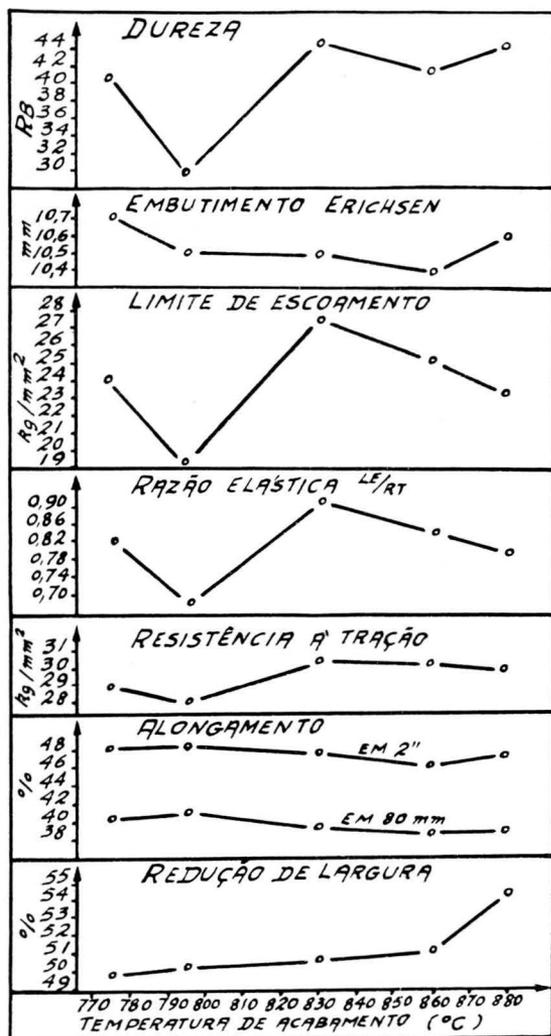


Fig. 15 — Gráficos contendo os valores médios dos ensaios de dureza, embutimento e tração de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

- c) O limite de escoamento médio oscila muito. O melhor valor é apresentado pela amostra acabada a quente a 795°C, vindo a seguir os valores das amostras acabadas a quente a 775°C e a 880°C.
- d) A resistência à tração média é pouco influenciada pela temperatura de acabamento a quente. A amostra acabada a 795°C é a que acusou, no entanto, menor resistência, o que era de esperar porque também seus valores de dureza e limite de escoamento foram os mais baixos.

- e) A *razão elástica média* não acusa influência bem definida da temperatura de acabamento. O melhor valor é o da amostra acabada a 795°C.
- f) O *alongamento médio* é muito pouco influenciado pela temperatura de acabamento a quente. No entanto, as amostras acabadas a quente em temperaturas mais baixas são as que acusaram os melhores valores.
- g) A *redução de largura média* variou diretamente com a temperatura de acabamento a quente, sendo que a amostra acabada a 880°C acusou redução sensivelmente maior do que as demais.

Em resumo, os resultados dos ensaios não permitem que se afirme qual ou quais das amostras são as melhores para estampagem profunda. Se o embutimento Erichsen fôr considerado como o ensaio mais representativo, a melhor chapa seria a da amostra acabada a 775°C, a qual também acusou alongamento bom; tomando-se a dureza, o limite de escoamento e a razão elástica como as características mais importantes, o melhor material seria o da amostra acabada a 795°C, que apresenta valores sensivelmente mais baixos que as demais, além de ter acusado os melhores valores no alongamento. Vê-se, assim, que não é possível tirar qualquer conclusão, como ocorreu também no caso das chapas finas a quente. Pela medição da anisotropia plástica espera o autor indicações mais precisas em estudo futuro.

5.5. *Estrutura das Chapas Finas a Frio em Função da Temperatura de Acabamento a Quente* — Para exame ao microscópio foram retirados 9 corpos de prova de cada uma das 5 amostras, semelhantemente ao que foi feito com as chapas finas a quente, de modo a se ter uma visão perfeita da estrutura desde a borda até o centro da tira. A granulação observada nos

Nº da tira	Temperatura de acabamento	Tamanhos de grão limites (Nºs A S T M)																	
		CP nº 1		CP nº 2		CP nº 3		CP nº 4		CP nº 5		CP nº 6		CP nº 7		CP nº 8		CP nº 9	
		Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.	Cen-trô	Su-perf.
10	775	7-9	8-9	7-9	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7
2	795	7-8	6-7	7-8	6-7	6-8	6-7	4-7	4-7	3-7	3-7	2-7	2-7	2-7	2-7	2-7	2-7	2-7	2-7
5	830	7-8	8-9	8-9	7-8	7-8	7-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8	6-8
3	860	7-9	7-9	8-9	7-8	7-8	6-8	7-8	6-8	7-8	6-8	6-8	6-7	6-8	6-7	6-8	6-7	6-8	6-7
4	880	8-9	8-9	8-9	8-9	7-9	7-9	5-8	5-8	5-8	5-8	5-8	5-8	5-8	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7

Nota: O CP n.º 1 foi cortado a 1 cm da borda e o CP n.º 9 do centro da tira. Os demais são intermediários, separados de 5 cm dos vizinhos.

Fig. 16 — Tamanhos de grão limites determinados no centro e na parte superficial, ao longo da largura, em chapas finas a frio originárias de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas.

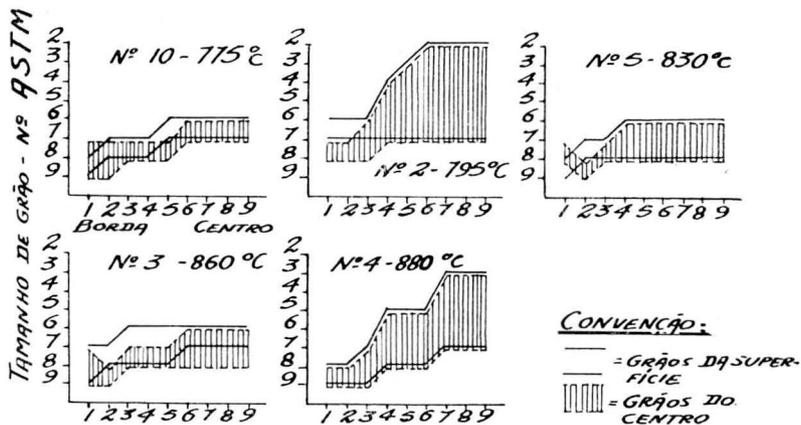


Fig. 17 — Representação gráfica dos tamanhos de grão máximos e mínimos observados na superfície e no centro das amostras de chapas finas a frio originárias de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas. Os números das abscissas representam a posição dos corpos de prova em relação à largura da tira.

9 corpos de prova de cada uma das 5 amostras é dada no quadro da figura 16. Na figura 17 êsses dados são novamente reproduzidos na forma de gráficos. As conclusões a que se chega são:

- A granulação mista constatada nas amostras ns. 2, 5 e 3 no estado de laminadas a quente foi quase totalmente eliminada pela laminação a frio seguida de recozimento.
- Em tôdas as 5 amostras a granulação é menor nas bordas do que no centro. Os grãos começam a aumentar de tamanho a aproximadamente uns 10 cm da borda, e a partir de uns 20 a 30 cm, a contar também da borda, atingem o maior tamanho, o qual permanece constante daí até o centro. Nas bordas os grãos abrangem faixas de tamanhos 6 a 8, 7 a 9 e 8 a 9, e na parte central da tira 2 a 7, 3 a 7, 6 a 7 e 6 a 8.
- A maior granulação é a que apresenta a amostra n.º 2, acabada a quente a 795°C, a qual, no estado de laminada a quente, não foi, contudo, a que acusou o maior tamanho de grão médio.

Na figura 18 é reproduzido o aspecto da granulação, desde a borda até o centro, das 5 amostras estudadas (foram omitidos os corpos de prova n.ºs 2, 4, 6 e 8).

Comparando-se a estrutura do aço após laminação a frio e recozimento com a que as amostras das mesmas tiras apresentaram no estado de laminadas a quente (figs. 10, 11 e 12),

Números das amostras e respectivas temperaturas de acabamento a quente

N.º 4 — 880°C

N.º 3 — 860°C

N.º 5 — 830°C

N.º 2 — 795°C

N.º 10 — 775°C

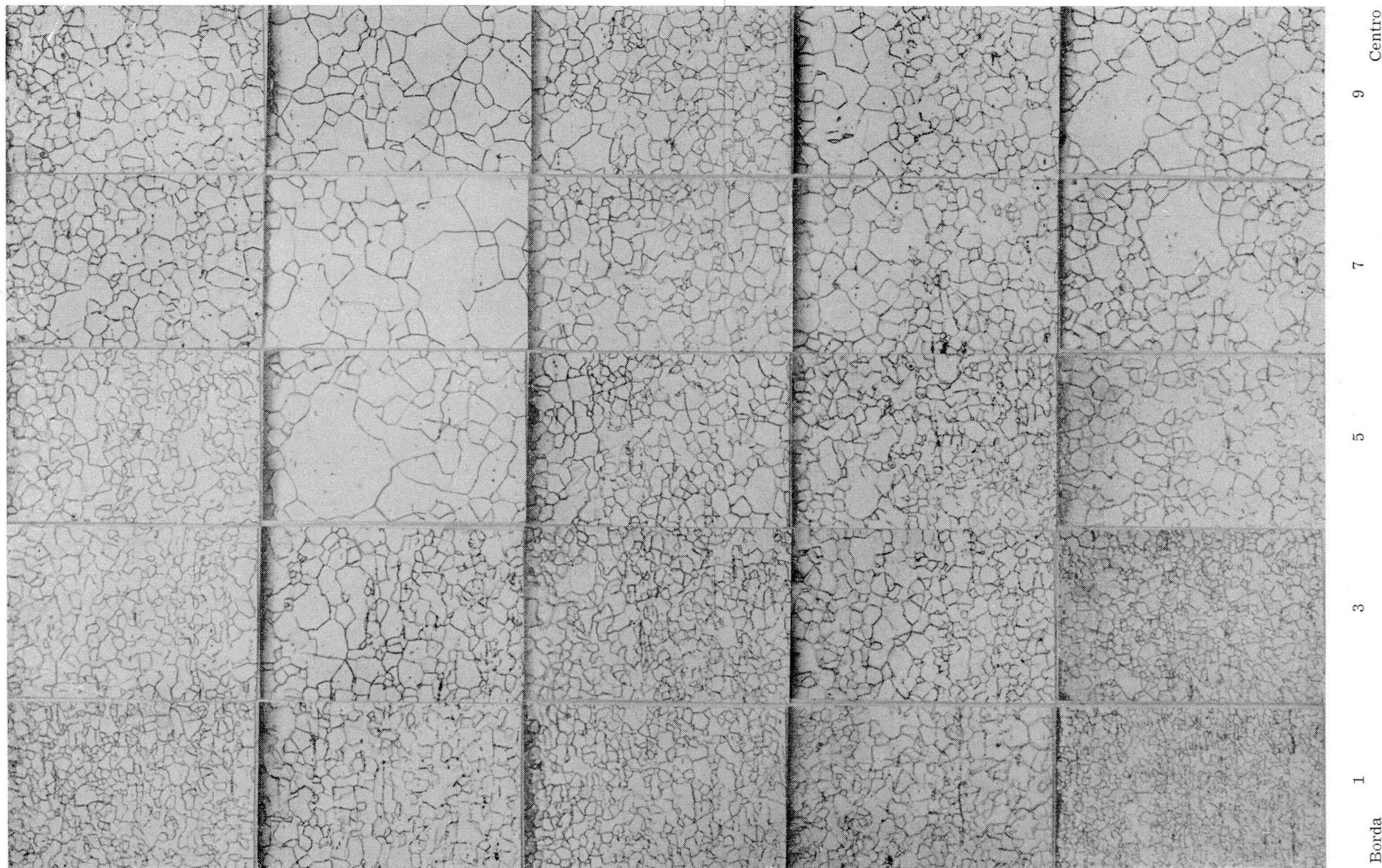


Fig. 18 — Aspecto da estrutura de chapas finas a frio (as fotos abrangem cêrca da metade da espessura) originárias de chapas finas a quente acabadas em diferentes temperaturas. Os números 1, 3, 5, 7 e 9 correspondem aos corpos de prova longitudinais que foram recortados desde a borda até o centro da tira. Ataque c/ nital a 5%. Aumento de 100 X.

6. CONCLUSÕES

As conclusões mais importantes que o presente estudo permite tirar são as seguintes:

- a) Em chapas finas a quente de 1,70 a 2,16 mm de espessura, a dureza e as propriedades de tração são sensivelmente melhores quando o acabamento ocorre a temperaturas acima de 800°C, e nas de 3,05 mm de espessura essas mesmas propriedades são melhores quando o acabamento é feito acima de 830°C.
- b) A granulação das chapas finas a quente, com espessura desde 1,70 até 3,05 mm, é mista na quase totalidade dos casos quando o acabamento ocorre abaixo de 810°C; é ora mista, ora uniforme, quando o acabamento tem lugar entre 810°C e 870°C, e é sempre uniforme quando o acabamento é feito acima de 870°C.
- c) A ocorrência de granulação mista deve ser provocada principalmente pelo fato de se deformar a camada superficial da tira, no último passe a quente, quando essa camada já se encontra na forma de ferro α .
- d) A temperatura de enrolamento a quente, dentro dos limites de 535°C a 685°C, não tem influência bem definida sobre a dureza nem sobre o tamanho e a distribuição dos grãos.
- e) Os ensaios de dureza, embutimento e tração não permitem que se determine com a desejada precisão a estampabilidade das chapas finas a quente. Em vista disso, não foi possível verificar se a granulação mista é ou não prejudicial.
- f) Igualmente com as amostras de chapas finas a frio os ensaios de dureza, embutimento e tração demonstraram não poder determinar com precisão a qualidade de estampagem.
- g) A granulação mista das chapas finas a quente é quase totalmente eliminada pelas operações de laminação a frio e recozimento.
- h) Nas chapas finas a frio o tamanho dos grãos costuma variar desde a borda até o centro, sendo os grãos menores na borda.
- i) A granulação homogênea obtida na chapa fina a quente pelo acabamento acima de 870°C desaparece após laminação a frio e recozimento, dando lugar a grãos menores na região da borda do que na região central.

*

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Direção da Companhia Siderúrgica Nacional a permissão para publicar o presente estudo, e também ao pessoal do Departamento de Pesquisas e do Departamento da Laminação pela excelente colaboração prestada.

percebe-se de imediato que a estrutura da chapa fina a frio não depende, tanto quanto se poderia supor, da estrutura da chapa fina a quente da qual é originária, o que contraria a afirmativa de alguns pesquisadores^{4, 12} de que tôdas as outras condições sendo iguais, o tamanho de grão de uma chapa fina a frio, após recozimento, é tanto maior quanto maior tiver sido o tamanho de grão da chapa fina a quente que lhe deu origem.

Outro fato que pode ser notado é que a estrutura da amostra n.º 4, proveniente da chapa fina a quente acabada a 880°C, e que após a laminação a quente apresentou granulação uniforme (tamanho 8 a 9) ao longo de tôda a largura, perdeu essa uniformidade de granulação, acusando grãos de tamanho 8 a 9 na borda e 3 a 7 no centro da tira.

Aceitando-se como correta a afirmativa de que o tamanho de grão ideal para estampagem profunda em chapas finas a frio é n.ºs 6 a 7^{2, 13}, pode-se concluir que as amostras das tiras n.ºs 10, 5 e 3, acabadas a quente respectivamente a 775°C, 830°C e 860°C, são as que apresentam a granulação mais adequada, com tamanho variando de 6 a 8 na parte central e 7 a 9 nas bordas, enquanto que as amostras das tiras n.ºs 2 e 4, acabadas a quente a 795°C e 880°C, acusam granulação já bastante maior do que a ideal: tamanhos 2 a 7 e 3 a 7 no centro, e 6 a 8 e 8 a 9 nas bordas, respectivamente.

A *cementita terciária* também foi estudada sob o microscópio, constatando-se que seu aspecto não varia muito nas 5 amostras. A figura 19 reproduz a aparência média da mesma.



Fig. 19 — Aspecto da cementita terciária no corpo de prova n.º 5 da amostra de chapa fina a frio n.º 4. Ataque com picrato de sódio. Aumento. 250 ×.

BIBLIOGRAFIA

1. GOETTGE, D. T. e ROBINSON, E. L. — “Some Effects of Hot Strip Mill Rolling Temperatures on Properties of Low Carbon Sheet-Coils”. Transactions AIME, vol. 206, págs. 1169-1174, 1956.
2. HONEYMAN, A. J. K. — “The Metallurgy of Steels for Deep Drawing”. Sheet Metal Industries, vol. 34, n.º 34, págs. 51-65, janeiro de 1957. Londres.
3. RICHEY, W. H. — “Effects of Heating and Rolling in the Strip Mill”. Iron and Steel Engineer Year Book, 1944.
4. RICKETT, R. L. e KRISTUFEK, E. C. — “The Microstructure of Low Carbon Steel”. Transactions of American Society for Metals, vol. 41, pág. 1113-1144; Cleveland, 1949.
5. SAMUELS, M. L. — “Grain Growth in Normalised Sheet Steel During Box Annealing”. Transactions AIME, vol. 31, pág. 327-345; New York, 1938.
6. SAMUELS, M. L. e BOYLES, A. — “Some Problems in the Production of Low Carbon Sheets in Non Continuous Mills”. Transactions of American Society for Metals, vol. 26, págs. 929-949; Cleveland, 1938.
7. SAFIAN, M. M. — “Laminadores Contínuos de Chapas a Quente”. Metalurgizdat, págs. 128 a 150; Moscou, 1956.
8. HOUDREMONT, E. — “Handbuch der Sonderstahlkunde”. Verlag Stahleisen m. b. H., pág. 159; Dusseldorf, 1956.
9. Idem, pág. 55.
10. WHITELEY, R. L.; WISE, D. E. e BLICKWEDE, D. J. — “Drawability and Anisotropy of Metals”. Trabalho apresentado no “International Colloquium on the Forming of Sheet Metals”, efetuado em Paris, de 23 a 25 de maio de 1960.
11. LANKFORD, W. T.; SNYDER, S. C. e BAUSCHER, J. A. — “New Criteria for Predicting the Press Performance of Deep Drawing Sheets”. Transactions of American Society for Metals, vol. 42, págs. 1197-1232; Cleveland, 1950.
12. HINDSON, R. D. — “Metallurgical Factors in the Hot Working and Cleaning of Hot Rolled Strip and their Influence on the Cold Reduced Annealed Product”. Proceedings from the International Symposium on the Annealing of Low Carbon Steel, pág. 9; Cleveland, 1957.
13. ASCOUGH, H. H. — “Annealing of Cold Reduced Sheet and Coil in Europe”. International Symposium on the Annealing of Low Carbon Steel, pág. 96; Cleveland, 1957.



DISCUSSÃO ⁽¹⁾

J. Borges Ferreira ⁽²⁾ — Muito agradeço ao Eng. Sylvio Friedrich a apresentação de seu trabalho, sem dúvida palpitante para o estabelecimento de controles visando a uniformidade das características das chapas laminadas a quente e a frio. A contribuição também tentou correlacionar os ensaios de dureza, de embutimento e de tração com as características de estampabilidade profunda, de grande interesse entre nós. Estão abertos os debates.

A. Pedrosa da Silva ⁽³⁾ — O Autor subordina propriedades mecânicas e estruturais em função das temperaturas de acabamento e de enrolamento das chapas. Perguntaria como lhe foi possível controlar essas temperaturas?

S. Friedrich ⁽⁴⁾ — Isso é perfeitamente possível porque, ao longo da laminação, nós dispomos de pirômetros que acusam a temperatura da chapa. Esta temperatura é medida na saída do forno, logo que a placa vai entrar na cadeira esboçadora, na entrada e na saída do trem acabador e na entrada da bobinadeira, de modo que são quatro os pontos em que a temperatura é registrada.

A. Pedrosa da Silva — Nos laminadores, os jatos de água permanecem com a mesma pressão?

S. Friedrich — Os jatos de água podem ser variados; são separados por grupos, de modo que podem ser ligados todos, ou parte. Conforme o material, faz-se a avaliação da quantidade de água que é necessária.

H. Schlacher ⁽⁵⁾ — Acêrca da figura 8 tenho uma pergunta: a curva de dureza, a curva de limite de escoamento e também a da razão elástica são bem uniformes, tendendo a subir com as temperaturas de acabamento. Sômente a curva do embutimento tem um mínimo na temperatura alta. Qual é a razão dêste mínimo?

S. Friedrich — Êsses ensaios não dão uma informação suficientemente precisa acêrca da qualidade de estampabilidade de uma chapa. Esta é a conclusão a que se chega após um estudo dêsses, conclusão a que, aliás, muito pesquisador já chegou. É porisso que há uma preocupação muito grande em vários países para se chegar a um ensaio que represente fielmente a estampabilidade de uma chapa. Êste nosso estudo veio comprovar tal fato. Os ensaios feitos, de dureza, de embutimento e de tração, não dão uma informação suficientemente precisa. No conjunto, êles dão uma idéia boa, mas quando se quer acompanhar experiências êles não mostram o fenômeno com a precisão que seria

(1) Contribuição Técnica n.º 443, publicada neste Boletim. Discutida na Comissão "G" do XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, julho de 1961.

(2) Membro da ABM e Presidente da Comissão; Engenheiro da Usina de Volta Redonda da CSN; Volta Redonda, RJ.

(3) Membro da ABM e Engenheiro da USIMINAS; Belo Horizonte, MG.

(4) Membro da ABM e Autor do trabalho; Engenheiro da Usina de Volta Redonda da CSN; Volta Redonda, RJ.

(5) Membro da ABM e Engenheiro da Usina de Monlevade da CSBM; Monlevade, MG.

de se desejar. No caso das chapas finas a quente, o ensaio de embutimento de Erichsen deixa muito a desejar. Nas chapas a frio ele já é mais indicativo. Daí esta disparidade.

H. Schlacher — Então não há uma explicação certa para este fenômeno? Porque em temperatura alta normalmente não deveria haver esta caída.

S. Friedrich — Realmente. Acho que os ensaios não tem precisão suficiente.

A. Foldes ⁽⁶⁾ — Queria saber dos tratamentos de chapas laminadas a quente nas diversas temperaturas que foram mostradas aqui, nos diferentes modelos. A formação de camadas de oxidação resulta de compostos diferentes; sua composição é de óxidos de ferro das mais diferentes e variadas misturas. Esses óxidos também, como é do conhecimento de todos, são isoladores do calor. Pode ser que, especialmente na estampabilidade de uma chapa, o isolamento térmico dessa camada oxidada, tenha influido sobre a formação da cristalização original do ferro.

S. Friedrich — É um ponto interessante que o senhor levantou, realmente. Nós não tivemos a preocupação de estudar em detalhes as camadas de óxido. Mas é uma coisa que pode ser verificada num estudo futuro.

A. Foldes — Quer dizer que essas camadas de óxidos não foram removidas antes do ensaio?

S. Friedrich — No material a quente, não foram removidas. Foi ensaiado nas mesmas condições que ele costuma ser empregado.

A. Foldes — É empregada geralmente uma chapa laminada a quente depois de ser decapada. Acho que é uma falha do estudo feito, porque as composições mecânicas das carepas de laminação são absolutamente divergentes daquelas da própria chapa. De maneira que eu parto do princípio que, no caso desse trabalho, a casca de laminação deveria ter sido removida. Porisso pergunto se não seria interessante incluir neste ensaio a verificação da remoção desta camada e, provavelmente também, o estudo da composição da camada de laminação que, por sua composição diferente, pode ter influência sobre o resfriamento das camadas superiores.

S. Friedrich — Acho interessante a sua observação. E de fato nós poderemos fazer uma verificação num estudo posterior.

J. Amaral Cintra ⁽⁷⁾ — Gostaria de lembrar ao Eng. Friedrich do valor do "*ensaio de tração verdadeiro*" como meio de qualificação de chapas para estampagem. Fizemos o ano passado um trabalho a respeito; mostrámos que o ensaio de tração convencional, realmente, trás pouca contribuição para a definição dessas propriedades de estampabilidade. Entretanto, dois parâmetros que poderão ser tirados de um ensaio de tração verdadeiro, podem definir razoavelmente a estampabilidade das chapas. Este ensaio verdadeiro é mais físico; leva em con-

(6) Membro da ABM e Diretor da Sunbeam do Brasil Anticorrosivos; São Paulo, SP.

(7) Membro da ABM e Docente da EPUSP; Engenheiro da Mercedes-Benz do Brasil; São Paulo, SP.

sideração as dimensões de uma chapa enquanto ela está sendo deformada. E a experiência tem demonstrado que é mais correlacionado com a função da chapa. Além disso queria lembrar que está incluído no temário desta sessão um trabalho que devo apresentar sobre o mesmo assunto. (*)

S. Friedrich — Estou inteiramente de acordo com o que informa o Dr. Cintra. Somente não apliquei ainda o que ele sugeriu em 1959 porque nosso estudo foi destinado a verificar, a testar os nossos ensaios, e foi mostrado claramente que não são satisfatórios como teríamos desejado. De modo que nós já temos programado a continuação deste estudo e iniciaremos a medida das propriedades pelo método que o senhor preconiza.

J. Amaral Cintra — Aliás acho que faltaria ainda uma outra parte em seu trabalho, que seria a de tomar essas diferentes chapas, com esses diferentes resultados, e estampá-las.

S. Friedrich — Exatamente. Tudo isso temos em mente realizar.

J. Amaral Cintra — Então queira contar com a nossa colaboração e com o nosso entusiasmo.

(*) Ver os seguintes trabalhos acenados:

- “O ensaio de tração como meio de qualificação de chapas finas para estampagem”, de J. Amaral Cintra; ABM-Boletim, volume 16, páginas 457 a 470.
- “Sobre a estampabilidade de chapas finas”, pelo mesmo Autor; publicado neste Boletim, pág. 147.