

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO RECOZIMENTO DAS CHAPAS FINAS A FRIO PARA ESTAMPAGEM PROFUNDA PRODUZIDAS PELA COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL ⁽¹⁾

MAURÍCIO DE CARVALHO MOREIRA ⁽²⁾

RESUMO

No presente trabalho procurou-se determinar até que ponto os fatores tempo de encharque e temperatura de recozimento, podem ser responsáveis pelas propriedades mecânicas e estruturais das chapas finas a frio para estampagem profunda produzidas pela Companhia Siderúrgica Nacional.

O estudo foi realizado em chapa de aço extra doce, tendo sido escolhidas duas amostras que no Laminador de Tiras a Quente (LTQ) alcançaram as temperaturas de acabamento de 825°C e de 870°C, e de enrolamento de 675°C e 685°C respectivamente.

O recozimento foi feito em vácuo, no Laboratório do Departamento de Pesquisas, tendo sido estudada a faixa de temperatura de 600°C a 700°C com tempos de encharque que variaram de 15 minutos até 20 horas.

Sempre que possível se procurou seguir nos ensaios mecânicos a norma DIN 1623; para os estudos metalográficos foram utilizadas as normas ASTM.

Os dados obtidos revelam que, após laminação a frio e recozimento, as amostras estudadas possuíam granulação mais fina do que aquela que é considerada ideal para estampagem profunda, não sendo possível obter-se, com recozimento, a temperatura de até 700°C e tempos de encharque de até 20 horas, um crescimento sensível dos grãos. As propriedades mecânicas, no entanto, melhoram consideravelmente; atingem valores muito bons quando o recozimento é feito a temperaturas próximas a 700°C e com tempos de encharque longos.

(1) Contribuição Técnica n.º 442. Apresentada ao XVI Congresso Anual da ABM; Pôrto Alegre, RS, julho de 1961.

(2) Membro da ABM; Engenheiro Industrial Metalúrgico; Assistente de Pesquisas Metalúrgicas do Departamento de Pesquisas da Cia. Siderúrgica Nacional; Volta Redonda, RJ.

1. INTRODUÇÃO TEÓRICA (*)

1.1 — *Generalidades:* As chapas de aço comum que se destinam a estampagem profunda, têm necessidade de preencher determinadas condições de fabricação, cujo controle rigoroso deve ser feito desde a Aciaria. No entanto, neste trabalho, serão tecidos comentários teóricos apenas a partir da Laminação a Quente, já que sua influência é muito grande para as condições finais do material.

Para que uma chapa aceite estampagem profunda, é necessário que possua determinadas características essenciais relacionadas com: dureza, limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, tamanho de grão cristalino, deformação da rede cristalina, etc. Todas essas características podem ser influenciadas a partir do Laminador de Tiras a Quente pela: velocidade de laminação a quente; temperatura de acabamento (no Laminador a Quente); velocidade de resfriamento; temperatura de enrolamento; percentagem de redução a frio; temperatura de recozimento; tempo de encharque do material no recozimento; percentagem de encruamento.

1.2 — *Temperatura de acabamento:* A temperatura de acabamento dá uma idéia das condições em que se processou a laminação a quente, e tem influência direta e preponderante no tamanho do grão do laminado a quente.

O que determina se uma operação de laminação se deu a quente ou a frio é o estado do material após o trabalho mecânico. A grande maioria dos autores define trabalho a quente como sendo “*A deformação plástica de um metal a uma temperatura e velocidade tais, que não permaneça tensão interna, sendo o limite inferior da temperatura para este processo a temperatura de recristalização*”¹.

No entanto, para o material em estudo não basta que, ao final da laminação a quente, ele se apresente recristalizado; há necessidade de que sejam preenchidas outras condições, como:

- A granulação deve ser homogênea em seu tamanho e distribuição.
- A granulação não deve ser muito fina.

É comum se observar no material laminado a quente uma faixa superficial de grãos grandes, enquanto a parte central possui grãos menores. A incidência dessa granulação mista diminui à medida que a temperatura de acabamento aumenta, de-

(*) Todas as considerações aqui emitidas dizem respeito a material para estampagem profunda MSG-20.

saparecendo no material acabado acima de 870°C (vide figuras 1 e 2) ².

Isto é motivado pela desigual distribuição do carbono, provocando nas zonas mais pobres daquele elemento maior probabilidade de formação de ferrita, necessitando, por conseguinte, de uma temperatura mais alta para permanecer austenítica. Observando-se o detalhe do diagrama Fe-C das figuras 3 e 4 pode-se concluir o seguinte:

- 1.º — Se o material fôr laminado acima da temperatura Ar_3 (para 0,03% de C; $Ar_3 = 863^\circ\text{C}$) o trabalho mecânico será feito todo êle sôbre material na forma austenítica, sofrendo, por conseguinte, uma recristalização homogênea (isto supondo que o carbono estivesse homogêneamente distribuído).
- 2.º — Se o material fôr laminado abaixo da temperatura Ar_3 , o trabalho mecânico será feito em material parte austenítico, parte ferrítico (tanto mais ferrítico quanto mais baixa fôr a temperatura), sofrendo, por conseguinte, recristalização desigual.

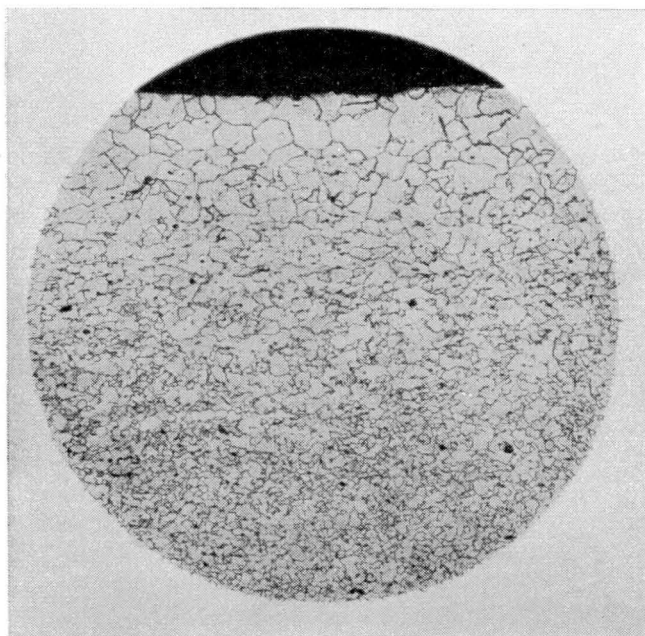


Fig. 1 — Amostra de aço laminado a quente, acabada no LTQ a 820°C. Granulação mista. Ataque Nital: 100 ×.

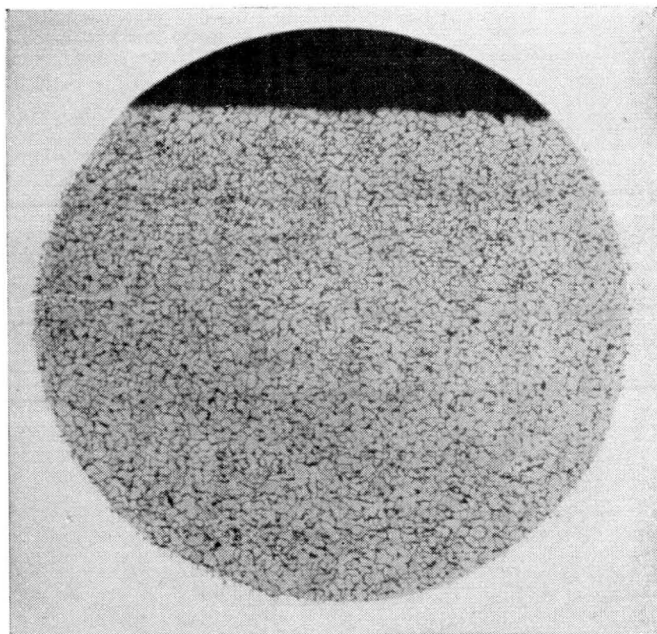


Fig. 2 — Amostra de aço laminado a quente, acabada no LTQ a 870°C. Granulação uniforme. Ataque Nital; 100 ×.

Então, uma estrutura de grãos uniformes, equiaxiais e de tamanho adequado para que, após outros tratamentos (laminação a frio e recozimento), possa servir para estampagem profunda, exige que a temperatura de acabamento tenha sido pouco maior (10°C a 30°C) que a temperatura crítica A_{r3} , possibilitando assim que o material tenha sido todo êle praticamente laminado na forma austenítica.

Se êsse procedimento não fôr obedecido, o material pode ser laminado contendo alguma ferrita, dando como conseqüência granulação heterogênea e deformada, sendo que essa granulação heterogênea poderá não ser corrigida pelos tratamentos posteriores normais.

A faixa de temperatura de acabamento que se recomenda, então, para êsse material é de 875-900°C.

Todo êsse contrôle deve ser feito tendo em vista uma das leis básicas de recristalização que diz: *“Para as mesmas condições de material, de redução a frio, e de recozimento (temperatura e tempo) o grão recristalizado será tanto menor quanto menor fôr o grão antes do trabalho a frio”*¹.

1.3 — *Velocidade de resfriamento; Temperatura de bobinamento:* A velocidade de resfriamento age no sentido de dificultar ou favorecer a precipitação, principalmente de carbonetos e sua conseqüente segregação. Ora, no aço em resfriamento, no momento em que é ultrapassada a temperatura de 721°C , se inicia uma precipitação de carbonetos; se o resfriamento fôr feito lentamente irá favorecer a que êsses carbonetos segreguem para a zona intergranular, dando origem a um resfriamento nos grãos cristalinos de dureza muito superior àquela dêsses últimos. Porém, se êste resfriamento fôr suficientemente rápido, não haverá tempo para que os carbonetos segreguem, ficando retidos de um modo disperso em tôda a massa metálica, tornando o material mais homogêneo.

Essa velocidade está intimamente ligada à temperatura de bobinamento, pois o material deve ser resfriado não só rapidamente, como também a ponto de produzir um enrolamento a baixa temperatura.

Experiências anteriores⁴ comprovaram que a temperatura de bobinamento determina o tamanho e a forma das partículas de cementita, sendo que uma temperatura de bobinamento alta é responsável por partículas de cementita maiores e de forma irregular, enquanto que temperaturas baixas produzem melhor distribuição e menores partículas de cementita. A temperatura recomendada⁴ para bobinamento é de no máximo 650°C .

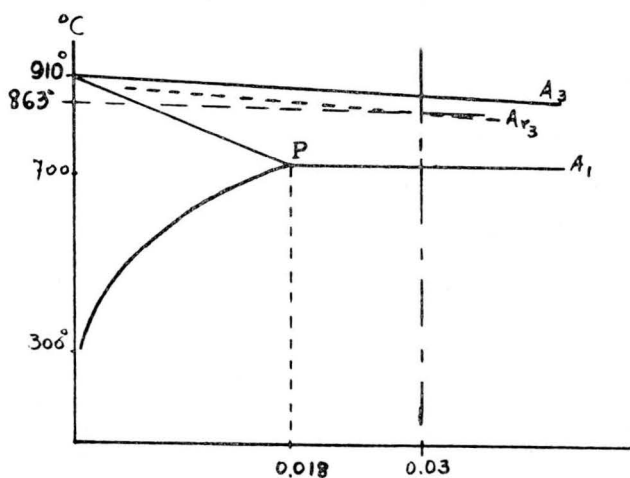


Fig. 3 — Detalhe esquemático do diagrama Fe-C na zona de interesse do trabalho.

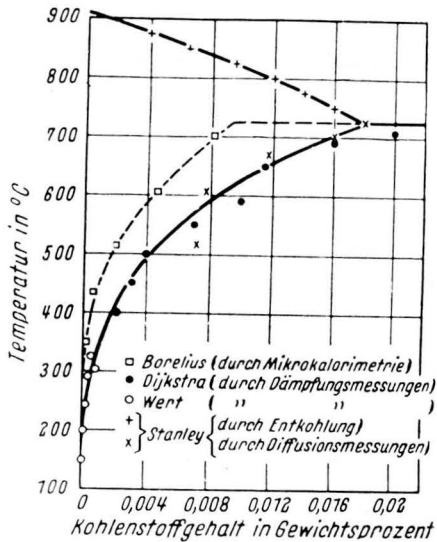


Fig. 4 — Detalhe do diagrama Fe-C mostrando os resultados de diferentes estudos para a determinação da máxima solubilidade do carbono na ferrita. (Houdremont, E. — Handbuch der Sonderstahlkunde — Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf, 1956, pág. 189). Daempfungsmessungen = medidas do amortecimento interno. Entkohlung = descarbonetação. Diffusionsmessungen = medidas da difusão. Kohlenstoffgehalt in Gewichtsprozent = teor de carbono em % de peso.

1.4 — *Porcentagem de redução a frio*: Embora diversas sejam as teorias que procuram explicar o fenômeno da recristalização (nucleação e crescimento de grão), o que fica logo evidenciado é que, para que haja recristalização abaixo da temperatura crítica inferior, é indispensável que o material tenha sofrido uma deformação a frio. Vale ressaltar que:

- 1.º — Alterthum, Anderson e Mehl⁵ admitem que os núcleos de recristalização verdadeiros se formam nos pontos de maior energia do reticulado, presumivelmente onde a curvatura do reticulado seja mais pronunciada, e que o núcleo cresce à custa da rede tensionada.
- 2.º — Masing e Burgers⁵ dizem que fragmentos livres de tensão são quebrados do reticulado durante o processo de deformação e com o recozimento crescem à custa da matriz que os envolve.

Os primeiros justificam sua hipótese (*Hipóteses dos pontos de maior energia*) dizendo:

- Os núcleos se formam na intersecção dos planos de escorregamento (*slip planes*), no contorno dos grãos e nos pontos de contacto dos grãos onde há razão para se esperar maior energia de deformação.
- A velocidade de nucleação aumenta com o aumento da deformação.
- Os pontos sob tensão se tornam mais ativos com o aumento da temperatura.

Como principal argumento dos segundos (*Hipótese dos pontos de menor energia*) aparece:

- A orientação preferencial dos grãos recristalizados é freqüentemente semelhante à estrutura anteriormente deformada, isto porque os novos grãos se formam à custa de fragmentos de velhos grãos deformados.

Com base, então, na primeira hipótese se verifica que se um material metálico não apresentar pontos de “*Maior energia*” de deformação não terá sua estrutura alterada por um recozimento sub-crítico, sofrendo apenas com êsse tratamento um alívio das tensões internas.

Um dos meios de se fornecer maior energia a alguns pontos do material é provocar uma deformação a frio. Se essa deformação a frio não fôr capaz de produzir algum ponto com energia suficiente para que seja um núcleo de recristalização, o recozimento sub-crítico apenas aliviará a tensão interna produzida.

Se, no entanto, essa deformação a frio fôr pouco intensa, porém já capaz de produzir alguns pontos com energia suficiente para ser um núcleo, ocorrerá uma recristalização com crescimento dos grãos; é o crescimento crítico, que se dá desde aproximadamente 4% até 20% de deformação (o máximo crescimento ocorrendo em tôrno de 4%, vide figura 5), sendo que maiores deformações são necessárias quanto maior fôr o grão inicial.

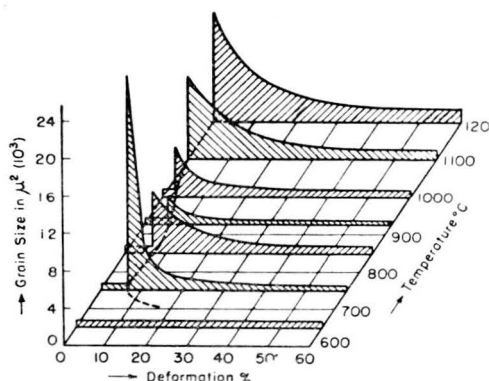


Fig. 5 — Diagrama de recristalização para aço com 0,03% de carbono⁵.

Agora, à medida que a deformação fôr sendo cada vez mais intensa, surgirá maior número de pontos com energia suficiente para nuclear, e com o recozimento, em lugar de ocorrer

| VARIÁVEL | VALOR RECOMENDADO | OBSERVAÇÕES |
|-----------------------|----------------------------|--|
| Limite de Escoamento | Max. 27 kg/mm ² | CP transversal à direção de laminação |
| Tamanho de grão | 6 a 7 ASTM | 24 a 96 grãos/pol.2 de imagem com 100 X granulação homogênea |
| Alongamento | Min. 40% | CP transversal à direção de laminação. Medido em 80 mm. |
| Embutimento | Min. 9,95 mm | Erichsen |
| Dureza | Max. 45 R _B | |
| Limite de Resistência | Min. 28 kg/mm ² | CP transversal à direção de laminação |

Fig. 6 — Quadro dos valores recomendados pela ASM, ASTM e DIN para as características de chapa fina a frio de bitola 20 para estampagem profunda.

crescimento de grão, haverá o aparecimento de maior número de grãos devido ao aumento dos núcleos de recristalização.

Dá a importância do controle da percentagem de redução na laminação a frio. Estudos anteriores realizados pelo autor³ demonstraram que a redução a frio, para esse material, metalúrgicamente boa é de 40%. Na usina de Abbey⁴ a redução usada é de 40% a 50%, sendo *admitido em casos excepcionais*, devido às condições de espessura do laminado a quente, uma redução *máxima* de 60%.

O grão ideal para o material laminado a frio e recozido é de 6 a 7 ASTM. Com reduções a frio superiores a 50% o grão usualmente obtido é de tamanho menor que 7 ASTM, isto quando a laminação a quente é bem conduzida⁴.

1.5 — *Recozimento sub-crítico*: O recozimento sub-crítico é um tratamento térmico em que o material é aquecido até pouco abaixo da temperatura crítica (721°C), permanece nela por algum tempo, e em seguida sofre resfriamento lento (cerca de 30°C/h). Esse tratamento é capaz, dentro de certos limites, de conferir ao aço determinadas propriedades mecânicas e metalúrgicas, pela ação que tem sobre as tensões internas, forma e tamanho dos grãos cristalinos.

Embora por definição não seja fixada uma temperatura mínima para recozimento sub-crítico, essa não deve ser inferior a 600°C para simples recristalização e 620°C quando se desejar

início de crescimento de grão, principalmente quando da utilização de tempos curtos de tratamento⁶.

Um pequeno crescimento dos grãos ocorre na faixa 620°C-700°C verificando-se que, para tempos de encharque iguais, o grão cresce proporcionalmente com a temperatura. Tratamentos próximos de 720°C trazem pequeno ou nenhum benefício ao material, com risco mesmo de dificultar a operação. O tempo de encharque é importante como um fator de crescimento do grão. No entanto, em média, pode ser considerado que para resultados semelhantes, dobrar o tempo de encharque torna possível baixar apenas 10°C na temperatura¹.

O ciclo de recozimento mais comum para as chapas de estampagem profunda é de 665°C-680°C durante 8 horas, e para estampagem extra-profunda 665°C-680°C durante 12 horas, isto para material trabalhado até então em boas condições.

*

Encerrando essas considerações teóricas são dados no quadro da figura 6, em resumo, os valores recomendados para algumas características das chapas de bitola 20 para estampagem profunda.

2. RELATO DO TRABALHO

2.1 — *Recozimento; local e condições:* A primeira dificuldade a ser vencida logo de início na realização do presente estudo foi a de como conseguir no laboratório do Departamento de Pesquisas, com as instalações existentes, um recozimento branco.

Como é sabido, na faixa de temperatura programada para o estudo, se o material não estiver protegido por uma atmosfera inerte, redutora ou sob vácuo, se oxidará, fato êsse indesejável no trabalho em questão, já que as amostras iriam ser tratadas na forma e dimensões de corpos de prova e a carepa iria alterar-lhes as medidas ou pelo menos as propriedades de superfície.

O forno a ser utilizado era um forno de mufla com aproximadamente 43 cm × 26,6 cm × 15,2 cm internamente. Várias tentativas feitas não resultaram satisfatórias.

Surgiu, então, mais um dispositivo que, aliando a experiência adquirida na série de tentativas, com uma confecção mais trabalhosa, se supunha solucionaria o problema, uma vez que eliminava a solda amarela e possibilitava o uso da gacheta de borracha, muito mais indicada para o caso do vácuo.

Foi êsse o dispositivo que deu resultado absolutamente perfeito: a caixa era feita de um tubo de aço de 12,7 cm (5") de diâmetro interno, fechado em uma das extremidades por uma tampa soldada elêtricamente, e na outra possuindo um flange com gacheta de borracha, no qual estavam fixados os tubos de vácuo e do termopar da caixa por meio de solda branca (estanho), sendo êsse conjunto, do flange com a gacheta, refrigerado por meio de água corrente. O esquema da caixa e fotografias da instalação aparecem nas figuras 7, 8 e 9.

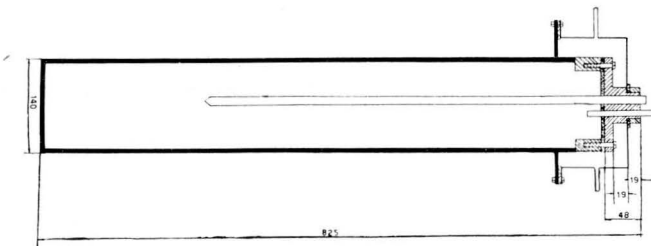


Fig. 7 — Corte longitudinal da caixa usada para o recozimento. Cotas em milímetros.

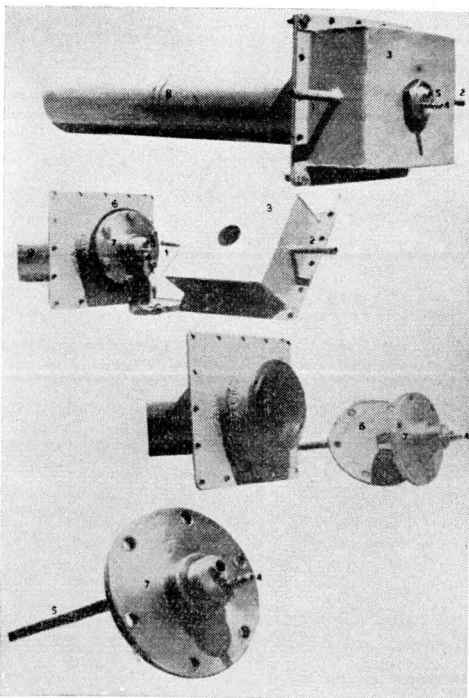


Fig. 8 — Fotos da caixa em detalhes. 1 — Entrada de água de refrigeração do flange. 2 — Saida da água de refrigeração do flange. 3 — Caixa de refrigeração. 4 — Tomada de ligação do vácuo. 5 — Gacheta de borracha. 7 — Flange de vedação da caixa. 8 — Corpo da caixa.

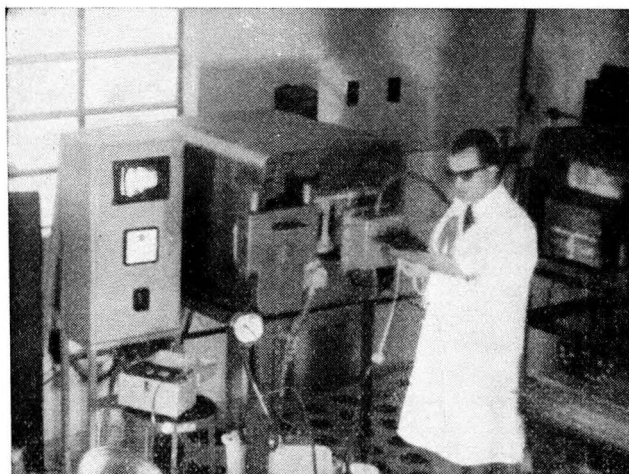


Fig. 9 — Vista geral da instalação de recozimento.

Tornou-se possível, então, a realização dos diversos recozimentos programados, que combinavam as temperaturas de 600°C, 620°C, 640°C, 660°C, 680°C e 700°C, com os tempos de encharque de 15, 30, 45, 60, 120, 240, 600 e 1.200 minutos, totalizando 48 condições de tratamento. Essa série de recozimentos previa cobrir tôdas as possibilidades de recozimento sub-crítico de interesse.

O primeiro teste visou verificar se havia diferença entre as temperaturas acusadas pelos termopares da caixa, do forno e a temperatura das amostras. Observou-se, então, que a temperatura do forno se mantinha 40°C acima da temperatura acusada pelo termopar da caixa, que, por sua vez, assinalava temperatura igual à do termopar soldado às amostras. Sendo assim, o controle da temperatura de recozimento ficou sendo feito pelo termopar da caixa — um termopar de ferro — constantan ligado a um potenciômetro MeCi.

2.2 — *Amostragem e corpos de prova:* As amostras foram retiradas de modo a se obter material o mais homogêneo possível e de boa qualidade. Foi escolhida uma corrida de aço

extra-doce efervescente, cuja análise acusou: C — 0,06%; Mn — 0,41%; S — 0,027% e P — 0,012%.

Dessa corrida, no LTQ, foi separado um item de laminação formado por placas 2 (base dos lingotes) e dêle escolhidas as bobinas 2 e 4, que alcançaram as seguintes temperaturas de laminação a quente, em °C:

| | Bobina 2 | Bobina 4 |
|----------------------|----------|----------|
| Entrada do LTQ | 1.035 | 980 |
| Acabamento | 870 | 825 |
| Enrolamento | 685 | 675 |

Essas bobinas foram então acompanhadas, e no Laminador de Tiras a Frio (LTF), após redução para bitola 20, foram retirados de cada uma, da sua parte final, 30 metros (correspondente à parte superior das placas de base). Após eliminação das bordas foi aproveitada apenas a parte central, e dela confeccionados os corpos de prova segundo o esquema da figura 10, observando-se que os corpos de prova para tração fôsses feitos na direção transversal à de laminação. Os outros corpos de prova eram destinados aos ensaios de embutimento e dureza.

Cada ciclo de recozimento foi experimentado utilizando-se 3 corpos de prova para tração, 1 para embutimento (onde se fazia 5 ensaios Erichsen) e 1 para dureza; isto para cada amostra (acabada a 870°C e 825°C no LTQ). A amostra para estudo metalográfico era cortada da amostra de dureza e observada no sentido longitudinal ao de laminação.

A análise química da chapa deu o seguinte resultado, em %: C — 0,03; Mn — 0,35; S — 0,017; P — 0,014; Si — 0,010 e Al — 0,007.

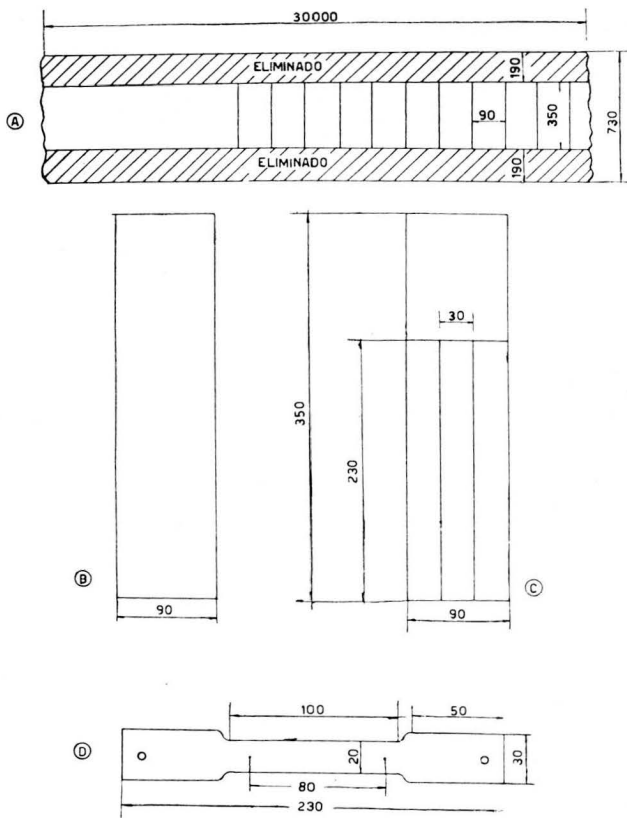


Fig. 10 — (Cotas em milímetros): A — Esquema da retirada das amostras da chapa original. B — Corpos de prova para embutimento. C — 3 corpos de prova para tração; 1 para dureza e microfotografia. D — Esquema dos corpos de prova para tração após a usinagem.

2.3 — *Ensaio Mecânico*: Nos ensaios mecânicos procurou-se seguir a norma recomendada DIN número 1623. Foram realizados:

- Ensaio de tração, determinando os limites de escoamento e de resistência e a percentagem de alongamento.
- Ensaio de embutimento Erichsen e ensaio de dureza Rockwell R 30 t, transformada em R_B .

No quadro da figura 11 aparecem os resultados médios das amostras para cada ciclo de recozimento.

| Temperatura °C | Tempo de encharque (min) | Dureza R _B | | Embutimento ERICHSEN - mm | | Limite de Escoamento kg/mm ² | | Limite de Resistência kg/mm ² | | Alongamento em 80 mm (%) | |
|----------------|--------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|------------------|---|------------------|--|------------------|--------------------------|------------------|
| | | 870 ^o | 825 ^o | 870 ^o | 825 ^o | 870 ^o | 825 ^o | 870 ^o | 825 ^o | 870 ^o | 825 ^o |
| 600 | 15 | 47,5 | 50,5 | 9,8 | 9,7 | 25,5 | 27,2 | 31,0 | 30,4 | 42,2 | 41,8 |
| | 30 | 48,9 | 50,0 | 9,9 | 9,8 | 25,7 | 27,4 | 30,6 | 30,5 | 41,0 | 40,4 |
| | 45 | 50,4 | 50,2 | 10,4 | 10,0 | 28,2 | 27,3 | 31,4 | 31,3 | 42,5 | 41,8 |
| | 60 | 49,6 | 47,2 | 10,3 | 10,2 | 26,8 | 28,9 | 30,7 | 30,6 | 42,4 | 41,2 |
| | 120 | 43,2 | 47,0 | 10,7 | 10,3 | 28,1 | 28,2 | 30,5 | 31,0 | 42,7 | 40,7 |
| | 240 | 46,4 | 45,1 | 9,9 | 10,1 | 28,2 | 27,7 | 30,2 | 30,3 | 40,6 | 41,2 |
| | 600 | 45,1 | 47,8 | 10,3 | 10,5 | 25,1 | 27,4 | 30,4 | 30,7 | 39,2 | 39,5 |
| 600 | 1.200 | 45,8 | 45,7 | 10,5 | 10,4 | 28,0 | 28,4 | 30,4 | 30,8 | 39,1 | 41,2 |
| 620 | 15 | 47,1 | 47,7 | 10,1 | 9,8 | 26,5 | 26,3 | 30,5 | 30,7 | 42,6 | 39,9 |
| | 30 | 45,4 | 45,3 | 10,3 | 10,2 | 24,7 | 26,4 | 29,8 | 30,5 | 42,0 | 41,6 |
| | 45 | 44,9 | 45,9 | 10,3 | 10,0 | 25,3 | 27,7 | 30,4 | 29,7 | 43,7 | 42,7 |
| | 60 | 47,2 | 48,1 | 10,3 | 10,2 | 28,2 | 29,3 | 31,0 | 31,5 | 42,5 | 39,3 |
| | 120 | 47,1 | 45,1 | 10,7 | 10,5 | 27,9 | 29,6 | 31,3 | 30,6 | 39,3 | 41,2 |
| | 240 | 46,0 | 42,5 | 10,6 | 10,2 | 26,1 | 27,3 | 30,5 | 30,7 | 41,6 | 40,8 |
| | 600 | 45,8 | 44,2 | 10,5 | 10,2 | 28,1 | 27,7 | 31,2 | 30,2 | 40,0 | 41,7 |
| 620 | 1.200 | 42,6 | 45,7 | 10,7 | 10,2 | 24,6 | 28,1 | 28,7 | 32,5 | 43,4 | 41,0 |
| 640 | 15 | 42,5 | 47,8 | 10,7 | 10,6 | 25,3 | 26,0 | 30,0 | 29,7 | 42,3 | 41,4 |
| | 30 | 46,0 | 50,4 | 10,3 | 10,4 | 28,3 | 29,3 | 31,5 | 31,9 | 40,2 | 40,1 |
| | 45 | 47,0 | 45,5 | 10,7 | 10,4 | 27,8 | 28,6 | 32,2 | 30,8 | 41,2 | 41,2 |
| | 60 | 45,5 | 49,6 | 10,3 | 10,1 | 28,8 | 29,1 | 31,3 | 31,2 | 41,0 | 38,8 |
| | 120 | 43,6 | 46,0 | 10,5 | 10,3 | 27,8 | 28,5 | 30,9 | 30,7 | 41,4 | 41,6 |
| | 240 | 47,5 | 42,9 | 10,3 | 10,5 | 27,1 | 26,6 | 31,2 | 30,7 | 40,8 | 40,0 |
| | 600 | 42,3 | 47,0 | 10,2 | 10,0 | 27,0 | 28,9 | 31,0 | 31,6 | 42,1 | 42,5 |
| 640 | 1.200 | 43,3 | 44,0 | 10,3 | 10,7 | 26,1 | 28,9 | 30,6 | 30,6 | 39,6 | 40,2 |
| 660 | 15 | 45,6 | 45,8 | 10,3 | 10,2 | 26,7 | 28,5 | 31,8 | 32,6 | 39,3 | 38,9 |
| | 30 | 46,1 | 47,4 | 10,7 | 10,4 | 25,6 | 28,7 | 31,0 | 33,0 | 42,5 | 40,2 |
| | 45 | 44,0 | 47,1 | 10,7 | 10,4 | 27,0 | 29,4 | 31,9 | 32,7 | 41,6 | 41,2 |
| | 60 | 44,4 | 45,4 | 10,4 | 10,5 | 26,1 | 26,6 | 31,3 | 30,6 | 40,3 | 39,4 |
| | 120 | 41,4 | 45,4 | 10,4 | 10,3 | 27,1 | 24,5 | 31,1 | 29,5 | 44,1 | 41,2 |
| | 240 | 42,5 | 43,0 | 10,9 | 10,2 | 24,6 | 25,2 | 31,1 | 30,3 | 44,4 | 40,4 |
| | 600 | 44,4 | 42,5 | 10,4 | 10,4 | 26,4 | 27,4 | 29,4 | 30,6 | 41,7 | 40,9 |
| 660 | 1.200 | 39,4 | 41,0 | 10,2 | 10,3 | 26,5 | 28,3 | 30,0 | 31,4 | 43,8 | 42,1 |
| 680 | 15 | 41,8 | 44,2 | 11,0 | 10,7 | 26,4 | 30,2 | 30,7 | 32,1 | 43,0 | 43,5 |
| | 30 | 41,0 | 43,8 | 10,6 | 10,4 | 25,5 | 27,7 | 29,4 | 30,1 | 43,0 | 42,0 |
| | 45 | 41,1 | 44,1 | 10,6 | 10,1 | 25,8 | 27,1 | 29,2 | 29,5 | 43,2 | 40,3 |
| | 60 | 43,6 | 47,7 | 10,4 | 10,3 | 27,9 | 24,5 | 31,7 | 29,7 | 41,0 | 40,4 |
| | 120 | 45,9 | 43,0 | 10,3 | 10,2 | 27,5 | 26,5 | 30,8 | 30,1 | 42,3 | 39,7 |
| | 240 | 42,5 | 45,5 | 10,1 | 10,0 | 26,6 | 24,9 | 30,7 | 29,3 | 40,0 | 40,5 |
| | 600 | 43,4 | 42,5 | 10,6 | 10,2 | 25,8 | 25,7 | 30,4 | 30,1 | 40,8 | 40,4 |
| 680 | 1.200 | 33,4 | 39,6 | 10,6 | 10,3 | 24,8 | 26,3 | 30,2 | 29,8 | 45,8 | 43,4 |
| 700 | 15 | 43,5 | 46,0 | 10,2 | 10,0 | 26,9 | 27,5 | 29,0 | 29,9 | 41,4 | 39,7 |
| | 30 | 42,4 | 45,3 | 10,4 | 10,3 | 26,2 | 26,9 | 30,3 | 30,1 | 42,5 | 40,8 |
| | 45 | 45,3 | 47,4 | 10,1 | 10,9 | 25,7 | 25,2 | 30,3 | 29,7 | 44,3 | 41,5 |
| | 60 | 42,7 | 44,1 | 10,3 | 10,0 | 25,0 | 24,8 | 30,5 | 30,4 | 43,3 | 42,3 |
| | 120 | 39,3 | 42,8 | 10,9 | 10,7 | 24,9 | 25,0 | 30,0 | 29,5 | 42,9 | 41,4 |
| | 240 | 38,5 | 39,1 | 10,4 | 10,3 | 23,0 | 24,0 | 29,4 | 28,9 | 45,2 | 41,6 |
| | 600 | 39,3 | 43,0 | 10,6 | 10,5 | 22,8 | 25,2 | 29,8 | 30,8 | 43,3 | 43,7 |
| 700 | 1.200 | 37,9 | 36,8 | 10,9 | 10,8 | 25,3 | 24,3 | 29,5 | 29,4 | 45,7 | 41,4 |

Fig. 11 — Resultados médios dos ensaios mecânicos após os diversos recozimentos.

Embora os resultados dos ensaios mecânicos tenham sido bastante variados, no conjunto mostraram que, mecânicamente, o material atinge, nos melhores ciclos (temperaturas mais altas com tempo de encharque mais longo), os valores especificados.

Nas figuras 12 e 13 aparecem os mesmos dados da figura 11 na forma de gráficos. Por elas se verifica, ainda, que a influência da temperatura de acabamento é claramente evidenciada, pois os valores obtidos com as amostras acabadas a 870°C são, na maioria dos casos, melhores que as acabadas a 825°C.

No entanto não se encontrou ainda o ensaio mecânico representativo da estampabilidade de uma chapa, trabalhando-se por isso com um conjunto de propriedades, que não podem ser analisadas independentemente, pois são propriedades intimamente correlacionadas.

Além disso, devido às deficiências de ensaio (aparelho ou operador) ou de amostragem (localização da amostra), surgem resultados incompatíveis. Foi baseado nisso que se tentou a formulação de um índice que agrupasse tôdas as propriedades mecânicas, com a finalidade de diminuir a influência de algum

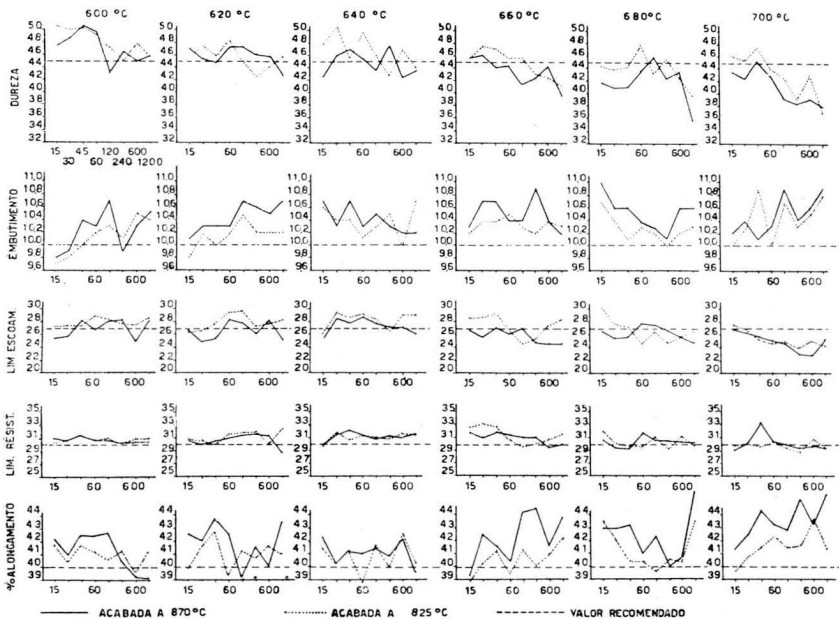


Fig. 12 — Resultados médios dos ensaios mecânicos em função do tempo de encharque em minutos: Dureza R_B ; Embutimento Erichsen em mm; Limite de escoamento e limite de resistência em kg/mm^2 ; Alongamento em percentagem, medido em 80 mm.

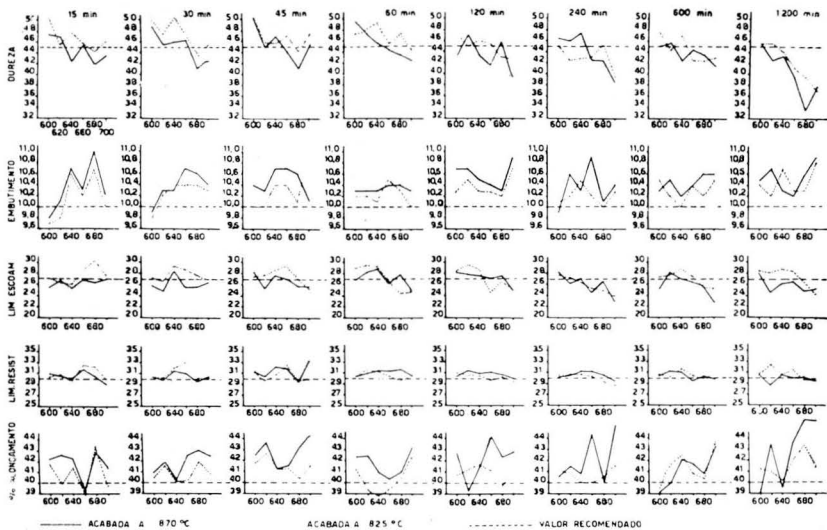


Fig. 13 — Resultados médios dos ensaios mecânicos em função da temperatura de recozimento em °C: Dureza R_B ; Embutimento Erichsen em mm; Limite de escoamento e limite de resistência em kg/mm^2 ; Alongamento em percentagem, medido em 80 mm.

valor discrepante, por uma simples observação do conjunto de resultados. Ao lado disso, êsse índice deveria quantificar aproximadamente a estampabilidade do material. Para isso foram dados pesos às relações conforme a importância teórica das variáveis a critério do autor.

A fórmula a que se chegou de um modo empírico foi:

$$I = \left(\frac{E}{R_B} \times 250 \right) + \left(\frac{L_R}{L_E} \times 10 \right) + (A \times 2)$$

Onde: E = Embutimento Erichsen em mm.

R_B = Dureza Rockwell B.

L_R = Limite de Resistência em kg/mm^2 .

L_E = Limite de Escoamento em kg/mm^2 .

A = Percentagem de Alongamento em 80 mm.

Evidentemente essa fórmula não pode ser considerada definitiva, devendo-se procurar obter maior número de dados para corrigir os coeficientes. As curvas obtidas pela aplicação desse índice aparecem na figura 14. Observe-se mais uma vez a nítida influência, para melhor, da temperatura de acabamento de 870°C sôbre a de 825°C.

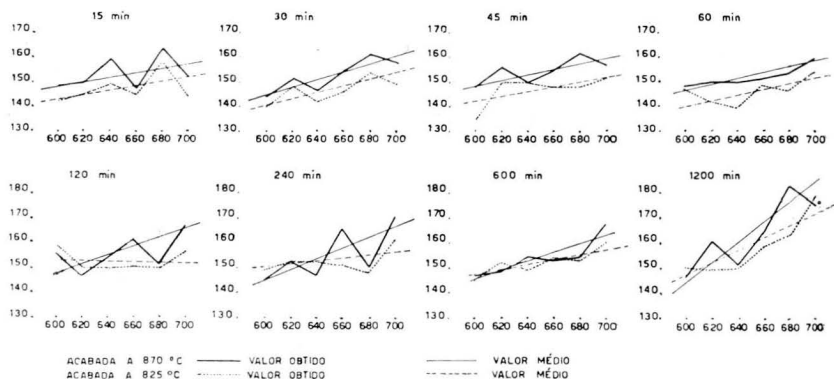


Fig. 14 — Variação do valor do índice I (ordenada) em função da temperatura de encharque (abscissa) para os diversos tempos de encharque.

2.4 — *Ensaio metalográfico*: Os ensaios metalográficos realizados constaram de:

- Observação da estrutura.
- Contagem do número de grãos por polegada quadrada.
- Medida da distorção dos grãos cristalinos (relação entre os eixos longitudinais e transversais à direção de laminação).

A contagem dos grãos foi feita individualmente pelo tamanho do grão; assim, em uma microfotografia, dentro de uma área pré-determinada, por comparação com o padrão da ASTM, foram contados primeiro todos os grãos tamanho 10, depois todos os grãos tamanho 9, a seguir todos os grãos tamanho 8 e assim sucessivamente, obtendo-se, além da percentagem de cada tipo de grão contido na amostra conforme o tamanho, o número de grãos por polegada quadrada.

| Amostra acabada à 870°C no LTQ | | | | | | | Condições de encharque | | Amostra acabada à 825°C no LTQ | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|-----|-----|---|--------------------------------|------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------|------|-----|-----|---|
| Distribuição percentual dos grãos | | | | | | E _L /E _T | Grãos/ /pol. 2 | Temp. °C | Tempo min. | Grãos/ /pol. 2 | E _L /E _T | Distribuição percentual dos grãos | | | | | |
| 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | | | | | | | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| 60,2 | 32,1 | 4,4 | 3,1 | - | - | 1,500 | 270 | 600 | 15 | 392 | 1,470 | 72,7 | 24,7 | 2,5 | - | - | - |
| 53,7 | 37,4 | 6,4 | 2,9 | - | - | 1,500 | 242 | | 30 | 334 | 1,320 | 61,0 | 36,0 | 2,7 | 0,4 | - | - |
| 62,8 | 34,2 | 3,1 | - | - | - | 1,425 | 306 | | 45 | 244 | 1,380 | 57,5 | 36,8 | 4,3 | 1,4 | - | - |
| 44,5 | 46,6 | 5,6 | 3,3 | - | - | 1,210 | 209 | | 60 | 214 | 1,140 | 33,6 | 52,0 | 11,4 | 3,0 | - | - |
| 37,2 | 37,6 | 21,0 | 4,4 | - | - | 1,395 | 214 | | 120 | 234 | 1,110 | 32,5 | 57,8 | 6,6 | 3,4 | - | - |
| 29,5 | 61,8 | 6,0 | 3,0 | - | - | 1,240 | 199 | | 240 | 194 | 0,975 | 28,8 | 60,5 | 8,7 | 2,0 | - | - |
| 32,5 | 60,8 | 6,0 | 0,8 | - | - | 1,060 | 183 | | 600 | 243 | 1,240 | 31,9 | 63,9 | 3,9 | 0,4 | - | - |
| 17,3 | 61,0 | 19,5 | 2,2 | 0,3 | - | 1,095 | 179 | 600 | 1.200 | 202 | 1,150 | 19,0 | 64,8 | 14,8 | 1,5 | - | - |
| 50,0 | 45,9 | 4,1 | - | - | - | 1,300 | 262 | 620 | 15 | 184 | 1,150 | 36,4 | 47,0 | 13,8 | 2,7 | - | - |
| 50,8 | 47,4 | 1,7 | - | - | - | 1,270 | 396 | | 30 | 205 | 1,430 | 29,0 | 60,3 | 8,3 | 2,4 | - | - |
| 31,7 | 53,5 | 9,1 | 5,5 | - | - | 1,285 | 208 | | 45 | 251 | 1,285 | 46,2 | 43,9 | 7,7 | 2,1 | - | - |
| 20,8 | 32,4 | 39,4 | 5,8 | 1,4 | - | 1,170 | 170 | | 60 | 224 | 1,105 | 31,7 | 60,8 | 6,0 | 1,5 | - | - |
| 30,8 | 59,5 | 7,7 | 1,9 | - | - | 1,220 | 234 | | 120 | 218 | 1,205 | 32,8 | 58,5 | 6,6 | 2,0 | - | - |
| 31,7 | 59,9 | 6,1 | 2,3 | - | - | 1,160 | 212 | | 240 | 223 | 1,145 | 30,2 | 61,9 | 6,0 | 1,7 | - | - |
| 22,7 | 64,0 | 10,2 | 3,3 | - | - | 1,320 | 187 | | 600 | 193 | 1,060 | 31,1 | 59,8 | 6,7 | 2,5 | - | - |
| 32,5 | 44,7 | 14,9 | 6,8 | 1,2 | - | 1,200 | 147 | 620 | 1.200 | 167 | 1,030 | 14,9 | 59,5 | 23,3 | 2,4 | - | - |
| 21,0 | 54,5 | 13,6 | 9,9 | 1,2 | - | 1,160 | 162 | 640 | 15 | 234 | 1,355 | 30,5 | 59,0 | 8,3 | 2,3 | - | - |
| 36,2 | 54,1 | 7,1 | 2,4 | 0,2 | - | 1,190 | 224 | | 30 | 277 | 1,160 | 46,1 | 47,3 | 5,6 | 1,0 | - | - |
| 32,9 | 46,5 | 11,4 | 9,2 | - | - | 1,300 | 189 | | 45 | 206 | 1,120 | 43,4 | 44,4 | 8,5 | 3,8 | - | - |
| 43,9 | 40,7 | 8,1 | 4,7 | 2,6 | - | 1,079 | 190 | | 60 | 182 | 1,150 | 54,5 | 27,8 | 11,2 | 6,3 | 0,2 | - |
| 26,2 | 49,5 | 17,4 | 6,1 | 0,6 | - | 1,235 | 164 | | 120 | 204 | 1,120 | 30,5 | 58,8 | 6,2 | 4,9 | - | - |
| 26,5 | 59,8 | 10,8 | 2,9 | - | - | 1,220 | 184 | | 240 | 184 | 1,155 | 29,6 | 63,0 | 6,8 | 1,0 | - | - |
| 18,6 | 66,0 | 12,7 | 2,7 | - | - | 1,040 | 145 | | 600 | 172 | 1,000 | 17,4 | 70,5 | 9,5 | 2,6 | - | - |
| 25,0 | 44,3 | 25,6 | 5,2 | - | - | 1,390 | 164 | 640 | 1.200 | 145 | 1,080 | 16,2 | 50,0 | 29,3 | 4,5 | - | - |

Fig. 15 — Resultados das observações metalográficas.

| Amostra acabada à 870°C no LTQ | | | | | | | Condições de encharque | | | Amostra acabada à 825°C no LTQ | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-----|-----|--------------------------------|-------------------------|----------|------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|-----|
| Distribuição percentual dos graos | | | | | | E _L /E _T | Graos/pol. ² | Temp. °C | Tempo min. | Graos/pol. ² | E _L /E _T | Distribuição percentual dos graos | | | | | |
| 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | | | | | | | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| 20,7 | 46,0 | 17,8 | 9,9 | 5,4 | - | 1,350 | 120 | 660 | 15 | 237 | 1,285 | 50,5 | 34,1 | 10,7 | 4,8 | - | - |
| 39,5 | 41,2 | 12,4 | 7,0 | - | - | 1,220 | 214 | | 30 | 172 | 1,028 | 39,3 | 40,2 | 13,6 | 6,8 | - | - |
| 37,5 | 29,0 | 22,8 | 10,6 | - | - | 1,220 | 160 | | 45 | 189 | 1,138 | 44,1 | 28,5 | 14,5 | 13,4 | - | - |
| 43,5 | 39,1 | 13,0 | 4,3 | - | - | 1,105 | 172 | | 60 | 204 | 1,300 | 46,6 | 36,7 | 12,4 | 3,9 | - | - |
| 13,4 | 50,5 | 16,0 | 19,6 | - | - | 1,130 | 112 | | 120 | 171 | 1,070 | 24,2 | 56,8 | 12,0 | 7,0 | - | - |
| 18,6 | 65,8 | 10,8 | 4,8 | - | - | 1,155 | 134 | | 240 | 146 | 1,150 | 22,2 | 56,2 | 18,8 | 2,7 | - | - |
| 29,8 | 53,2 | 12,8 | 4,2 | - | - | 1,180 | 164 | | 600 | 151 | 1,170 | 20,7 | 57,1 | 17,1 | 3,8 | 1,32 | - |
| 12,7 | 36,4 | 23,8 | 27,2 | - | - | 1,160 | 118 | 660 | 1.200 | 185 | 1,160 | 53,2 | 25,3 | 16,8 | 4,6 | - | - |
| 25,4 | 56,5 | 14,8 | 3,2 | - | - | 1,205 | 167 | 680 | 15 | 165 | 1,080 | 27,2 | 51,0 | 15,5 | 6,3 | - | - |
| 21,9 | 52,0 | 17,3 | 8,8 | - | - | 1,200 | 153 | | 30 | 198 | 1,260 | 33,1 | 52,9 | 10,3 | 3,8 | - | - |
| 25,1 | 56,0 | 16,8 | 1,9 | - | - | 1,220 | 178 | | 45 | 154 | 1,020 | 26,6 | 48,8 | 16,2 | 8,4 | - | - |
| 42,0 | 35,0 | 11,9 | 11,2 | - | - | 1,250 | 143 | | 60 | 201 | 1,290 | 45,7 | 38,8 | 12,9 | 3,4 | - | - |
| 52,3 | 43,7 | 3,2 | 0,6 | - | - | 1,250 | 306 | | 120 | 147 | 1,085 | 18,0 | 59,0 | 16,2 | 6,7 | - | - |
| 23,6 | 59,0 | 12,7 | 4,9 | - | - | 1,185 | 142 | | 240 | 198 | 1,155 | 32,8 | 59,5 | 6,3 | 1,0 | 0,3 | - |
| 31,7 | 57,3 | 10,6 | 0,9 | - | - | 1,155 | 202 | | 600 | 91 | 1,160 | 11,7 | 43,4 | 29,6 | 7,7 | 5,5 | 2,2 |
| 18,9 | 34,7 | 30,4 | 8,0 | 8,0 | - | 1,110 | 100 | 680 | 1.200 | 198 | 1,050 | 39,0 | 38,3 | 18,4 | 4,3 | - | - |
| 36,2 | 34,4 | 13,3 | 13,3 | 2,6 | - | 1,060 | 131 | 700 | 15 | 219 | 1,120 | 30,8 | 55,6 | 11,4 | 2,2 | - | - |
| 43,8 | 32,6 | 11,0 | 10,8 | 1,7 | - | 1,090 | 176 | | 30 | 191 | 1,078 | 46,8 | 39,5 | 10,7 | 3,1 | - | - |
| 39,0 | 34,2 | 13,8 | 7,6 | 4,3 | 0,7 | 1,170 | 137 | | 45 | 177 | 0,942 | 58,0 | 25,7 | 13,3 | 3,1 | - | - |
| 31,0 | 43,7 | 20,4 | 4,9 | - | - | 1,240 | 172 | | 60 | 134 | 1,161 | 23,8 | 44,0 | 23,5 | 7,1 | 1,4 | - |
| 19,9 | 52,2 | 17,9 | 10,0 | - | - | 1,240 | 120 | | 120 | 131 | 1,270 | 20,9 | 57,0 | 12,6 | 8,8 | - | - |
| 17,4 | 60,0 | 20,5 | 2,4 | - | - | 1,310 | 146 | | 240 | 172 | 1,082 | 15,4 | 58,0 | 22,6 | 3,8 | - | - |
| 10,8 | 45,6 | 28,7 | 13,3 | 1,5 | - | 1,070 | 97 | | 600 | 145 | 1,205 | 10,0 | 63,6 | 21,0 | 4,8 | 0,6 | - |
| 16,2 | 46,0 | 16,2 | 14,1 | 7,3 | - | 1,180 | 95 | 700 | 1.200 | 87 | 1.100 | 11,5 | 36,7 | 27,0 | 17,2 | 7,5 | - |

Fig. 16 — Resultados das observações metalográficas.

Como foi dito, neste estudo cobriu-se uma faixa de temperaturas e tempos de encharque para recozimento sub-crítico num total de 48 condições. Em nenhuma delas o material apresentou estrutura metalográfica ideal, tendo sempre granulação um tanto fina e irregular de ferrita, com pouca perlita, e os grãos de ferrita um pouco alongados. Nos quadros das figuras 15 e 16 aparecem os resultados das observações feitas. Veja-se que no recozimento a 700°C durante 20 horas a estrutura apresentou uma granulação que variou de 6 a 10 ASTM assim distribuída:

- 7,5% de grão 6
- 17,2% de grão 7
- 27,0% de grão 8
- 36,7% de grão 9
- 11,5% de grão 10

Deformação residual de 10%.

Pela figura 17 verifica-se que, mesmo após os melhores recozimentos, o material se apresenta com uma deformação residual compreendida entre 10% e 20%.

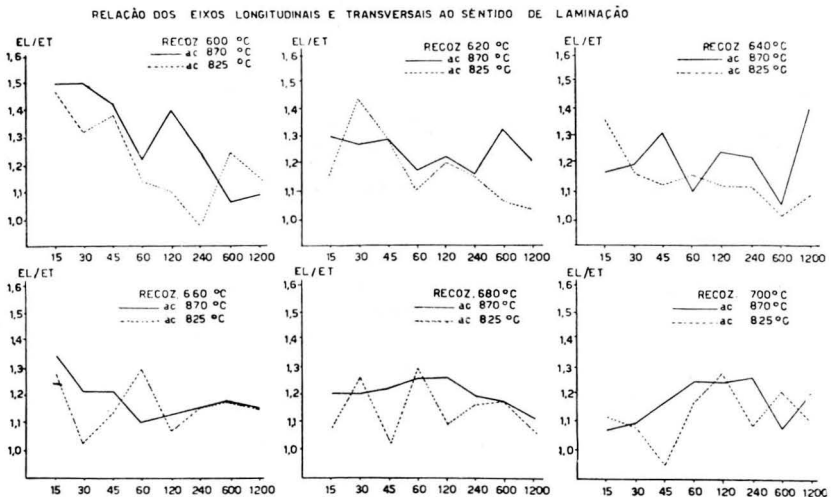


Fig. 17 — Relação dos eixos longitudinais e transversais dos grãos (média) — E_L/E_T — em função do tempo de encharque em minutos.

Em trabalho anteriormente apresentado pelo autor³ já se havia observado que, para reduções a frio acima de 40%, o recozimento sub-crítico é incapaz de tornar os grãos cristalinos equiaxiais, e concluído que a deformação que permanece no material após um dado recozimento, é tanto maior quanto maior houver sido a deformação a frio antes daquele tratamento térmico.

DISTRIBUIÇÃO DA GRANULAÇÃO — AMOSTRA ACABADA A 870°C

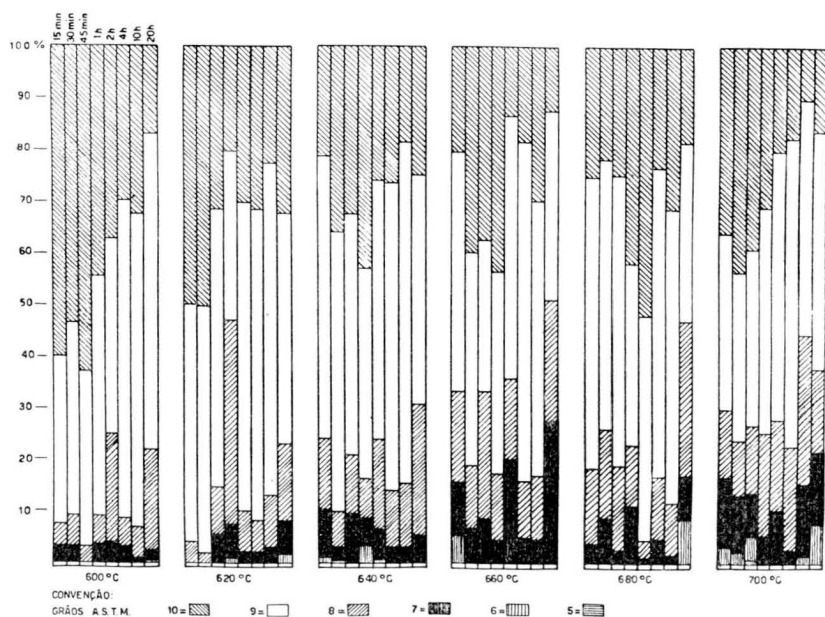


Fig. 18 — Distribuição em percentagem da granulação por tamanho de grão nas amostras acabadas a 870°C no LTQ em função do tempo e da temperatura de enchaque no recozimento.

Nas figuras 18 e 19 (em que aparece sob a forma de coluna a distribuição em percentagem dos grãos nas amostras acabadas a 870°C e 825°C no LTQ) verifica-se, além da heterogeneidade da granulação, que, para tratamentos em tempo curto (até 45 minutos) a 600°C, não há crescimento de grão.

DISTRIBUIÇÃO DA GRANULAÇÃO — AMOSTRA ACABADA A 825°C

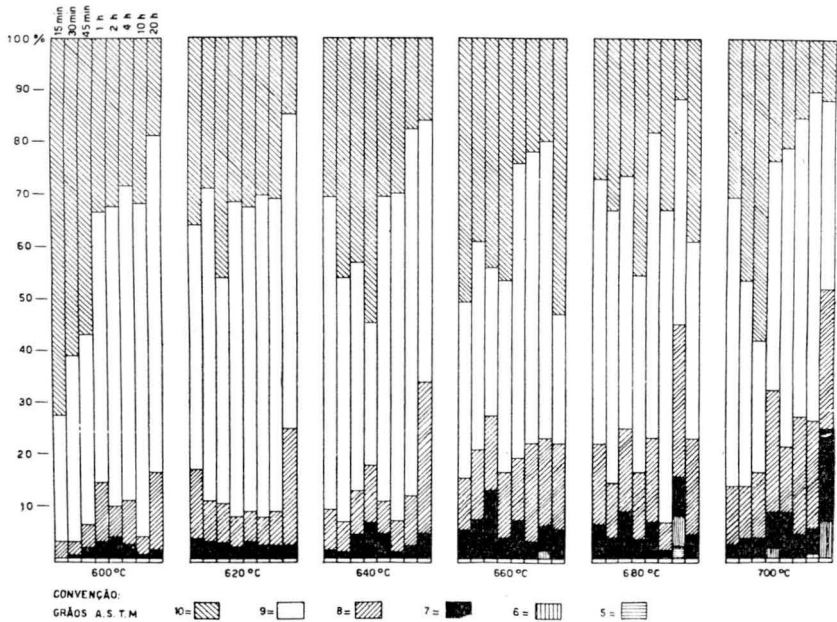


Fig. 19 — Distribuição em percentagem da granulação por tamanho de grão nas amostras acabadas a 825°C no LTQ em função do tempo e da temperatura de enchaque no recozimento.

A figura 20 mostra a variação percentual dos diversos tamanhos dos grãos em função do tempo de encharque. É interessante observar que a granulação aparece mais heterogênea nas amostras que possuem maior quantidade de cementita, perlita e inclusões, do que naquelas mais livres dessas fases. Isto é devido a que, junto a essas fases, é maior a probabilidade de nucleação no recozimento.

As inclusões, por inibirem o crescimento dos grãos, se mal distribuídas causam também heterogeneidade. Deve-se, pois, tornar o material o mais homogêneo possível pela melhor dispersão das fases cementita, perlita e inclusões, evitando uma nucleação desordenada. Isto se consegue principalmente pelo melhor controle da temperatura de acabamento, da velocidade de resfriamento e da temperatura de enrolamento.

Pelas figuras 21 e 22 verifica-se que, mesmo considerando o tamanho médio dos grãos, através o valor grãos/polegada

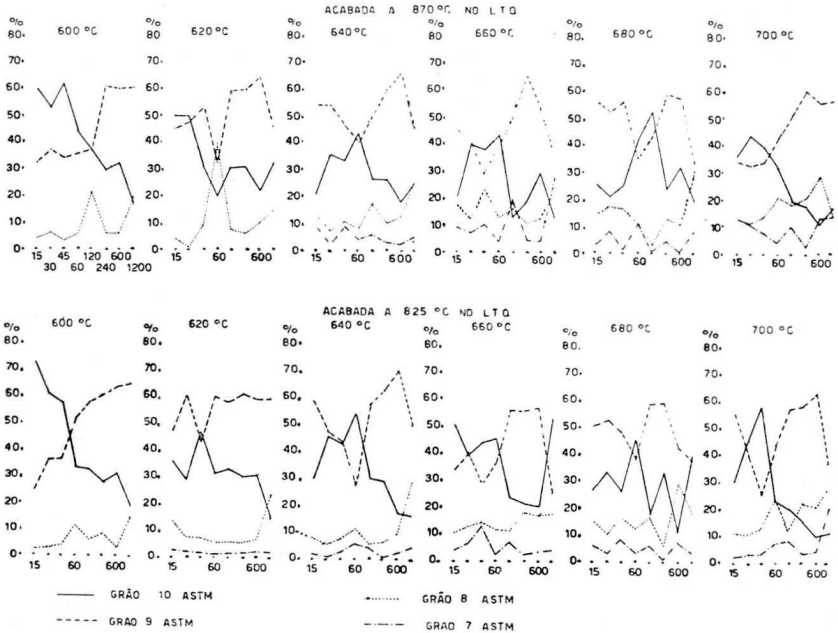


Fig. 20 — Variação percentual dos diversos tamanhos dos grãos em função do tempo de encharque nas diversas temperaturas.

quadrada, à exceção de 2 pontos (em cada tipo de amostra) que atingem o tamanho 7 ASTM, nenhum dos recozimentos dados foi capaz de melhorar a granulação além do tamanho 8 ASTM.

Finalmente, pôde-se constatar, como anteriormente para os ensaios mecânicos, que também os resultados metalográficos foram nitidamente melhores para as amostras acabadas a 870°C no LTQ do que para as acabadas a 825°C. Observe-se, pelas figuras 21 e 22, que as amostras acabadas a 870°C atingem mais rapidamente a faixa de granulação média de 8 ASTM, enquanto as acabadas a 825°C têm maior resistência para alcançá-la.

As figuras 18 e 19 confirmam a mesma observação anterior, principalmente mostrando a quantidade bem menor de grãos 10 ASTM nas amostras acabadas a 870°C. As figuras 23a e 23b mostram num quadro de conjunto as microfotografias obtidas das amostras acabadas a 870°C em função do tempo e da temperatura de encharque (ataque de Nital com 100 × de ampliação).

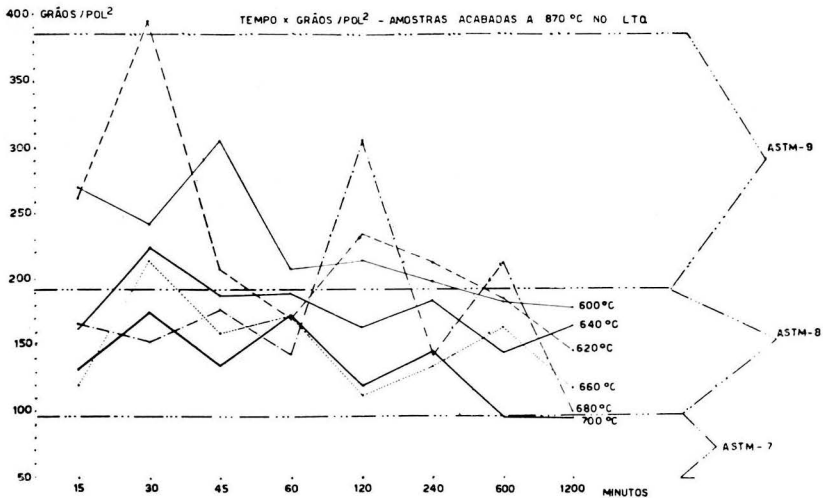


Fig. 21 — Variação do número de grãos/pol.² em função do tempo de encharque para as diversas temperaturas de recozimento. Amostras acabadas no LTQ a 870°C.

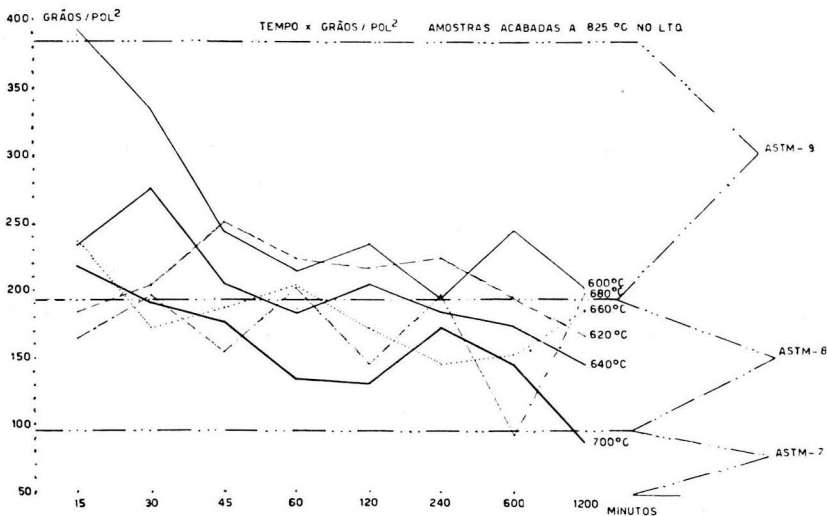


Fig. 22 — Variação do número de grãos/pol.² em função do tempo de encharque para as diversas temperaturas de recozimento. Amostras acabadas no LTQ a 825°C.

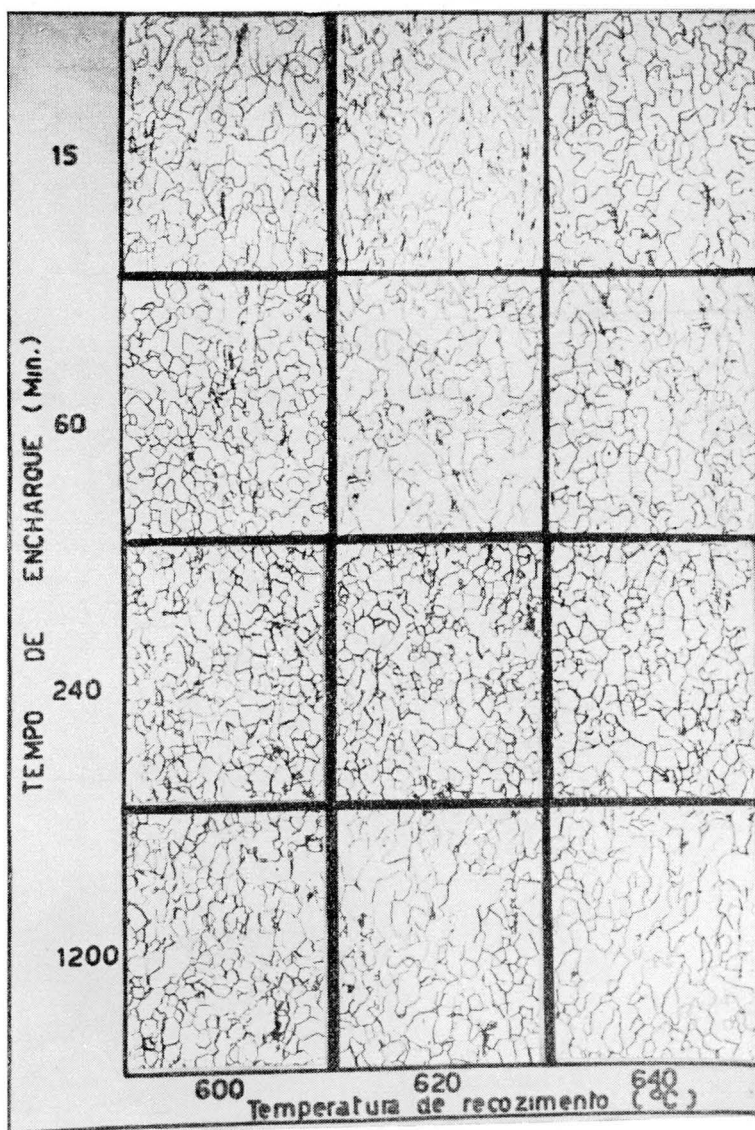


Fig. 23a — Microfotografias obtidas para as amostras acabadas a 870°C no LTQ. Ataque Nital. Aumento: 100 ×.

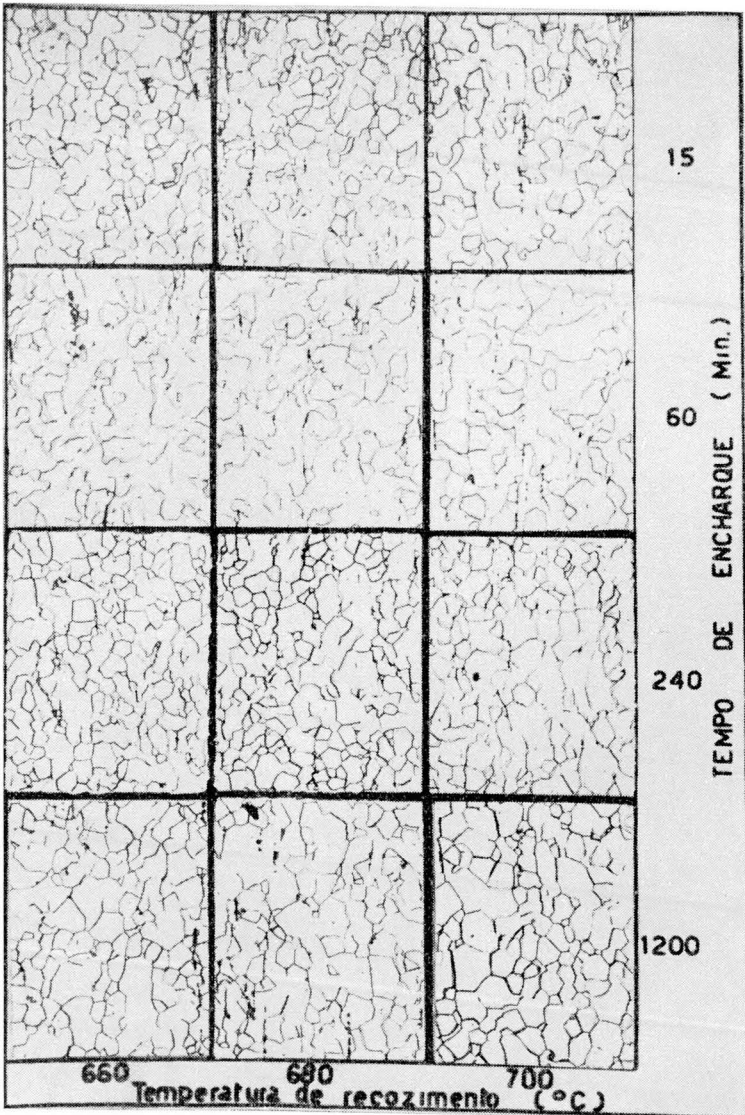


Fig. 23b — Microfotografias obtidas para as amostras acabadas a 870°C no LTQ. Ataque Nital. Aumento: 100 ×.

3. CONCLUSÕES

- a) As chapas MSG-20 (estampagem profunda) estudadas não possuem ainda a estrutura metalográfica ideal, sendo que a principal causa da granulação fina e heterogênea não está no recozimento, mas sim na excessiva redução a frio dada, que, além disso, faz com que o material retenha grãos deformados mesmo após o tratamento térmico.
- b) Os tratamentos de recozimento sub-crítico a 600°C em tempos curtos, até 45 minutos, não produzem crescimento de grão.
- c) É nítida a influência da temperatura de acabamento, tanto nas propriedades mecânicas, como nas metalográficas. Os resultados das amostras acabadas a 870°C no LTQ são, na grande maioria das vezes, melhores que os das acabadas a 825°C.
- d) Embora os resultados dos ensaios mecânicos tenham sido bastante variados, no conjunto mostram que, mecanicamente, o material atinge os valores especificados para chapa destinada à estampagem profunda nos melhores tratamentos térmicos (temperaturas mais altas e tempos de encharque mais longos).
- e) Tudo indica ser possível se estabelecer um índice que, abrangendo o conjunto dos resultados mecânicos, seja representativo da estampabilidade de uma chapa.

*

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece à Companhia Siderúrgica Nacional por permitir a publicação deste trabalho, e, em particular, à Chefia e Sub-Chefia do Departamento de Pesquisas pelos decisivos ensinamentos delas recebidos. Agradece ainda a todos os colegas e auxiliares pela prestimosa colaboração recebida.

BIBLIOGRAFIA

1. A. S. M. — Metals Handbook, A. S. M., págs. 260-261, Cleveland, Ohio, 1948.
2. FRIEDRICH, S. E. — “Contribuição à determinação da influência das temperaturas de laminação e enrolamento sobre a estrutura e as propriedades mecânicas das chapas finas a quente e a frio”. (Trabalho apresentado ao XVI da Associação Brasileira de Metais; Pôrto Alegre, julho de 1961 e publicado neste Boletim).
3. MOREIRA, M. C. — “Relatório de estágio. (Não publicado).
4. ASCOUGH, H. H. — “Annealing of cold reduced sheet and coil in Europe”, págs. 96, etc. International Symposium on the Annealing of Low Carbon Steel; Cleveland, 1957.

5. BURKE, KENYON, BURGHOFF, HOBBS — *"Grain control in industrial metallurgy"*, pág. 53. A. S. M.; Cleveland, Ohio, 1949.
6. OTTO, F. L. — *"Present — day annealing and how it is affected by cold work"*, págs. 51 a 56. International Symposium on the Annealing of Low Carbon Steel; Cleveland, 1957.

Outras obras consultadas:

- HINDSON, R. D. — *"Metallurgical factors in the hot working and cleaning of hot rolled strip and their influence on the cold reduced annealed product"*. International Symposium on the Annealing of Low Carbon Steel; Cleveland, 1957.
- EDWARD, C. A. — *"The structure and properties of mild steel"*. A. S. M.; Cleveland, Ohio, 1953.
- JEVONS, J. D. — *"The metallurgy of deep drawing and pressing"*. Chapman & Hall Ltd.; London, 1941.
- BORCHERS, H. e SAUR, G. — *"Influência do tempo de recozimento na estrutura e comportamento na transformação de aços ao carbono planos"*. Stahl und Eisen, vol. 79, n.º 4, 1959.
- POMP, A. — *"Fundamentos de recozimento de chapas de aço laminadas a frio"*. Stahl und Eisen, vol. 73, n.º 3.
- UNITED STATE STEEL — *"The making shaping and tratong of steel"*. U. S. S., 1941.
- COLPAERT, H. — Boletim n.º 40 — Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, 1951.
- BIRCHENALL, C. E. — *"Physical Metallurgy"*. Mc Graw-Hill Book Company; New York, 1959.
- CORRÊA DA SILVA, L. C. — *"Princípios básicos de metalurgia"*. Curso da Associação Brasileira de Metais; São Paulo, 1959.



DISCUSSÃO (1)

Jardel Borges Ferreira (2) — Em nosso temário, se concentraram três trabalhos envolvendo estudos sobre a estampabilidade de chapas; isso deixa patente que o problema preocupa e que em torno dele se esforçam pesquisadores das usinas e dos laboratórios. Em seu trabalho, o Eng. Carvalho Moreira procurou determinar até que ponto os fatores “*tempo de encharque*” e “*temperatura de recozimento*” podem influir nas propriedades mecânicas das chapas finas para estampagem profunda. Após ensaios metódicos, o Autor procurou ligar numa fórmula empírica, dados do ensaio de embutimento, da dureza, os limites de escoamento e de resistência e, finalmente, o alongamento — visando um índice único que, abrangendo o conjunto das características mecânicas, seja representativo dessa propriedade complexa que denominamos “*Estampabilidade*”.

Agradeço essa contribuição, a qual vem reforçar as demais sobre o mesmo tema; estou certo de que há de se chegar a caracterizar essa propriedade.

Alexandre Foides (3) — Realmente, as contribuições desta Comissão giraram em torno da estampabilidade de chapas; sobre o tema tivemos nada menos do que três contribuições, todas certamente de alto interesse. Mostram que os pesquisadores estão empenhados no difícil problema, que certamente acabará sendo resolvido. Mas pondero que a «estampabilidade» tem sido aqui abordada apenas em termos de variáveis metalúrgicas: de estrutura metalográfica, de segregações, de temperaturas de elaboração ou de enrolamento das bobinas, etc. Mas, casos há de mau comportamento em estampagem profunda, que podem ser resolvidos pelo tratamento superficial da própria chapa; a fosfatização, por exemplo, pode facilitar sobremaneira a deformabilidade do material às tremendas tensões criadas.

A respeito, apresentei no Congresso de Volta Redonda (1958) uma contribuição sobre processos de deposição química, dando como aplicação possível da fosfatização a dos casos difíceis de deformação das chapas de aço por estampagem (4).

De fato, além da proteção contra a corrosão, a camada de fosfato vem sendo aplicada com êxito em casos de deformação a frio de ferro e de aço. Sendo essa camada cristalina e intimamente unida com o metal-base, evita um atrito direto entre este e o aço das matrizes usadas para a deformação. Além disso, a estrutura esponjosa da camada, possibilita uma maior absorção e retenção de lubrificantes e facilita a operação. Apontando as possibilidades da fosfatização, queria apenas sugerir que, nas futuras pesquisas da CSN e outras, se incluísse também o processo químico no plano de trabalho. Porque é certo que,

(1) Contribuição Técnica n.º 442, publicada neste Boletim. Discutida na Comissão “G” do XVI Congresso Anual da ABM; Porto 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 Diretor da Sunbeam Anticorrosivos do Brasil; São Paulo, SP.

(4) Foides, Alexandre — “A fosfatização: processo de deposição química sobre metais. Característicos e aplicações”; “ABM-Boletim”, volume 15, página 191.

através de tratamento superficial por fosfatização, temos conseguido deformações a frio que antes não eram possíveis. Porisso, acho que seria interessante juntar êsse tratamento químico aos melhoramentos metalúrgicos, numa forma de cooperação, para se obter melhores resultados em muitos casos.

Sôbre êste assunto, disponho de um grande número de dados, que estou disposto a pôr à disposição de todos.

J. Borges Ferreira — Essa cooperação poderia ser, por, exemplo, a de enviarmos a nossos clientes, juntamente com um dado pedido de fornecimento, um reticulado de chapa. Poderíamos pedir a estampagem das chapas com e sem tratamento químico; daí resultariam boas indicações.