

# ESTUDO MICROESTRUTURAL DE PRODUTOS OBTIDOS NO PROCESSO “CROSS WEDGE ROLLING”

**William Regone; Mário Luiz Nunes da Silva; Sérgio Tonini Button**

Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Unicamp - Campinas - SP  
**sergio1@fem.unicamp.br**

## RESUMO

O desenvolvimento de processos de conformação para a melhoria da qualidade dos produtos, bem como a diminuição das perdas de matéria-prima e também da energia são os principais enfoques de várias pesquisas no Brasil e no exterior. Entre essas pesquisas está o processo Cross Wedge Rolling (CWR) que vem sendo estudado nos últimos anos para a substituição do recalque horizontal a quente na fabricação em uma única operação de eixos escalonados, pinos, eixos excêntricos e outros componentes. A utilização desse processo apresenta grandes vantagens em comparação ao recalque a quente, tais como produtos com maior precisão dimensional, boa qualidade superficial e melhoria das propriedades mecânicas, alta capacidade de produção, melhor aproveitamento da matéria-prima e fácil automatização. Esse processo é caracterizado pela deformação plástica de um tarugo cilíndrico pela ação de ferramentas em formato de cunha montadas sobre placas planas que se movem tangencialmente uma em relação à outra. O processo CWR é estável, no que diz respeito ao aparecimento de defeitos, apenas dentro de parâmetros específicos que dependem da geometria da peça a ser fabricada, da geometria da ferramenta, da temperatura do material de partida e da taxa de deformação. Deve-se ressaltar que existe uma interdependência desses parâmetros e que sua especificação incorreta pode acarretar o aparecimento de defeitos internos e externos que podem inviabilizar a utilização da peça fabricada. O defeito mais freqüentemente encontrado no processo CWR é a formação de uma cavidade central, que se apresenta na forma de uma fissura axial também conhecida como efeito Mannesmann. O objetivo deste trabalho é programar os parâmetros do equipamento que realiza o processo de CWR para o não surgimento do efeito Mannesmann e caracterizar a microestrutura obtida após o processamento de aços carbono 1045 e microligado ao Ti-V. Desta forma, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 17 mm e 90 mm de comprimento foram aquecidos até a temperatura de encharque de 1200 °C e mantidos nesta temperatura por um tempo de 20 minutos. Logo após, foram deformados por ferramentas serrilhadas em forma de cunha na máquina de CWR a uma velocidade de 170 mm/s e em seguida resfriados ao ar. Os corpos de prova após os ensaios apresentaram diâmetro médio de 13,6 mm e comprimento de aproximadamente 120 mm. Os resultados mostram que o efeito Mannesmann aparece na parte central do eixo longitudinal dos aços e as microestruturas

são compostas pelas fases ferrítica-perlítica, sendo que há um aumento no tamanho das colônias de perlita da borda em direção ao centro do corpo de prova.

**Palavras-Chaves:** *Cross Wedge Rolling; Ferrita; Perlita; Aço Microligado.*

## INTRODUÇÃO

O processo chamado *Cross Wedge Rolling* (CWR) vem se destacando nos últimos anos para a substituição do recalque horizontal na fabricação de eixo escalonados, pinos e eixos excêntricos. A utilização deste processo apresenta grandes vantagens em comparação ao recalque a quente, tais como: maior precisão dimensional, boa qualidade superficial, melhoria das propriedades mecânicas, alta capacidade de produção, melhor aproveitamento de material, fácil automatização do processo e menores níveis de ruído e vibração durante a operação. Esse processo é caracterizado pela deformação plástica de um tarugo cilíndrico pela ação de ferramentas em formato de cunha montadas sobre placas planas que se movem tangencialmente uma em relação à outra. A deformação real plástica é muito complexa, pois uma combinação de compressão radial, alongamento axial e cisalhamento transversal são necessários para se obter o formato da peça final [1-2].

Em relação ao aparecimento de defeitos, o processo CWR é estável apenas dentro de parâmetros específicos que dependem da geometria da peça a ser fabricada e que são: a geometria da ferramenta, a temperatura do material de partida e a taxa de deformação. Vale ainda ressaltar que existe uma interdependência entre estes parâmetros e que sua especificação incorreta acarretará o aparecimento de defeitos que podem ser divididos em três grupos: defeitos internos (cavidades e poros), defeitos de superfície e seções com geometria diferente da esperada [3].

O defeito mais freqüentemente encontrado no processo CWR é a formação de uma cavidade central, também conhecida como efeito Mannesmann. Este efeito se apresenta na forma de uma fissura axial na região central da peça em trabalho. Ele está relacionado com a tensão de cisalhamento intenso existente no centro da peça durante o processo ou às tensões de tração acumuladas durante um certo número de revoluções da peça. Outros fatores que podem estar ligados à formação da cavidade central são a torção relativa entre as bordas e os vários diâmetros da peça com velocidades diferentes ou ainda grandes inclusões presentes no material de partida [3-4].

Nos processos de conformação a quente os produtos adquirem sua geometria final com deformações no campo austenítico. Assim, quando ocorre seu resfriamento o material passa por uma transformação de fase que, dependendo da taxa de resfriamento gera os produtos de decomposição. Quando o material é submetido a uma taxa de resfriamento muito lenta, como por exemplo ao ar, os produtos de decomposição são a ferrita e a perlita. A ferrita forma-se por difusão nucleando preferencialmente nos contornos de grão da austenita. A perlita é uma microestrutura clássica que não é uma fase, e sim uma mistura de duas fases, sendo composta pela ferrita e pela cementita e que ocorrem sob forma de lamelas paralelas. A cementita é uma fase rica em carbono, de composição  $Fe_3C$  [5].

O objetivo deste trabalho é programar os parâmetros do equipamento que realiza o processo de CWR para o não surgimento do efeito Mannesmann e caracterizar a microestrutura obtida após o processamento de aços carbono comercial 1045 e microligado ao Ti-V. Os resultados mostraram surgimento do efeito Mannesmann e as microestruturas são compostas pelas fases ferrítica-perlítica, sendo que há um aumento no tamanho das colônias de perlita da borda em direção ao centro do corpo de prova.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utiliza-se um aço microligado ao V-Ti denominado A1, adotado em processos de forjamento com resfriamento controlado para fabricação de componentes automotivos e um aço carbono comercial AISI 1045 denominado B1. As composições químicas dos aços são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química dos aços estudados (% em peso).

	C	Mn	Si	Al	S	P	Ti	V	N
A1	0,32	1,51	0,66	0,024	0,031	0,016	0,028	0,099	0,006
B1	0,42 - 0,50	0,6 - 0,9	-	-	Max 0,05	Max 0,04	-	-	-

O equipamento de Cross Wedge Rolling (CWR) foi projetado e construído no trabalho de doutorado do aluno Fernando César Gentile e se encontra instalado no Laboratório de Conformação Mecânica do DEMA/FEM/UNICAMP [6]. Na Figura apresenta-se a ferramenta usada para deformar os corpos de prova no processo de CWR.



Figura 1 - Ferramenta utilizada no CWR.

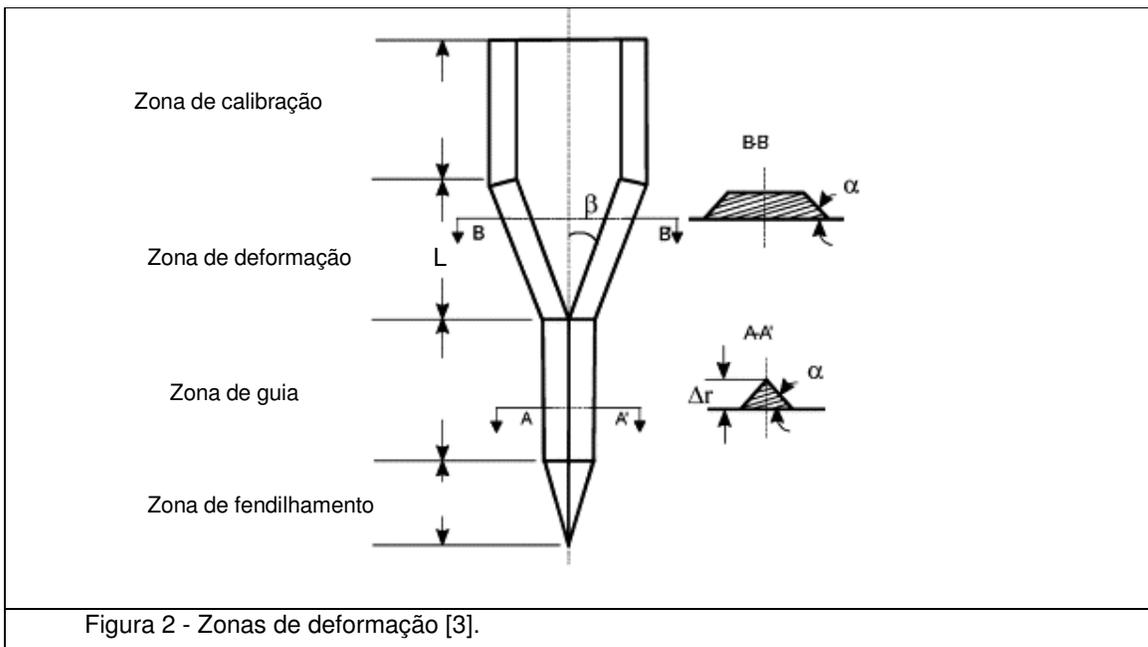
Os principais componentes que fazem parte do equipamento de CWR são: estrutura; ferramenta; porta ferramenta; guias; motor de corrente alternada; fuso de esferas; acoplamento e suas características físicas são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características principais do equipamento.

Características	Definições
Dimensões máximas do tarugo	25mm x 106mm
Comprimento máximo da peça	190mm
Comprimento máximo deformado da peça	80mm
Deformação máxima da seção transversal	75%
Comprimento máximo da ferramenta	500mm
Potência do motor	40CV
Torque do motor	16kgfm
Velocidade máxima de operação	200mm/s
Dimensões principais s/ motor (comp. x largura x altura)	2000mm x 700mm x 500mm

De maneira geral, o comprimento total da ferramenta é composto por quatro zonas distintas: zona de cunhagem, zona de guia, zona de estiramento e zona de acabamento, como mostra a Figura 2.

A deformação do material depende principalmente da geometria da ferramenta utilizada descrita pelos seguintes fatores: ângulo de conformação,  $\alpha$ ; ângulo de estiramento,  $\beta$ ; ângulo da rampa,  $\gamma$ ; profundidade de deformação,  $\Delta r$ ; comprimento total de laminação,  $2l$  e comprimento da cunha,  $L$  (Figura 2).



O ângulo de conformação deve se encontrar entre 20° e 30°. Um valor abaixo deste limite irá acarretar o aparecimento de cavidade central e má formação da seção transversal da peça. Por outro lado para valores maiores que o indicado acima está associado o aparecimento de defeitos superficiais [7]. Já o ângulo  $\beta$  deve estar entre 5° e 10°. Para valores abaixo deste intervalo as ferramentas terão comprimento excessivamente grande, que fará aumentar o número de revoluções da peça, possibilitando o aparecimento de cavidade central; enquanto para valores acima do intervalo

as ferramentas terão largura excessiva [8]. Em relação à redução de área,  $\delta$ , que é a variação percentual de área em relação a área inicial, pode-se dizer que há um valor crítico acima do qual trincas na região central da peça podem aparecer. Alguns autores sugerem que  $\delta$  encontre-se entre 55% e 70%, enquanto outros autores propuseram expressões e diagramas para a escolha de parâmetros geométricos com o intuito de evitar o aparecimento dos defeitos [7-9].

O processo CWR é caracterizado por deformação plástica de um tarugo cilíndrico, pela ação de ferramentas serrilhadas em formato de cunha montadas sobre placas planas que se movem tangencialmente uma em relação à outra. Desta forma, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 17 mm e 90 mm de comprimento foram aquecidos até a temperatura de encharque de 1200 °C e mantidos nesta temperatura por um tempo de 20 minutos. Logo após, foram deformados ou laminados no equipamento de CWR a uma velocidade de 170 mm/s e em seguida resfriados ao ar. A Figura 3 mostra um esquema do corpo de prova final obtido após processamento no CWR. As dimensões finais médias são diâmetro de 13,6 mm e comprimento 120 mm. Esta figura apresenta de forma esquemático efeito Mannesmann, na região central da peça.

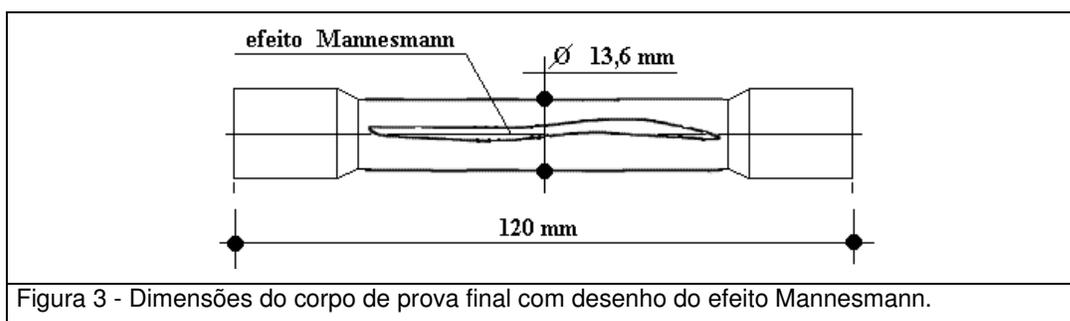


Figura 3 - Dimensões do corpo de prova final com desenho do efeito Mannesmann.

Para revelar as microestruturas foi utilizada uma técnica convencional. As amostras foram embutidas, lixadas, polidas com alumina de granulometria de 1 a 0,5  $\mu\text{m}$ . Posteriormente as amostras foram atacadas com nital 2% para se revelar as microestruturas obtidas da decomposição da austenita e observadas em microscopia óptica. Foi determinada a fração volumétrica ou proporção de fase por contagem manual de pontos segundo a norma ASTM E - 562.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os cálculos dos parâmetros do projeto do processo CWR que têm grande influência no modo de deformação da peça e conseqüentemente sobre a formação de defeitos durante o processamento. A correta combinação destes parâmetros acarretará um processo contínuo e estável e peças isentas de defeitos. Também serão apresentadas as observações do comportamento microestrutural do aço microligado ao V-Ti e do aço carbono comercial após o processamento no equipamento de CWR. Estas caracterizações metalográficas foram feitas nos corpos de prova que resfriaram ao ar, nas secções longitudinal e transversal.

## Análise da Estabilidade do Processo CWR, Referente aos Possíveis Defeitos Apresentados

O projeto das ferramentas para a operação de cross wedge rolling foi elaborado tendo-se como base o manual da empresa Panambra Indústria e Técnica S.A. Handbook of Wedge Rolling – Process and Practice [10].

Os parâmetros principais das ferramentas, os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  têm seus valores mais apropriados, e posteriormente adotados, nas faixas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ .

Parâmetro	Intervalo apropriado (°)	Valor adotado (°)
Ângulo $\alpha$	20 – 30	24
Ângulo $\beta$	5 – 10	7,5

Outro parâmetro importante para o projeto das ferramentas de cross wedge rolling é a redução de diâmetro,  $\delta$ , do corpo de prova a ser laminado. Como já citado, o corpo de prova laminado apresenta o perfil descrito na Figura 3. Seu diâmetro inicial é 17 mm e a região central deformada apresenta diâmetro de 13,2 mm. Portanto, o parâmetro  $\delta$  pode ser calculado pela equação 1.

$$\delta = \frac{17}{13,2} = 1,3 \dots\dots\dots(1)$$

Com os três parâmetros principais definidos para o projeto das ferramentas de cross wedge rolling ( $\alpha$ , ângulo de conformação;  $\beta$ , ângulo de estiramento e  $\delta$ , redução relativa) fez-se a verificação da estabilidade do projeto no que diz respeito à incidência dos principais tipos de defeitos neste processo tais como: (i) Escorregamento; (ii) Marcas Superficiais; (iii) Estiramento; (iv) Cavidades centrais.

### (i) Escorregamento

A equação 2 apresenta a condição para a não ocorrência deste defeito.

$$(0,15 + 0,0038\alpha)\beta^{0,925} \leq 1,93 \dots\dots\dots(2)$$

$$(0,15 + 0,0038 \times 24)7,5^{0,925} \leq 1,93$$

$$1,56 \leq 1,93$$

Como 1,56 é menor do que 1,93 a condição foi considerada como atendida.

### (ii) Marcas Superficiais

A equação 3 apresenta a condição para a não ocorrência deste defeito.

$$\delta \geq 1 + \pi g \alpha g \beta \dots\dots\dots(3)$$

$$1,3 \geq 1 + \pi g 24 \operatorname{tg} 7,5$$

$$1,3 \geq 1,06$$

Como 1,3 é maior do que 1,06 a condição foi considerada como atendida.

### (iii) Estiramento

A equação 4 apresenta a condição para a não ocorrência deste defeito.

$$\delta \leq \frac{1}{2} \left( 2 + \pi \tan \alpha \tan \beta + \frac{\sqrt{3\pi/2 \tan^3 \alpha \tan \beta}}{\xi} \right) \dots\dots\dots(4)$$

com  $\alpha$  e  $\beta$  em radianos e onde  $\xi$  é um fator de carga, ou ainda um fator de correção, utilizado para comparar o processo cross wedge rolling com a deformação de um tarugo através de uma cunha em compressão simples (sem rotação da peça). Este fator  $\xi$  é calculado em função do ângulo de conformação da ferramenta,  $\alpha$ , através da equação 5.

$$\xi = 51,559 e^{-0,0416\alpha} \dots\dots\dots(5)$$

$$\xi = 51,559 e^{-0,0416 \times 24}$$

$$\xi = 19,0$$

voltando-se à equação 4 e lembrando-se que  $\alpha = 24^\circ = 0,4189 \text{ rad}$  e  $\beta = 7,5^\circ = 0,1309 \text{ rad}$ ,

$$1,3 \leq \frac{1}{2} \left( 2 + \pi g 0,4189 \cdot \operatorname{tg} 0,1309 + \frac{\sqrt{3\pi/2 \operatorname{tg}^3 0,4189 \cdot \operatorname{tg} 0,1309}}{19} \right)$$

$$1,3 \leq 1,62$$

Como 1,3 é menor do que 1,62 a condição foi considerada como atendida.

### (iv) Cavidades centrais

A equação 6 apresenta a condição para a não ocorrência deste defeito.

$$(0,15 + 0,0038\alpha)\beta^{0,325} \geq M \dots\dots\dots 6$$

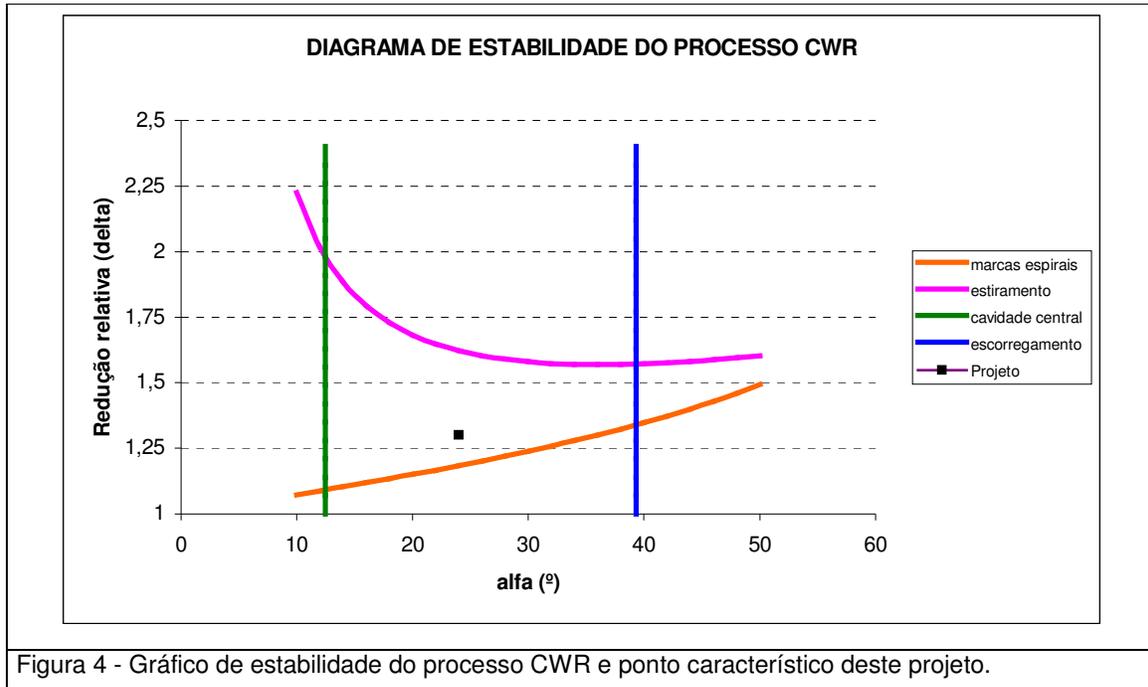
onde  $M$  representa um parâmetro constante do material a ser trabalhado com faixa de valores de 0,35 a 0,40. O limite inferior deste parâmetro se refere a materiais com boas propriedades de conformação.

$$(0,15 + 0,0038 \times 24) 7,5^{0,325} \geq 0,4$$

$$0,46 \geq 0,4$$

Como 0,46 é maior do que 0,4 a condição foi considerada como atendida.

Na Figura 4 as curvas referentes às equações 2, 3, 4, e 6 e também o ponto característico deste projeto foram plotados. Note-se que o referido ponto se situa dentro da região limitada pelas 4 curvas, região esta que fornece os valores de  $\alpha$  e  $\delta$  (e por conseqüência valores de  $\beta$ ) para ferramentas consideradas estáveis em relação aos defeitos analisados.



Mesmo levando-se em consideração os parâmetros que garantiriam a estabilidade do processo, no que diz respeito aos defeitos que normalmente ocorrem, as peças produzidas apresentaram cavidades centrais como a mostrada na Figura 5.

Desta forma, acredita-se que outras variáveis estejam influenciando no processo e não apenas aquelas ditadas pelo projeto das ferramentas.

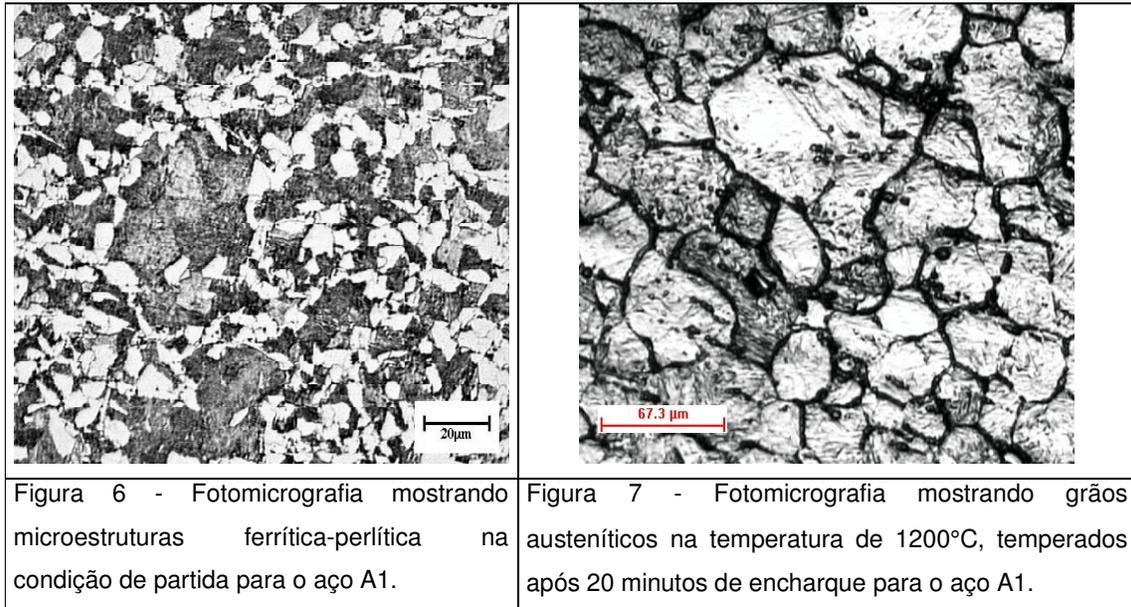


## Comportamento Microestrutural dos Aços Processados no CWR

O comportamento microestrutural dos aços processados no CWR será apresentado em uma série de análises metalográficas. Estas fotomicrografias mostram a microestrutura do ponto de partida na temperatura de encharque e principalmente do seu resfriamento ao ar. Assim, será apresentado o acompanhamento da microestrutura do aço microligado ao V-Ti (A1) e para efeito de comparação do aço carbono comercial (B1). Estas caracterizações foram feitas nas secções longitudinal e transversal sendo que para a secção transversal o comportamento microestrutural foi feito do sentido da borda para o centro do corpo de prova, onde também se realizou a contagem da proporção de fases.

A Figura 6 apresenta a microestrutura do aço A1 na condição de partida, ou seja, antes do aquecimento. Observa-se nessa fotomicrografia que esse material é composto de ferrita e perlita com colônias perlíticas complexas e semi-contínuas em torno dos grãos ferríticos.

A Figura 7 mostra a fotomicrografia dos grãos austeníticos do aço A1 na temperatura de 1200 °C, temperados após 20 minutos de encharque. Observa-se que a maior proporção dos grãos austeníticos apresentam dimensões em torno de 50 µm. Os grãos são pequenos devido ao titânio em solução sólida que ancora o crescimento dos grãos austeníticos. Pode-se observar também nesta fotomicrografia, grãos com crescimento anormal devido possivelmente, ao longo tempo de encharque.



## Observações Microestruturais na Secção Longitudinal

As Figuras 8 e 9 mostram fotomicrografias da secção longitudinal dos corpos de prova do aço microligado (A1) e do aço carbono (B1) que foram processados no equipamento de CWR. Estes aços foram deformados na temperatura de 1200 °C e resfriados ao ar. Para o aço A1 tem-se uma microestrutura de fases ferrítica-perlítica apresentado um certo grau de refinamento da fase ferrítica.

Para o aço B1 tem-se grandes colônias de perlitas e os grãos ferríticos estão em um formato irregular e espalhado de forma aleatória entre colônias.

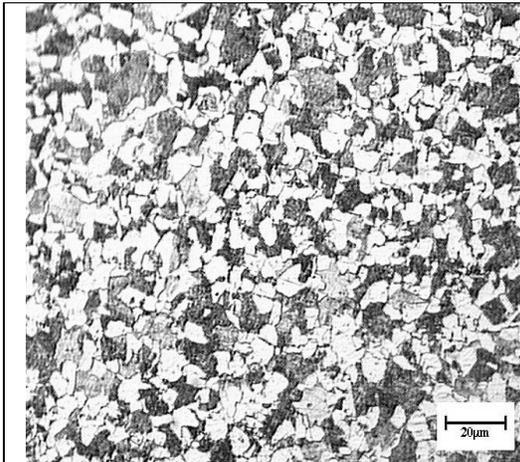


Figura 8 - Fotomicrografia da secção longitudinal do aço A1.

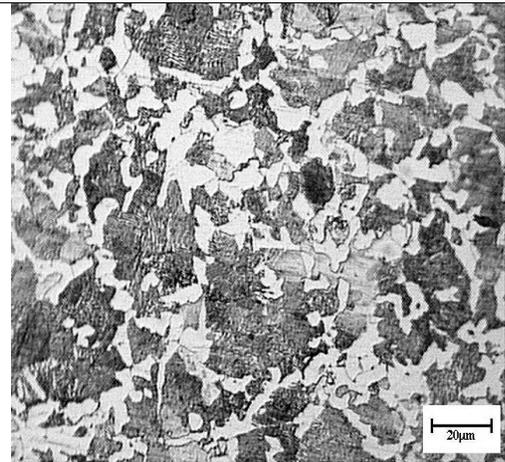


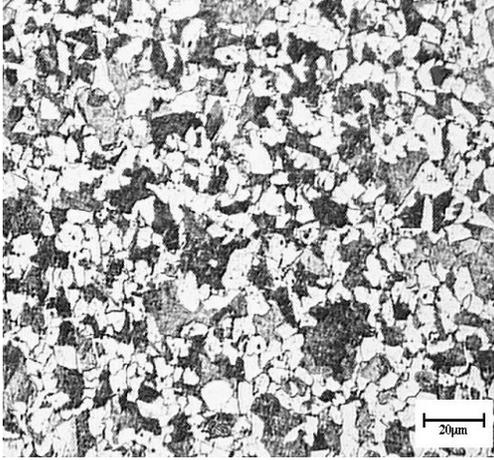
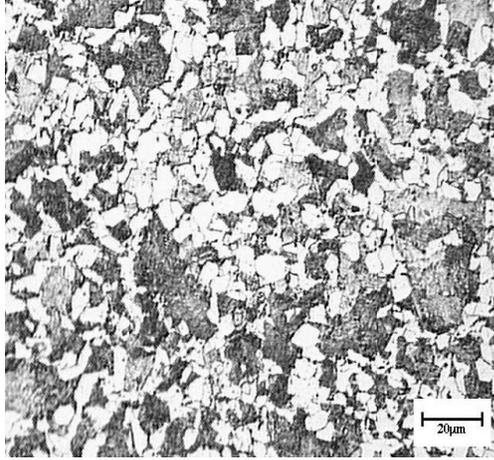
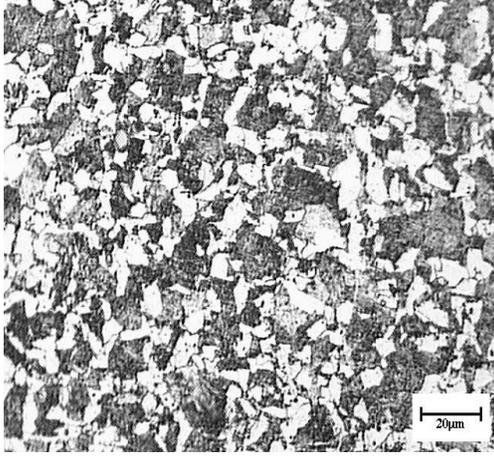
Figura 9 - Fotomicrografia da secção longitudinal do aço B1.

#### **Observações Microestruturais na Secção Transversal**

Nas Figuras 10a até 10c e Figuras 11a até 11c observa-se microestruturas dos aços A1 e B1 respectivamente, lembrando que estes aços foram deformados na temperatura de 1200 °C e resfriados ao ar. Estas observações metalográficas são da secção transversal da região central do corpo de prova e no sentido da borda para o centro.

Para os dois experimentos realizados nos aços A1 e B1 ocorre o surgimento do efeito Mannesmann, ou seja, uma cavidade (furo) na região central dos corpos de prova após o processamento no equipamento de CWR.

Para as fotomicrografias das Figuras 10a até 10c do experimento do aço A1, tem-se uma microestrutura característica do processo de resfriamento ao ar, com a presença das fases ferrítica-perlítica. Pode-se observar que na Figura 10a, próxima da borda, um certo grau de refinamento da fase ferrítica, o que é também demonstrado na Figura 10c na qual também observa-se um pequeno aumento do tamanho das colônias de perlita. Na Figura 10c, que está próxima do efeito Mannesmann, ou seja, da cavidade central, tem-se o aumento do tamanho das colônias de perlita.

	
<p>Figura 10a - Fotomicrografia da secção transversal do aço A1 (próxima da borda).</p>	<p>Figura 10b - Fotomicrografia da secção transversal do aço A1.</p>
	
<p>Figura 10c - Fotomicrografia da secção transversal do aço A1 (próxima da cavidade central).</p>	

As metalografias mostradas a seguir foram realizadas no aço carbono comercial B1, para efeito de comparação com o aço microligado. Na Figura 11a, próxima da borda, tem-se uma microestrutura de colônias de perlita com a fase ferrítica. A Figura 11b apresenta praticamente a mesma análise que a Figura 10b, no aspecto do aumento do tamanho das colônias de perlita. Na Figura 11c que está próxima da cavidade central tem-se o mesmo comportamento da Figura 10c, ou seja, há um aumento nítido no tamanho das colônias de perlita.

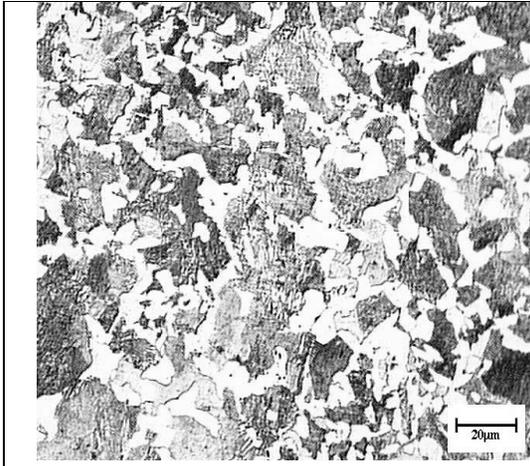


Figura 11a - Fotomicrografia da secção transversal do aço B1 (próxima da borda).

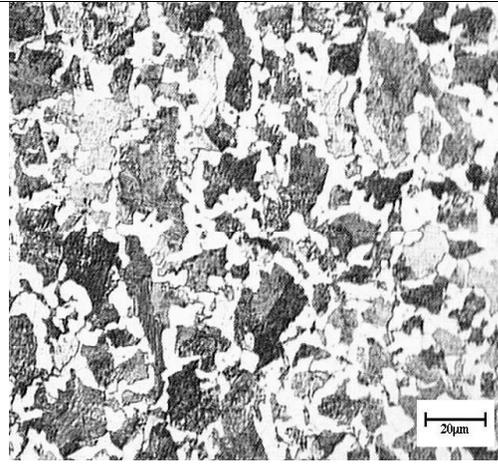


Figura 11b - Fotomicrografia da secção transversal do aço B1.

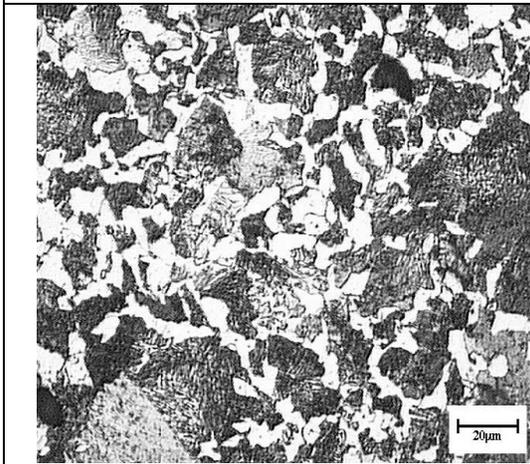


Figura 11c - Fotomicrografia da secção transversal do aço B1 (próxima da cavidade central).

Para uma melhor compreensão quantitativa das fases presente nos experimentos com os aços A1 e B1 processados no CWR foram calculadas as proporções de fases perlíticas e ferríticas. Assim, os resultados das contagens das proporções das fases das Figuras 10a até 10c e Figuras 11a até 11c são mostrados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Proporções de fases do experimento do Aço A1.

-	Figura 10a	Figura 10b	Figura 10c
% de perlita	46,35	51,43	52,70
% de ferrita	53,65	48,57	47,30

Tabela 5 - Proporções de fases do experimento do Aço B1.

-	Figura 11a	Figura 11b	Figura 11c
% de perlita	52,38	49,21	56,83
% de ferrita	47,62	50,79	43,17

O que se observa nos resultados da Tabela 4 referente ao aço microligado é que há um aumento gradativo da proporção de fase perlítica. A variação de proporção de perlita, da borda para o centro do corpo de prova, onde está a cavidade central é de 6,35%. Já na Tabela 5, referente ao aço carbono comercial, não há pelos dados apresentados um aumento gradativo da fase perlítica, mas há uma pequena variação da proporção de perlita da borda para o centro do corpo de prova de 4,45%.

Como mostrados nas fotomicrografias do aço microligado e do aço carbono comercial para a secção transversal, o aumento do tamanho das colônias de perlita pode estar relacionado com o gradiente térmico existente no corpo de prova (da borda para o centro), quando do seu resfriamento ao ar.

Um outro aspecto é que as deformações que atuam no material são uma combinação de compressão radial, alongamento axial e cisalhamento transversal no campo austenítico. Portanto, a borda fica sujeita a maior grau de deformação que o centro do material. Assim, na transformação de fase tem-se na borda, uma maior quantidade de sítios para a nucleação da fase ferrítica, que o centro do material.

## CONCLUSÕES

Apesar de as ferramentas terem sido projetadas atendendo-se às condições de estabilidade do processo previstas na literatura, as peças produzidas apresentaram o defeito tipo cavidades centrais. Isto confirma a idéia de que outros variáveis, possivelmente temperaturas de pré-aquecimento, velocidades de trabalho, microestruturas de partida, devem estar atuando no sentido de causar os defeitos.

Na condição de partida observa-se microestruturas compostas por fases ferrítica e perlítica com colônias perlíticas complexas e semi-contínuas, e na temperatura de encharque observa-se que os grãos austeníticos apresentam dimensões em torno de 50  $\mu\text{m}$ .

As metalografias da secção longitudinal para o aço microligado apresentam uma microestrutura de fases ferrítica-perlítica com um certo grau de refinamento da fase ferrítica. Para o aço carbono comercial tem-se grandes colônias de perlitas.

As fotomicrografias da secção transversal do aço microligado e do aço carbono comercial caracterizam as microestruturas com um pequeno aumento do tamanho das colônias de perlita da borda para o centro. Assim, próximo das cavidades centrais tem-se o aumento do tamanho das colônias de perlita.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio dado ao desenvolvimento deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] WERONSKI, W.; PATER, Zb. Selection of geometric parametrs of transverse wedge rolling tools. *Journal of Materials Processing Technology*, v.34, p.273-280, 1992.
- [2] QIANG LI; LOVELL, M. R.; SLAUGHTER W.; TAGAVI K; *Journal of Materials Processing Technology* 125–126 (2002) 248–257
- [3] DEAN, T. A.; FU, X. P. Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.33, n.3, p.367-400, 1993.
- [4] DANNO, A.; TANAKA, T. Hot forming of stepped shafts by wedge rolling with three rolls. *Journal of Mechanical Working Tehnology*, v.9, p.21-35, 1984.
- [5] Honeycombe, R. W. K. and Bhadeshia, H. K. D. H.; *Steels Microstructure and Properties*; Published by Edward Arnold; second edition, 1995.
- [6] GENTILE, F. C. E S. T. BUTTON - Estudo Do Processo De Cross-Wedge Rolling Para A Produção De Eixos Escalonados Com Aços Microligados; Trabalho apresentado no XXI Senafor, Gramado- RS;2001.
- [7] HAYAMA, M. Optimum working conditions in the cross rolling of stepped shaft. *Journal of Mechanical Working Technology*. v.17, n.3, p.31-46, 1979.
- [8] ANDREEV, G. V.; MAKUSHOK, E. M.; SEGAL, V. M.; *et al.* Some problems of cross wedge rolling. *Izvest. AN BSSR*, v. 3, p.16-21, 1972.
- [9] DANNO, A.; AWANO, T. Effect of rolling conditions on formation of central cavity in 2-roll cross rolling. *J. JSTP*, v.17, n.181, p.117-124, 1976.
- [10] HLADKÝ, V. Handbook of wedge rolling process and practice. Tool design and tool making. W. Engeneering for hot metal forming. BRNO, Czech Republic.

## **Microstructural Analysis of Products Manufactured by Cross Wedge Rolling**

### **Abstract**

The advantages of metal forming, consisting of high productivity, low costs per part, minimum scrap material and energy consumption and improvement of overall quality, stimulate the increase of their application. Cross Wedge Rolling (CWR) is an important metal forming technique used to manufacture stepped shafts to substitute the conventional hot upsetting. CWR products show high quality with more precise dimensions, good surface finish, high productivity, easy automation, and a small amount

of scraps. In that process a billet is deformed by the relative movement of two wedge tools assembled on flat dies. CWR products are free of defects only for a defined range of variables like product geometry, tools geometry, process temperature and strain rate. The incorrect choice of these parameters can cause the formation of many defects like necking, surface marks and internal faults generated by the Mannesmann effect. The objective of this work is to define the ideal process parameters that avoid the formation of these defects, and analyze the microstructure of two steels (SAE 1045 and a medium carbon Ti-V microalloyed steel) deformed by CWR. Workpieces with 17 mm in diameter and 90 mm long were heated to 1200 °C for 20 minutes, then deformed by CWR at a speed of 170 mm/s and air cooled. Results from these tests showed that the internal defect initiates in the central region of the products and that the microstructures are formed by ferrite and pearlite, with an increase of the size of the pearlite colonies from the surface to the center of the workpieces.

**Key words:** *Cross wedge rolling, microalloyed steel, ferrite, pearlite.*