

# ESTUDO DO PROCESSO DE CROSS-WEDGE ROLLING PARA A PRODUÇÃO DE EIXOS ESCALONADOS COM AÇOS MICROLIGADOS <sup>(1)</sup>

Sérgio Tonini Button <sup>(2)</sup>

Fernando Cesar Gentile <sup>(3)</sup>

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo o estudo do processo *Cross Wedge Rolling* (CWR) para fabricação de eixos escalonados a partir de barras de aços microligados, com o intuito de obter peças isentas de defeitos internos e/ou externos com custos menores que os observados no processo atualmente empregado na indústria, e com propriedades mecânicas adequadas às condições de utilização em caixas de transmissão automotivas. Para alcançar esse objetivo, desenvolveu-se o projeto, o dimensionamento e a construção de um equipamento CWR em escala de laboratório, bem como o dimensionamento e a fabricação de ferramentas para a conformação de algumas geometrias de eixos escalonados. São apresentadas informações técnicas sobre o projeto do equipamento construído, bem como resultados experimentais obtidos em ensaios realizados para avaliar a conformabilidade dos aços microligados que serão empregados na fabricação desses eixos.

## 1) Introdução

A exigência por parte das montadoras de automóveis por produtos com maior qualidade, a preços mais baixos e com entregas mais rápidas faz com que a indústria de auto-peças concentre esforços na busca de processos que sejam capazes de satisfazer tais exigências, e de materiais alternativos que apresentem propriedades mecânicas tão boas ou melhores que os materiais atuais, porém com custos menores.

Para o caso específico de produção de eixos escalonados para caixas de transmissão, o processo CWR traz grandes vantagens sobre o recalque horizontal tais como: economia de material e energia, maior produção, dimensões mais próximas do produto final e melhor acabamento superficial. Quando a utilização do processo CWR é aliada à utilização de aços microligados, vantagens adicionais podem ser obtidas pois esses materiais não necessitam de tratamento térmico (tempera e revenido) após a conformação para alcançar as propriedades mecânicas desejadas. Porém é de vital importância o conhecimento dos parâmetros do processo CWR para que este possa ser aplicado com sucesso.

---

(1) Trabalho apresentado no XXI Senafor, 23 e 24/10/2001, Gramado, RS

(2) Professor Associado - sergio1@fem.unicamp.br

(3) Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Laboratório de Conformação Mecânica - Departamento de Engenharia de Materiais  
Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas  
C.P. 6122 - 13083-970 - Campinas - SP

O uso da simulação física em laboratório do processo CWR é de grande utilidade para a compreensão do mesmo, bem como para o desenvolvimento do processo para fabricação de peças isentas de defeitos e com propriedades mecânicas adequadas sua utilização.

## 2) O processo CWR

O processo denominado *Cross Wedge Rolling* (CWR) vem se destacando nos últimos anos para a substituição do recalque horizontal na fabricação de eixo escalonados por apresentar grandes vantagens em comparação ao processo de recalque a quente<sup>[1, 2]</sup>, 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.

O CWR foi utilizado inicialmente na produção de pré-formas para forjamento de precisão em matrizes fechadas e tem sido usado na produção de eixos escalonados, pinos, eixos excêntricos e outros componentes numa única operação.

Esse processo é caracterizado pela deformação plástica de uma barra ou tarugo pela ação de ferramentas em formato de cunha que se movem tangencialmente uma em relação a outra. As ferramentas podem ser montadas sobre placas ou rolos, sendo que no primeiro caso as placas podem ser planas ou côncavas em que pode-se usar um, dois ou três rolos como mostra a Figura 1.

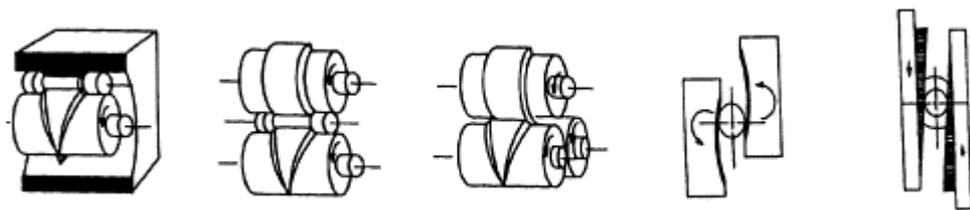


Figura 1 - Tipos de ferramentas empregadas no CWR<sup>[2]</sup>.

Para todas as configurações apresentadas o processo pode ser executado a quente (entre 1000 e 1200°C para peças em aço) ou a frio. No primeiro caso, o aquecimento do material de partida é geralmente feito por indução para garantir boa qualidade superficial da peça. 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 de laminação,  $2l$  e comprimento da cunha,  $L$  (Figura 2).

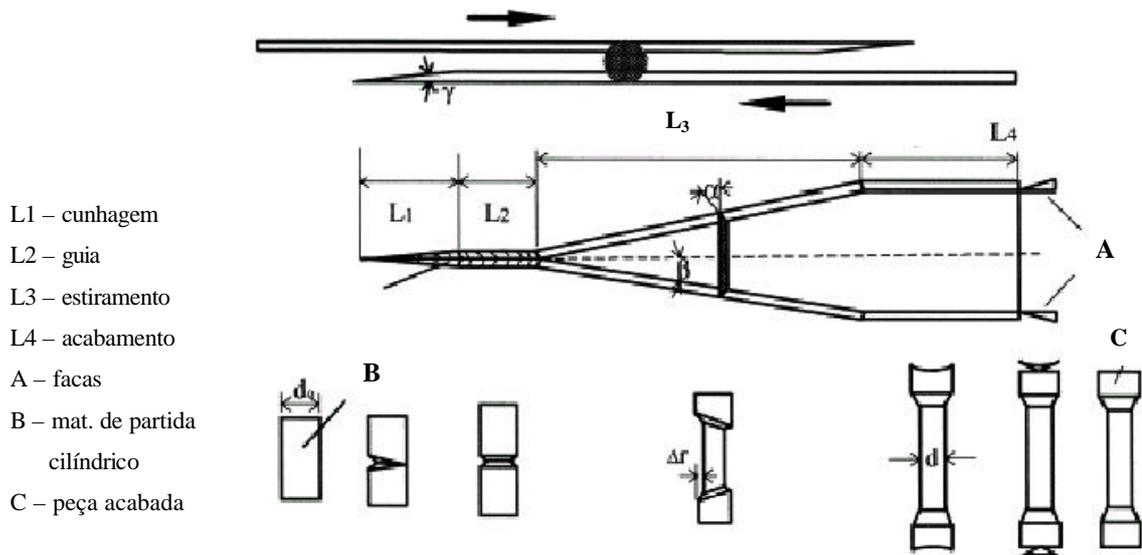


Figura 2 - Zonas de deformação<sup>[2]</sup>

Atualmente o processo CWR está bastante desenvolvido no que diz respeito aos equipamentos, nas configurações com dois rolos, três rolos e ferramentas planas, sendo os dois primeiros os mais utilizados na indústria.

Para que o processo CWR seja aplicado com sucesso é necessário o conhecimento dos mecanismos de deformação da peça que são complexos devido a sua natureza tridimensional. Isso faz com que o processo seja estável apenas dentro de parâmetros específicos que dependem da geometria da peça a ser fabricada que são: a geometria da ferramenta, a temperatura do material de partida e a taxa de deformação.

As análises teóricas encontradas na literatura tendem a empregar soluções aproximadas baseadas em muitas simplificações assumidas e, deste modo, apesar de alguns modelos simplificados descreverem satisfatoriamente algumas características do processo, não há nenhum modelo teórico proposto que descreva adequadamente o processo CWR.

O comprimento e a área de contato entre as ferramentas e a peça atraiu a atenção dos pesquisadores, uma vez que estes parâmetros têm grande influência sobre a carga e energia de deformação.

Smirnov<sup>[3]</sup> desenvolveu em 1948 um modelo de deformação plana para a compressão dos rolos sobre a peça e se baseou no processo *cross rolling*, em que não existem as ferramentas em cunha. Devido às semelhanças do CWR com o processo *cross rolling*, vários autores usaram seus resultados para o estudo da área de contato no processo CWR. Vários trabalhos experimentais foram realizados para obtenção das projeções da área de contato sobre planos específicos dos eixos coordenados, resultando em vários modelos, fórmulas teóricas e algoritmos que foram apresentados para as diversas configurações de equipamentos<sup>[4-6]</sup>.

Além da preocupação na determinação das projeções da área de contato peça/ferramenta, também foi analisada a força atuante sobre a peça que pode ser decomposta em três componentes em um sistema de coordenadas fixo à peça. Os primeiros métodos teóricos para o cálculo destas componentes eram bastante simples e foram baseados em condições estáticas se afastando, portanto, do problema real.

A partir da metade dos anos 70, várias contribuições foram dadas para o entendimento da compressão rotacional, que é um conceito básico para o cálculo das componentes das forças no processo CWR. Várias pesquisas foram desenvolvidas levando-se em consideração que o material é processado por compressão rotacional em deformação plana<sup>[7]</sup>. Métodos de cálculo como o método da energia, método dos elementos finitos e do limite superior foram largamente utilizados<sup>[8-10]</sup>.

Os defeitos característicos do processo CWR foram categorizados por Jonhson e Mamalis<sup>[11]</sup>, e podem ser divididos em três grupos: defeitos internos (cavidades e poros), defeitos de superfície e seções com geometria diferente da esperada.

O defeito mais frequentemente encontrado no processo CWR é a formação de uma cavidade central, também conhecida como efeito Mannesmann e que se apresenta na forma de uma fissura axial no processo com dois rolos e com ferramentas planas e como um anel no processo com três rolos.

Um estudo preliminar realizado por Smirnov<sup>[12]</sup> apresentou duas possíveis razões do aparecimento deste defeito. A primeira estaria relacionada com a tensão de cisalhamento intenso existente no centro da peça durante o processo. Dentro desta visão vários autores desenvolveram pesquisas mostrando que trincas muito pequenas, existentes no material de partida, podem se propagar durante o processo devido a

presença de deformação plástica e causar o defeito<sup>[13,14]</sup>. Outra corrente acredita que a cavidade central seja formada devido as 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 e grande inclusões presente no material de partida.

Os defeitos de superfície encontrados no processo CWR são: canaletas espirais, empescoçamento e *lapping*<sup>[2]</sup>.

As canaletas podem ser atribuídas à abertura de trincas ou defeitos superficiais existentes no material de partida ou ao atrito existente entre peça/ferramenta devido ao uso de serrilhado muito profundo nas ferramentas. Alguns autores atestam que o aparecimento de canaletas sempre é acompanhado do aparecimento de empescoçamento<sup>[2]</sup>. No empescoçamento estão incluídas a diminuição de diâmetro ou a quebra da peça em regiões de mudança brusca de diâmetros em presença de forças axiais não equilibradas. Quando a força de tração (axial) gera tensões maiores que a tensão limite de escoamento do material trabalhado, o empescoçamento ocorrerá preferencialmente nas regiões de menor diâmetro. O empescoçamento e as canaletas podem ser eliminadas dependendo do projeto das partes subsequentes da ferramenta. O *lapping* ocorre quando do uso de ferramentas planas com cantos vivos. Quando a cunha apresenta cantos vivos e a peça tem seu diâmetro reduzido o material deformado tem a tendência de dobrar-se<sup>[14]</sup>.

Finalmente, a má formação da seção transversal pode se apresentar como *squaring* ou *twisting*. No primeiro caso há um achatamento de parte do material devido ao escorregamento da peça em relação às ferramentas. Este escorregamento se dá quando a força tangencial atuando na peça se torna maior que a força de atrito entre peça/ferramenta. Assim a peça para de girar e é comprimida continuamente sem acompanhar a deformação axial<sup>[2]</sup>. Já o *twisting* é produzido por diferenças entre a força tangencial e a força de atrito em diferentes porções da peça<sup>[2]</sup>.

Os parâmetros geométricos que influem no processo CWR são o ângulo de conformação, **a**; o ângulo de estiramento, **b** e a redução de área, **e**.

O ângulo de conformação deve encontrar-se 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 *lapping* e empescoçamento<sup>[15]</sup>.

Já o ângulo **b** 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<sup>[5]</sup>.

Em relação a redução de área, **e**, 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<sup>[15, 16]</sup>. Alguns autores sugerem que **e** encontre-se entre 55% e 70%.

### 3) Aços microligados

A otimização de projetos tem estimulado pesquisas de desenvolvimento de novas classes de materiais. Para os aços, uma das alternativas foi o desenvolvimento de novas composições químicas para o melhoramento de suas características, o que levou à produção dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) pela adição de elementos de liga que foram utilizados para aumentarem a resistência mecânica pelo refino de grão e endurecimento por precipitação.

Os elementos de liga freqüentemente presentes nos aços ARBL são o níquel, cromo e molibdênio podendo chegar a 6% (em peso) a soma dos seus teores. Pode-se encontrar também pequenos teores de boro e vanádio. Essa categoria de aços se caracteriza por apresentar elevados valores de resistência mecânica e tenacidade e serem utilizados freqüentemente na condição temperados e revenidos<sup>[17]</sup>.

A partir dos anos 60, o desenvolvimento de aços microligados (também chamados aços ARBL microligados) estimulou o estudo das relações entre microestruturas e propriedades mecânicas, proporcionando uma vasta gama de aços estruturais de alta resistência<sup>[18]</sup>.

Pode-se definir os aços microligados como aços carbono-manganês contendo pequenos teores de nióbio e/ou vanádio e/ou titânio (usualmente menores que 0,15% em peso). A finalidade de introduzir pequenos teores destes elementos é produzir refino de grão austenítico e endurecimento por precipitação de pequenos carbonetos e/ou carbonitretos de Ti, Nb e V na ferrita, que levam o material a adquirir elevada resistência mecânica. Estes materiais se caracterizam por alta resistência mecânica, alta tenacidade, boa soldabilidade (devido ao baixo teor de carbono) que possibilita sua utilização em projetos com redução de peso e em condições severas.

Nos aços microligados cada elemento de liga exerce um papel específico dentro da microestrutura<sup>[18]</sup>. O nióbio é responsável pela formação de carbonitretos na fase austenítica (geralmente abaixo de 1000°C) que exercerão papel importante no controle do grão austenítico que, por consequência, favorecerá refinamento do grão ferrítico, possibilitando o aumento da resistência mecânica. O vanádio forma precipitados ricos em carbono em torno de 700°C (após a decomposição da austenita em ferrita), responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e aumento de dureza dos aços microligados e seu efeito pode ser realçado pelo aumento da quantidade de nitrogênio. Os carbonetos e carbonitretos de titânio são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica por precipitação enquanto os nitretos formados a altas temperatura inibem o crescimento do grão austenítico<sup>[18]</sup>.

Para obtenção da microestrutura desejada e, portanto, das propriedades mecânicas desejadas, os aços microligados são fabricados a partir de processos termomecânicos, que para o caso de produtos semi-acabados são denominados de laminação controlada<sup>[19]</sup> que é um procedimento em que vários estágios da laminação têm sua temperatura controlada, com o grau de redução de cada passe pré-determinado e com temperatura de término de processo definida precisamente.

A utilização de aços microligados em componentes forjados para a indústria automobilística teve início na década de 70 em consequência da necessidade de economia de combustível decorrente da crise do petróleo. Com o uso intensivo deste material nos automóveis houve uma grande redução do peso dos mesmos. Assim, um veículo mais leve permite uma redução de peso de outros componentes como motores, freios, embreagem, etc<sup>[20]</sup>.

Porém, a grande vantagem do uso de aços microligados em componentes forjados vem do seu processamento. Os aços ligados usados com frequência em peças de automóveis sujeitas a grandes esforços e/ou esforços cíclicos necessariamente devem passar por processo de tratamento térmico de têmpera, para aumento de sua resistência mecânica através da decomposição da austenita em martensita, e de revenido para melhorar a tenacidade. Já os aços microligados conseguem alcançar alto níveis de resistência mecânica e tenacidade (iguais ou superiores aos obtidos no processo convencional) simplesmente sendo deixados resfriar ao ar após o processo de forjamento, favorecendo o aumento de resistência mecânica e tenacidade através da precipitação de carbonetos, nitretos e carbonitretos,

eliminando-se assim as etapas de tratamento térmico, reduzindo o tempo de processo e diminuindo custos da produção<sup>[21]</sup>, dentre outras vantagens encontradas<sup>[22]</sup>.

Porém, a tecnologia de processamento termomecânico usada para a fabricação de semi-acabados não pode ser transferida diretamente para os produtos forjados a quente. Os forjados são produzidos a partir de barras aquecidas (a gás ou por indução) a 1260°C e conformados a 1120°C. O crescimento de grão austenítico e o coalescimento de precipitados são muito rápidos nesta temperatura<sup>[23]</sup>. A redução da temperatura de forjamento para otimizar as propriedades mecânicas implica em redução na eficiência e aumento da capacidade dos equipamentos e excessivo desgaste das ferramentas<sup>[23]</sup>. Assim a composição do aço a ser usado bem como a rota de fabricação da peça devem ser bem definidas a fim de se fabricar peças com características mecânicas adequadas às necessidades de sua utilização<sup>[24-26]</sup>. Atenção especial deve ser dada a esse aspecto quando se desejar utilizar aços microligados e outros processos de conformação para fabricação de peça para automóveis, como o processo *cross wedge rolling*.

#### 4) O equipamento de CWR projetado

Na Figura 3 apresenta um esquema do equipamento CWR de laboratório que foi projetado e está sendo montado no Laboratório de Conformação Mecânica, para os ensaios de simulação do processo. Na Tabela 1 são mostradas suas características principais, destacando-se tratar-se de um equipamento com ferramentas planas, sendo uma fixa e uma móvel tracionada pela rotação do eixo do motor elétrico.

Tabela 1 – Características principais do equipamento.

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

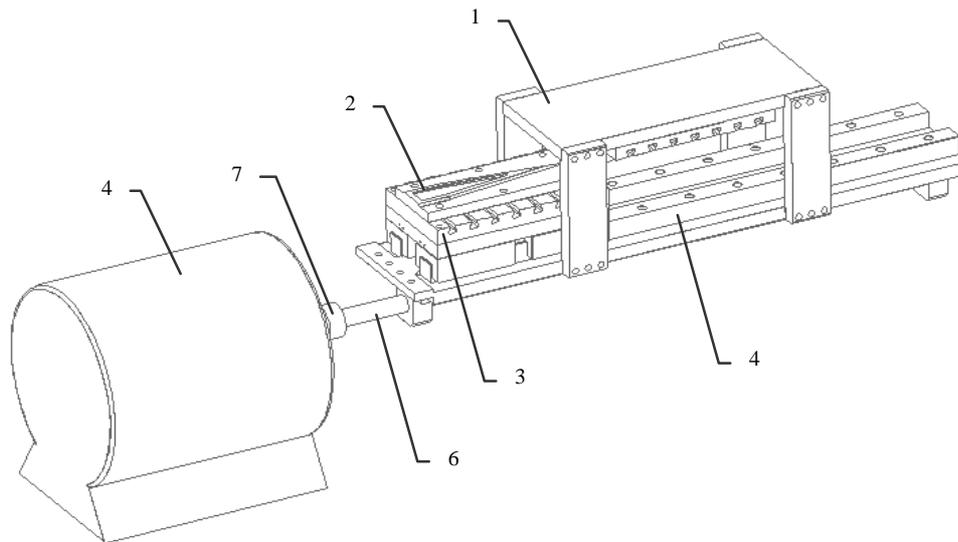


Figura 3 - Esquema do equipamento CWR com ferramentas planas.  
 1) estrutura; 2) ferramenta; 3) porta ferramenta; 4) guias;  
 5) motor de corrente alternada; 6) fuso de esferas; 7) acoplamento.

## 5) Procedimento experimental

Foram realizados ensaios em laboratório para avaliar a conformabilidade de aços microligados que serão empregados na fabricação de eixos pelo processo CWR.

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço microligado utilizado (48MnV3) nos ensaios de conformabilidade.

Tabela 2 - Composição química em peso do aço microligado 48MnV3  
 (segundo informações do fornecedor)

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Nb	N
0,46- 0,50	0,10- 0,30	0,70- 1,00	max. 0,03	0,02- 0,035	0,10- 0,20	0,08- 0,13	0,04- 0,06	80-140 ppm

Corpos de prova com 15mm de diâmetro e 20mm de comprimento foram cortados longitudinalmente de barras com diâmetro de 2 3/4" e deformados para a avaliação da conformabilidade. Os ensaios de conformabilidade foram realizados a 1050°C em prensa hidráulica com capacidade de carga de 50 toneladas com ferramenta inferior plana e superior em cunha.

Após a deformação, os corpos de prova foram:

- resfriados diretamente na água, ou
- resfriados até 500°C por 15 minutos e imersos em água, ou
- resfriados ao ar. Três réplicas forma feitas para cada situação.

A avaliação da microestrutura foi realizada nos corpos deformados nas posições apresentadas na Figura 4.a e na matéria-prima como recebida. Após a preparação das amostras (lixamento e polimento com pasta de diamante) foi feito o ataque com nital 5%.

No caso da matéria-prima como recebida, a avaliação da microestrutura foi feita nos sentidos transversal e longitudinal, enquanto que nos corpos de prova deformados, apenas no sentido longitudinal (mesmo sentido da deformação). Também foram realizadas medidas de dureza Rockwell C nos pontos mostrados na Figura 4.b para as amostras deformadas e no material como recebido.

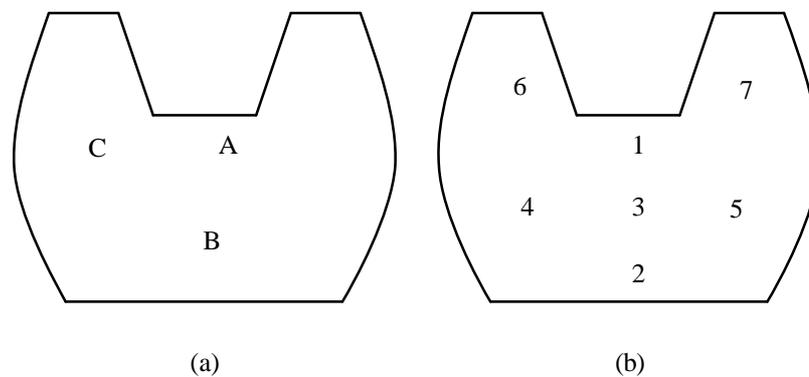


Figura 4 (a) posições onde foram avaliadas as microestruturas,  
(b) posições para as medidas de dureza.

## 6) Apresentação e análise dos resultados

### 6.1 Análise das microestruturas

A seguir são apresentadas as figuras contendo as microestruturas resultantes em cada tratamento.

O material como recebido (Figura 5) apresenta granulação com tamanho irregular e distribuição de fases típica de aços com o mesmo teor de carbono. Na micrografia feita no sentido longitudinal pode ser observada orientação granular proveniente da laminação mostrando que os últimos passes do trabalho a quente não foram suficientes para recristalizar todo o material e eliminar essa orientação característica.

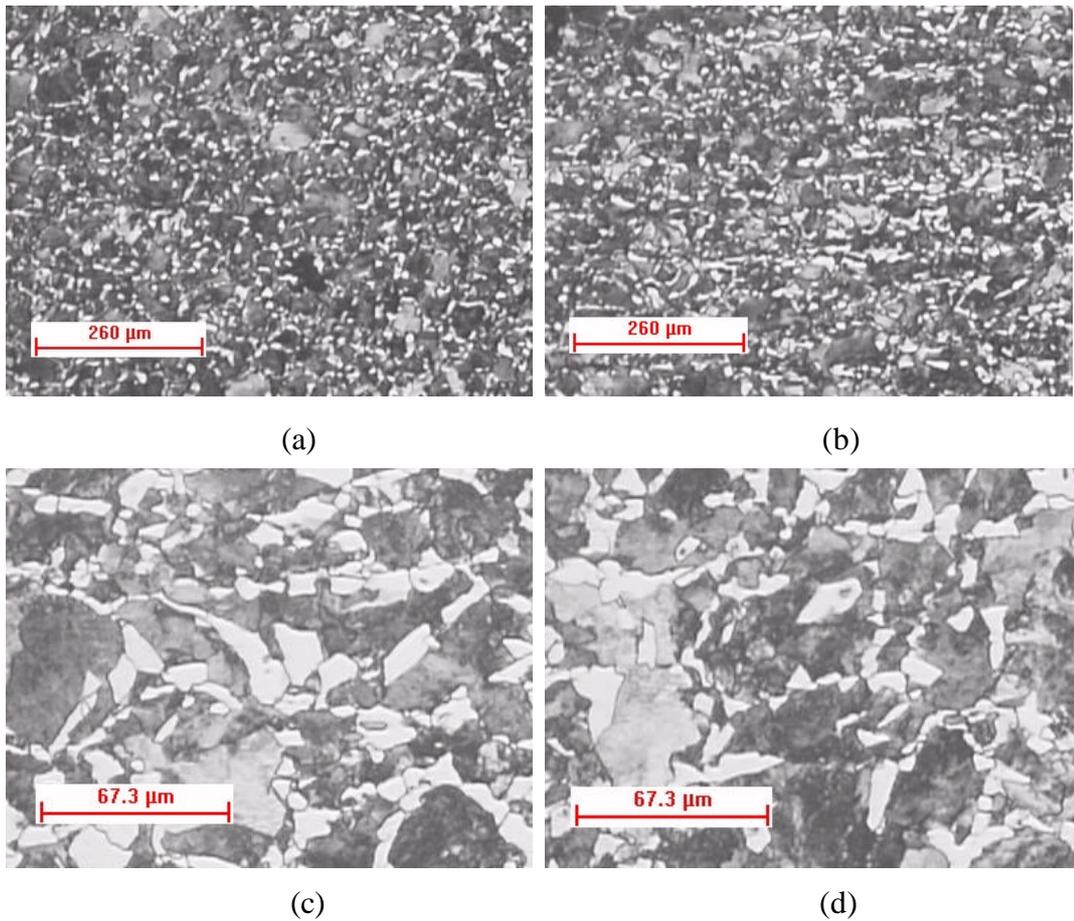


Figura 5 - Material como recebido: (a) e (c) sentido transversal, (b) e (d) sentido longitudinal.

Na Figura 6 pode-se observar que as amostras resfriadas diretamente na água após a deformação, apresentaram estrutura martensítica em todas as regiões que repetiram a microestrutura representada para a região A (Figura 4.a). Não foi possível a realização de medidas de tamanho de grão austenítico nestas amostras.

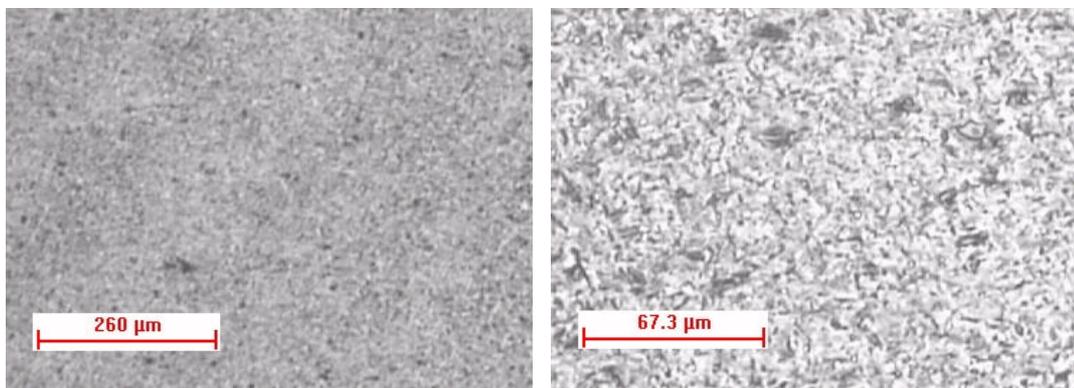


Figura 6 - Microestruturas das amostras resfriadas em água logo após a deformação (região mais deformada).

Na Figura 7 observa-se que as amostras resfriadas ao ar apresentaram, para todas as regiões de análise, uma estrutura ferrítico-perlítica. Porém, a região mais deformada apresentou granulação menor e mais homogênea com alguns grãos apresentando crescimento anormal, o que indica recristalização mais intensa nesta área.

Por outro lado, a região da base da amostra, que sofreu menor deformação, apresentou granulação mais grosseira, mostrando que pode ter ocorrido crescimento de grão devido à temperatura elevada.

Finalmente, a região lateral da amostra apresenta tamanho de grão intermediário entre as regiões citadas anteriormente, o que está em conformidade com o grau de deformação desta região.

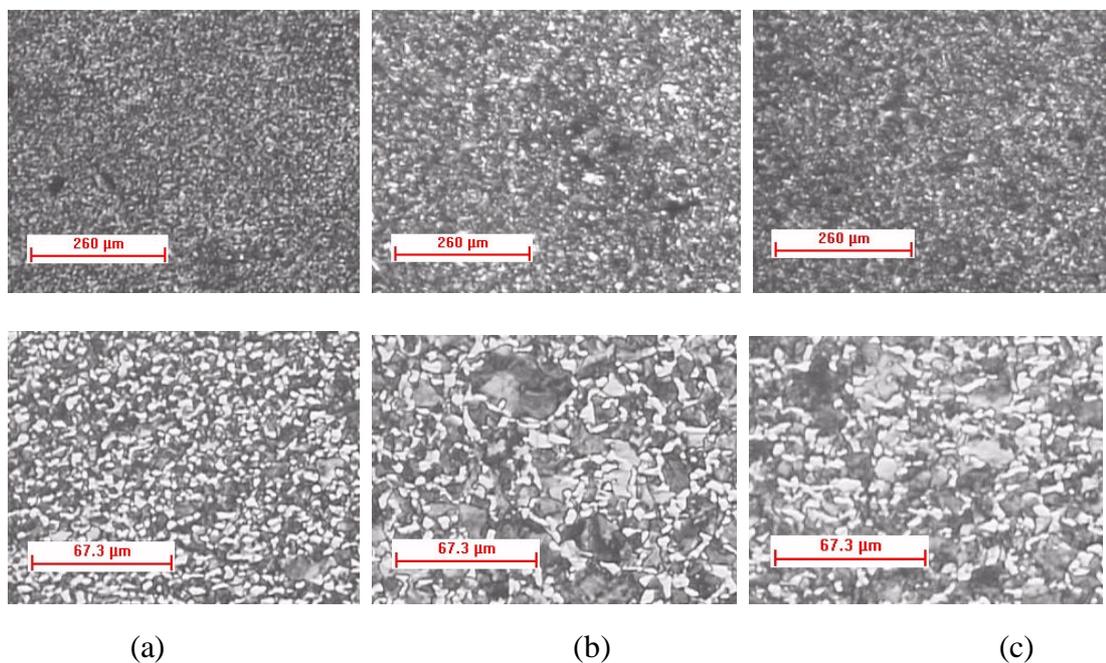


Figura 7 - Microestruturas das amostras resfriadas ao ar: (a) região mais deformada, (b) próxima a base da amostra, (c) lateral.

As amostras resfriadas até 500°C e posteriormente resfriadas em água (Figura 8) apresentam estrutura ferrítica-perlítica e as mesmas tendências em relação a tamanho de grão que as amostras resfriadas ao ar nas várias regiões analisadas. Porém, pode ser observado que as amostras resfriadas ao ar apresentaram granulação mais fina e mais homogênea e também estrutura perlítica mais fina.

Este último tratamento foi feito com o intuito de se obter estrutura martensítica com mínimo de distorção, porém, a temperatura do primeiro resfriamento e o tempo de exposição foram muito elevados. Como não foi possível a

obtenção da curva de transformação isotérmica do aço 48MnV3, novos testes deverão ser realizados a temperaturas menores (talvez por volta de 350°C) e com tempo de exposição menor.

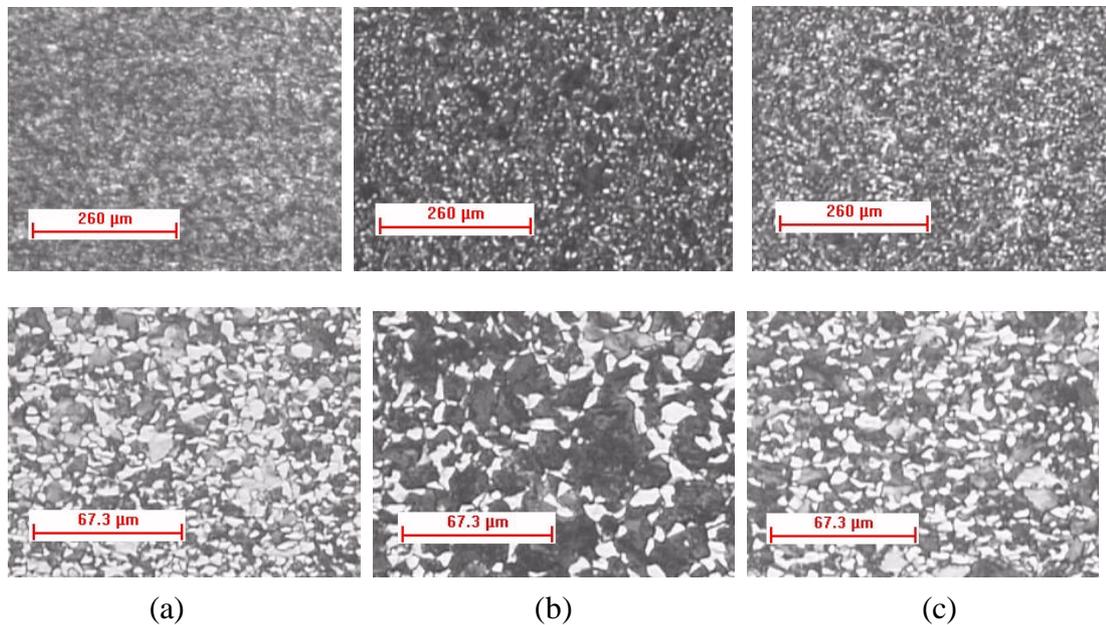


Figura 8 - Microestruturas das amostras resfriadas até 500°C por 15 min. com posterior resfriamento em água, (a) região mais deformada, (b) próximo a base da amostra, (c) lateral.

## 6.2 Análise das medidas de dureza

A Tabela 3 e a Figura 9 apresentam os resultados de dureza HRC para as amostras de cada condição de resfriamento, de acordo com as posições mostradas na Figura 4.b. Em alguns desses pontos não foi possível a medida de dureza para algumas amostras devido a irregularidades na geometria.

Os valores obtidos nos ensaios de dureza são esperados e coerentes com as microestruturas encontradas nos ensaios de conformabilidade.

Duas das amostras resfriadas em água apresentaram valores de dureza inferiores pois estas não apresentaram estruturas totalmente martensíticas. Provavelmente, para estas amostras houve um tempo maior entre a retirada do corpo de prova da prensa e a imersão deste em água, o que tornou possível a formação de constituintes estáveis antes da formação da martensita.

Assim, da análise das microestruturas e dos resultados de dureza obtidos com os corpos-de-prova do aço microligado 48MnV3, deformados a quente e resfriados por três procedimentos distintos, pode-se concluir que o modo de resfriamento afeta

significativamente as propriedades mecânicas do material conformado, como se observou nas diversas microestruturas obtidas e na variação de valores de dureza.

Porém, observou-se que o grau de deformação imposto, variado nos corpos-de-prova pela presença da ferramenta superior em forma de cunha, afeta a microestrutura de acordo com a região estudada, mas não tem influência significativa sobre a dureza. Para deve-se realizar outros ensaios mecânicos para uma conclusão mais definitiva sobre a influência do processo de conformação e do modo de resfriamento sobre as propriedades mecânicas.

Tabela 3 - Medidas de dureza Rockwell C

Meio	Medida	1	2	3	4	5	6	7
Ar	1	25	27.5	26	-	28	-	27.5
	2	26	28.5	26.5	28	-	27.5	-
	3	25	28	26	-	29	-	27
Água	1	33	37	35	42	39	46	45
	2	36.5	49	46	55	48	54.5	47
	3	59	59	60	61.5	60	61	62
Resf. 500°C	1	24	25	25	-	24	24	24
	2	22.5	-	23	24.5	-	24	-
	3	24	24	22.5	-	24	-	25

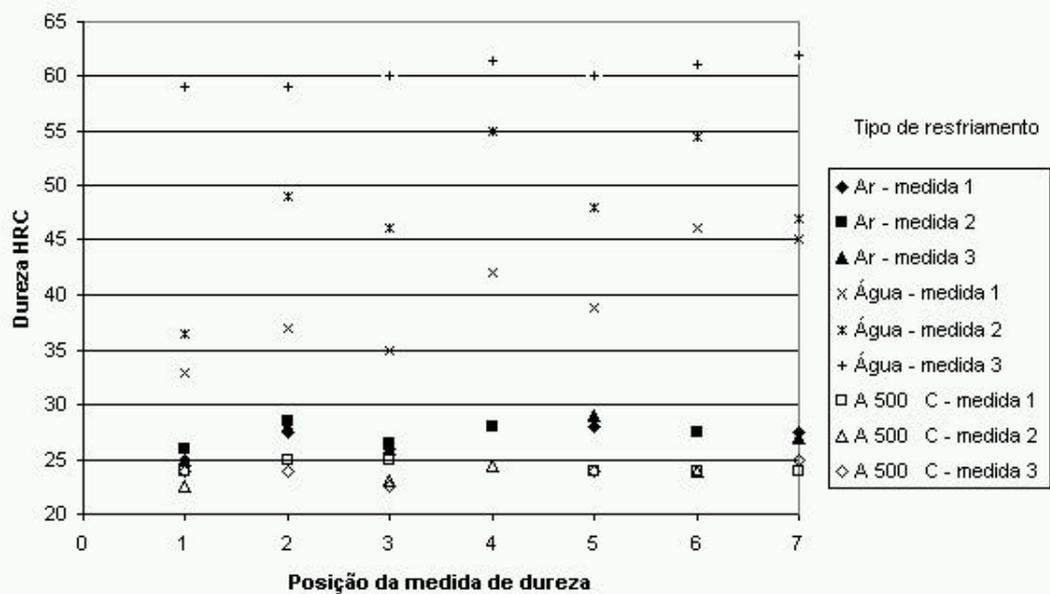


Figura 9 - Variação da dureza em função do modo de resfriamento e da posição das medidas nos corpos-de-prova.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

## 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] 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.
- [3] SMIRNOV, V. S. Cross rolling. *Mashgiz, Moscow*, 1948.
- [4] AWANO, T.; DANNO, A. Rolling force and rolling torque - a study of hot rolling of stepped shaf II. *J. JSTP*, v.9, n.88, p.296-303, 1968.
- [5] 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.
- [6] PATER, Zb.; WERONSKI, W. Determination of the contact area between the rolling tools and the workpiece in cross rolling process. *Journal of Material Processing and Technology*, v.45, p.105-110, 1994.
- [7] HANASHIRO, T.; SAITO, Y; *et al.* Stress analysis in plane-strain rotary compression of cylindrical billet. *J. JSTP*, v.18, n.199, p.605-612, 1977.
- [8] HAYAMA, M. Estimation of load and contact width in rotational compression of rod. *J. JSTP*, v.15, n. 157, p.141-146, 1974.
- [9] NA, K. H.; CHO, N. S. Analysis of rotational compression of a cylindrical billet in the transverse rolling process. *Journal of Mechanical Working Technology*, v.28, n.22, p.203-216, 1990.
- [10] PATER, Zb. Theoretical method for estimation of mean pressure on contact area between rolling tools and workpiece in cross wedge rolling process. *International Journal of Mechanical Science*, v.39, n.2, p.233-400, 1997.
- [11] JONHSON, W.; MAMALIS, A. G. A survey of some physical defects arising in metal working processes. Proceedings of 17th Internatioanl MTDR Conference, London, p.607-621, 1977.
- [12] SMIRNOV, V. S. The deformation process in cross rolling. *Stal*, v.7, n.6, p.511, 1947.
- [13] AWANO, T.; DANNO, A. Metal flow on rolled shafts - a study of hot rolling of stepped shaft: Part 1. *J. JSTP*, v.9, n.88, p.285-295, 1968.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] GUIMARÃES, V. A. Influência da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e no micromecanismo de fratura de um aço microligado com nióbio e titânio. Tese de Doutorado - UNICAMP, 1997.
- [18] SAGE, A. M. Microalloyed steels for structural applications. *Metals and Materilas*, v.5, n.10, p.584-588, 1989.
- [19] KASPAR, R; et. al. Improving properties of low-carbon microalloyed steel by means of accelerated cooling of dynamically recrystallized austenite. *Steel Research*, v.60, n. 12, p. 566-570, 1989.
- [20] HANSEN, S. S. Justification for the use of HSLA steels in various applications. *Proceedings of Microalloying 88Congress*, Chicago, USA. p.31, 1988.
- [21] ALBIERO, W. *Metalurgia ABM*. v.37, n.281, p.192, 1981.
- [22] MEI, P. R. Efeito do tratamento termomecânico na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono microligados com nióbio. Tese de Livre Docência - UNICAMP, 1989.
- [23] WRIGHT, P. H. *Advanced Material and Processes*. p.237, 1983.
- [24] REEDER, A.; VASEY, C. G.; NAYLOR, D. J. Development of microalloyed steels for forgin and bar applications. *Fundamentals of Microalloying Forging Steels*, *Proceedings of an International Symposium*, USA, 1987.
- [25] COYNE, J. E. *Forging. Advanced Material and Processes*. v.137, n.1, p.51-80, 1990.
- [26] NAYLOR, D. J. Microalloyed forging steels. *Proceedings of the International Conference on Microalloying in Steels*, Spain. v.284-2, p.83-93, 1998.

## **STUDY OF THE CROSS-WEDGE ROLLING TO THE MANUFACTURE OF STEPPED SHAFTS WITH MICROALLOYED STEELS**

**Abstract:** The aim of this work is the study of the *Cross Wedge Rolling* (CWR) to manufacture stepped shafts from microalloyed steel bars, to achieve products without internal and external defects with lower production costs than those observed in the process commonly used in forging industries, and with adequate mechanical properties to the conditions of use in automotive transmissions. To attain this objective it has been designed and assembled a laboratorial CWR equipment, and the design and manufacturing of the dies to form some stepped shafts. Some technical details of the equipment are presented, as well as some experimental results from tests carried out to evaluate the workability of microalloyed steels used to manufacture these shafts.