

## **ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL DO AÇO CL-23 TRATADO TERMICAMENTE SOB DIFERENTES CONDIÇÕES.**

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, Alessandro Roger Rodrigues, Rafael Gustavo da Rocha Paulo, Pedro Maradei Severino. - Engenharia de Materiais e Metalurgia - Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira.

O emprego de ligas metálicas na engenharia e na indústria é baseado principalmente nas suas propriedades mecânicas, ou seja na sua capacidade de suportar as cargas a que estão sujeitas quando em serviço (CHIAVERINI, 1987). O comportamento mecânico do material está intimamente ligado à estrutura cristalina, que por sua vez depende da composição química e das condições de fabricação do componente mecânico. Peças com estrutura bruta de fusão, encruadas ou obtidas em temperaturas muito elevadas, ambas associadas a velocidades de resfriamento variáveis, podem apresentar propriedades mecânicas e microestruturais distantes dos valores padrões comumente conhecidos pela literatura. Assim, nesses casos e noutros tantos não citados aqui, o controle da estrutura passa a ser um fator decisivo para a correta seleção e aplicação dos materiais metálicos (CHIAVERINI, 1987).

Uma forma bem conhecida para controlar a microestrutura dos componentes mecânicos é o emprego de tratamentos térmicos. Trata-se do meio mais usual, seguro e eficiente para modificar a estrutura cristalina e as propriedades mecânicas de peças, principalmente das ligas ferrosas. Uma vez fixada a composição química da liga, as condições de tratamento térmico poderão determinar em definitivo a estrutura desejada e, conseqüentemente, as propriedades finais dos materiais (CHIAVERINI, 1987). Há uma boa variedade de tratamentos térmicos, cada qual com seus procedimentos básicos e aplicações usuais. Recozimento, normalização, têmpera e revenimento são exemplos típicos de tratamentos térmicos. Tratamentos isotérmicos, tais como martêmpera e austêmpera, bem como tratamentos termo-químicos de cementação, nitretação, carbonitretação e boretação são mais exemplos extraídos do rol de possibilidades existentes.

Nesse contexto, as análises metalográficas de peças apresentam um papel de grande importância, uma vez que é possível monitorar, verificar ou investigar a estrutura gerada pelos tratamentos térmicos. Por meio da macrografia é possível verificar a textura e o processo de deformação submetido pelo material, considerando as linhas de escoamento associadas ao tipo de carregamento aplicado na peça, como laminação, extrusão ou forjamento, por exemplo. Já a micrografia permite obter informações sobre a microestrutura da peça, tais como tipo, tamanho, distribuição e forma dos grãos. Ambas as informações extraídas dessas caracterizações fornecem dados para correlacionar às propriedades mecânicas do componente ou até modificá-las, visando seu aprimoramento. O presente trabalho apresenta uma caracterização da macro e microestrutura do aço CL-23 forjado a quente (1200°C) e submetido a diferentes tratamentos térmicos.

O material estudado foi o aço CL-23, similar aos da família SAE 8620, empregado na fabricação de engrenagens automotivas por apresentar boa relação entre resistência mecânica e tenacidade. Os corpos-de-prova foram fornecidos por uma empresa fabricante de peças automotivas que participa desse estudo. Tratam-se de espelhos das engrenagens que são cisalhados para descarte na última etapa do processo de forjamento a quente. A composição química básica do material é dada na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificação do material utilizado nas análises metalográficas.

Elementos (% em peso)						
C	Mn	Cr	Mo	Si	P	S
0,23 - 0,28	0,90 - 1,30	0,35 - 0,70	0,10 - 0,20	0,15 - 0,35	0,25 máx	0,02 - 0,04

Na seção de forjaria da empresa, as engrenagens foram processadas inicialmente com o pré-aquecimento em forno de indução. Três rotas de aquecimento foram realizadas: a 800, 950 e 1200°C, respectivamente denominadas como forjamento a morno (1), semi-quente (2) e quente (3). Os tarugos pré-aquecidos em cada rota foram forjados em três matrizes sequenciais para obtenção da geometria final da peça. Somente o produto da rota 3 foi aproveitado para este estudo, pois é o único que necessita de tratamentos térmicos posteriores para permitir a correta usinagem das engrenagens. A Figura 1 ilustra de forma esquemática a geometria das engrenagens fabricadas pela empresa.

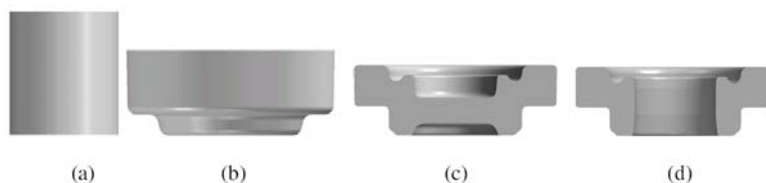


Figura 1 - Rota de forjamento das engrenagens. (a) tarugo, (b) forjado sem detalhes internos, (c) forjado com espelho (miolo) e (d) forma final do produto sem espelho.

Fonte: (YAMAKAMI, 2003)

Depois de forjados, ainda na própria empresa os materiais foram submetidos a quatro condições de resfriamento: ao ar (A), em forno a 600°C por 20 min (F), recozido e normalizado a 950°C por 2 h (N) e temperado em água (T). Após o tratamento térmico, os corpos-de-prova foram usinados na forma de disco para possibilitar as análises metalográficas. A forma final dos corpos-de-prova, preparados com pré-usinagem em torno convencional, pode ser vista na Figura 2.

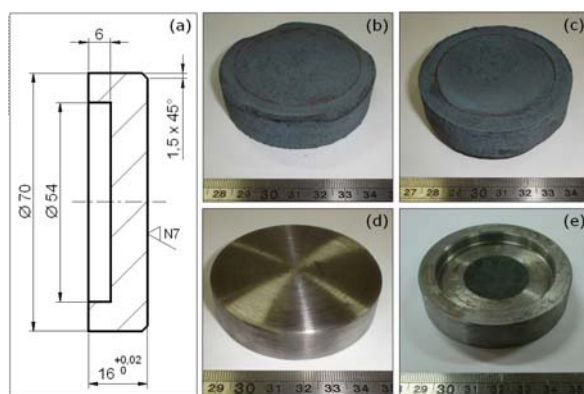


Figura 2 - (a) Desenho para a usinagem dos corpos-de-prova; (b) e (c) vista superior e inferior em perspectiva das amostras brutas; (d) e (e) mesmas vistas das amostras usinadas.

As amostras pré-usinadas de cada condição foram lixadas respeitando a alternância em 90° a cada troca de lixa, da granulação mais grossa até a mais fina: 120, 220, 400 e 600. Após esse processo, para as análises macrográficas, as amostras foram atacadas por 10 s com reativo de iodo, contendo 10g de iodo sublimado, 20g de iodeto de potássio e 100g de água destilada. Com o evidenciamento das linhas da macroestrutura, as amostras foram levadas à lupa para registro fotográfico. Após a análise macroestrutural, as amostras foram particionadas, embutidas em resina, lixadas novamente até a lixa 1000 e polidas com alumina de 1 µm. Foi utilizado ataque de Nital a 2% por 10 s e controle visual. Feito o ataque, as amostras foram levadas ao microscópio ótico, marca Carl Zeiss Jena, modelo Neophot 21, para análise da microestrutura e seu registro fotográfico. A Figura 3 traz resumidamente as imagens representativas do processo de preparação das amostras para análise macrográfica.

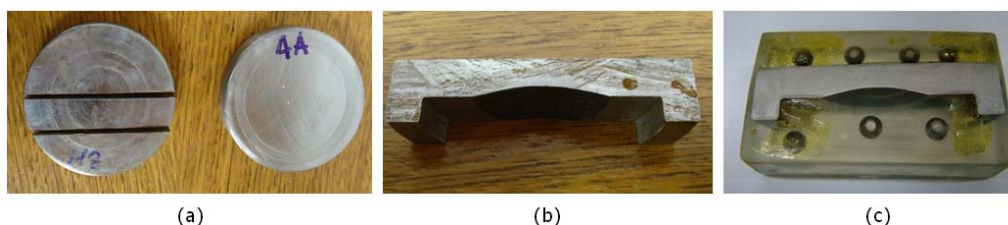


Figura 3 - Sequência de preparação das amostras metalográficas. (a) corpo-de-prova cortado, (b) seção transversal e (c) amostra embutida com esferas de aço para apoio no processo de lixamento.

A Figura 4 mostra a macrografia do corpo-de-prova da condição (F). Em função das demais amostras apresentarem o mesmo perfil das linhas de escoamento do material durante o processo de forjamento, é ilustrada na figura apenas uma condição microestrutural. A mesma imagem retrata as regiões de onde foram extraídas as micrografias apresentadas nas Figuras 5 e 6 a seguir.

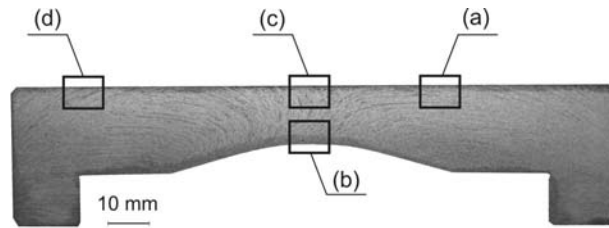


Figura 4 - Linhas de deformação evidenciadas pelo ataque de iodo no exame macrográfico.

É possível verificar que os espelhos experimentaram maiores níveis de deformação plástica na região central, já que as linhas de escoamento do material partem dessa área, que, por sua vez, apresentava-se livre de restrição durante o processo de forjamento e corte dessa parte da engrenagem. As linhas de deformação convergem para as extremidades, pois justamente essa porção representava a ligação de material entre o espelho e a parede interna do furo no cubo das engrenagens forjadas. Vale lembrar apenas que os espelhos, assim como as engrenagens que os geraram, são peças de revolução e, portanto, as extremidades da seção transversal, mostradas na figura acima, representam o diâmetro externo das amostras. Além de as linhas de escoamento convergirem para as extremidades das amostras, cumpre adicionar que elas concentram-se na porção inferior das extremidades, uma vez que essa região representa a última área solicitada pelo cisalhamento causado pelo punção da prensa.

As Figuras 5 e 6 mostram as micrografias dos corpos-de-prova submetidos às quatro condições de tratamento térmico. Torna-se importante destacar que foi realizada nas amostras uma varredura preliminar utilizando o microscópio ótico no intuito de reconhecer a microestrutura predominante e identificar potenciais áreas de interesse, como regiões próximas às superfícies ou localizadas sobre as linhas de escoamento geradas no material durante o processo de forjamento.

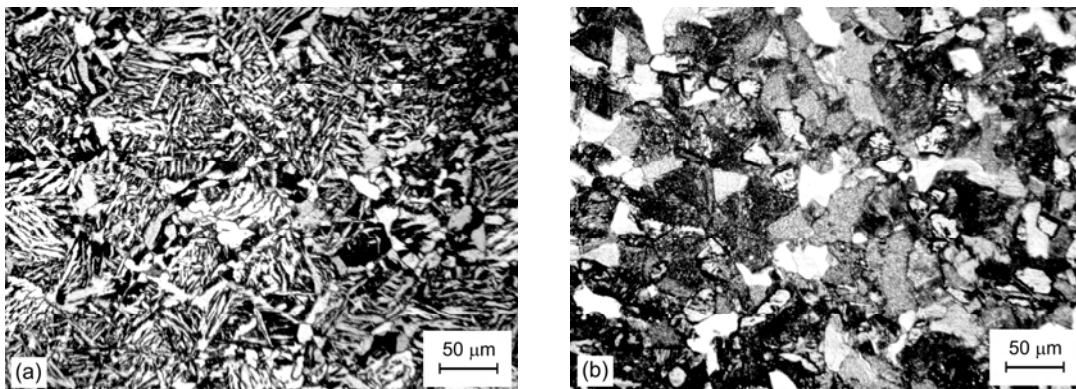


Figura 5 - Micrografias das amostras tratadas na condição A (a) e F (b). Aumento de 250x.

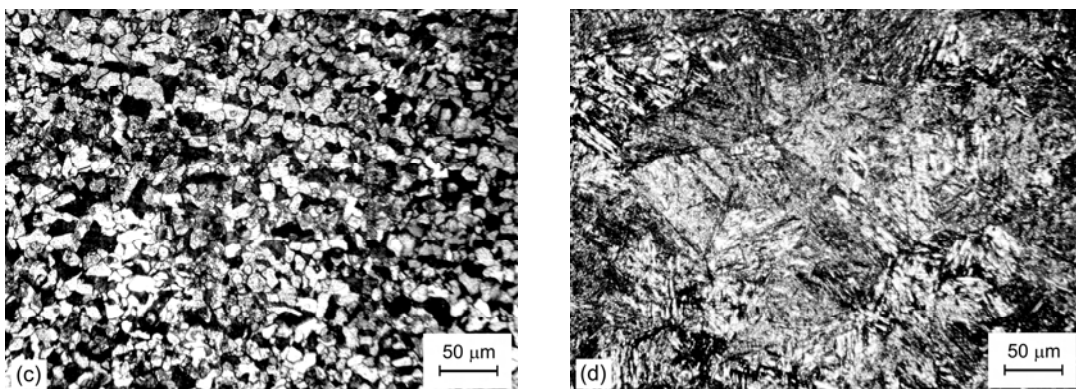


Figura 6 - Micrografias das amostras tratadas na condição N (c) e T (d). Aumento de 250x.

Pelo exame visual da Figura 5a, nota-se que a microestrutura provável apresenta uma matriz perlítico-ferrítica, com ferrita apresentando-se em cor clara e perlita em cor escura. A morfologia da ferrita pode ser classificada, em princípio, como alongada, em forma de agulha ou acicular, com orientação aparentemente aleatória e independente das linhas de escoamento

evidenciadas na caracterização macroestrutural. Sugere-se ser essa aleatoriedade compatível com o padrão macroscópico encontrado na Figura 4, devido à região de observação ser a área (a), como vista na própria imagem. Já a perlita apresenta formas diversas, variando do aspecto alongado ao poligonal em colônias isoladas. Sugere-se, pelo menos visualmente, que há uma predominância ferrítica na matriz, o que condiz com os baixos níveis de dureza decorrentes da menor severidade do meio de resfriamento, em comparação às amostras temperadas em água. Ao que indica qualitativamente a imagem, não se verifica ferrita intragranular na matriz e os tamanhos dos grãos mostram-se não uniformes, sendo, porém, a distribuição aparentemente homogênea.

A Figura 5b indica apresentar grãos de perlita (escuros) e de ferrita (claros) dispersos na matriz, com tamanhos variados, porém bem maiores quando comparados à microestrutura da condição (A). O aspecto morfológico sugere grãos poligonais sem uma orientação mais evidenciada que pudesse associar às linhas de escoamento do material observadas no exame macrográfico. Novamente, isso pode ser condizente com a região (b) da amostra analisada no microscópio. Os tamanhos de grãos perlíticos são maiores que os ferríticos, o que pode ter favorecido o aparecimento de ferrita intragranular em regiões isoladas da amostra. A predominância da ferrita pode explicar os baixos valores de dureza encontrados para esta condição microestrutural (F).

Na Figura 5c, verifica-se mais uma vez a presença de grãos perlíticos, em tom escuro, e ferríticos, de cor clara, bem distribuídos na matriz. O tratamento térmico de normalização promoveu a formação de uma microestrutura uniforme, com grãos menores quando comparados à condição (F). A morfologia indica grãos predominantemente poligonais e simétricos. Neste caso, é possível identificar na área superior da imagem um padrão de alinhamento dos grãos, tanto de perlita como de ferrita. Novamente, a aparente predominância ferrítica condiz com o baixo valor de dureza medido na amostra.

A Figura 5d sinaliza para uma microestrutura martensítica devido às finas estrias retas entrecortadas e à dificuldade de se obter uma imagem plenamente focada, que são características desse tipo de textura. Porém, associando a morfologia da textura do material à sua dureza, pode-se inferir que houve geração de martensita. Todavia, não se pode descartar a formação de bainita, ferrita acicular e perlita fina, justamente por apresentarem também microdurezas maiores e serem microconstituintes condizentes com esse tipo de tratamento térmico, que gera uma textura bastante refinada da matriz. De forma análoga às amostras das condições (A) e (F), a condição temperada também apresentou orientação da textura aparentemente aleatória e independente das linhas de escoamento do material. Os contornos de grãos não ficaram bem evidenciados, tendo sido desfavorecidos pelo aspecto bastante alongado dos constituintes.

Com base em todos os resultados colhidos neste estudo, conclui-se que as linhas de deformação do material durante o forjamento iniciam-se do centro das amostras e convergem radialmente para as extremidades, tendo todas as condições microestruturais apresentado o mesmo padrão de escoamento. As micrografias revelaram que a microestrutura apresenta relação direta com a taxa de resfriamento. O meio de resfriamento menos severo gerou uma estrutura mais dúctil, com grãos de perlita e ferrita uniformemente dispersos na matriz. O resfriamento rápido, tal como na têmpera, resultou uma microestrutura endurecida, com grãos de martensita, e possível bainita, alongados em forma de ripas. O tratamento térmico causou influência decisiva na microestrutura e, conseqüentemente, na dureza das peças. Esta pesquisa encontra-se em andamento. É pretendido na próxima fase refinar e finalizar a investigação metalográfica qualitativa, assim como buscar dados quantitativos para determinar a porcentagem e tamanho dos microconstituintes.

## **Referências Bibliográficas**

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Ferrosas**. 2. ed. São Paulo: ABM, 1987. 232 p.

YAMAKAMI, W. J. **Uma Proposta para Flexibilização do Forjamento a Quente de Precisão**. 2003. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 2003.