



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

## EXPERIMENTO 5: ENSAIO JOMINY

### Objetivo:

Avaliar a temperabilidade de amostras de dois tipos de aço, utilizando ensaio Jominy, ensaio de dureza e análise microestrutural.

### Teoria:

As propriedades mecânicas de materiais metálicos podem ser modificadas por métodos diferentes: refinamento de grão, endurecimento por solução sólida e encruamento. Além disso, outros mecanismos, baseados nas características microestruturais, podem afetar as propriedades mecânicas. Nesse aspecto, o desenvolvimento de microestruturas distintas envolve, de alguma forma, fenômenos das transformações de fase. Nesse experimento, serão exploradas as transformações de fase do aço.

Transformações de fase podem ser classificadas em três grupos:

- Transformações dependentes de difusão em que não há mudança do número ou composição das fases presentes. Isso inclui solidificação de um metal puro e transformações alotrópicas.
- Transformações dependentes de difusão em que há alguma alteração na composição das fases e frequentemente no número de fases presentes. Transformações eutetóides são exemplos desse tipo de transformação de fase.
- Transformação adifusionais, nas quais uma fase metaestável é produzida, como no caso da transformação martensítica.

Para transformações em que ocorre difusão, a formação de uma nova fase depende de rearranjos atômicos, que são dependentes do tempo. Um segundo impedimento é o aumento de energia relacionado a criação de novos contornos de fase. A dependência da taxa de transformação com o tempo, denominada cinética da transformação, é uma consideração importante em tratamentos térmicos. A maioria das transformações de fase requerem um tempo para a sua conclusão e a cinética é importante para o desenvolvimento da microestrutura.

No caso de aços, a principal transformação de fase na condição de equilíbrio termodinâmico é a reação eutetóide: austenita (ferro  $\gamma$ )  $\leftrightarrow$  ferrita (ferro  $\alpha$ ) + cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). A austenita, com elevada solubilidade de carbono, se transforma, durante o resfriamento, em ferrita, com menor solubilidade de carbono, e cementita, com concentração muito maior de carbono. A perlita é o produto microestrutural dessa transformação, dado o crescimento cooperativo de lamelas de ferrita e cementita. Fora das condições de equilíbrio, a temperatura e a taxa de resfriamento têm papéis importantes na transformação da austenita durante o resfriamento.

Uma maneira conveniente de representar a dependência do tempo e da temperatura nessas transformações é o diagrama de transformação-tempo-temperatura (TTT), apresentado na Figura 1. Nesse diagrama, os eixos vertical e horizontal são, respectivamente, a temperatura e o logaritmo do tempo. Duas curvas sólidas são plotadas, sendo uma representando o tempo necessário para o início da transformação e outro, para a conclusão da transformação. A curva pontilhada corresponde a 50% da transformação. A temperatura da transformação eutetóide é indicada por uma linha horizontal e, acima dessa temperatura, apenas austenita estará presente.

A transformação para perlita ocorre em baixas taxas de resfriamento e levará o tempo indicado pelas linhas sólidas para iniciar e concluir. Em tratamentos isotérmicos abaixo  $\sim 540^\circ\text{C}$ , ocorre a transformação de austenita para

bainita, um microconstituente que também é formado pelas fases ferrita e cementita. Já em taxas mais elevadas de resfriamento, forma-se o microconstituente martensita, que é metaestável e gerado por uma transformação adifusional. Por não ser dependente de difusão, a transformação martensítica não depende do tempo, apenas da temperatura e da taxa de resfriamento. Em termos de desempenho mecânico, a microestrutura perlítica possui boa tenacidade, porém baixa resistência mecânica, comparativamente aos demais microconstituintes. No outro oposto, a martensita apresenta maior resistência mecânica, porém é muito frágil. Por isso, geralmente, um aço temperado requer revenimento para aumento de sua tenacidade. Já a bainita representa um aumento de resistência mecânica sem grande perda de ductilidade.

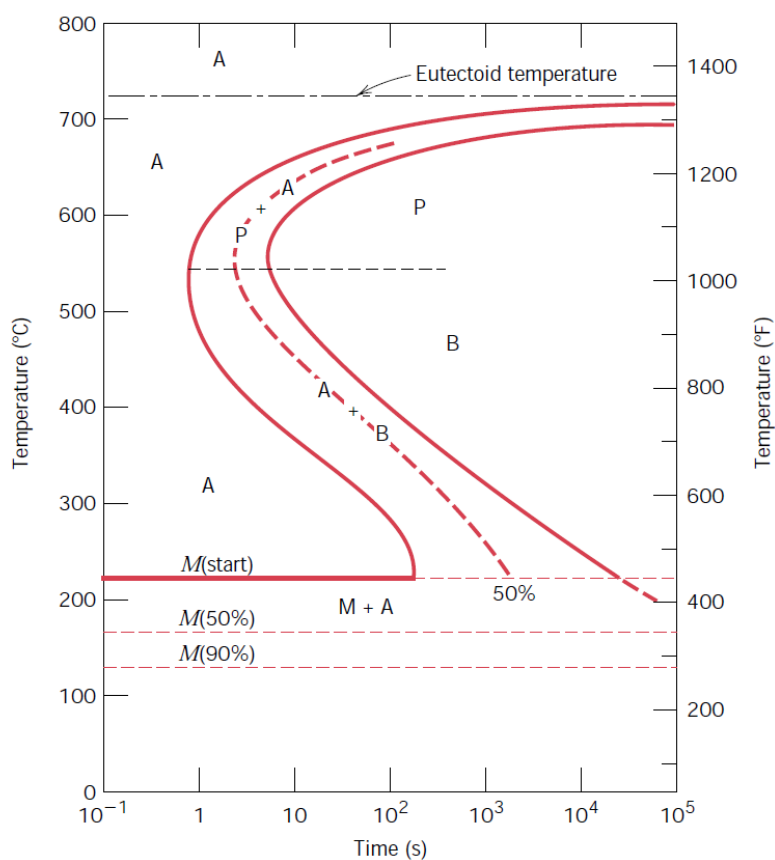


Figura 1: Diagrama transformação-tempo-temperatura (TTT) para um aço eutetóide. A: austenita, P: perlita, B: bainita, M: martensita.

Devido à possibilidade de obtenção de distintas propriedades mecânicas por meio de tratamentos térmicos, os aços são frequentemente submetidos a esses tratamentos. No entanto, em tratamentos convencionais é praticamente impossível resfriar o material a uma taxa uniforme, pois a superfície resfriará sempre mais rapidamente que o interior. Por isso, uma medida importante para a comparação de diferentes composições de aço é a temperabilidade, termo usado para descrever a habilidade de uma liga em endurecer pela formação de martensita para um dado tratamento térmico. Dessa forma, um material com elevada temperabilidade tem a capacidade de formar martensita não apenas na superfície da peça, mas em grande medida também no interior da peça.

Do ponto de vista tecnológico, tratamentos térmicos para obter distintas propriedades mecânicas em aços são realizados em meios diferentes, o que altera a taxa de extração de calor. Dos três meios mais comuns de têmpera, a água

é a que produz a taxa de resfriamento mais severa, seguida do óleo e, depois, do ar. O grau de agitação de cada meio também influencia na taxa de extração de calor.

Um procedimento padronizado para determinar a temperabilidade é o ensaio Jominy, em que um corpo-de-prova cilíndrico é austenitizado e, posteriormente, resfriado por um jato d'água em uma de suas extremidades, conforme esquema da Figura 2. Com isso, uma taxa de resfriamento mais elevada é obtida na extremidade resfriada e essa taxa é reduzida à medida que se afasta dessa extremidade. Em seguida, medidas de dureza são obtidas na lateral do corpo-de-prova a partir da extremidade temperada, obtendo-se uma curva de temperabilidade.

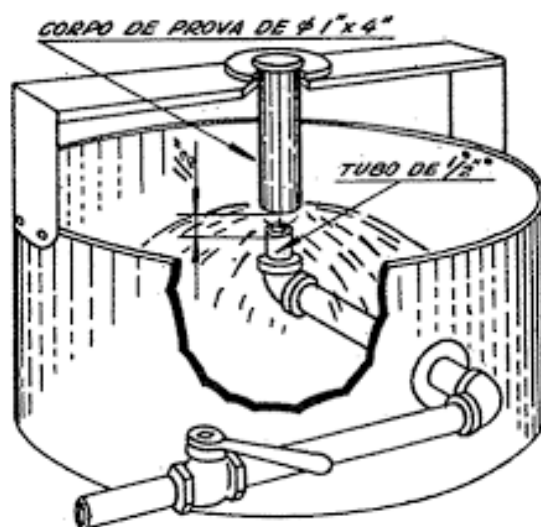


Figura 2: Montagem experimental do ensaio Jominy.

A temperabilidade dos aços é afetada pela adição de elementos de liga, como cromo, níquel, molibdênio e carbono, que dificultam a formação de fases por difusão, como a ferrita ou a perlita, e, por isso, deslocam a curva TTT para direita, favorecendo a formação de martensita. Além disso, teores mais elevados de carbono resultam em martensita de maior dureza. Outro fator que afeta a temperabilidade dos aços é o processo de austenitização, uma vez que o aumento do tempo e/ou da temperatura de austenitização promove o crescimento de grãos e, portanto, dificulta a nucleação e o crescimento de fases por difusão, favorecendo a formação de martensita.

*Material adicional pode ser encontrado em: Callister Jr, W.D. "Materials Science and Engineering: An Introduction", J. Wiley & Sons.*

## Pré-teste:

Tópicos a serem avaliados para a execução do experimento:

- ✓ Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro;
- ✓ Como são definidos os aços;
- ✓ Interpretação de diagramas de transformações por resfriamento contínuo, relacionando as taxas de resfriamento às possíveis fases formadas;
- ✓ Temperabilidade dos aços;
- ✓ Ensaio Jominy.

## Procedimento experimental:

Materiais empregados: aços SAE 1045 e SAE 4340. Será fornecido 1 corpo-de-prova de cada material.

1. Colocar o corpo de prova para ensaio Jominy no forno a 900 °C por 30 minutos;
2. Retirar o corpo de prova e realizar o resfriamento no dispositivo para ensaio Jominy. Tomar notas a respeito do dispositivo e suas condições de funcionamento;
3. Serão entregues dois corpos de prova previamente submetidos ao procedimento anterior, um de aço SAE 1045 e outro de aço SAE 4340. Esses corpos de prova tiveram suas faces planas previamente limpas e polidas. Em cada um dos corpos de prova, determinar a dureza HRC como função da distância da extremidade resfriada sobre um dos trechos planos, como indicado na Figura 3. Efetuar leituras de dureza a cada 1,6 mm nos primeiros 25 mm medidos a partir da extremidade temperada e a cada 3,2 mm no restante da amostra. Anotar os valores encontrados de forma sequencial;

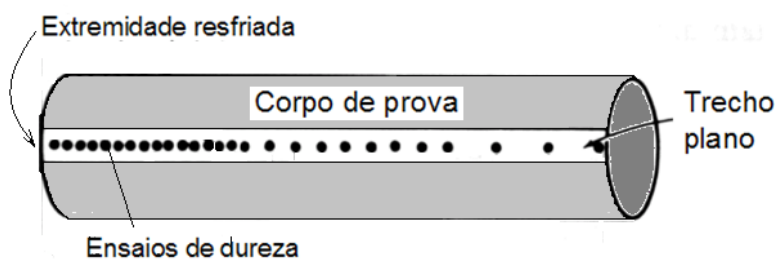


Figura 3: Esquema do modo de realização das medidas de dureza sobre o corpo de prova.

4. Serão entregues duas amostras, conforme mostrado na Figura 4, uma de cada aço. O grupo deverá fazer a preparação metalográfica das amostras tratadas seguindo as etapas de lixamento, polimento, ataque e visualização da microestrutura;

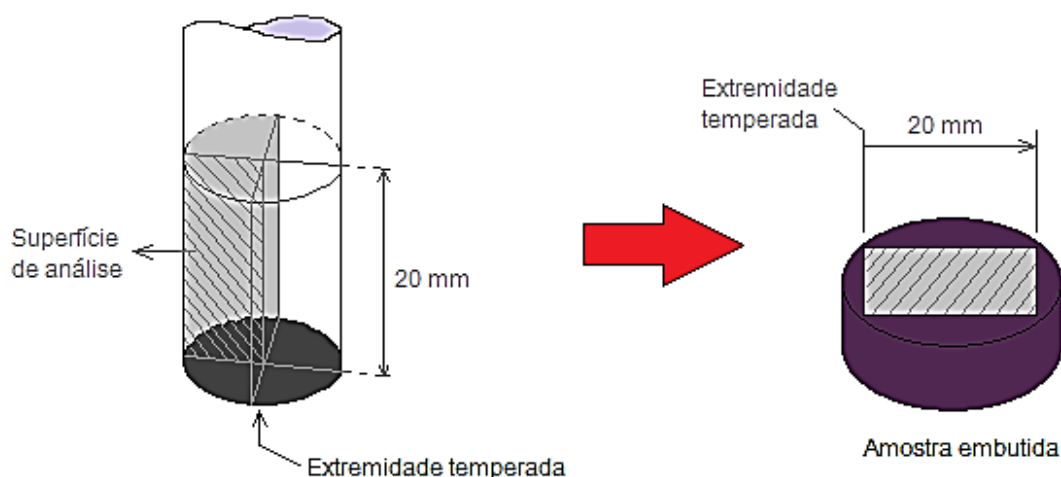


Figura 4: Esquema representativo do corte do segundo corpo de prova (à esquerda) e do embutimento da amostra metalográfica extraída do mesmo (à direita).



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

5. Registrar os materiais utilizados para cada etapa, o reagente químico e as condições do ataque metalográfico. Os resultados devem ser registrados na forma de imagens da microestrutura, devidamente acompanhadas de observações textuais.

Dica: Atente-se para o objetivo das etapas 4 e 5, que é analisar a variação da microestrutura em função da distância da extremidade temperada.

## **ATENÇÃO:**

- ❖ CUIDADO NA MANIPULAÇÃO DE OBJETOS QUENTES.
- ❖ SEGURANÇA MÁXIMA PARA EVITAR O CONTATO COM METAL AQUECIDO.

## **Relatório:**

Recomenda-se que o relatório seja dividido em seis (6) seções, organizadas da seguinte forma:

- 1) Introdução
  - Definição do conceito de temperabilidade
  - Importância dos tratamentos de têmpera e revenimento na tecnologia de aços
  - Utilidade do ensaio Jominy
  - Outras informações que o grupo julgar convenientes
- 2) Objetivo
- 3) Procedimento experimental
  - Esquemas do aparato experimental e corpos de prova
  - Explicação das etapas do procedimento experimental – fenômenos envolvidos e resultados esperados
- 4) Resultados e discussões
  - Gráfico(s) de dureza em função da distância das duas amostras analisadas
    - i) Comparação entre as duas curvas
    - ii) Comparação com informações da literatura
    - iii) Discutir diferenças entre as curvas e possíveis discrepâncias em relação às informações encontradas na literatura
  - Imagens das microestruturas das amostras, obtidas após ensaio metalográfico
    - i) Descrição das microestruturas observadas, com identificação das fases e descrição qualitativa/quantitativa de sua distribuição
    - ii) Discussão a respeito das possíveis diferenças, comparação com informações da literatura
    - iii) Correlação entre as microestruturas observadas e as curvas de dureza obtidas
  - Determinar qual amostra era de aço 1045 e qual era de aço 4340
- 5) Conclusões
- 6) Referência bibliográficas