

Transferências de calor no processo de têmpera

Djone Rafael Viana (FAHOR) dv001140@fahor.com.br

Leonardo José Lottermann (FAHOR) lI001211@fahor.com.br

Prof.^a Me. Carla Beatriz Spohr (FAHOR) carla@fahor.com.br

Resumo

Tendo em vista a aplicabilidade da teoria física, o presente artigo parte da necessidade de visualizar a física de forma aplicada ao cotidiano de um ambiente de produção. Assim, realizando um estudo de caso dentro de uma indústria metalúrgica, efetuando o processo de têmpera de peças metálicas, obtiveram-se importantes considerações quanto aos tratamentos térmicos e a sua correlação com a teoria básica.

Palavras chave: Têmpera, Física, Transferência de Calor.

1. Introdução

A física, mesmo sendo reconhecida como a ciência exata que mais se relaciona com o dia a dia, normalmente utiliza situações ideais de aplicabilidade, assim, não relacionando-se totalmente com a realidade dos processos produtivos. Ao estudar-se as transferências de calor, identificou-se a importância de analisar a correlação destes fenômenos com processos práticos dentro da engenharia e de mecanismos aplicados na indústria.

Observando a ampla aplicação da têmpera dentro da indústria metalúrgica e considerando a relação com o estudo teórico em questão, verificou-se a relevância de obter conhecimentos mais detalhados sobre o assunto.

Desta forma o presente artigo tem como objetivo identificar e expor as relações entre a teoria física de transferências de calor com a aplicabilidade dentro da indústria, através do processo de têmpera de peças metálicas.

2. Revisão da Literatura

2.1 Transferência de Calor

Este estudo tem em seu princípio a definição de transferência de calor, que segundo, Incropera e DeWitt (1998), é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Esta transferência acontece de forma espontânea, direcionando-se do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura, sem considerar variáveis como dimensões, natureza e se existe contato entre os corpos ou não (BONJORNO, 1985).

Segundo Bonjorno (1985), os processos de transferência de calor podem ocorrer por meio de três diferentes processos, sendo eles o de condução, de convecção e de radiação. Tendo em vista que o presente artigo tem enfoque na aplicação de transferência de calor no processo de têmpera, o qual é definido por Chiaverini (1986), como o mais importante processo de tratamento térmico aplicado à construção mecânica, e que mesmo utiliza dentro de seu processo dois conceitos básicos da transferência de calor, o de condução e de radiação, dar-se-á maior visibilidade a estes, correlacionando-os com a têmpera.

Sendo assim, Bonjorno (1985) define condução, como o processo de transferência de calor pelo qual a energia é transmitida entre partículas sem que as mesmas sejam deslocadas. Incropera e DeWitt (1998, p.25) relacionam, ainda, a condução ao “[...] transporte de energia em um meio devido à existência de um gradiente de temperatura, e o mecanismo físico envolvido é a movimentação aleatória dos átomos ou moléculas”.

Vale lembrar que sob maiores temperaturas, ocorre proporcional aumento de agitação molecular, ou seja, aumentando também o fluxo de calor (INCROPERA e DEWITT, 1998). Os autores ainda ressaltam que a condução térmica depende diretamente do material em que se está aplicando a variação, pois deve-se considerar a condutividade térmica do material.

Já tratando-se da transferência de calor por radiação, segundo Incropera e DeWitt (1998), esta consiste na energia emitida por todo corpo ou matéria que apresenta temperatura não-nula.

Independente da forma de matéria, as emissões podem ser atribuídas a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. A energia do campo de radiação é transportada por meio de ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, fótons). Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele (INCROPERA e DEWITT, 1998, p.5-6).

Verifica-se que todos os corpos que possuem temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação (BONJORNNO, 1985). Outro aspecto levantado pelo autor é de que independentemente de o corpo estar em equilíbrio térmico, ou não, com o meio, ele sempre estará emitindo energia, através da radiação, e desta forma, recebendo a mesma quantidade do meio.

Ao tratar-se de radiação, deve-se considerar que existem três diferentes tipos de corpos, os quais são classificados de acordo com a sua capacidade de irradiar e absorver calor. Classifica-se, então, como **corpo opaco** aquele que absorve a maior parte da energia que lhe é fornecida, tendo assim, baixos índices de reflexão e refração. Os corpos de cores escuras são considerados opacos (BONJORNNO, 1985).

Seguindo esta classificação, o autor define **corpo transparente** como todo aquele que possui alto poder transmissor, ou seja, grande parte da energia que lhe é fornecida é refratada. Vale ainda ressaltar, segundo Bonjorno (1985), que

um corpo pode ser opaco para determinado tipo de radiação, e transparente para outro.

Ainda existe a classificação de **corpo negro**, o qual é capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele. Porém, é impossível encontrar-se na realidade um corpo que possua tais características (BONJORNO, 1985).

Segundo Bonjorno (1985, p.57), “Todo corpo bom absorvedor de energia é também um bom emissor de energia”. Estes princípios básicos das transferências de calor constituem fator importante na análise de muitos problemas industriais e até mesmo ambientais, conforme citado por Incropera e DeWitt (1998).

2.2 Têmpera de peças metálicas

Dentro dos processos de produção, frequentemente os materiais não se encontram adequados às condições desejadas, sendo assim, segundo Chiaverini (1986), faz-se necessário, submeter as peças metálicas a determinados tratamentos, buscando minimizar inconvenientes, como tensões geradas em processos de fundição, conformação ou usinagem, as quais podem provocar distorções e empenamentos na estrutura resultante, prejudicando as propriedades mecânicas do equipamento.

Os tratamentos térmicos podem trazer uma série de benefícios, tais como remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza do material, aumento de resistência mecânica, melhora de ductilidade, usinabilidade, resistência, entre outros, conforme citado por Chiaverini (1986). O autor, porém, salienta que aplicando-se determinado tratamento térmico, é comum verificar-se que juntamente com a melhora de uma ou mais propriedades do material, ocorre prejuízo em outras.

Tendo em vista que os tratamentos térmicos estão diretamente ligados a um ciclo aquecimento-temperatura, deve-se considerar alguns fatores determinantes no processo, como o aquecimento, tempo de permanência à temperatura, ambiente do aquecimento e resfriamento (CHIAVERINI, 1986).

Dentro destes fatores, vale ressaltar que a variação de temperatura no aquecimento, bem como a manutenção da mesma, depende da composição do material utilizado.

Quanto mais alta esta temperatura acima da de recristalização ou crítica, maior segurança se tem na obtenção das modificações estruturais desejadas; mas por outro lado, tanto maior será o tamanho do grão final, fato este que, como se sabe, pode prejudicar as qualidades do material (CHIAVERINI, 1986, p.242).

A têmpera, sendo um destes tratamentos térmicos, consiste no aquecimento do aço até o ponto onde ocorre a sua transformação austenítica, a seguir, este material é sujeito a um resfriamento abrupto, ou seja, o material é resfriado na velocidade crítica da têmpera, assim, obtendo uma reorganização estrutural, chamada martensita (MENKE, 2011).

A martensita segundo CETEC (2007), trata-se de uma nova fase na mudança de estrutura do aço, altamente distorcida. A transformação em martensita, conforme citado pelo autor, ocorre devido a um cisalhamento e uma expansão da rede da austenita (fase anterior à têmpera). Assim, “Os grãos de martensita nucleiam e crescem a uma taxa muito alta, próxima à velocidade do som, no interior da matriz da austenita” (CETEC, 2007, cap. 16).

Através do processo de têmpera, onde ocorrem modificações estruturais muito intensas, obtém-se aços com elevado grau de dureza, resistência ao desgaste e resistência à tração (CHIAVERINI, 1986). Porém, segundo Chiaverini (1986), juntamente com estes benefícios, a têmpera provoca determinada diminuição da ductilidade e tensões internas são originadas bastante intensas.

Segundo Soares (2011), “Em peças de pequenas dimensões ou seções, esses efeitos podem ser algumas vezes tolerados, mas são bastante prejudiciais ou inaceitáveis na maioria dos casos”. Sendo assim, normalmente ocorre um tratamento posterior à têmpera, chamado revenido, que consiste em aquecer novamente o material, a uma temperatura menor, mantendo esta por determinado período, visando o alívio destas tensões internas (SOARES, 2011). Este processo resulta em uma pequena redução da dureza, porém melhora a ductilidade do material, chegando, em alguns casos, a eliminar as tensões internas prejudiciais, conforme exposto por Chiaverini (1986).

3. Métodos e Técnicas

O presente estudo foi baseado no processo de têmpera que é comumente utilizado em indústrias de pequeno e médio porte, e todas as variáveis envolvidas resultam de consultas a manuais técnicos ou de observações práticas.

Em primeiro lugar, cabe citar que para o processo em questão, e sua posterior análise, foram utilizados equipamentos de uso corrente na indústria, já que não se dispunha de equipamentos de precisão. Este fator, mesmo que alterando sensivelmente os resultados, não compromete a validação da pesquisa.

Os processos de tratamento térmico foram realizados na ferramentaria de uma metalúrgica de médio porte, do município de Santa Rosa, em um dia de temperatura ambiente média, em torno dos 26° C. No processo de têmpera que é realizado nesta indústria, o aquecimento é realizado em um forno por indução convencional, que atinge até 950° C, e o ambiente de têmpera não é controlado, ou seja, a peça, quando retirada do forno, sofre um primeiro resfriamento ao entrar em contato com o ar, e logo após, é submetida ao resfriamento abrupto que caracteriza o processo.

A peça que foi submetida ao processo trata-se de um punção de dobra, que forma, juntamente com a matriz de dobra, uma ferramenta de conformação de chapas metálicas, amplamente utilizada nos mais diversos setores industriais, pois representa um processo rápido e eficiente para a fabricação de perfis com geometrias complexas. A peça é constituída do material Aço SAE 4340, que

apresenta ótimas propriedades mecânicas em relação à fabricação de ferramentas, tanto de conformação como de estampo, e possui alta temperabilidade, adquirindo altos índices de dureza superficial.

Inicialmente, tendo em posse a peça recém-usinada, preparou-se o forno e colocou-se a peça no mesmo, programando-o na temperatura especificada via tabela para o material em questão, que é a de 950° C. O forno, por ser utilizado várias vezes ao dia, já encontrava-se a uma temperatura de 296° C quando a peça foi introduzida. No momento inicial, teve-se o cuidado de marcar o tempo, permitindo uma análise posterior do aumento da temperatura do forno no decorrer do tempo.

Outro fator relevante que deve ser lembrado é o fato de que não utilizou-se pirômetro para a realização da medição da temperatura real da peça, sendo que os valores de temperatura durante o aquecimento, que são citados no presente artigo, são referentes à temperatura do forno, partindo-se então do princípio de equilíbrio de temperatura entre forno e peça.

O aquecimento ocorreu de maneira gradual, e levou cerca de 45 minutos para o forno alcançar os 950° C. Para que o sistema estivesse em total equilíbrio térmico, deixou-se a peça por mais 10 minutos no forno, até que esta atingisse a cor rubra em toda sua estrutura, indicando assim o momento certo para efetuar-se a têmpera.

A retirada da peça foi realizada com a ajuda de um “alicate” estendido, e foi com este que introduziu-se a peça no óleo, permitindo mantê-la segura por alguns instantes, tempo durante o qual o fluxo de calor é mais contínuo e que, por isso indica-se, a movimentação da peça, impedindo a formação de uma “bolha de ar” no entorno desta, provocando também a movimentação do óleo, fator que melhora os efeitos da têmpera.

Em seguida, a peça foi deixada resfriando no óleo por quase uma hora, e só depois retirada. Sabe-se que durante boa parte deste tempo ocorreram trocas intensas de calor entre a peça e o óleo, porém, neste experimento, devido à ausência de um instrumento eficaz de medição de temperatura a distância, no caso o pirômetro, não foi possível efetuar este estudo.

Após a limpeza da peça, livrando-a da “carepa” característica do processo de têmpera, efetuou-se a medição de dureza desta, temperada, e de outro punção, fabricado com o mesmo material, este porém em estado natural. A dureza superficial foi medida com o auxílio de um medidor de dureza Rockwell, e a escala utilizada foi a escala C, mais usualmente utilizada para aços.

Os valores obtidos, 30 HRC para o material natural, e 50 HRC para o temperado, comprovam a eficácia do processo, e ilustram a grande flexibilidade deste material às mais diversas aplicações, aliado ao baixo custo, se comparado a materiais mais nobres, que já apresentam maior dureza no material bruto.

Já os cálculos que foram realizados posteriormente, são baseados nos princípios físicos de transferência de calor, e utilizam-se dos dados coletados

para sua aplicação. Os valores que foram encontrados dizem respeito a taxa de transferência de calor durante o aquecimento, permitindo identificar a temperatura de equilíbrio ao final do resfriamento, considerando o a quantidade de calor recebida pela peça no aquecimento.

4. Resultados e discussões

Através dos procedimetos acima descritos, pôde-se chegar a alguns resultados, que, por terem como base um experimento realizado sob condições reais, o qual sofreu a influência de diversos aspectos que não são levados em consideração em uma situação idealizada, são portanto mais precisos e confiáveis, podendo estes serem contestados experimentalmente, desde que se utilize a mesma metodologia empregada no presente artigo.

Assim, chegou-se a dois resultados principais, que podem ser classificados de acordo com o período que ilustram.

4.1 Aquecimento

Durante o aquecimento fez-se o monitoramento da temperatura em função do tempo transcorrido, possibilitando a análise gráfica do aquecimento, conforme a Figura 1.

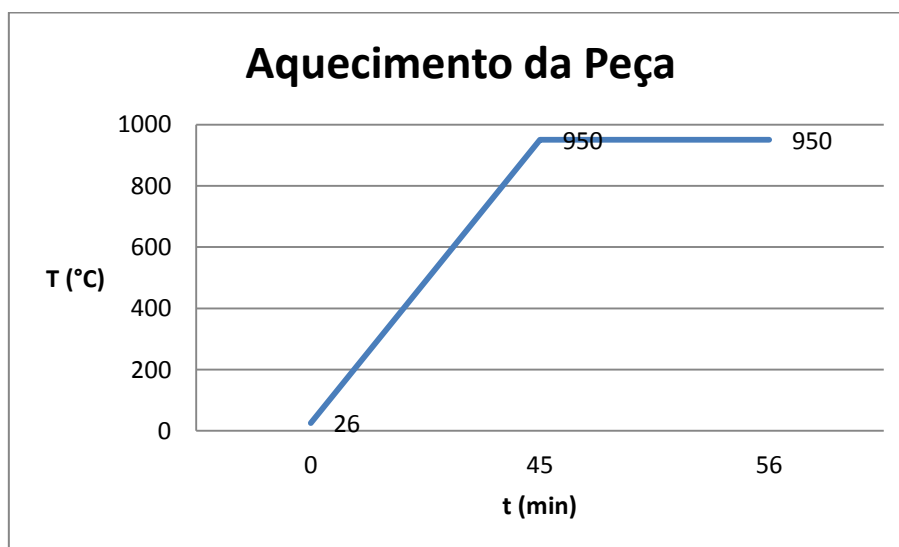


Figura 1 – Aquecimento da Peça. Fonte: O autor (2011)

Para que se consiga calcular a taxa de radiação de calor do forno para a peça, além da variação de temperatura, representada acima, necessita-se também da área da peça, que foi calculada através das dimensões da peça, levando-se em conta a área do rebaixo, contudo, considerando as superfícies curvas como se fossem planas. Este valor, somado às constantes, como o valor do coeficiente de emissividade do aço e da constante de Stefan - Boltzmann, que são facilmente encontrados nas bibliografias existentes, possibilitou a aplicação

da fórmula de taxa de radiação de energia, do forno para peça.

$$\dot{Q} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Onde:

A: 0,05 m² (área total da peça);

ε: 0,24 – aço trefilado a frio (emissividade da superfície);

σ: 5,67.10⁻⁸ W/m²K⁴ (Constante de Stefan – Boltzmann)

T: 1229 K

Sendo que T, não se refere á variação, e sim a um determinado momento.

$$\dot{Q} = 0,05 \times 0,24 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times (299^4 - 1223^4)$$

$$\dot{Q} = 0,05 \times -30.335,13$$

$$\dot{Q} = -1.516,76 \text{ W}$$

$$P = 1.516,76 \text{ W ou J/s}$$

4.2 Resfriamento

Neste processo, como não ocorreu monitoramento da temperatura da peça e do óleo, por motivos já anteriormente citados, deteve-se ao cálculo da temperatura de equilíbrio entre a peça, e seu elemento refrigerante, o óleo, ao término do resfriamento.

Para chegar-se ao resultado pretendido, usou-se a fórmula da quantidade de calor, que é expressa da seguinte maneira:

$$Q = m \cdot c \cdot dT$$

Considerando que o óleo absorveu todo o calor liberado pela peça, durante o resfriamento, igualou-se a quantidade de calor da peça à do óleo, gerando um sistema que fornece assim a temperatura de equilíbrio. Para que esta notação tenha valor, desconsiderou-se o calor perdido pela peça no breve contato com o ar.

$$Q_{\text{óleo}} + Q_{\text{peça}} = 0$$

$$m_{\text{óleo}} \cdot c \cdot dT + m_{\text{peça}} \cdot c \cdot dT = 0$$

Para este cálculo, além dos dados já apontados acima, houve a necessidade de quantificar a massa de cada elemento envolvido. A massa da peça foi calculada através do seu volume, que é fornecido pelo software utilizado no projeto, sendo que este foi multiplicado pela densidade padrão do aço, que é 7,85 g/cm³. Da mesma maneira foi encontrada a massa de óleo, utilizando porem as dimensões do reservatório para descobrir seu volume, e levando em consideração a densidade do óleo, que é 0.9281 Kg/L.

Os valores para o Calor Específico (c) do aço e do óleo são fornecidos por livros didáticos e catálogos técnicos, sendo os valores adotados de 0,115 Kcal/Kg °C e 0,4 Kcal/Kg °C, respectivamente.

Assim, tem-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}m_{\text{óleo}} \cdot C \cdot dT + m_{\text{peça}} \cdot C \cdot dT &= 0 \\232,16 \times 0,4 \times (T_f - 26) + 2,401 \times 0,115 \times (T_f - 950) & \\92,864 T_f - 2.414,464 + 0,276 T_f - 262,31 &= 0 \\92,864 T_f + 0,276 T_f &= 2.414,464 + 262,31 \\93,14 T_f &= 2.676,77 \\T_f &= 28,74 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Através deste resultado, pode-se ainda calcular a variação de temperatura gerada pela peça no óleo:

$$\begin{aligned}dT &= T_f - T_i \\dT &= 28,74 - 26 \\dT &= 2,74 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

5. Conclusões

Através do estudo da teoria física dos processos de transferência de calor, e da busca da visualização desta teoria aplicada na realidade cotidiana de uma indústria metalúrgica, o presente artigo revela a relação direta da teoria com a prática, atingindo seus objetivos.

Além de revelar a aliaça entre a teoria e a prática o presente artigo expos um importante processo de fabricação da indústria metalúrgica, a têmpera. Consistindo em uma base para estudos mais detalhados sobre os tratamentos térmicos, este estudo contém informações relevantes à formação do engenheiro, que irá conviver com projetos de produtos onde uma decisão aparentemente simples, como a escolha de material e processos, pode acarretar em variáveis consideráveis no projeto, custos e no produto final.

6 . Referências

BONJORNO, Regina F.S. Azenha. **Física 2: termologia, óptica geométrica, ondulatória**. São Paulo: FTD, 1985.

CETEC. **Mudança de Estrutura: Martensita**. Disponível em: <<http://www.cienciosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21&top=140>>. Acesso em: 3 de maio de 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.

MENKE. Têmpera. Disponíveis em: <http://www.menkecia.com.br/servicos_detalhes.php?ID=2>. Acesso em: 3 de maio de 2011.



TEMA: Inovação Tecnológica



SOARES, Marco. Ferros & aços I-50: Tratamentos térmicos: Têmpera e revenido. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco150.shtml>>. Acesso em: 3 de maio de 2011.