

EMPREGO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AÇOS¹

Humberto Luiz Gama de Magalhães²,
Sheila Medeiros de Carvalho³,
Willy Ank de Moraes⁴,
Leonardo Barbosa Godefroid⁵,
Luiz Cláudio Cândido⁵,

RESUMO

O controle de temperatura nas etapas de conformação mecânica de um material oferece a possibilidade de atuar na determinação das propriedades mecânicas e na qualidade dos produtos de aço. A medição de perfis térmicos por meios diretos, dos quais o mais comum é por termopares de contato, pode não ser operacional devido à própria condição do processo de produção. Neste trabalho é proposto aproveitar a emissão luminosa dos materiais por incandescência para se avaliar a temperatura dos mesmos. Com um sistema de captação de imagens, pôde-se obter uma imagem do material em estado de incandescência. Um *software* poderia fazer a análise da coloração presente no material aquecido, uma calibração prévia poderia eliminar condições indesejáveis que poderiam interferir no sinal obtido. Após a captura e identificação da coloração presente ao longo do material, o sistema correlaciona com a temperatura equivalente, de acordo com a teoria prevista pela mecânica quântica. Foram realizadas quatro experiências de resfriamento do corpo-de-prova (placa de aço). Em cada experimento a temperatura deste corpo-de-prova foi monitorada, através de um registrador do tipo x-t, obtendo-se curvas da temperatura do CP com o tempo de perda de incandescência (resfriamento). Para cada experimento de resfriamento a amostra teve a sua incandescência registrada por meio da câmera digital, onde foram obtidas imagens do estado de incandescência do CP ao longo de todo o tempo de duração do ensaio e tomadas algumas amostras para o estudo da coloração apresentada pela mesma. As curvas mostram um comportamento assintótico para um tempo de resfriamento infinito o que corresponde ao estado de não incandescência do corpo-de-prova. O sistema digital apresentou grande sensibilidade e potencialidade de ser utilizado em aplicações diretamente práticas.

Palavras-chave: perfil térmico; incandescência; microestrutura; análise digital

¹ Contribuição técnica para o 5º ENEMET do Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005

² Eng^o Metalurgista – Escola de Minas/UFOP – Belgo Mineira; humberto.magalhaes@belgo.com.br

³ Aluna do 10^o período Eng. Metalúrgica – Escola de Minas/UFOP; sheila_mcarvalho@yahoo.com.br

⁴ Eng^o Metal.; M.Sc. Membro da ABM; COSIPA; willymoraes@cosipa.com.br

⁵ Eng^o Metal.; M.Sc.; D.Sc; Membro da ABM; Prof. Adjunto; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais/REDEMAT – Escola de Minas/UFOP; candido@em.ufop.br; leonardo@demet.em.ufop.br

INTRODUÇÃO

As empresas produtoras de fio-máquina destinado à produção de *steel cord* para a fabricação de pneus utilizam laminadores muito rápidos, com velocidade de lingotamento de 120 metros por segundo. Obviamente o volume de arame produzido é elevado. Ao final do processo de laminação, o fio máquina já na dimensão requerida é descarregado, ainda quente, por sobre uma esteira que faz a retirada do material enquanto o mesmo esfria. O controle da temperatura neste momento é importante, pois dele depende a estrutura final do aço que também depende de sua composição química e do grau de deformação sofrido na conformação. Obviamente, as propriedades mecânicas do produto final dependem diretamente da microestrutura obtida no produto final. Assim sendo, o controle de temperatura nesta fase, oferece a possibilidade de atuar na determinação das propriedades mecânicas e na qualidade do fio-máquina.

Como se pode notar na Figura 1, há um decaimento da temperatura do metal após a saída do laminador que pode ser notada pela mudança na coloração do metal. O significado da mudança desta coloração, conforme pode ser observado na Figura 1, é dado à luz da física quântica.

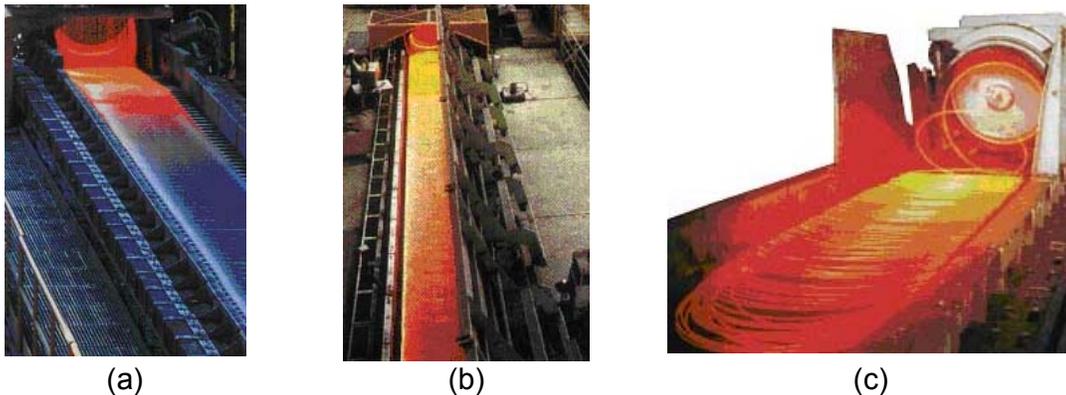


Figura 1 – Fotografias mostrando a saída de material siderúrgico (fio-máquina) de um laminador “a quente” onde se pode observar o decaimento da temperatura do mesmo pela alteração na sua coloração.

Max Planck deduziu uma expressão teórica para a curva de distribuição espectral de um corpo negro que emite luz por incandescência. A emissão de luz ocorre em todas as frequências, ou comprimentos de onda, segundo a função mostrada no gráfico da Figura 2 e apresentada pela equação 1:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi^5 h^5 c^5}{15 \lambda^5 k_B^4 T^4} \dots \dots \dots (1)$$

Onde: k_B é a constante de Boltzmann ($= 1,381 \times 10^{-23}$ J/K); c é a velocidade de luz no vácuo ($= 2,998 \times 10^8$ m/s); h é a constante de Planck ($= 6,62 \times 10^{-34}$ J*s).

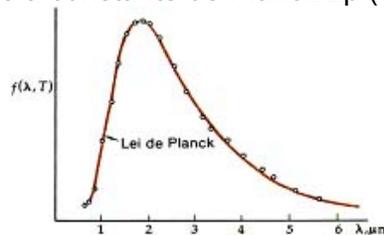


Figura 2 – Curva de distribuição espectral da radiação de um corpo negro a 1327°C.

Conforme mostra a Figura 1, a curva de distribuição de espectros de comprimentos de onda emitidos é suave e tende para zero para valores pequenos e elevados de comprimento de onda. Esta curva apresenta um máximo para um valor específico $\lambda_{\text{máx}}$ de comprimento de onda, que depende da temperatura segundo a lei de Wien: $\lambda_{\text{máx}} \times T = C_0 = 0,2014 \frac{\text{h} \cdot \text{c}}{\text{k}_B}$ (2)

Assim sendo, verifica-se que quanto maior a temperatura, maior é o comprimento de onda emitido. A emissão ocorre efetivamente em uma faixa de comprimentos de onda, assim o início da emissão de luz ocorre em temperaturas por volta de 500°C quando o máximo de emissão ainda está na faixa do infravermelho. Como os comprimentos de onda mais baixos correspondem à cor vermelha, então é esta cor que é inicialmente emitida. Com o acréscimo da temperatura, a frequência mais emitida aumenta, alterando a cor observada até tornar o objeto azul claro em temperaturas muito elevadas.

Com base nestes conhecimentos⁽¹⁻¹²⁾, pode-se estender esta teoria para o campo prático a fim de se fazer uma análise da temperatura de um corpo sólido em incandescência através da medição do comprimento de onda (ou frequência) da luz por este emitida. Este é o princípio de funcionamento do pirômetro ótico, que emprega a luz emitida por um filamento elétrico como critério de comparação com a luz do objeto do qual se deseja medir a temperatura. Tendo feita a calibração da temperatura do filamento de acordo com a corrente elétrica que passa pelo mesmo, basta igualar a cor do mesmo à do objeto para se medir a corrente imposta ao filamento e conseqüentemente a temperatura do objeto medido. A mesma técnica pode ser aplicada à saída do fio-máquina do laminador:

1. Com um sistema de captação de imagens, pode-se obter uma imagem do material em estado de incandescência;
2. Um *software* poderia fazer a análise da coloração presente em diversos pontos do arame na medida em que este é despejado pelo laminador por sobre a esteira. Uma calibração prévia poderia eliminar condições indesejáveis que poderiam interferir no sinal obtido. Esta calibração seria simples e poderia ser feita rotineiramente segundo as diversas condições ambientais porventura presentes. Após a captura e identificação da coloração presente ao longo do material, o sistema faria a correlação com a temperatura equivalente, de acordo com a teoria prevista pela mecânica quântica. Seria obtida uma distribuição de temperaturas ao longo do comprimento da esteira transportadora do arame;
3. De conhecimento da velocidade de trabalho da esteira transportadora, o mesmo software faria a correlação posição do arame com o tempo que levaria para chegar a tal posição. A conjugação deste dado com a temperatura do material em tal posição levaria a uma série de pontos pertencentes à curva de resfriamento do material;
4. A curva final de resfriamento do material seria obtida, utilizando-se os pontos obtidos, por meio de uma interpolação de uma função de resfriamento sobre tais pontos. A função desta interpolação seria feita por meio de técnicas modernas de interpolação como a *spline* cúbica, que leva em consideração os valores de pontos vizinhos e a derivada entre estes para o cálculo de cada um dos pontos da função. Outra possibilidade seria o ajuste de uma função de resfriamento previamente conhecida através de medições convencionais de temperatura;

5. De posse das curvas de resfriamento do aço e das respectivas curvas TRC o mesmo *software* poderia determinar a microestrutura sendo formada. Com base nas informações fornecidas, poder-se-ia atuar, caso necessário, no processo de resfriamento do aço para alterar a microestrutura e conseqüentemente as propriedades finais do arame.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios foram utilizados um forno de resistência elétrica, um multímetro com termopar do tipo K, um registrador gráfico, uma câmera digital (porta USB), um computador e uma placa de aço do tipo AISI/SAE 1020.

A Figura 3 mostra um esquema da montagem empregada nos experimentos.

As experiências foram realizadas segundo o seguinte procedimento:

1. Ligar o forno com ajuste de temperatura na faixa de 900°C
2. Instalar a câmera de filmar no computador
3. Posicionar a câmera de frente para o local onde será colocada a placa
4. Colocar a placa de aço SAE 1020 no forno
5. Deixar durante 1 hora no forno para que se tenha uma homogeneização da temperatura em toda a placa
6. Deixar posicionado o multímetro e o registrador de gráficos
7. Retirar a amostra com uma pinça
8. Colocá-la em frente a câmera de filmar
9. Colocar os fios do multímetro e do registrador de temperatura no orifício feito na placa
10. Ligar imediatamente o registrador de temperatura

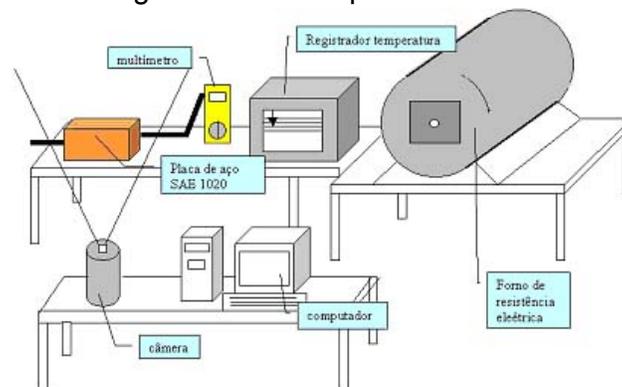


Figura 3 – Esquema da montagem experimental de acompanhamento ótico-digital de temperatura.

A Figura 4 mostra a montagem experimental utilizada neste trabalho.

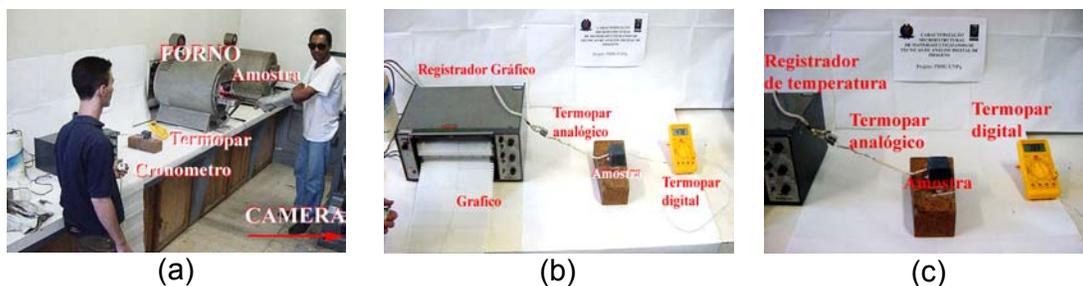
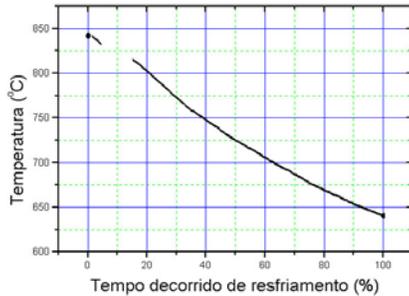


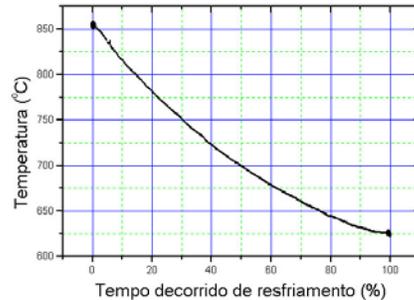
Figura 4 – Montagem experimental utilizada no trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas quatro experiências de resfriamento de CPs (placas de aço). Em cada experimento a temperatura do CP foi monitorada, através de um registrador do tipo x-t, obtendo-se curvas da temperatura do CP com o tempo de perda de incandescência (resfriamento). As Figuras 5 e 6 mostram as curvas obtidas, após normalização do tempo de esfriamento total.

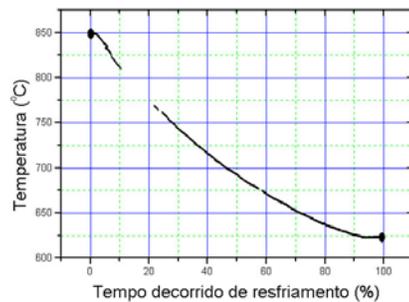


Resfriamento 1 – duração 3'26"

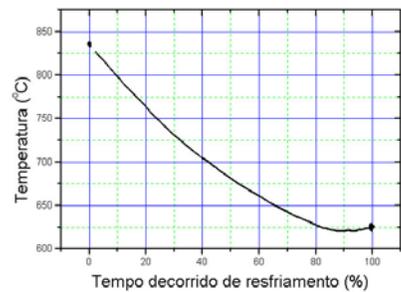


Resfriamento 2 – duração 3'18"

Figura 5 – Gráficos de evolução da temperatura do CP sob resfriamento ao ar do estado de incandescência até a não incandescência. A escala de tempo é normalizada em função do tempo de perda da incandescência.



Resfriamento 3 – duração 3'19"



Resfriamento 4 – duração 3'22"

Figura 6 – Gráficos de evolução da temperatura do CP sob resfriamento ao ar do estado de incandescência até a não incandescência. A escala de tempo é normalizada em função do tempo de perda da incandescência.

Para cada experimento de resfriamento a amostra teve a sua incandescência registrada por meio da câmera digital, tal como mostrado na Figura 3. Foram obtidas imagens do estado de incandescência do CP ao longo de todo o tempo de duração do ensaio e tomadas algumas amostras para o estudo da coloração apresentada pela mesma. Na Figura 7 é apresentado o aspecto do CP durante a 1ª experiência de resfriamento (resfriamento 1), que durou 3 minutos e 26 segundos.

Cada imagem foi analisada por um *software* de análise de imagens (*Photoshop* 6.0) e foram retirados histogramas de distribuição de quatro elementos constituintes de cada imagem, onde somente foi analisada a superfície do material:

1. Luminosidade (de 0 a 255);
2. Cor Vermelha (de 0 a 255);
3. Cor Verde (de 0 a 255);
4. Cor Azul (de 0 a 255).



0 % tempo de resfriamento 50 % tempo de resfriamento 100 % tempo de resfriamento
 Figura 7 – Aspecto do CP durante o resfriamento desde um estado de incandescência a 842° C

Um exemplo dos histogramas obtidos, para o estudo da imagem obtida no meio do resfriamento 1 (fotografia do meio na Figura 7) é mostrado na Figura 8.

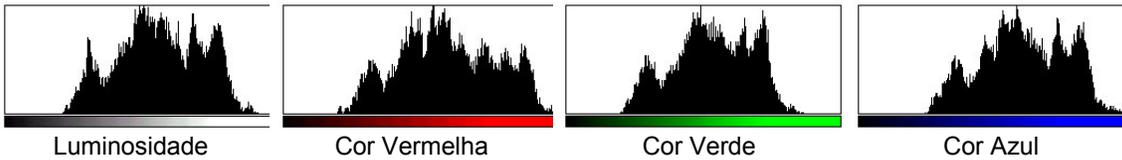


Figura 8 – Histogramas de estudo de cores para a imagem da Figura 7, obtida a 50% do tempo de resfriamento final da experiência de resfriamento 1

Estes histogramas descrevem a presença de cores e suas respectivas intensidades no CP.

Uma vez obtidos os histogramas, os valores médios e a respectiva dispersão são colocados em gráficos em função do tempo normalizado de resfriamento para poder se prever a temperatura do CP em função de sua cor. Para as quatro experiências de resfriamento foram obtidos os gráficos mostrados na Figura 9.

As curvas mostram um comportamento assintótico para um tempo de resfriamento infinito o que corresponde ao estado de não incandescência do CP. Deve-se notar que, embora os executores das experiências não tenham reparado em uma mudança de coloração do CP, as suas respectivas curvas ainda mostraram uma variação perceptível pelo sistema ótico-digital. Isto ocorreu após 90% do tempo de resfriamento da peça.

Nota-se que o sistema empregado neste trabalho, apesar de simples, possui uma sensibilidade relativamente boa no que diz respeito à medição de temperatura. Observando o gráfico do resfriamento 1 mostrado na Figura 5, pode-se perceber que entre 30 e 50% do tempo de resfriamento da placa, houve uma queda de aproximadamente 50 °C na temperatura. Esta queda na temperatura foi sentida pelo sistema como uma queda de 25% na coloração da peça (ou 64 unidades binárias de coloração). Nesta faixa de temperaturas a curva intensidade luminosa versus tempo (ou aproximadamente temperatura) é praticamente linear.

Pode-se notar pelos gráficos da Figura 9 que a variação na emissão de luz da amostra seguiu um comportamento estável entre 20 a 80% do tempo de resfriamento, o que corresponde a uma faixa de temperaturas entre 775 e 625 °C aproximadamente. Abaixo desta faixa de temperaturas, conforme calculado por equações, o corpo emite radiação eletromagnética na faixa do infravermelho, portanto não apresentando o fenômeno da incandescência. Esta é a razão das curvas da Figura 9 serem assintóticas com um tempo de resfriamento infinito. Neste caso, a intensidade de radiação luminosa captada pelo sistema é dada pelas condições de superfície e iluminação do material analisado que são praticamente as mesmas quando se observa o material à temperatura ambiente.

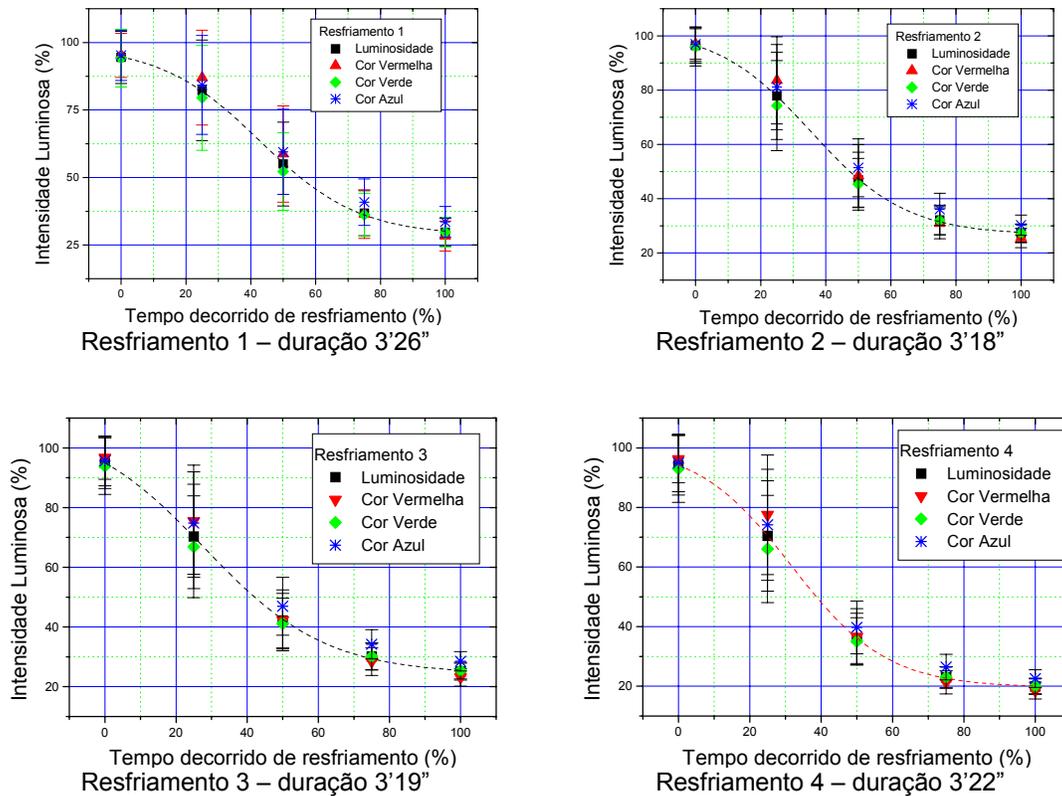


Figura 9 – Gráficos de variação dos parâmetros de luminosidade e cores durante as experiências de resfriamento desde um estado de incandescência.

Por outro lado, na faixa de temperaturas superiores a $775\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre uma outra tendência de estabilização da radiação emitida, que naturalmente tende a saturar o sistema ótico de tomada de imagens. Este fato é conhecido com o nome de superexposição e limita, em princípio, a faixa de operação de um sistema de tomada de temperaturas deste tipo. Porém uma série de procedimentos pode ser tomada a fim de se regular o sistema para que o mesmo trabalhe em todas as faixas de temperatura:

1. Alteração do tempo de exposição ou da velocidade de tomada de quadro pela câmera digital. Este foi o procedimento utilizado para se obter a curva do esfriamento 3 mostrada na Figura 9.

A diminuição do tempo de exposição prorroga a saturação do sistema ótico-digital para condições de emissão (temperatura) maiores. Pode-se notar na Figura 9 que a curva do esfriamento 3 foi mais retilínea na faixa superior de temperaturas porque houve um acerto não proposital nas condições de captura da imagem, quando se diminuiu a velocidade de registro da imagem. Esta diminuição compensou a maior iluminação proveniente da amostra alterando respectiva curva da Figura 9.

2. O acoplamento de filtros de luz ou filtros de polarização à frente da lente objetiva da câmera pode filtrar a radiação indesejável e permitir, ao mesmo tempo, uma maior tolerância à superexposição e uma maior seletividade à radiação captada.

Por fim, as curvas da Figura 9 devem ser relacionadas às curvas das Figuras 5 e 6 para se predizerem os valores de temperatura apenas com a emissão de luz do material a ser analisada. Esta correlação deverá levar em consideração as funções das equações da literatura e também de calibração feita de acordo com o equipamento e condições de observação presentes.

A Figura 10 mostra as fotografias referentes a dois resfriamentos diferentes empregados para o aço do tipo AISI/SAE 1020.

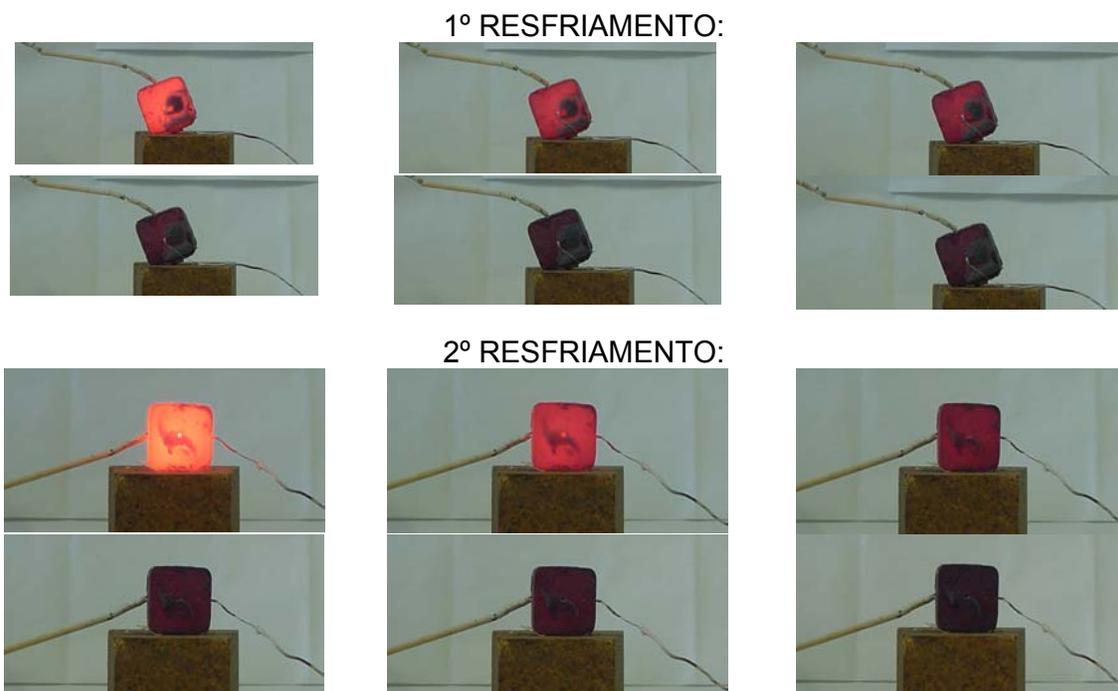


Figura 10 – Fotografias referentes a dois resfriamentos empregados no trabalho.

Foram feitas em 4 amostras metalografias para análise da estrutura do material após resfriamento de várias maneiras. A Figura 11 mostra as fotomicrografias das 4 amostras.

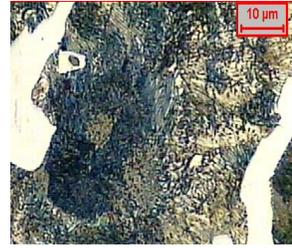
Na amostra 1, foi feita uma normalização, mostrando o estado de entrega do material. Na amostra 2 foi feita uma têmpera em água, onde pode-se notar no sentido transversal a presença de uma estrutura martensítica.

Na amostra 3 foi feito um revenimento à 550 °C para alívio de tensões internas e na amostra 4 foi feita uma normalização por convecção forçada usando um simples secador de cabelo, isto para simular uma situação no trem laminador de uma siderúrgica.

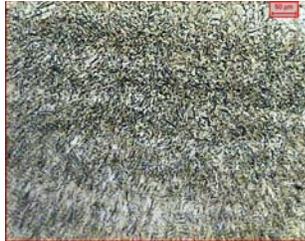
Um comentário final que deve ser colocado é que ocorre a formação da carepa nas etapas de aquecimento, encharque e resfriamento, onde esta interfere na medição final da temperatura.



Amostra 1 transversal 500X



Amostra 1 transversal 1000X



Amostra 2 transversal 200X



Amostra 2 transversal 1000X



Amostra 2 longitudinal 500X



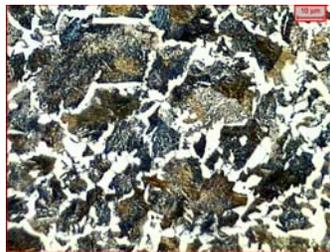
Amostra 2 longitudinal 1000X



Amostra 3 transversal 500X



Amostra 3 transversal 1000X



Amostra 4 transversal 1000X

Figura 11 – Fotomicrografias das 4 amostras utilizadas.

CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos e da discussão, conclui-se:

1. Há um grande potencial de aplicação de um sistema deste tipo diretamente no controle de qualidade de empresas do ramo siderúrgico que realizam operações de conformação mecânica “a quente” de grandes quantidades de material metálico expostos ao ambiente;
2. As experiências realizadas demonstraram que a análise de imagens de materiais incandescentes possui a sensibilidade necessária para o acompanhamento da temperatura destes materiais (acima de 600 °C);
3. Adaptações ao sistema devem ser feitas para aumentar-se simultaneamente a faixa de temperaturas analisadas e a precisão da análise. Estas adaptações podem ser a nível lógico pelo controle das condições de captura das imagens ou podem ser alterações físicas no sistema, como, por exemplo, o emprego de filtros de luz e polarizadores para a obtenção de imagens;
4. Mais experiências devem ser feitas com um sistema de captura de imagens mais preciso para se melhorar, ainda mais, a precisão do sistema de captação e interpretação de imagens para fins de determinação da temperatura;
5. O sistema testado, embora não terminado, demonstrou ter um grande potencial para o controle de temperaturas tal como foi proposto inicialmente neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – MESSIAH, A., **Quantum Mechanics**; translated from the french by G.M Temmer, J.Potter, vol.1, p.10-11, Amesterdam, New York, 1976.
- 2 – WICHMANN, EYVIND H. **Física Cuántica**, vol.4, p.21-31, Barcelona, 1972.
- 3 – EISBERG,R., **Física Quântica: átomos , moléculas, sólidos, núcleos e partículas**; Coord. Carlos Maurício Chaves; tradução Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota, 6º edição, p.30-42. Editora Campus, Rio de Janeiro:1988.
- 4 – FERENCO JUNIOR, M. **Curso de Física: calor**; traduzido por José Goldemberg, vol.1, p.10-11, São Paulo, 1976.
- 5 – GASIOROWICZ, S. **Física Quântica**; traduzido por Antônio Luciano Leite Vieira, p.1- 7, Rio de Janeiro: 1979.
- 6 – HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineering**; McGraw-Hill Book Co, 2nd printing, chapter 8 – The Measurement of Temperatura, p.285-339, 1984.
- 7 – TIPLER. **Ótica e Física Moderna**; LTC - Livros Técnicos e Científicos editora S.A. Física; vol. 4; 3 ed.
- 8 – EISBERG. **Fundamentos da Física Moderna**; Editora Guanabara, p. 40 – 41, Rio de Janeiro:1979;
- 9 – LEIGHTON. **Principles of Modern Physics**; International Student Edition
- 10 – SERWAY. **Física: para cientistas e engenheiros**; LTC - Livros Técnicos e Científicos editora S.A., vol.4; 3 ed.
- 11 – ZEMANSKY, MARK W. **Calor e Termodinâmica**, 1975.
- 12 – KRELTH, FRANK. **Princípios de Transmissão de Calor**; Editora Edgard Bliicher Ltda., 2 ed., 1975.