Unisanta Science and Technology, **2019, 3, July**
Published Online 2019 Vol.8 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Avaliação Termográfica das características de Deformação Plástica de Metais para Conformação

Theophilus Jakobus Costa Fiuza Verburg[1], Arthur Rodrigues Cândido de Oliveira[2], Douglas Luiz da Silva Ganança[3], Gabriel Tonéra de Morais[3], Fernando Chad Silva[3], Arlindo de Goes Moreira[1] e Willy Ank de Morais[1,3]

UNISANTA[1] – Universidade Santa Cecília – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

KGB Soluções em Engenharia LTDA,[2]
R. Quinze de Novembro, 382 - 2 - Centro, São Vicente - SP, 11310-400

WILLY ANK SOLUÇÕES[3] – Departamento Técnico
Rua onze de junho, 316 A.102 - São Vicente-SP, Brasil - CEP: 11320-160

E-mail*:* willyank@unisanta.br
Received January, 2019

Resumo: A análise termográfica é uma técnica de diagnostico baseado em um ensaio não destrutivo, que utiliza câmeras e sensores infravermelhos para medição de temperatura e distribuição de calor. A termografia é amplamente empregada numa variedade de situações, desde armamentos bélicos, passando por técnicas preditivas de manutenção industrial, inclusive diagnósticos médicos. Um novo campo em desenvolvimento é a aplicação da termografia na avaliação de ensaios de deformação plástica. Neste trabalho foram empregados corpos de prova de tração, constituídos de aço carbono, em diferentes espessuras, para avaliação da deformação plástica quantificada por extensômetria comparando-a com a geração de calor quantificada através de uma câmera termográfica. Através destes experimentos serão feitas associações fenomenológicas entre o gradiente de temperatura detectado pelo processo termográfico com a deformação do material caracterizada por parâmetros plásticos.

Palavras chave: Termografia; deformação plástica; ensaio de tração.

Thermographic Evaluation of Plastic Deformation characteristics of Metals for Forming

Abstract: Thermographic analysis is a non-destructive diagnostic technique, which uses cameras and infrared sensors to measure temperature and thus the heat distribution. This technics is widely used in a variety of situations, from warlike weapons, to predictive industrial maintenance techniques, including medical diagnostics. A new field in development is the application of thermography in the evaluation of plastic deformation tests. In this work, tensile specimens were used, made of carbon steel, in different thicknesses, to evaluate the plastic deformation quantified by extensometer comparing it with the quantified heat generation through a thermographic camera. Through these experiments, it will be made phenomenological associations between the temperature gradient detected by the thermographic process and the deformation of the material characterized by plastic parameters.

Keywords: Thermography; Plastic deformation; Tensile test.

1. Introdução

Cada vez mais a tecnologia vem auxiliando a indústria a trabalhar de maneira mais produtiva e segura. É com a tecnologia que surgem novas ferramentas de trabalho e novas metodologias com intuito de otimizar processos dentro de uma organização. Dentre as tecnologias desenvolvidas no último século está a câmera termográfica, ou termovisor, que é uma ferramenta que converte radiação infravermelha, não visível a olho nu,

Copyright © 2019 ISESC.

em imagens que mostram a temperatura oriunda do calor gerado por objetos e seres vivos.

O presente trabalho tem por objetivo evidenciar a relação entre o comportamento plástico de alguns metais e o respectivo aumento de temperatura ocasionado pela deformação plástica através do emprego de técnicas termográficas. Para isso, o presente trabalho foi desenvolvido nos seguintes estágios:

1. entendimento do uso da termografia e das câmeras termográficas.
2. Recolhimento de dados de ensaio de tração usando corpos de prova de diferentes aços;
3. associar os dados coletados durante o ensaio de tração com as informações registradas por uma câmera termográfica durante a execução dos ensaios;
4. evidenciar uma possível relação entre a deformação e geração de calor do aço.

2. Termografia

A técnica termográfica teve seus primeiros usos em 1929 quando a primeira câmera com sensor infravermelho foi usada pelos Britânicos [1] em suas defesas antiaéreas. E foi justamente em armamentos bélicos que a tecnologia foi ficando cada vez mais sofisticada, sendo que com o tempo, tal tecnologia foi sendo repassada para indústria, trazendo benefícios em diversos setores da manufatura aos serviços

2.1 Funcionamento de uma Câmera Termográfica

Todos os objetos emitem energia infravermelha, conhecida como assinatura de calor. Uma câmera infravermelha, também conhecida como câmera termográfica, detecta e mede esta energia gerando uma imagem termográfica [2]. Nesta imagem, são exibidas as diferentes temperaturas locais no componente, na forma de gradientes de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de cinza (escala monocromática), sendo a geração de imagens térmicas é obtida, em geral, por termovisores ou câmeras termográficas dotadas de sensores de infravermelho.

Os sensores de infravermelho quântico proporcionam maior desempenho de detecção e velocidade de resposta mais rápida. Sua sensibilidade à foto é dependente do comprimento de onda. Estes detectores devem ser refrigerados para obter medições precisas. Uma câmera de imagem térmica refrigerada moderna inclui um sensor de imagem combinado com um *Cryocoole* [3]. Este dispositivo reduz a temperatura do sensor para temperaturas criogênicas, que é uma condição necessária para minimizar o ruído induzido termicamente para um nível inferior ao do sinal da cena que está sendo filmada. Estas são câmeras altamente sensíveis, que podem detectar a menor diferença de temperatura entre as câmeras. Eles podem ser projetados para permitir a imagem na banda infravermelha de onda média, ou *medium waves infrared* (*MWIR*) e na faixa infravermelha de onda longa, ou *long waves infrared* (*LWIR*) do espectro, onde há um alto contraste térmico devido à física de corpo negro.

Os chamados detectores térmicos não requerem refrigeração, mas têm tempos de resposta lentos e baixas capacidades de detecção. Uma câmera onde o sensor de imagem não precisa de resfriamento criogênico é uma câmera infravermelha não refrigerada. O design do detector baseia-se no microbolômetro, que é um pequeno resistor ao óxido de vanádio que tem um grande coeficiente de temperatura em um elemento de silício com bom isolamento térmico, baixo calor e excelente isolamento térmico [1].

As mudanças de temperatura da cena causam mudanças de temperatura do bolômetro que são convertidas em sinais elétricos e processadas em uma imagem. Os sensores não refrigerados funcionam na banda de infravermelho de ondas longas, ou *long waves infrared* (LWIR), onde a maior parte de sua energia infravermelha é emitida por alvos de temperatura terrestre. As câmeras não refrigeradas são geralmente mais baratas que as câmeras refrigeradas [2]. Essas câmeras têm um menor número de componentes móveis e têm uma vida útil mais longa quando comparadas às câmeras refrigeradas sob condições operacionais semelhantes.

A câmera converte esses dados infravermelhos em uma imagem eletrônica que mostra a temperatura superficial aparente do objeto a ser medido. Uma câmera infravermelha contém um sistema óptico que concentra a energia infravermelha em um chip detector especial que contém milhares de pixels detectados dispostos em uma grade [4].

Cada pixel na matriz do sensor reage à energia infravermelha concentrada nela e produz um sinal eletrônico [2, 4]. O processador da câmera tira o sinal de cada pixel e aplica um cálculo matemático para criar um mapa de cores da temperatura aparente do objeto, conforme Figura 1. Cada valor de temperatura é atribuído a uma cor diferente. A matriz de cores resultante é enviada para a memória e para a exibição da câmera como uma imagem de temperatura (imagem térmica) desse objeto [5].

Muitas câmeras infravermelhas também incluem uma câmera de luz visível que captura automaticamente uma imagem digital padrão no momento em que é acionada [4, 5]. Ao misturar essas imagens, é mais fácil correlacionar áreas problemáticas em sua imagem de infravermelho com o equipamento ou área real que está sendo inspecionada.

Copyright © 2019 ISESC

A termografia por infravermelho pode ser somente qualitativa ou qualitativa/ quantitativa dependendo da aplicação. Tais métodos podem ser conceituados da seguinte maneira:

- Termografia qualitativa – Quando a informação que interessa é o perfil e não os valores térmicos apresentados. Essa é a característica que classifica a termografia infravermelha como uma técnica que fornece laudos instantâneos.
- Termografia quantitativa - É por meio deste método que se define o nível de gravidade de uma anomalia.



Figura 1. Exemplo do uso da termografia em um quadro de distribuição [5].

2.2 Aplicações da Termografia

Atualmente a termografia possui aplicações em diversos setores [1, 2 e 5]: na indústria automobilística é utilizada no desenvolvimento e estudo do comportamento de equipamentos pneumáticos, desembaçador do para-brisa traseiro, freios, no sistema de refrigeração, turbo, etc. Na siderurgia tem aplicação no levantamento do perfil térmico dos fundidos, durante a solidificação, na inspeção de revestimentos refratários dos fornos. A Figura 1 ilustrou, por exemplo, a inspeção termográfica de painéis, uma aplicação muito comum na indústria [6].

Na indústria aeronáutica é utilizada no ensaio de materiais compostos para detectar dupla laminação ou outros tipos de rupturas. Pontos quentes assim como falhas de coesão em componentes elétricos e eletrônicos podem ser determinados através da termografia. Na indústria química emprega a termografia para a otimização do processo e no controle de reatores e torres de resfriamento.

As aplicações na engenharia civil influem a avaliação do isolamento térmico de edifícios e a possibilidade de se determinar detalhes construtivos das construções. Em processos industriais, a termografia por infravermelho tem sido aplicada tanto através de sistemas on-line quanto off-line, em fabricação de papel, vidro, lingotamento/laminação de siderurgia, pelotização de minério de ferro.

Hoje em dia a termografia, que conta com equipamentos bem mais avançados quando comparados a suas primeiras versões, é usada para diversas finalidades; e como a tecnologia ainda não é muito difundida, tem-se novas aplicações para a tecnologia surgindo a todo o momento. Uma dessas novas aplicações é o melhor entendimento no comportamento de materiais quando os mesmos sofrem algum tipo de transformação ou deformação. Para esses estudos é possível utilizar a termografia para justificar o comportamento dos materiais quando submetidos a esforços mecânicos, como tração, ou flexão, por exemplo.

2.3 Técnicas da Termografia

A termografia é uma das técnicas de inspeção chamada de: Técnicas de Manutenção Preditiva. As técnicas termográficas geralmente consistem na aplicação de tensões térmicas no objeto, medição da distribuição da temperatura da superfície e apresentação da mesma, de tal forma que as anomalias que representam as descontinuidades possam ser reconhecidas. Duas situações distintas podem ser definidas:

1. Tensões térmicas causadas diretamente pelo próprio objeto durante a sua operação: equipamento elétrico, instalações com fluido quente ou frio, isolamento entre zonas de diferentes temperaturas, efeito termoelástico, etc.
2. Tensões térmicas aplicadas durante o ensaio através de técnicas especiais (geralmente aquecimento por radiação ou condução) e certas metodologias a serem estabelecidas caso a caso, para que se possa obter boa detecção das descontinuidades.

Em ambas as situações é necessário haver um conhecimento prévio da distribuição da temperatura superficial (ou pelo menos que possa ser assumida com certa segurança), como um referencial comparativo com a distribuição real obtida durante o ensaio. O caso mais simples ocorrerá quando a distribuição da temperatura for uniforme e as descontinuidades, por sua vez, se manifestarem como áreas quentes (por exemplo: componentes com maior resistência elétrica em uma instalação), ou áreas frias (fluxo interno de ar nos materiais).

Copyright © 2019 ISESC

2.4 Vantagens e Desvantagens da Termografia

A termografia utiliza raios infravermelhos para verificar as condições operacionais de um equipamento e envolve alta tecnologia, por isso, seu custo é relativamente alto. No entanto, a rapidez e a segurança fazem esta técnica ser extremamente vantajosa no monitoramento de processos e máquinas, cujas vantagens são [1, 2, 4 e 5]:

1. Facilidade de operação;
2. Segurança, inspeção sem contato físico com o equipamento a ser inspecionado;
3. Não interfere na produção, verificação de equipamentos em pleno funcionamento;
4. Alto rendimento e economia, inspeção de grandes superfícies em pouco tempo;
5. Permite antecipar danos que possam causar elevados custos de manutenção corretiva;
6. Permite corrigir problemas que causam perda e consumo de energia;
7. Prolongamento da vida útil evitando queimas ou perdas desnecessárias das peças;
8. Informação numérica e visual

Porém, a técnica também apresenta certas desvantagens ou limitações [1, 2, 4 e 5]:

1. As variações na distribuição das temperaturas podem ser muito pequenas para serem detectadas;
2. Discrepâncias muito pequenas podem ser mascaradas, pelo "ruído de fundo", e permanecer sem detecção;
3. As principais organizações de normalização ainda não reconhecem a termografia como um método confiável de END (Ensaios Não Destrutivos) para avaliação e certificação dos produtos ensaiados

3. Desenvolvimento

De forma sucinta, o trabalho proposto consiste no emprego da termografia na aquisição do gradiente de energia térmica liberada durante o ensaio de tração em corpos de prova (CPs) conforme a Figura 2.a e 2.b. Tais CPs foram confeccionados dentro da norma ASTM E8 M [7], usando quatro tipos de aços laminados s frio (LF) e laminados a quente (LQ), oriundos da Usiminas-Cubatão de diferentes qualidades:

1. CP01 - EN 10130 DC04, para estampagem profunda, LF, 1,00 mm de espessura;
2. CP02 - SAE J403 1006, para uso geral, LF, 2,00 mm de espessura;
3. CP03 - ASTM A1018 CS, para uso geral, LQ, 3,00mm de espessura;
4. CP04 - NBR 6650 LNE 500, para uso estrutural, LQ, 4,00mm de espessura.

Como medida de controle, todos os CPs serão pintados com a mesma tinta epóxi, de aspecto preto fosca, de forma a estabelecer um índice de emissividade, empregado no ajuste da termocâmera, igual e o mais alto o possível (próximo à 0,95) em todos os ensaios.

A taxa de alongamento aplicada a amostra foi constante e provoca uma deformação que normalmente prossegue até a ruptura do material, passando pela região de instabilidade plástica, representada pela estricção. Um extensômetro mecanicamente acoplado diretamente ao CP mede a deformação linear no alongamento e transmite os valores instantâneos a um computador.

Estes dados, juntamente os dados de força aplicada, gerados pela célula de carga do equipamento foram usados para descrever a relação força vs. alongamento do CP. Posteriormente estes dados são analisados conforme descrito no item 3.1.

Antes do início do ensaio, uma máquina termográfica, modelo FLIR T400 IR, foi posicionada à frente a máquina de ensaios focalizando a região útil dos CP, no lado contrário de onde foi fixado o extensômetro. Desta forma, o equipamento monitorou todo o ensaio, gerando imagens térmicas, ou termogramas, periodicamente ao mesmo tempo em que o extensômetro, fixado na face contrária, registrou a deformação do CP. A Figura 2 ilustra o posicionamento dos equipamentos e o aspecto do CP durante o ensaio.

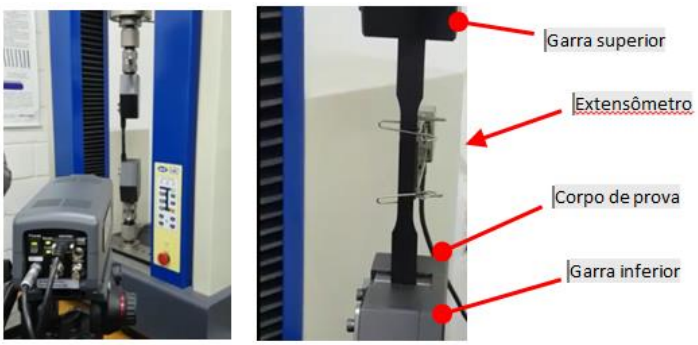

Figura 2. Corpo de prova para ensaio de tração: (a) posicionamento da máquina termográfica focada no corpo de prova, (b) posicionamento do extensômetro na região útil do CP.

Copyright © 2019 ISESC

Após a realização dos ensaios tornou-se necessário processar os dados coletados pela câmera (termogramas), como os mostrados na Figura 3. Também foi necessário analisar os dados obtidos do extensômetro e da célula de carga da máquina de ensaios mecânicos, correlacionando as informações de ambas as fontes no intuito de traçar um perfil de dispersão da energia térmica gerada.

Os testes foram realizados em um laboratório com temperatura controlada por um sistema de ar condicionado convencional. Assim, tornou-se necessário esperar que a temperatura dos CPs atingisse equilíbrio térmico com o ambiente, após sua acomodação na máquina de tração, o que levou alguns minutos. O tempo em repouso teve de ser suficiente para que a temperatura do conjunto equilibrasse com a temperatura do fundo (ambiente) da sala, evitando leituras equivocadas.

3.1 Análise da Deformação Plástica

Durante o ensaio, será feito o registro da curva força vs. deslocamento (F vs. ΔL), através do uso de uma célula de carga (F) e de um extensômetro (ΔL). Tais dados foam disponibilizados por um *software* específico do equipamento (ENIC Tesc®) e a partir destes dados, tornou-se possível calcular os valores da tensão e deformação de engenharia, dadas pelas equações:

$$S = \frac{F}{A_0} \qquad (1)$$

$$e = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{} \qquad (2)$$

Sendo:
A_0 – área inicial do corpo de prova (CP);
L_0 – comprimento inicial do CP na região abrangida pelo extensômetro (50 mm)

Uma vez obtidos os valores de S e e, foi possível calcular as tensões e deformações reais (σ e ε), conforme as equações [8]:

$$\sigma_i = S_i \cdot (1 + e) \qquad (3)$$

$$\varepsilon = ln(1 + e) \qquad (4)$$

Sendo:
S, e – tensão e deformação de engenharia, respectivamente;
σ, ε – tensão e deformação reais, respectivamente.

Para fazer a análise da deformação plástica no ensaio de tração, tona-se necessário descrever matematicamente a resposta mecânica do material no estado plástico. Com essa finalidade estão disponíveis algumas equações que representam o comportamento plástico dos materiais [8]. Tais equações fazem o modelamento completo da curva tensão-deformação. Destas equações, a mais conhecida é devida à Hollomon, que avalia com mais precisão o regime plástico:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \qquad (5)$$

Sendo:
n – expoente de encruamento e **K** – constante plástica de resistência do material (MPa).

Para obter os parâmetros da equação (5), devido à Hollomon, considera-se a regressão linear do logaritmo dos dados de σ vs. ε, segundo a equação [8]:

$$log(\sigma) = log(K) + n \cdot log(\varepsilon) \qquad (6)$$

ou

$$Y = A + B \cdot X \qquad (7)$$

Na qual:
Y = log (σ) ; X = log (ε) ; K = 10A e n = B**.**

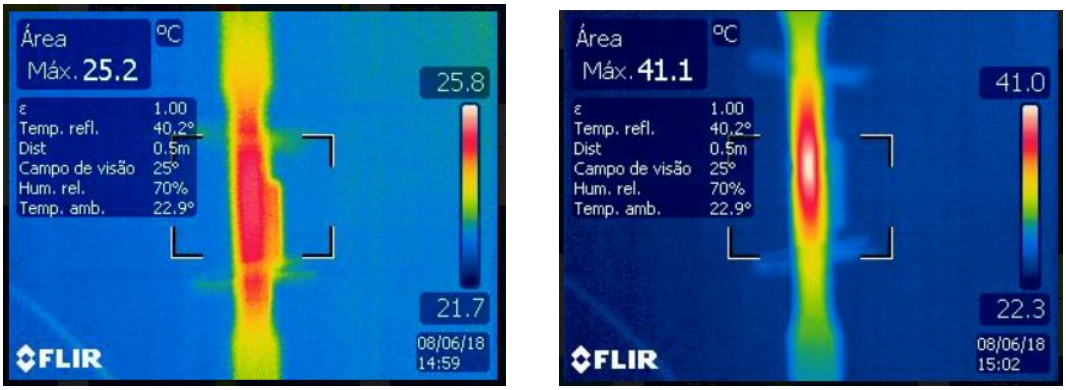

Figura 3. Termogramas típicos obtidos nos ensaios de tração efetuado neste trabalho.

Copyright © 2019 ISESC

Com os valores dos parâmetros da equação de Hollomon, torna-se possível calcular a energia para deformação plástica, segundo a equação:

$$U_0 = A_0 \cdot L_0 \int_0^{\varepsilon_i} \sigma \cdot d\varepsilon \qquad (8)$$

Que considerando a equação (5), devido a Hollomon:

$$U_0 = V_0 \times \left[K \frac{(\varepsilon_f)^{n+1}}{n+1} \right] \qquad (9)$$

Na qual:

U0 – energia plástica interna gerada ao longo do processo de deformação plástica (J) no volume útil (V = V0 = A0·L0) de medição da deformação no corpo de prova.

Os dados de energia foram empregados para fazer a avaliação do calor gerado pelo processo de deformação plástica, que implica no aumento da temperatura dos corpos de prova, registrados pelo sensor termográfico. Os ensaios propostos devem ser realizados com taxas de deformação constantes em cada ensaio. Um fenômeno esperado é a observação das maiores temperaturas na região de estricção (empescoçamento) em todos os CPs.

5. Resultados e Discussão

As Tabelas 1 e 2 apresentam os dados obtidos a partir dos ensaios de tração com 4 amostras dos aço avaliadas, nos quais foram feitas as medições termográficas. Os dados mostrados já consideram a relação entre tensão e deformação reais (σ vs. ε), calculadas pelo uso das equações apresentadas no item 3.1, com base nos dados disponibilizados durante os ensaios com os quatro tipos de aços empregados. Os volumes envolvidos foram diferentes devido às diferentes espessuras reais: 1,01 – 1,96 – 3,05 e 4,10 mm, respectivamente aos CP01, CP02, CP03 e CP04. A temperatura apresentada é a máxima registrada em cada corpo de prova extraída de termogramas registados a cada 1 mm de alongamento dos corpos de prova. Vide Figura 4.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de tração com medições termográficas para o CP01 e CP02

CP 01 (n =0,249; K =517,8 MPa; V =634,8 mm³)					**CP 02 (n =0,214; K =517,9 MPa; V =1228 mm³)**				
□L (mm)	**□**	**□ (MPa)**	**U_0 (J)**	**$T_{máx}$ (°C)**	**□L (mm)**	**□**	**□ (MPa)**	**U_0 (J)**	**$T_{máx}$ (°C)**
0	0,000	0,0	0,0	22,9	0	0,000	0,0	0,0	22,9
1	0,020	194,8	2,0	23,4	1	0,020	223,4	4,5	25,0
2	0,039	231,0	4,6	23,8	2	0,039	258,7	10,3	25,1
3	0,058	254,9	7,5	24,4	3	0,058	281,6	16,6	26,3
4	0,077	273,2	10,7	25,0	4	0,077	298,9	23,3	27,1
5	0,095	288,2	14,0	25,8	5	0,095	312,9	30,2	28,0
6	0,113	300,9	17,3	26,3	6	0,113	324,8	37,2	28,8
7	0,131	312,0	20,8	26,4	7	0,131	335,0	44,4	29,5
8	0,148	321,8	24,3	26,9	8	0,148	344,1	51,6	30,2
9	0,166	330,7	27,8	27,3	9	0,166	352,2	59,0	30,7
10	0,182	338,8	31,4	27,8	10	0,182	359,6	66,3	31,4
11	0,199	346,2	35,0	28,3	11	0,199	366,3	73,7	32,0
12	0,215	353,0	38,6	28,6	**12**	**0,215**	**372,6**	**81,0**	**32,5**
13	0,231	359,4	42,2	28,9	13	0,231	378,3	88,4	33,2
14	**0,247**	**365,3**	**45,8**	**29,3**	14	0,247	383,7	95,8	34,0
15	0,262	370,9	49,4	29,6	15	0,262	388,8	103,1	34,5
16	0,278	376,2	53,1	30,2	16	0,278	393,5	110,5	35,3
17	0,293	381,2	56,7	30,4	17	0,293	398,0	117,8	36,4
18	0,307	385,9	60,3	31,0	18	0,307	402,2	125,1	37,5
19	0,322	390,4	63,9	31,4	19	0,322	406,2	132,3	38,9
20	0,336	394,7	67,5	32,0	20	0,336	410,1	139,5	40,1
21	0,351	398,7	71,0	32,8	21	0,351	413,7	146,7	40,7
22	0,365	402,7	74,6	33,7	22	0,365	417,2	153,8	40,6
23	0,378	406,4	78,1	35,1	23	0,378	420,5	160,9	37,2
24	0,392	410,0	81,7	36,5					
25	0,405	413,4	85,2	37,1					

Copyright © 2019 ISESC

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração com medições termográficas para o CP03 e CP04

CP 03 (n =0,174; K =464,2 MPa; V =1912 mm³)					CP 04 (n =0,095; K =938,2 MPa; V =2585 mm³)				
□L (mm)	□	□ (MPa)	U_0 (J)	$T_{máx}$ (°C)	□L (mm)	□	□ (MPa)	U_0 (J)	$T_{máx}$ (°C)
0	0,000	0,0	0,0	22,9	0	0,000	0,0	0,0	22,9
1	0,020	234,3	7,6	25,2	1	0,020	645,8	30,2	25,2
2	0,039	263,9	16,9	26,0	2	0,039	689,3	63,8	26,7
3	0,058	282,8	26,8	26,6	3	0,058	715,7	98,4	28,8
4	0,077	296,8	37,2	27,5	4	0,077	734,9	133,5	31,1
5	0,095	308,1	47,8	28,2	**5**	**0,095**	**750,1**	**168,7**	**33,7**
6	0,113	317,5	58,6	28,8	6	0,113	762,5	204,0	40,1
7	0,131	325,7	69,5	29,5	7	0,131	773,1	239,1	49,0
8	0,148	332,8	80,4	30,0					
9	0,166	339,2	91,4	30,6					
10	**0,182**	**345,0**	**102,4**	**31,2**					
11	0,199	350,3	113,4	31,6					
12	0,215	355,1	124,4	32,0					
13	0,231	359,6	135,3	32,6					
14	0,247	363,7	146,2	33,1					
15	0,262	367,6	157,1	33,6					
16	0,278	371,2	167,8	34,3					
17	0,293	374,7	178,6	35,0					
18	0,307	377,9	189,2	36,3					
19	0,322	381,0	199,8	37,8					
20	0,336	383,9	210,3	39,4					
21	0,351	386,7	220,8	40,4					
22	0,365	389,3	231,2	41,1					

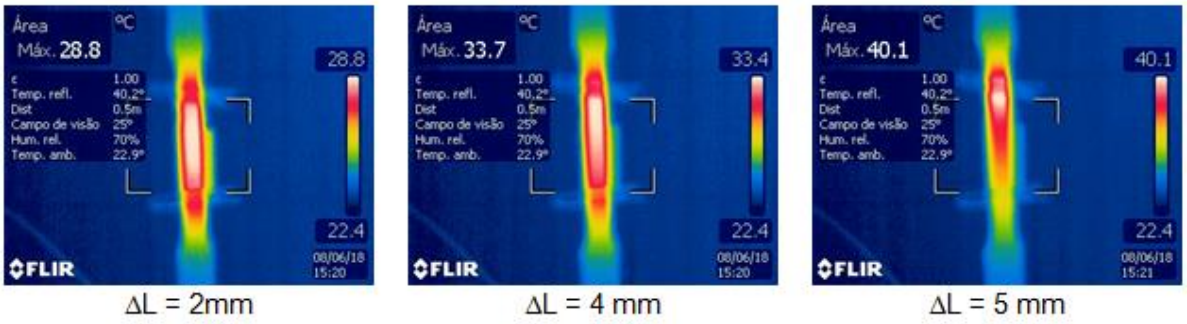

Figura 4. Termogramas ilustrando a concentração de calor gerado na região da estricção que ocorreu a partir de 5 mm de deformação (ΔL) no CP 04.

Nestas tabelas, os dados apresentados estão separados no início da instabilidade plástica (estricção), indicada pela linha em negrito e pela alteração da coloração de fundo nessas Tabelas. Os dados antes da instabilidade plástica correspondem à deformação uniforme nos CPs e consequentemente no calor registrado. Após o início da estrição o processo de geração de calor tende a se intensificar e se tornar cada vez mais localizado, conforme ilustrado pelas imagens térmicas apresentadas na Figura 4, que servem para ilustrar como a técnica e o equipamento empregado são sensíveis à presença de deformações plásticas heterogêneas ou localizadas.

Com os dados disponíveis pelos ensaios de tração e pelas medidas termográficas, foram gerados gráficos entre a energia plástica (U_0) e a temperatura máxima ($T_{Máx}$) registrada, mostrados nas Figuras 5 e 6.

Copyright © 2019 ISESC

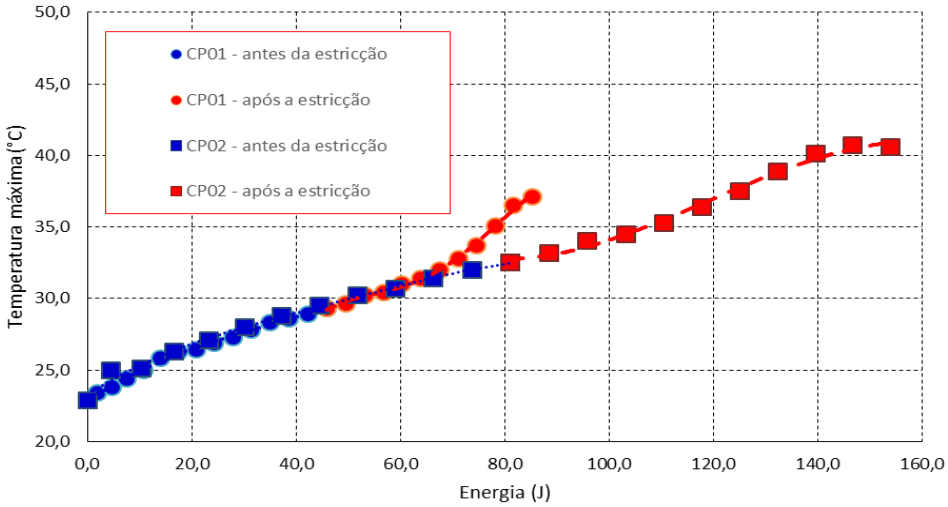

Figura 5. Correlação entre a energia plástica (J) e a temperatura máxima (°C) gerada ao longo dos ensaios de tração com o CP01 e CP02.

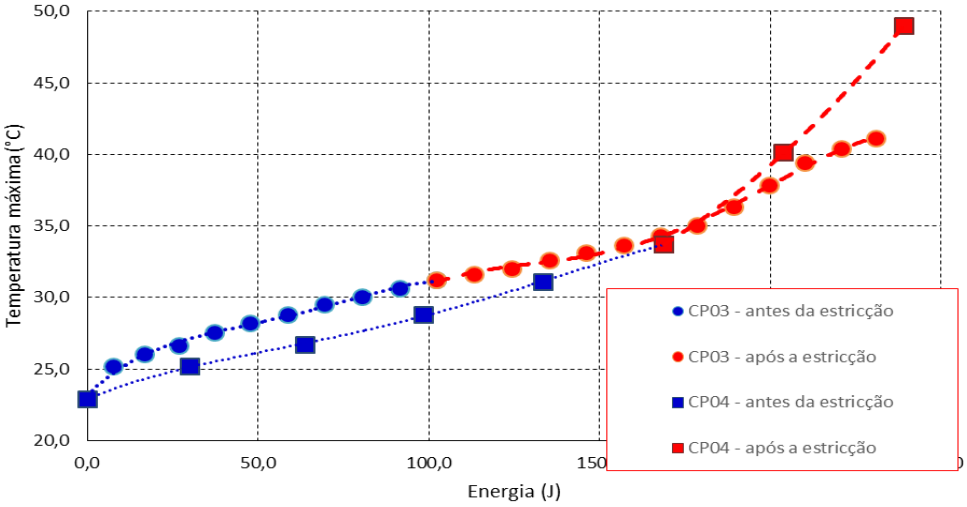

Figura 6. Correlação entre a energia plástica (J) e a temperatura máxima (°C) gerada ao longo dos ensaios de tração com o CP03 e CP04.

As curvas obtidas foram separadas em duas regiões: antes e após o início da instabilidade plástica (estricção) em cada um dos 4 tipos de aços testados. Antes da instabilidade plástica, ou estrição, pode-se gerar uma correlação linear entre a energia plástica e a temperatura máxima no seguinte formato:

$$T_{máx} = A + B\ U_0.$$

Os resultados destas correlações estão apresentados na Tabela 3, juntamente com os valores do coeficiente de correlação de Pearson (R^2).

Copyright © 2019 ISESC

Tabela 3. Resultados de uma correlação linear entre U_0 (J) e $T_{máx}$ (°C).

Parâmetros	CP01	CP02	CP03	CP04
A (°C)	23,54	24,65	24,99	22,99
B (°C/J)	0,1326	0,1020	0,0626	0,0618
R^2	0,981	0,987	0,993	0,992
S_{LE} (MPa)	150	185	212	603
S_{LR} (MPa)	284,9	284,9	287,2	680,9
%Along (L_0=50mm)	41,7	37,0	35,8	11,2
K (MPa)	517,9	517,9	464,2	938,2
n (adim.)	0,249	0,214	0,174	0,095

Equação linear: $T_{máx} = A + B\ U_0$. R^2 - coeficiente de correlação de Pearson

Os valores da intercepção da regressão linear (reta) com a temperatura (eixo Y), ou A (°C), representa a temperatura inicial dos CPs, que era aproximadamente igual entre todos, variando apenas em 2°C. Ou seja, o parâmetro A não está associado ao comportamento dos materiais testados e sim às condições ambientais.

Por outro lado, o parâmetro angular das regressões, B (°C/J), está associado à capacidade de geração de calor, inferida pela temperatura, em função da energia plástica presente por unidade de volume.

Este parâmetro foi sensivelmente maior para o CP01, constituído do aço mais conformável, imediatamente seguido pelo mesmo parâmetro do CP02, que era do 2º aço mais conformável. Os aços menos conformáveis, apresentaram uma geração de calor menor intensa do que os aços mais conformáveis, conforme indicado pela relação entre os coeficientes angulares da regressão linear $T_{máx}$ vs. U_0 e o expoente de encruamento (n), tipicamente associado na bibliografia [8] à capacidade de deformação plástica dos metais.

A Figura 7 apresenta o resultado gráfico desta correlação. Os dois valores obtidos para o CP03 e CP04 deverão ser investigados em maiores detalhes, pois os mesmos não parecem seguir a tendência geral dos dados, especialmente no que diz respeito ao resultado do CP04. Também deve ser salientado de que é exatamente o CP04 que gerou uma menor quantidade de dados e, portanto, está mais propenso à erros experimentais.

3 Conclusão

A termografia empregada na prevenção de falhas mecânicas, traz muitos benefícios para os processos de modo geral, sendo muito útil desde aplicações médicas a industriais, devido sua grande precisão nas análises e fácil compreensão dos resultados. Pode-se perceber que o uso da termografia tem um bom custo benefício, apesar dos equipamentos necessários para uma boa análise possuírem um valor alto. Por isso é importante verificar cuidadosamente qual equipamento adquirir e se o mesmo é viável para a aplicação proposta.

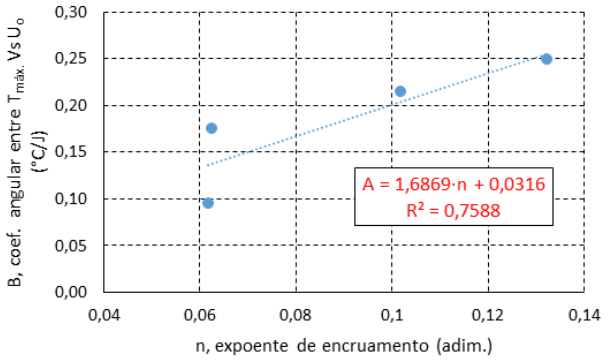

Figura 7. Correlação entre a geração de calor, representada pelo coeficiente angular da relação $T_{máx} = A + B\ U_0$ e o expoente de encruamento, *n*.

No ensaio executado, ficou explicito que existe uma relação entre a deformação plástica e o aumento da temperatura, gerando resultados gráficos onde foi possível visualizar uma variação de temperatura superior a 25°C. Um ponto a se destacar é que a temperatura máxima cai quase que instantaneamente quando o corpo de prova se rompe, comprovando assim que a geração de calor ocorre somente durante a deformação plástica. Pode-se comprovar que a geração de calor é dependente do comportamento plástico do material, sendo mais intenso quanto maior for a capacidade de deformação, representada pelo expoente de encruamento quantificado para os quatro tipos de aços testados e avaliados. Ensaios futuros deverão empregar CPs confeccionados em outros novas amostras destes aços, mas também em outros tipos de metais, tais como aços carbono, aço inox, alumínio e cobre para verificar o tipo de comportamento observado no presente trabalho.

Copyright © 2019 ISESC

Agradecimentos

Os autores agradecem especialmente ao Sr. Benedito Dias Chivites, Assistente técnico industrial da Usiminas-Cubatão, que nos auxiliou com as amostras de aço usinadas nos tamanhos adequados.

Referências

[1] BEARD, J.; Introduction to Infrared Thermografy, 2007, <http://web.utk.edu/~jbeard8/IT570/IntroIR_documentation>. Acessado em 15/03/2018.

[2] TARPANI, José R. et al . Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. Polímeros, São Carlos , v. 19, n. 4, p. 318-328, 2009 .

[3] XIS - XENICS INFRARED SOLUTIONS; MWIR & LWIR cooled cores; <http://www.xenics.com/en/application/mwir-lwir-cooled-cores>. Acessado em 13/03/2018.

[4] WOLFE, W. L.; ZISSIS, G. J.; The infrared handbook; Office of Naval Research, Washington, 1978.

[5] FLIR INSTRUMENTS, O Padrão da Indústria acaba de ser Elevado - Apresentando a nova FLIR T1020. <http://www.flir.com.br/instruments/content/?id=70502&collectionid=1346&col=70500>. Acessado em 27/06/2018

[6] Paluchowski, C.; Steffenello, F; Steffenello, M.; Franken, T; Spohr, C. B. Bases teóricas de inspeção termográfica para aplicação em componentes elétricos. SIEF – Semana Internacional das Engenharias. Horizontina: FAHOR. 2011.Disponível em: < http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Bases_inspecao_termografica_componentes%20eletricos.pdf >. Acessado 05/06/2018.

[7] ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

[8] MORAIS, W. A.. ANÁLISE DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO: Volume 1 - Fundamentos Matemáticos-Mecânicos. 1. ed. São Vicente: Willy Ank de Morais ? São Vicente: WILLY ANK - Soluções para o Setor Metal-Mecânico, 2018. v. 1. 104p.

Copyright © 2019 ISESC