

AVALIAÇÃO DO ENCHARQUE DA PLACA BASEADA NO CÁLCULO DA ENERGIA DE DEFORMAÇÃO¹

Mariana Valinhos Barcelos²
Raiane Oliveira Reis Lima³
Leonardo Lira Alves⁴

Resumo

A estabilidade durante a laminação está diretamente ligada com a qualidade do aquecimento da placa. Este trabalho tem como objetivo avaliar o encharque da placa com base no cálculo da energia de deformação, alcançada a partir da coleta de dados obtidos durante o processo de desbaste da placa no decorrer de 9 meses. A energia de deformação será um novo parâmetro de controle de processo, pois a partir desta, tem-se mais precisamente a condição de qualidade de aquecimento da placa. Essa implantação será útil tanto durante o processo, indicando correções para as condições críticas de acordo com composição e geometria da placa, quanto posteriormente ao processo, na investigação de ocorrências nocivas, ausentando ou não a responsabilidade do Forno de Reaquecimento. Para o presente trabalho foi escolhido como alvo de estudo o aço ASTM A36 que é um aço de aplicação estrutural e pode-se dizer ser consideravelmente crítico no que se diz respeito à laminação.

Palavras-chave: Encharque; Laminação; Energia de deformação na laminação.

ANALYSIS OF SOAKING SLAB BASED ON THE CALCULATION OF DEFORMATION ENERGY

Abstract

The stability during rolling is directly linked to the quality of the heating slab. This study aims to evaluate the soaking slab based on the calculation of deformation energy, which was achieved by gathering data obtained during the roughing mill process over the course of 9 months. Deformation energy will be a new parameter for process control, because of this, the quality of the heating slab has been more precise. This deployment will be useful both during the process, indicating corrections to be made on critical conditions according to the slab's composition and geometry, and also later in the process, in research harmful occurrences, being the responsibility of the reheating furnace or not. For this project, ASTM A36 steel was chosen as the primary target of study since it's a structural steel and can be said to be significantly critical regards to rolling.

Key words: Soaking; Rolling mill; Deformation energy on rolling mill.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Professora, curso de Engenharia Metalúrgica, IFES, ES, Brasil.*

³ *Engenheira Metalúrgica, graduada no IFES, ES, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, ArcelorMittal Tubarão, ES, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Uma das características de fundamental importância no processo de laminação a quente é a qualidade do aquecimento da placa. Pois o objetivo é aquecer as placas de forma tal que a temperatura seja compatível com as necessidades de laminação e suficientemente homogênea. Objetiva-se uma diferença de temperatura entre a superfície da placa e o centro a menor possível. Quanto menor for este gradiente térmico maior será o nível de encharque da placa e melhores serão as condições de laminação, principalmente no que diz respeito a condições críticas de processo que são espessuras finas, altas larguras e também para os aços que têm valores mais elevados de tensão de escoamento.

O presente trabalho mostra como foi implementado o cálculo da energia de deformação despendida na laminação de desbaste, com intuito de adicioná-la como um novo parâmetro de processo que permita avaliar, quantitativamente, a homogeneidade térmica da placa, ou seja, indicar com mais precisão a condição de encharque da placa, que por sua vez, se dentro de parâmetros pré-estabelecidos, poderá garantir boa estabilidade no processamento posterior no trem acabador.^(1,2)

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definição

Energia de deformação é o acréscimo de energia associada com a deformação do material, ou seja, é o trabalho realizado pelo aumento gradual da carga aplicada neste material. Também é definida como a energia de deformação por unidade de volume, sendo igual à área abaixo da curva do diagrama tensão-deformação de um determinado material. Durante a deformação plástica de um metal, certa quantidade de energia é armazenada. A maior parte do trabalho realizado na deformação aparece na forma de calor e somente uma fração deste trabalho fica retida. A quantidade de energia armazenada depende principalmente da deformação, da velocidade de deformação, da temperatura que o processo é realizado.^(3,4)

2.2 Cálculo

Antes da introdução do cálculo da energia de deformação, se torna necessário explicitar algumas definições, como de comprimento do arco de contato, redução relativa, entre outras.

2.2.1 Comprimento do arco de contato

Define-se arco de contato o arco medido sobre o cilindro de laminação, compreendido entre os pontos limites do contato entre o cilindro e a chapa. Estes pontos são caracterizados segundo a direção de laminação: ponto de entrada A e ponto de saída C. Geralmente o raio dos cilindros de laminação é muito maior que a espessura da chapa ($R \gg h_i$), é então, razoável substituir o arco AC pela projeção $\overline{AB} = L$. Desta forma, analisando o triângulo AÔB, é possível calcular:⁽³⁾

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (1)$$

Onde L , R e Δh são respectivamente o comprimento do arco de contato, o raio e a diferença entre as espessuras de entrada e saída.

É então, aceitável assumir:

$$R\Delta h \gg \frac{\Delta h^2}{4} \quad (2)$$

Em consequência, resulta para o arco de contato L :⁽³⁾

$$L = \sqrt{R\Delta h} \quad (3)$$

A Figura 1 ilustra as relações geométricas utilizadas nos cálculos anteriores.

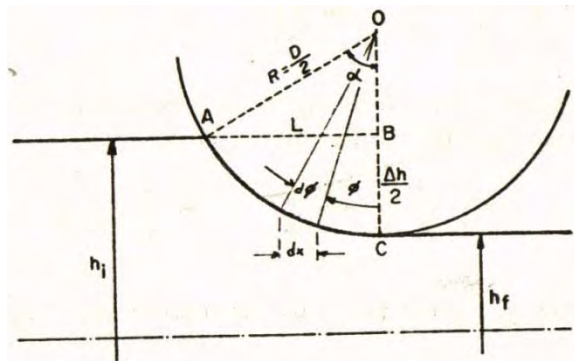


Figura 1. Relações geométricas na laminação.⁽³⁾

2.2.2 Raio achatado do cilindro

Durante o desgaste o cilindro de trabalho sofre uma deformação, que causa um ligeiro achatamento (Figura 2), para tornar os cálculos mais precisos, torna-se necessário fazer essa correção.

Hitchcock e Trincks⁽⁵⁾ derivaram a seguinte equação para o comprimento do arco de contato do cilindro achatado (L'):

$$L' = X_0 + X_2 \quad (4)$$

Onde

$$X_0 = \frac{8R(1-\nu_r^2)}{\pi E_r} P_a \quad (5)$$

e

$$X_2 = (L^2 + X_0^2)^{1/2} \quad (6)$$

Onde R , ν_r e E_r são respectivamente, raio do cilindro, coeficiente de Poisson para o material do cilindro e módulo de elasticidade do material do cilindro. Tem-se, que o raio achatado do cilindro é igual a Equação 7.

$$R' = \frac{R [1 + 16P(1-\nu_r^2)]}{\pi E_r w \Delta h} \quad (7)$$

Onde P , w e Δh são respectivamente, força, largura e variação da espessura.

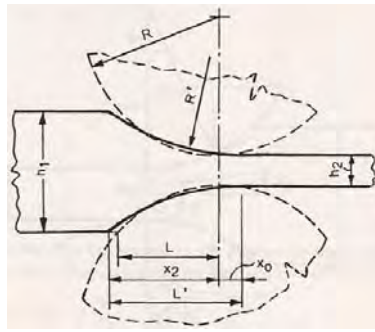


Figura 2. Representação do achatamento dos cilindros.⁽⁶⁾

2.2.3 Resistência média a deformação

Em geral a resistência média à deformação (K_{wm}) é obtida pela Equação 8:^(2,6)

$$K_{wm} = \frac{P}{W \sqrt{R \Delta h}} \quad (8)$$

O método desenvolvido por Sims,⁽⁷⁾ defende que o atrito ocorre apenas na zona de contato do cilindro. Definindo então, que a resistência à deformação (K_{wm}) pode ser apresentada da maneira:

$$K_{wm} = \frac{P}{w \sqrt{R' \Delta h Q}} \quad (9)$$

Onde P, w, R', Δh e Q são respectivamente, força, largura da tira, raio achatado, variação da espessura e fator geométrico. O fator geométrico é introduzido no cálculo, para tornar o mesmo mais próximo das condições reais de laminação. E é definido pela Equação 10.

$$Q = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r}{r} \right)^{1/2} \left\{ \pi \tan^{-1} \left(\frac{r}{1-r} \right)^{1/2} - \left(\frac{R'}{h_{saída}} \right)^{1/2} \ln \left[\left(\frac{h_n}{h_{saída}} \right)^2 (1-r) \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

Onde r, R', $h_{saída}$, h_n são respectivamente redução relativa, raio achatado, espessura de saída e espessura no ângulo neutro. Sendo a redução relativa:

$$r = 1 - h_{saída} / h_{entrada} \quad (11)$$

A espessura no ângulo neutro (Figura 3) é aquela na qual a velocidade da placa se torna igual à velocidade do cilindro e pode ser calculada a partir da Equação 12.

$$h_n = 2R' [1 - \cos(\phi_n)] + h_{saída} \quad (12)$$

Onde R', ϕ_n e $h_{saída}$ são respectivamente, raio achatado, ângulo neutro e espessura de saída.

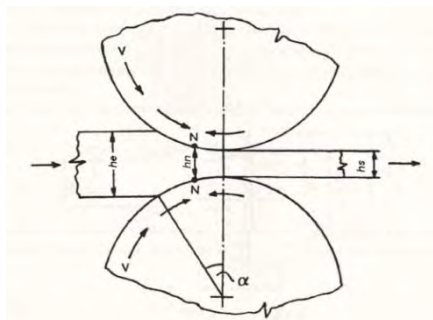


Figura 3. Espessura no ângulo neutro.⁽⁶⁾

Analogamente, ângulo neutro é o ângulo no qual a velocidade da placa se torna igual à velocidade do cilindro. Sendo representado pela Equação 13.

$$\phi_n = \left(\frac{h_{saída}}{R}\right)^{1/2} \tan \left[\frac{\pi}{8} \left(\frac{h_{saída}}{R}\right)^{1/2} \ln(1-r) + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{r}{1-r}\right)^{1/2} \right] \quad (13)$$

A Figura 4 ilustra o ângulo neutro.

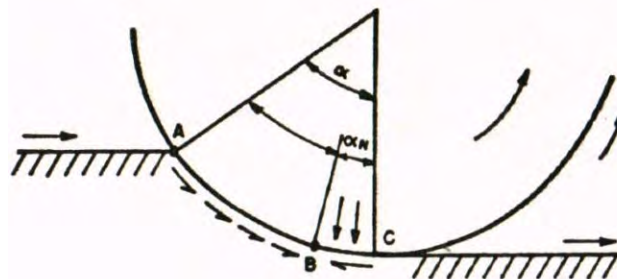


Figura 4. Ângulo neutro.⁽³⁾

2.2.4 Energia de deformação

Será utilizada a mesma metodologia utilizada por Barbosa et al.,⁽²⁾ para o cálculo da energia de deformação, segundo Pavlov, citado em Wusatowski,⁽⁸⁾ a energia de deformação (A_w) pode ser calculada através da Equação 14.

$$A_w = K_{wm} V \ln \frac{h_e}{h_s} \quad (14)$$

Onde K_{wm} , V , h_e e h_s são respectivamente a resistência média à deformação, o volume do material laminado, a espessura de entrada e a espessura de saída.

A energia de deformação é expressa em unidades obtidas pelo produto de unidade de comprimento por unidade de força. No Sistema Internacional de Unidades, energia é expressa em N/m. Essa unidade é chamada de joule (J).⁽²⁾

2.2.4.1 Implantação do cálculo da energia de deformação específica

O LTQ processa uma enorme gama de tipos de aços e dimensões de placas. A espessura da placa é constante, mas a largura varia em função dos pedidos dos clientes e o comprimento em função do peso da bobina e/ou do plano de corte da Aciaria. Isso implica em placas de volumes variados, mesmo se tratando de uma campanha de um único tipo de aço. Como mostra a Equação 14, o valor da energia de deformação varia diretamente com o volume da placa. Assim sendo, se quisermos comparar a energia de deformação de uma placa em relação à outra, sem o efeito da variação dimensional existente entre elas, temos que calcular a energia de deformação específica, ou seja, a energia de deformação consumida para desbastar a placa por unidade de volume.⁽²⁾

Foi utilizada a seguinte equação, para calcular a energia de deformação específica no processo de desbaste da placa:

$$\frac{A_w}{V} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\sqrt{R\Delta h Q}} \ln \frac{h_e}{h_s} \quad (15)$$

Onde P , W , n , V , Q , h_e e h_s são respectivamente a força de laminação, a largura do material, o número total de passes de desbaste, o volume do material laminado, o fator geométrico, a espessura de entrada e a espessura de saída.

Primeiramente, calcula-se a razão da força de laminação média pela projeção do arco de contato e multiplica-se pela redução verdadeira em cada passe de laminação. Após o último passe é feito o somatório dos valores parciais e, finalmente, divide-se o valor encontrado pela largura da tira. Este resultado representa a energia de deformação específica, ou seja, por unidade de volume.^(2,8)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O material que utilizado foi um aço de qualidade estrutural o ASTM A36, sob a norma AS1770Y001.

Tabela 1. Composição química aço ASTM A36⁽⁴⁾

| Norma | C (máx.) | Mn (máx.) | Si (máx.) | P (máx.) | S (máx.) |
|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| ASTM A36 | 0,26 | 0,70 | 0,40 | 0,040 | 0,05 |

3.2 Métodos

3.2.1 Coleta dos dados

Foram reunidos dados de laminação do período de 9 meses, sendo compreendidos de Setembro de 2011 a Maio de 2012.

3.2.2 Cálculos

Todos os cálculos foram realizados em planilhas do Microsoft Excel 2007, compreendidos em 10 passos, sendo eles:

- Passo 1: o CDP possui valores de força do topo, meio e base da placa, então, inicialmente foi feito o cálculo da média das forças em cada passe, desprezando os valores nulos;
- Passo 2: como se tem os dados do diâmetro dos cilindros superior e inferior, calculou-se a média dos raios dos cilindros de trabalho;
- Passo 3: também se tem para a espessura, os valores de topo, meio e base em cada passe, calculou-se então a média da espessura em cada passe;
- Passo 4: como comentado anteriormente, para obter um valor mais exato, considerou-se o achatamento do cilindro que ocorre durante a laminação, sendo para tal utilizada a Equação 7. Para o material do cilindro em questão utilizamos o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de Elasticidade (E_r) que foram respectivamente 0,3 e 21092,1Kgf/mm², e calculado então, o a raio achatado do cilindro em cada passe;
- Passo 5: foi calculada a redução relativa em cada passe pela Equação 11;
- Passo 6: foi calculado a ângulo neutro em cada passe, pela Equação 13, utilizando a espessura de saída do passe ($h_{saída}$) e os termos já calculados raio achatado (R') e redução relativa (r);
- Passo 7: foi calculada a espessura do material no ângulo neutro em cada passe, pela Equação 12;
- Passo 8: calculou-se o fator geométrico, que como explicado, foi inserido ao cálculo para dar mais exatidão ao mesmo. Sendo utilizada a Equação 10;
- Passo 9: Foi calculada então, a resistência média à deformação em cada passe, utilizando a Equação 9; e

- Passo 10: Tendo em mãos os valores obtidos nos passos anteriores, foi possível fazer o cálculo da Energia de Deformação específica, utilizando a Equação 15, onde foram utilizadas as espessura de entrada ($h_{entrada}$) e de saída ($h_{saída}$), a variação de espessura (Δh), a largura (w) e os termos já calculados raio achatado (R') e média da força (P). Após o cálculo da energia de deformação específica foram realizados estudos de correlação entre a mesma com outros parâmetros do processo através da função = Correl do Microsoft Excel 2007.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra o comportamento da força de laminação com a temperatura.

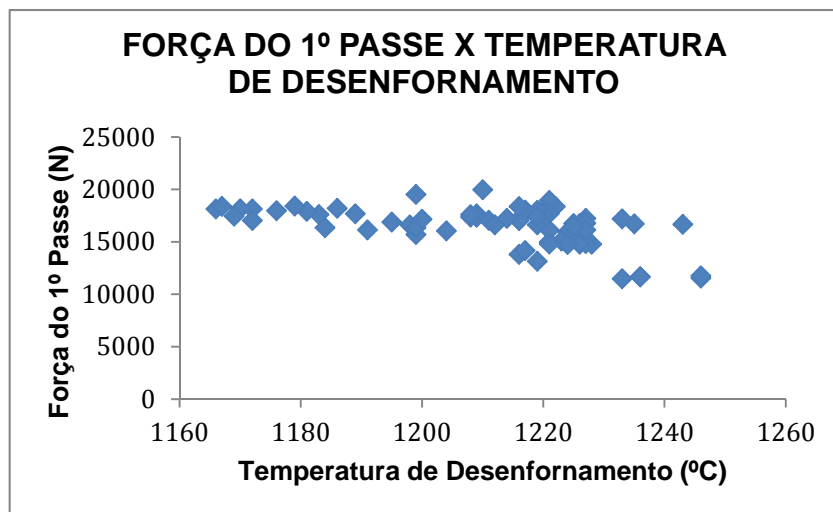


Figura 5. Comportamento da força despendida no primeiro passe do desbaste com a temperatura de desenfornamento.

A partir dos dados no gráfico podemos observar que a força de laminação despendida no primeiro passe é inversamente proporcional à temperatura de desenfornamento, gerando valores de -0,533 e 0,284 para correlação linear e para o quadrado do coeficiente de correlação respectivamente. Estes valores indicam uma correlação moderada entre as amostras e também um baixo coeficiente de determinação, ou seja baixo o nível de informação que explicada pelos regressores presentes no modelo.

Resultado esperado, visto que quanto maior o aquecimento das placas espera-se um menor esforço das cadeiras de laminação para realizar uma mesma redução.

Já A Figura 6 mostra a variação da energia de deformação específica despendida no desbaste com a temperatura de desenfornamento.

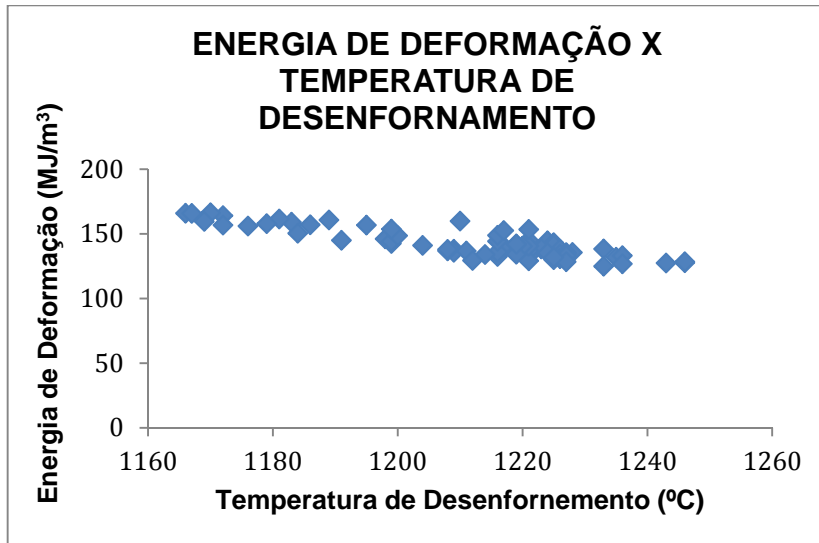


Figura 6. Comportamento da energia de deformação específica com a temperatura de desenfornamento.

A partir dos dados da Figura 6 podemos observar valores de $-0,856$ e $0,734$ para correlação linear e para o quadrado do coeficiente de correlação respectivamente. Estes valores indicam uma correlação forte entre as amostras e também um alto coeficiente de determinação, ou seja, alto nível de informação exemplificada pelos regressores presentes no modelo.

Visando validar os resultados acima, foi feita a mesma análise para a temperatura após o desbaste.

A Figura 7 mostra a variação da energia de deformação específica com a temperatura medida pelo pirômetro ao final do desbaste.

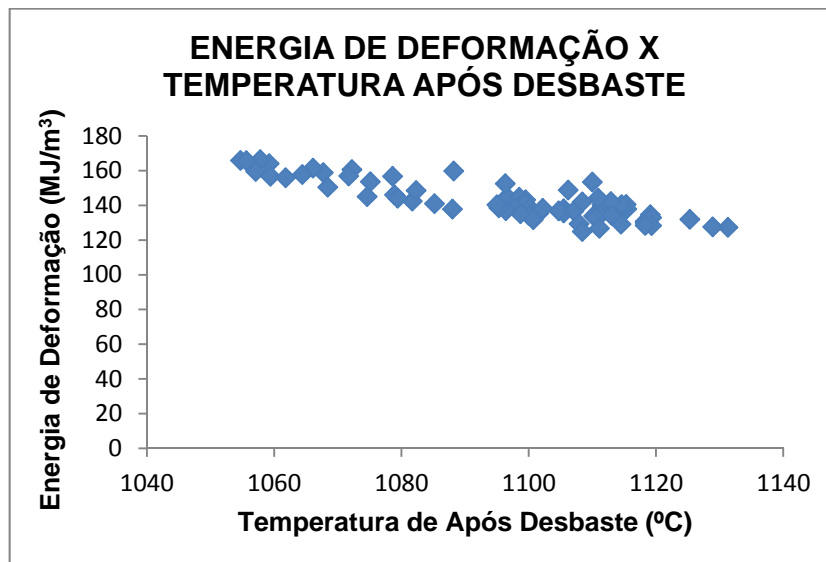


Figura 7. Comportamento da Energia de Deformação Específica com a temperatura medida pelo pirômetro ao final do Desbaste.

Analogamente, foram encontrados valores de $-0,861$ e $0,742$ para correlação linear e para o quadrado do coeficiente de correlação respectivamente, referente à energia de deformação específica e a temperatura após o desbaste.

Estes valores indicam uma correlação forte entre as amostras e também um alto coeficiente de determinação, ou seja, alto nível de informação exemplificada pelos regressores presentes no modelo.

Dados coerentes, pois à medida que se reduz a temperatura da placa, tem-se um aumento da resistência a deformação, conseqüentemente, um aumento da energia de deformação. Este fato corrobora com a correlação encontrada Na Figura 6.

No entanto, como a produção geralmente trabalha concomitantemente com dois fornos de aquecimento, foi feito um estudo comparando a energia de deformação de placas aquecidas no Forno 1 e Forno 2. Conforme mostrado na Figura 8, foi encontrada uma clara diferença nos resultados provenientes do Forno 1 e do Forno 2. A energia de deformação específica encontrada para os materiais aquecidos no Forno 1 foi superior a dos materiais aquecidos no Forno 2.

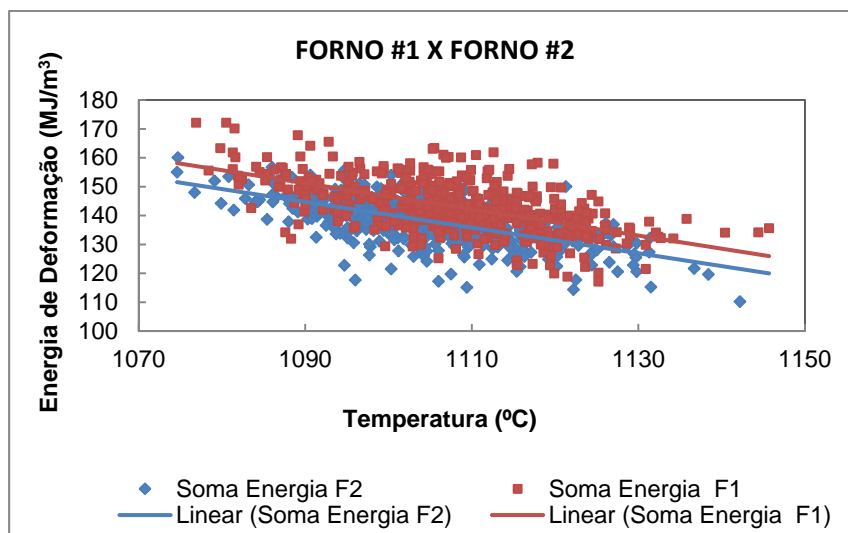


Figura 8. Diferença entre os resultados de Energia de Deformação dos Fornos 1 e 2.

Essa diferença possivelmente ocorre devido ao Forno 1 ser mais antigo que o Forno 2, logo, o primeiro apresenta tanto estrutura mais desgastada e danificada (revestimento refratário comprometido, queimadores obstruídos, etc.), além disso, foi calibrado há mais tempo.

Com objetivo de aprofundar o estudo e estimar limites superior e inferior para a energia de deformação, foi realizado um estudo dos materiais sucataados que tiveram alta energia de deformação ocorridas no período de 9 meses do aço A36, como foram obtidos poucos dados, a busca foi estendida para toda gama de aços sucataados produzida no LTQ no período de 16 meses, agrupando estes dados de acordo com suas dimensões e número de passes chegou-se a grupos (Figura 9), com quantidade de dados insuficiente para realização de estudos aonde se chegasse a valores seguros.

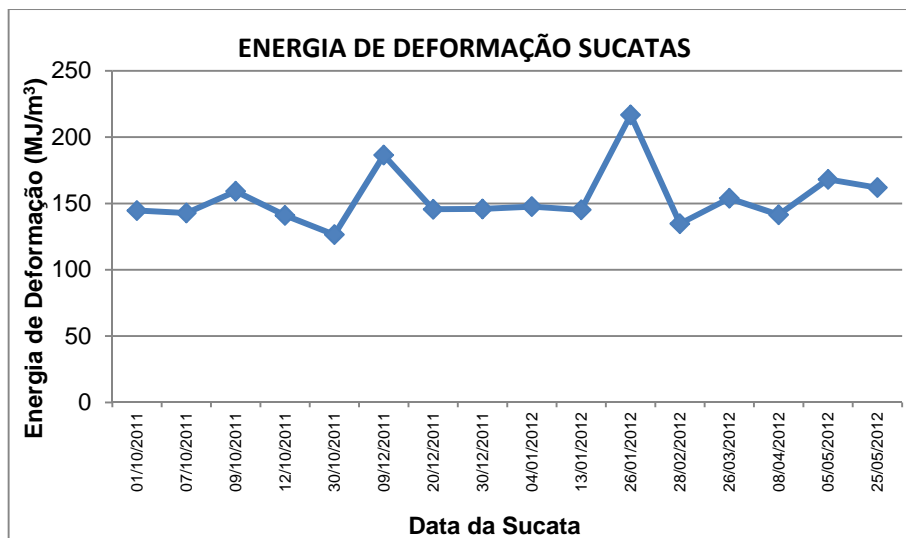


Figura 9. Energia de Deformação de Materiais que sucatarem.

Pela Figura 9, pode-se notar que os valores mantêm uma média, mas é possível identificar dois pontos em destaque. Devido o baixo número de casos não é possível realizar uma análise confiável com base somente nas sucatas durante o período estudado. Outro fator que corrobora para a dificuldade da análise é a distribuição temporal que apresenta uma distribuição homogênea durante o período de análise.

5 CONCLUSÃO

O fato das correlações encontradas entre a energia de deformação específica e as temperaturas de desenformamento e pós Desbaste serem coerentes torna possível a adição da energia de deformação como um novo parâmetro de análise da qualidade do aquecimento das placas, já que os resultados obtidos foram coerentes, uma vez que sabe-se que quanto maior a temperatura, menor será a energia de deformação. A diferença encontrada entre o Forno 1 e o Forno 2 indica que o Forno 2 está mais eficiente quando comparado ao 1. Este resultado pode ser explicado pelo fato do Forno 2 ser mais recente que o 1, logo sua calibração foi feita mais recentemente e por ser mais recente, possivelmente possui uma estrutura menos desgastada, queimadores funcionando de forma mais eficiente. Este dado corrobora para o fato da adição da energia de deformação como um novo parâmetro inclusive para acompanhamento e constatação da necessidade de manutenção e calibração nos fornos de reaquecimento.

O fato de ter-se chegado a pequenos grupos de materiais que sucatarem e que tiveram uma elevada energia de deformação durante o desbaste pode ser um indicativo da eficiência do aquecimento dos fornos de reaquecimento, pois, supõe-se que materiais com alta energia de deformação durante o desbaste são um indicativo do reaquecimento deficiente das placas.

REFERÊNCIAS

- 1 MACHADO, M. L. P. **Processos e equipamentos de laminação de produtos planos de aço**. Vitória: AMT, 2005. v. 1, p. 1 - 32.

- 2 BARBOSA, A. A. et. al. Avaliação do encharque da placa baseada no cálculo da energia de deformação no processo do desbaste. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 43., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABM, 2006.
- 3 HELMAN, H. et. al. **Fundamentos da laminação**. Belo Horizonte: UFMG, Fundação Cristiano Otoni, 1986.
- 4 BEER, F.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Macron Books, 1995.
- 5 HITCHCOCK, J.H; TRINKS, W. **Roll neck bearings**. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1935.
- 6 GINZBURG, V. B. **Steel-Rolling technology** : Theory and Practice. New York: Marcel Dekker, Inc., 1989.
- 7 SIMS, R.B. **The calculation of roll force and torque in hot rolling mills**.
- 8 Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, 1967. vol. 168, p. 186 - 190.
- 9 WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of rolling**. Oxford: Pergamon Press, 1969. p. 216 - 309.