

MODELAGEM ESTATÍSTICA POR REGRESSÃO NÃO LINEAR DO EFEITO DA DUREZA SOBRE A CONFORMABILIDADE DO AÇO SAE 1045 TREFILADO

Matheus Luis Petris (UDESC) E-mail: matheus.petris@gmail.com

Resumo: Conformabilidade é a capacidade que o material possui de deformar-se plasticamente, em processos de conformação, sem danos aos requisitos mecânico, dimensional, metalúrgico e visual. Há uma série de fatores que influenciam a conformabilidade, sendo a composição química, microestrutura, acabamento superficial, encruamento e dureza os principais. Nesse contexto, esta pesquisa mensurou o efeito da dureza sobre a conformabilidade do aço SAE 1045 trefilado, através de ensaios de dureza e compressão em amostras do material, sob efeito de diferentes tratamentos térmicos. Além de analisado como fornecido, o material de análise foi submetido a seis tratamentos térmicos distintos: recozimento, normalização, coalescimento, têmpera com resfriamento em água, têmpera com resfriamento em óleo e têmpera com resfriamento em óleo seguido de revenimento, com a finalidade de compreender uma ampla faixa de durezas e deformações por compressão, como resultado dos posteriores ensaios mecânicos. A compatibilidade da microestrutura obtida com o tratamento térmico aplicado foi verificada por meio de análise metalográfica, para constatar o êxito do processo e a expectativa em relação aos dados dos ensaios. Após análise dos pares ordenados dureza-deformação, foi apresentado o modelo estatístico que prevê o comportamento exponencial do decaimento da conformabilidade com o aumento da dureza, com valores de correlação satisfatórios, validados via coeficiente de determinação.

Palavras-chave: SAE 1045 Trefilado, Dureza, Conformabilidade, Regressão Não Linear, Tratamento Térmico.

STATISTICAL MODELING BY NON-LINEAR REGRESSION OF THE HARDNESS EFFECT ON THE SAE 1045 DRAWN STEEL FORMABILITY

Abstract: Formability is the material's ability to plastically deform, in forming processes, without damage to mechanical, dimensional, metallurgical and visual requirements. There are several factors that influence formability, such as chemical composition, microstructure, surface finish, work hardening and hardness being. In this context, this research measured the effect of hardness on the SAE 1045 drawn steel formability, through hardness and compression tests on samples under the effect of different heat treatments. In addition to being analyzed as supplied, the samples of the analysis material were subjected to six different heat treatments: annealing, normalization, coalescence, water hardening, oil hardening, and oil hardening followed by tempering, in order to understand a wide range of hardness and compression deformations as a result of subsequent mechanical tests. The compatibility of the microstructure obtained with the heat treatment applied was verified by means of metallographic analysis to verify the success of the process and the expectation in relation to the test data. After analyzing the hardness-deformation ordered pairs, the statistical model that predicts the exponential behavior of the conformability decay with increasing hardness was presented, with satisfactory correlation values validated via the coefficient of determination.

Keywords: SAE 1045 Drawn Steel, Hardness, Formability, Nonlinear Regression, Heat Treatment.

1. Introdução

Fatores como o avanço tecnológico, maior velocidade de fabricação e melhor qualidade nas pesquisas, vêm tornando cada vez mais competitiva a indústria de conformação de aço. Nesse contexto, o desenvolvimento de equações que possibilitem prever o efeito que os tratamentos térmicos possuem sobre as propriedades mecânicas do material são fundamentais para suprir a demanda da indústria e da comunidade científica por métodos

que permitam maior velocidade na tomada de decisão em torno das especificações ideais do aço para conformação.

A conformação mecânica pode ser definida como o processo em que se aplica uma carga sobre um determinado material com o intuito de deformá-lo plasticamente, obrigando-o a adquirir a forma desejada. A aplicação de tratamentos térmicos no aço, possui influência sobre a estrutura cristalina que constitui os grãos e, portanto, sobre as propriedades mecânicas como a dureza, tensão de escoamento, ductilidade, entre outras, favorecendo ou não a conformabilidade do material (CALLISTER, 2009).

Nesse estudo, o efeito da dureza sobre a conformabilidade do aço SAE 1045 trefilado foi equacionado por meio de um modelo estatístico de regressão não linear. Para isso, amostras do material foram preparadas, caracterizadas e submetidas a seis diferentes tratamentos térmicos de comum aplicação na indústria. Após finalizados os tratamentos térmicos, as amostras foram, em seguida, submetidas a ensaios mecânicos de dureza e compressão. A variedade de tratamentos térmicos aplicados permitiu a aquisição de dados em uma ampla faixa de durezas e deformações por compressão, de 136 HV a 698 HV e 4% a 72%, respectivamente.

A verificação da compatibilidade entre a microestrutura das amostras e o tratamento térmico nelas aplicado foi realizada por análise metalográfica, de modo a constatar o sucesso dos tratamentos térmicos, definir a expectativa em relação às propriedades mecânicas e proporcionar confiança nos dados adquiridos.

Por fim, os pares ordenados dureza-deformação foram dispostos em um gráfico de dispersão para modelagem estatística por regressão não linear. A qualidade da equação exponencial obtida e a correlação com os dados do ensaio foi verificada por meio do coeficiente de determinação.

2. Metodologia Experimental

2.1 Caracterização dos Corpos de Prova

As amostras do material foram obtidas a partir de uma barra de seção circular de aço SAE 1045 trefilado, a qual foi selecionada por meio do catálogo de produtos da Gerdau. A barra foi dividida em amostras de formato cilíndrico e dimensões nominais de 10 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento. De acordo com a norma NBR 5739, os corpos de prova para ensaio de compressão não devem possuir proporção de diâmetro-comprimento inferior a 1:1 e superior a 1:2. A proporção de 1:1.5 selecionada para essa pesquisa teve a intenção de evitar a deformação dos corpos de prova por cisalhamento ao longo dos ensaios mecânicos de compressão.

Os corpos de prova tiveram suas extremidades retificadas para garantir a qualidade do ensaio. Após a conclusão das operações de usinagem, as amostras foram identificadas e os diâmetros e comprimentos de cada uma delas medidos por meio de paquímetro e registrados.

Para a caracterização da composição química do material, uma amostra foi submetida à análise de espectrometria por fluorescência de raios X, que apontou a composição química apresentada na Tabela 01.

Tabela 01 – Composição química obtida para a amostra de aço SAE 1045 trefilado

Elemento	C	Mn	Si	Zn

Concentração em massa (%)	0.470	0.750	0.225	0.034
---------------------------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Autor, 2022.

2.2 Aplicação dos Tratamentos Térmicos

As amostras foram divididas em grupos de quatro unidades, conforme a Figura 01 (a), e submetidas a seis diferentes tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos foram realizados em forno mufla no laboratório de materiais e ensaios da UDESC-CCT. Para facilitar o manuseio e evitar a descarbonetação durante o aquecimento, os corpos de prova foram colocados em um recipiente, como indica a Figura 01 (b) e cobertos por granulado de baixo teor de carbono.



Figura 01 - (a) À esquerda, corpos de prova reunidos em grupos de quatro unidades; (b) À direita, recipiente utilizado para guarnição das amostras e granulado de baixo teor de carbono

Fonte: Autor, 2022.

Os tratamentos térmicos foram realizados conforme orientação do catálogo do fornecedor (Gerdau) e a temperatura de 966°C foi selecionada para a aplicação do recozimento, normalização e têmpera, a uma taxa de aquecimento de 20°C/min, com tempo de temperatura de patamar de uma hora. Após a permanência no forno, um grupo de corpos de prova foi retirado do forno e resfriado em água, dois grupos foram retirados e resfriados em óleo, o quarto grupo de amostras foi retirado e resfriado ao ar e o quinto grupo permaneceu dentro do forno, após seu desligamento, para lento resfriamento.

O revenimento foi aplicado em um grupo de amostras temperado em óleo. Com base na Figura 02 foi estabelecida a temperatura desejada de 300°C com dureza esperada de aproximadamente 45 HRC. O grupo de amostras foi mantido por uma hora em estufa à temperatura de 300°C.

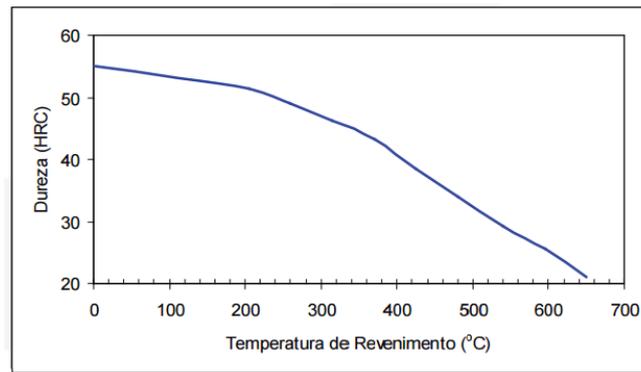


Figura 02 - Curva de dureza em HRC em função da temperatura de revenimento (°C)

Fonte: GGDMETALS. Catálogo Técnico: Aços e Metais. 2020.

O tratamento de coalescimento foi realizado em duas etapas: primeiramente, os corpos de prova foram submetidos a temperatura de 750°C por uma hora e em seguida submetidos à temperatura de 690°C por 15 horas. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno.

Após os tratamento térmicos, uma peça de cada grupo amostral foi embutida, lixada, polida, atacada com nital 1% e submetida a análise metalográfica via microscopia óptica (MO), para análise da estrutura cristalina e microestrutura.

2.3 Aplicação do Ensaio Mecânico de Dureza

Três das quatro amostras de cada grupo, após tratadas termicamente, foram submetidas ao ensaio de dureza, sendo a amostra restante direcionada para metalografia. Os ensaios de dureza foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos do CCT-UDESC. As amostras como fornecida, temperada em água e temperada em óleo foram submetidas a ensaio de dureza Rockwell C (HRC). As amostras coalescida, recozida, normalizada e revenida foram submetidas a ensaio de dureza Rockwell B (HRB). Para efeito de comparação, todos os valores de dureza foram convertidos para a escala de dureza Vickers (HV). Em cada amostra, foram tomadas três medidas de dureza espaçadas igualmente ao longo do comprimento da amostra e a média aritmética das três medidas, por fim, representou o índice de dureza da amostra ensaiada.

2.4 Aplicação do Ensaio Mecânico de Compressão

Devido a sua natureza destrutiva, os ensaios mecânicos de compressão uniaxial, aplicados para mensurar a conformabilidade por meio da deformação, foram realizados posteriormente aos ensaios de dureza, para as mesmas três amostras de cada grupo. Para esse ensaio foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos Pantec® de capacidade 1000 kN, apresentada na Figura 03, com calços M2 retificados e lubrificadas com bissulfeto de molibdênio para garantir a deformação uniforme do corpo de prova e evitar o efeito de cisalhamento advindo do atrito entre a face do corpo de prova e a superfície por meio da qual é imposta a carga.



Figura 03 - Máquina universal de ensaios mecânicos Pantec®

Fonte: Autor, 2022.

O comprimento final do corpo de prova resultante da deformação plástica por compressão foi obtido a partir da curva tensão-deformação gerada pelo software da máquina universal, bem como a tensão de escoamento e módulo de elasticidade. A deformação por compressão (C) alcançada para as amostras foi calculada após a realização do ensaio por meio da equação 1, que representa a razão entre a diferença dos comprimentos final (L_f) e inicial (L_o), isto é, deformação, e o comprimento inicial da amostra.

$$C\% = \left| \frac{L_f - L_o}{L_o} \right| \cdot 100\% \quad (1)$$

Foi utilizada a amostra temperada em água, teoricamente com a maior dureza, para definição da carga a ser utilizada nos ensaios de compressão. A carga de 130 kN provocou nesta amostra deformação de aproximadamente 5%, sem falhas, e foi selecionada como parâmetro para os demais ensaios de compressão.

3. Resultados e Discussões

3.1 Metalografia das Amostras

Após a análise metalográfica de uma amostra de cada grupo, foi possível observar que os tratamentos térmicos modificaram significativamente a estrutura cristalina e a microestrutura do material ensaiado, como era esperado. Na Figura 04 foi observada a microestrutura da amostra como fornecida. Na imagem, o tamanho e forma dos grãos indicaram pouca homogeneização, isto é, não foi esperada alta conformabilidade nessa condição, devido, teoricamente, a limitada quantidade de planos de escorregamento.

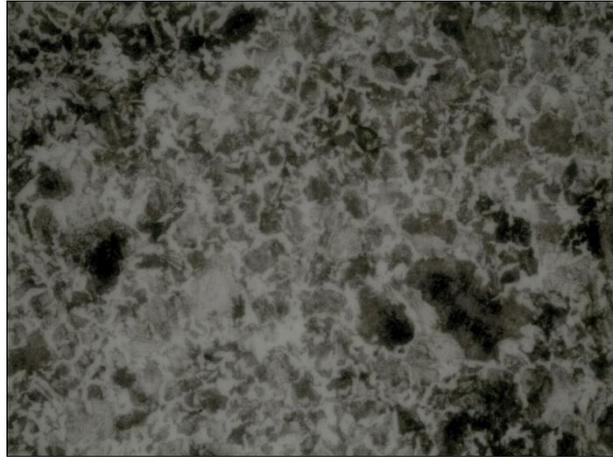


Figura 04 - Metalografia da amostra como fornecida (400x)

Fonte: Autor, 2022.

Na amostra recozida da Figura 05, foi notada maior homogeneização e menor tamanho de grão em relação a amostra da Figura 04, além de estrutura perlítica, sendo assim esperada menor dureza. Por apresentar teoricamente mais planos de escorregamento, houve a expectativa de que essa amostra apresentasse, portanto, maior conformabilidade em relação à amostra anterior.

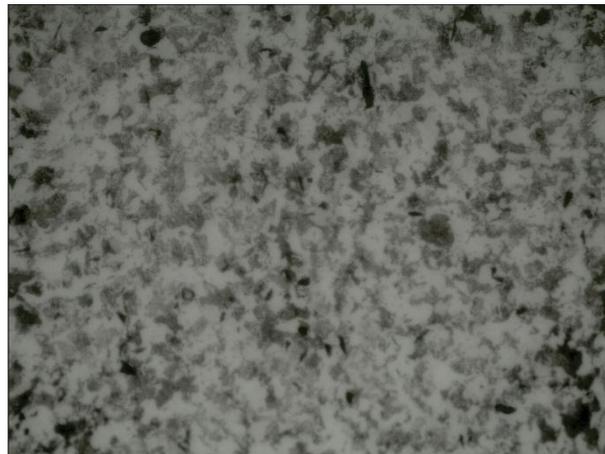


Figura 05 - Metalografia da amostra recozida (400x)

Fonte: Autor, 2022.

Na amostra normalizada da Figura 06, mesmo que tenha sido notado significativo aumento do tamanho de grão em relação à amostra recozida da Figura 05, não foram esperadas diferenças relevantes na dureza e conformabilidade entre essas duas amostras.



Figura 06 - Metalografia da amostra normalizada (400x)

Fonte: Autor, 2022.

Para a amostra coalescida da Figura 07, como esperado, foram percebidos o crescimento e esferoidização dos grãos, o que levou a expectativa de menor dureza e elevada conformabilidade para essa amostra.



Figura 07 - Metalografia da amostra coalescida (400x)

Fonte: Autor, 2022.

A amostra temperada em água da Figura 08, apresentou estrutura definitivamente martensítica, com grãos em forma de agulhas, que em teoria levam a uma menor quantidade de planos de escorregamento relativamente às demais amostras. Foi esperada, para essa configuração, elevada dureza e baixa tenacidade, características que levam a baixa conformabilidade.



Figura 08 - Metalografia da amostra temperada em água (400x)

Fonte: Autor, 2022.

A amostra temperada em óleo da Figura 09, mostrou características similares a amostra temperada em água, porém, com expectativa de menor dureza, decorrente da menor velocidade de resfriamento. Mostrou-se presente a estrutura martensítica, ainda que menos evidenciada em relação à estrutura martensítica da Figura 08, sendo esperada maior conformabilidade em relação a amostra temperada em água.



Figura 09 - Metalografia da amostra temperada em óleo (400x)

Fonte: Autor, 2022.

A amostra temperada em óleo e revenida da Figura 10, assim como na Figura 09, indicou estrutura martensítica, isto é, em teoria, com poucos planos de escorregamento, mas com expectativa de maior alívio das tensões internas em relação às amostras submetidas à têmpera sem revenimento. Por conta da diminuição da dureza e recristalização da estrutura, foi esperada melhor conformabilidade em relação às amostras temperadas sem posterior revenimento.

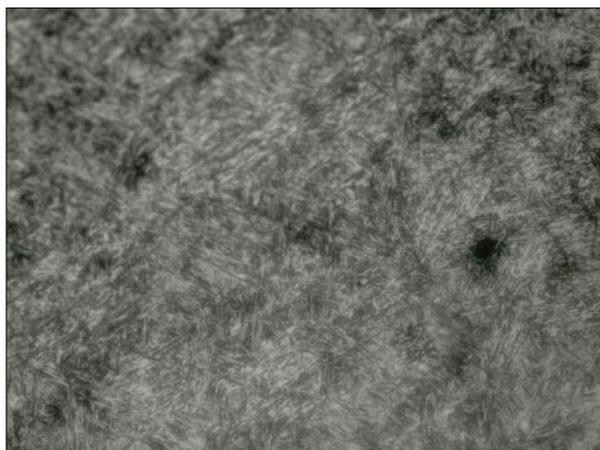


Figura 10 - Metalografia da amostra temperada em óleo e revenida (400x)

Fonte: Autor, 2022.

3.2 Modelagem Estatística do efeito da Dureza sobre a Conformabilidade

Avaliada a compatibilidade da microestrutura das amostras com os respectivos tratamentos térmicos aos quais foram submetidas, nas Tabelas 02 e 03 foram registrados os resultados dos ensaios mecânicos de dureza e compressão, respectivamente, realizados após a conclusão dos tratamentos térmicos. Para os dados obtidos em cada trio de amostras ensaiado, também foram calculados o desvio padrão e a média aritmética.

Tabela 02 - Compilação dos dados de dureza obtidos por meio de ensaio mecânico e valores de desvio padrão e média aritmética para cada trio de amostras ensaiado

Condição do Material	Dureza Vickers, H (HV)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio Padrão	Média Aritmética
Coalescido	153	150	143	5	149
Recozido	136	153	163	14	151
Normalizado	150	136	184	25	157
Revenido	346	321	268	40	312
Temperado em Óleo	436	327	400	56	388
Temperado em Água	594	632	698	53	641
Como Fornecido	232	235	239	4	235

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 03 - Compilação dos dados de deformação por compressão obtidos por meio de ensaio mecânico e valores de desvio padrão e média aritmética para cada trio de amostras ensaiado

Condição do Material	Deformação por Compressão, C (%)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desvio Padrão	Média Aritmética
Coalescido	68	67	72	3	69
Recozido	69	65	65	2	66
Normalizado	61	58	59	2	59
Revenido	17	21	36	10	25
Temperado em Óleo	8	6	7	1	7
Temperado em Água	5	5	4	1	5
Como Fornecido	42	43	44	1	43

Fonte: Autor, 2022.

Ao dispor os dados obtidos em um gráfico de dispersão, vide Figura 11, foi possível notar o rápido decaimento da deformação por compressão com o crescimento da dureza, na faixa de dureza inferior a 400 HV. Na faixa de dureza superior a 400 HV, entretanto, notou-se, relativamente, menor variação da deformação por compressão em relação ao aumento da dureza, o que sugeriu que a regressão linear não seria a melhor escolha para a modelagem do efeito de uma variável sobre a outra.

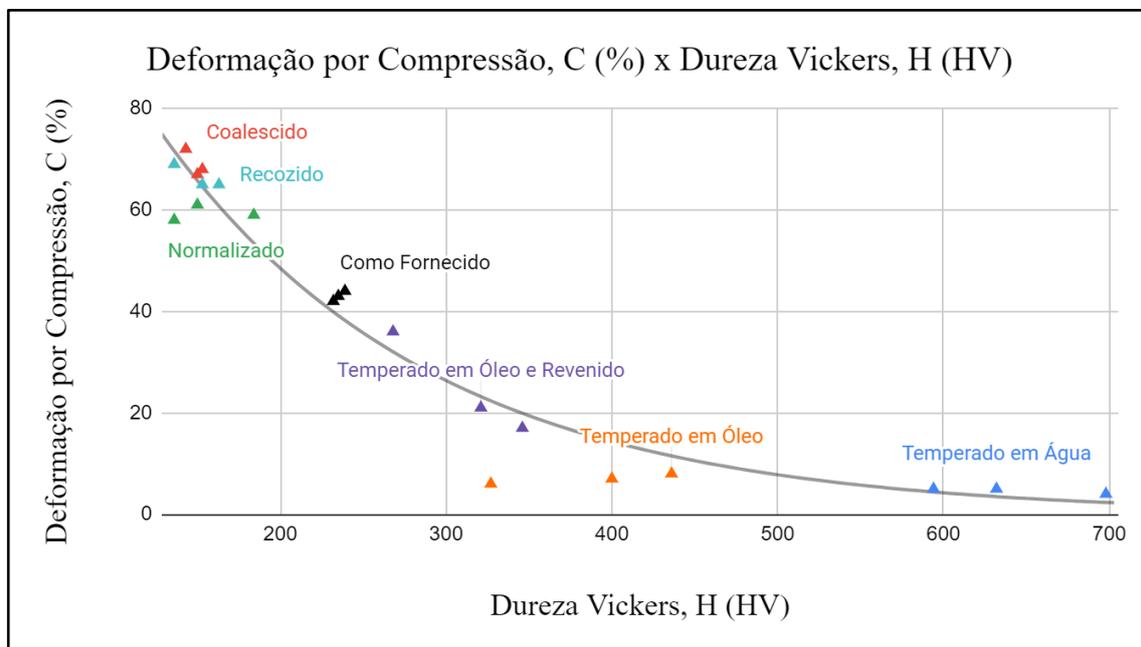


Figura 11 - Dispersão dos dados de deformação por compressão e dureza e linha de tendência exponencial

Fonte: Autor, 2022.

Foram avaliadas, para o conjunto de dados adquiridos, quatro propostas de modelagem

estatística, sendo elas a regressão linear e as regressões não lineares, logarítmica, de série de potências e exponencial. Os dados adquiridos foram organizados no Excel para obtenção dos modelos de regressão e coeficientes de determinação, os quais encontram-se dispostos na Tabela 04.

Tabela 04 - Propostas de regressões linear e não linear para modelagem dos dados

Regressão	Linear	Logarítmica	Série de Potências	Exponencial
Modelo	$C = 78.1 - 0.134H$	$C = 296 - 46 \ln(H)$	$C = 909.10^3 H^{-1.9}$	$C = 164e^{-H/164}$
Coefficiente de Determinação	$R^2 = 0.787$	$R^2 = 0.912$	$R^2 = 0.907$	$R^2 = 0.948$

Fonte: Autor, 2022.

Ao avaliar o coeficiente de determinação (R^2) obtido para as regressões, foi concluído que a regressão não linear exponencial foi a que melhor modelou o efeito da dureza (H) sobre a deformação por compressão (C) do aço SAE 1045 trefilado, com coeficiente 0.948, isto é, explicou 94.8% da variância dos dados e representou correlação estatística satisfatória para o objetivo deste trabalho. A equação 2 obtida é válida para o espaço de inferência de 100 a 700 HV, aproximadamente, que corresponde a faixa de dureza obtida em grande parte dos tratamentos térmicos realizados sobre o material da análise.

$$C\% = 164e^{-H/164} \quad (2)$$

4. Conclusão

Após a análise dos resultados, isto é, a metalografia e os ensaios de dureza e compressão, foi percebida, como esperado, a significativa influência que a dureza exerce sobre a conformabilidade do aço SAE 1045 trefilado.

Anteriormente à análise dos dados, a metalografia das amostras tratadas termicamente permitiu que fosse comparada a compatibilidade da microestrutura obtida com a microestrutura esperada para cada um dos tratamentos térmicos aplicados. Uma vez atestada a compatibilidade, foi possível seguir para a análise estatística com maior confiança de que os dados obtidos refletiam o verdadeiro efeito dos tratamentos térmicos sobre o material.

A aplicação dos seis tratamentos térmicos, discutidos nos resultados, proporcionou o alcance de índices de dureza superiores a 100 HV e inferiores a 700 HV, o que permitiu que os dados obtidos representassem um espaço de inferência satisfatório. A plotagem dos pares ordenados dureza-deformação no plano cartesiano, indicaram que o efeito de uma variável sobre a outra é não linear, isto é, é melhor explicado por modelos estatísticos de regressão não linear.

Dentre os diferentes modelamentos estatísticos, via regressão não linear, analisados, a regressão exponencial apresentou a melhor correlação para os dados, com coeficiente de determinação 0.948, isto é, explica 94.8% da variância da deformação por compressão

com a dureza. O modelo obtido, portanto, apresentou correlação satisfatória, representando adequadamente o rápido decaimento da deformação por compressão com o aumento da dureza, até 400 HV, e a redução desse efeito na faixa de dureza superior a 400 HV.

Por fim, esse trabalho proporcionou não somente um modelo estatístico para a previsão do efeito da dureza sobre a conformabilidade do aço SAE 1045 trefilado, mas também um processo bem estabelecido para que a mesma estratégia de modelagem estatística possa ser replicada para outros materiais pela indústria e comunidade científica.

Referências

- CALLISTER, W. D.** *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, 2009.
- CHANDLER, Harry.** *Heat treaters guide*. Asm Intl, 1995.
- DA ROCHA, Marcio Roberto.** *Aço abnt 1045 esferoidizado: estudo da cinética de coalescimento e correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas*. 2001.
- GGD METALS.** *Catálogo Técnico: Aços e Metais*. 2020.
- HARVEY, Philip D.** *Engineering Properties of Steel*. 1982.
- HIBBELER, R. C.** *Mechanical resistance*. 8th ed. 2011.
- KRAUSS, George, STEELS.** *Processing, Structure, and Performance*. 2nd ed. 2015.
- SAMUELS, Leonard E.** *Light Microscopy of carbon steels, a revised and expanded edition of optical Microscopy of Carbon Steels*, 1999.
- STEINER, Rudolf.** *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. 10th ed. 1990.