ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS EFEITOS DA COMPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA DO FORNO, DO TEMPO DO PROCESSO E DOS PERCENTUAIS DE CARBONO E DE MANGANÊS DO AÇO SAE 1018 NA CEMENTAÇÃO DE PARAFUSOS

Welington Volpatto Morais

Professor Sergio Silva Kucera – Universidade de Caxias do Sul

Professor Sandro Tomaz Martins - Universidade de Caxias do Sul

welingtonvm13@gmail.com

1 RESUMO

Este trabalho objetivou analisar a influência dos percentuais de carbono e de manganês do aço SAE 1018, do tempo de processo e da vazão do gás propano na dureza superficial e na espessura da camada cementada de parafusos. Os resultados foram analisados através de regressão linear. Para a dureza superficial notou-se a forte relação entre a variável percentual de manganês, seguido pela vazão de propano e as demais com uma relação menor. Já para espessura da camada houve uma relação direta com o tempo de cementação seguido por uma relação dez vezes menor do percentual de manganês. A vazão de propano não mostrou influência. Para ambas as variáveis de saída o percentual de carbono explicou apenas cerca 1% das variações.

2 ABSTRACT

This work aimed to analyze the influence of carbon and manganese percentages in SAE 1018 steel, process time and propane gas flow on the surface hardness and the cemented

ISBN: 978-65-89908-00-5

layer of screws. The results were analyzed through linear regression. For the surface hardness, a strong relationship between the percentage of manganese was observed, followed by the propane flow and the others with a lower ratio. As for the layer thickness, there was a direct relationship with the carburizing time followed by a ten times lower ratio of the percentage of manganese. It was also seen that the propane flow did not prove to be influential. For both output variables the carbon percentage explained only 1% of variations.

3 INTRODUÇÃO

A cementação consiste em aumentar a quantidade de carbono superficial em aços com baixos teores deste elemento, assegurando uma superfície dura e um núcleo tenaz. A difusão do carbono no material ocorre a partir da atmosfera do forno. Atualmente há diferentes combinações de gases utilizados. Entre eles a do propano, metanol e nitrogênio. A temperatura da atmosfera de cementação também influencia diretamente na difusão dos elementos e, portanto, na dureza e na espessura da camada , mas também afeta a proporção volumétrica dos gases.

Este trabalho foi desenvolvido junto a uma empresa (hoje fechada) onde variações significativas na dureza superficial e na profundidade da camada cementada de parafusos em aço SAE 1018 eram observadas. Tais variações eram atribuídas ao percentual de carbono na sua composição química. A partir disso, decidiu-se realizar um estudo objetivando analisar as influências dos percentuais de carbono e de manganês no aço, do potencial de carbono da atmosfera e do tempo de processo na dureza superficial e na profundidade da camada cementada. Naquele momento, o estudo foi

ISBN: 978-65-89908-00-5

desenvolvido como trabalho de conclusão de curso (1), defendido em 2018. Este artigo foi escrito com base nele.

Devido à grande quantidade de dados, aplicou-se regressão linear múltipla, que visa a obtenção de uma relação matemática entre as variáveis independentes de entrada e as dependentes de saída (2). Quanto mais variáveis forem consideradas, maior é a correlação entre os dados teóricos e reais, conforme a Equação 1 (3).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \cdots + \beta_p x_p + e \qquad (1)$$

onde: Y é a variável dependente de saída;

x_i, as variáveis observadas (independentes);

e, a diferença entre Y medido e calculado, chamado resíduo;

β_i são os coeficientes de regressão.

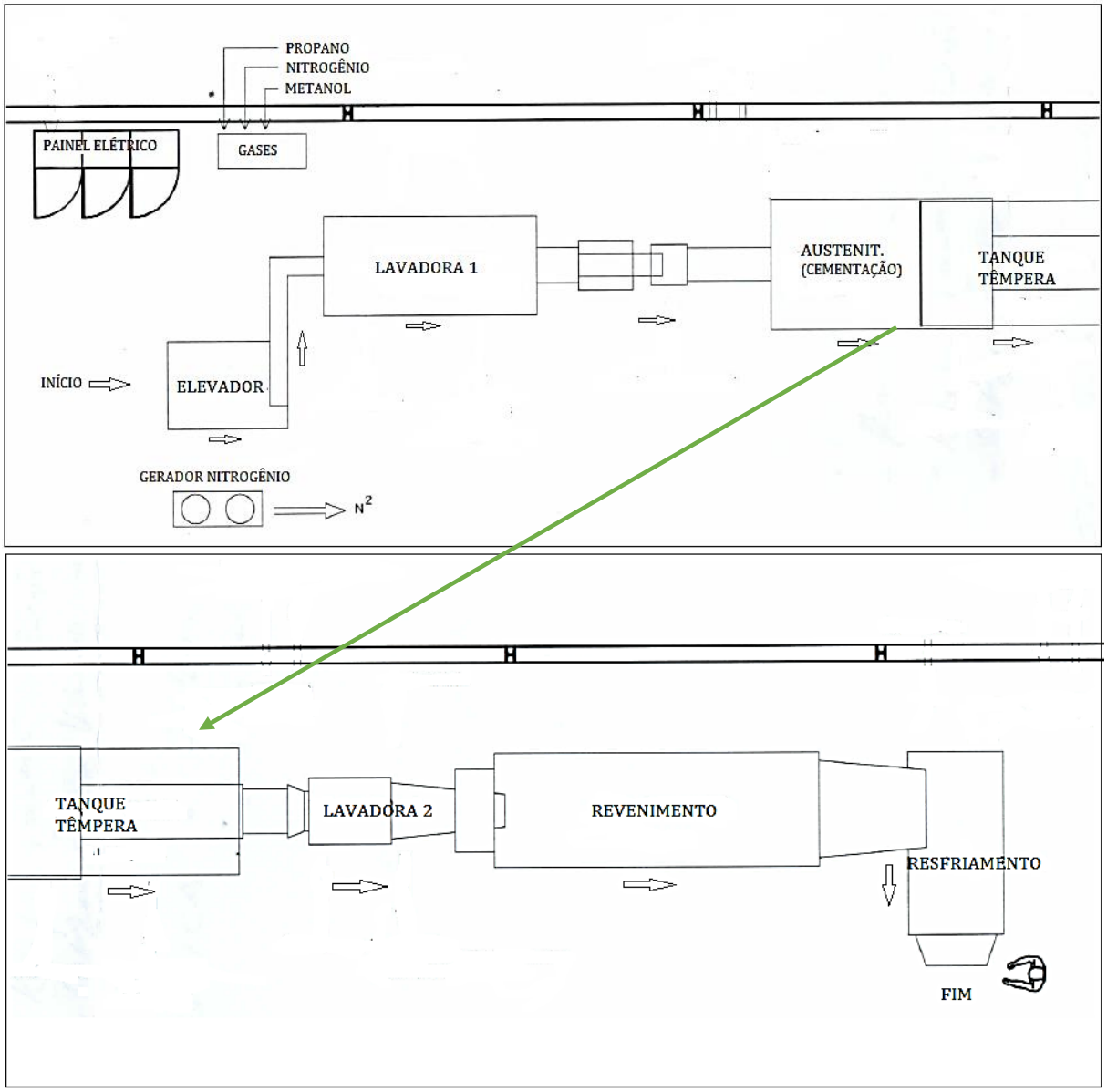
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ETAPAS DO TRATAMENTO TÉRMICO

A Figura 1 ilustra o layout fabril e a sequência das etapas onde a cementação era realizada, detalhadas na sequência.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 1 - Layout do processo de cementação



Fonte: (1)

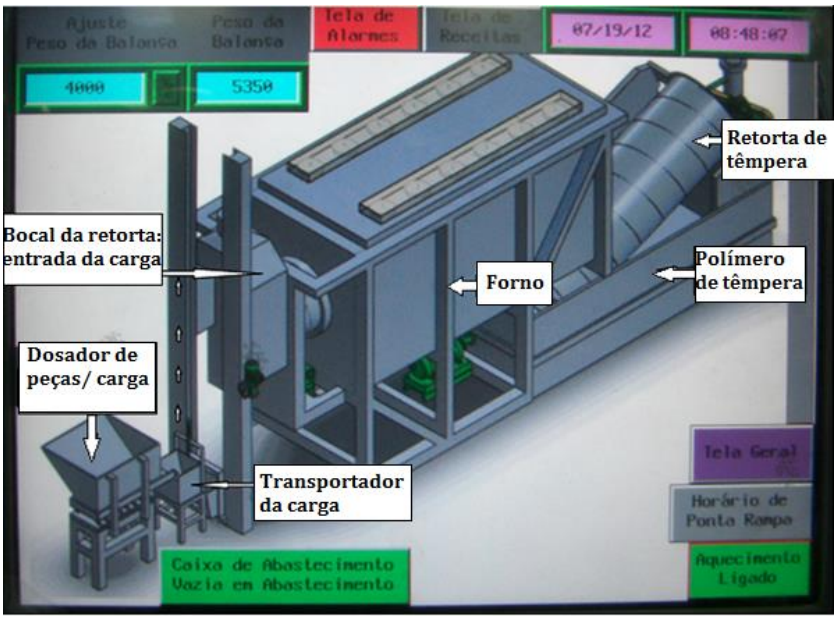
ISBN: 978-65-89908-00-5

No painel elétrico situado no início do processo há uma IHM (interface homem máquina), de onde são definidos o tempo de processo e as vazões de cada gás.

Junto às linhas de alimentação, há manômetros e rotâmetros individuais para nitrogênio, metanol e propano. Para os 2 primeiros gases, as vazões normais eram, respectivamente, de 6 e 13,5 m^3/h. Para o propano, era variada entre 0,7 e 0,9 m^3/h, dependendo do potencial de carbono desejado - medido por uma sonda específica - na atmosfera cementante, normalmente mantida a 900 °C.

O forno (Figura 2) possuía uma retorta helicoidal rotativa interna para conduzir as cargas de parafusos (bateladas de 5 kg) da entrada à saída. Opera em pressão manométrica de 10 mmca, suficiente para evitar a entrada de ar. Após o forno, há o tanque de polímero (mantido entre 42 e 45 °C), onde ocorre a têmpera.

Figura 2 – Imagem dos equipamentos de cementação e têmpera



Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

O tempo de cementação é ajustado via IHM através de valores indicativos, conforme Tabela1, que mostra os valores normalmente usados.

Tabela 1 – Relação entre velocidade da retorta (IHM) e tempo de cementação

Valores indicativos da velocidade da retorta	Tempo por volta	Tempo total (12 voltas)
90	2 min 26 s	29 min 6 s
100	2 min 12 s	26 min 18 s
110	2 min	24 min

Fonte: (1)

Na sequência do processo global (Figura 1), há uma segunda lavagem, após a qual os parafusos são revenidos, à temperatura de 350 °C por cerca de 54 min. Então eles são lavados, resfriados e secos através de um soprador.

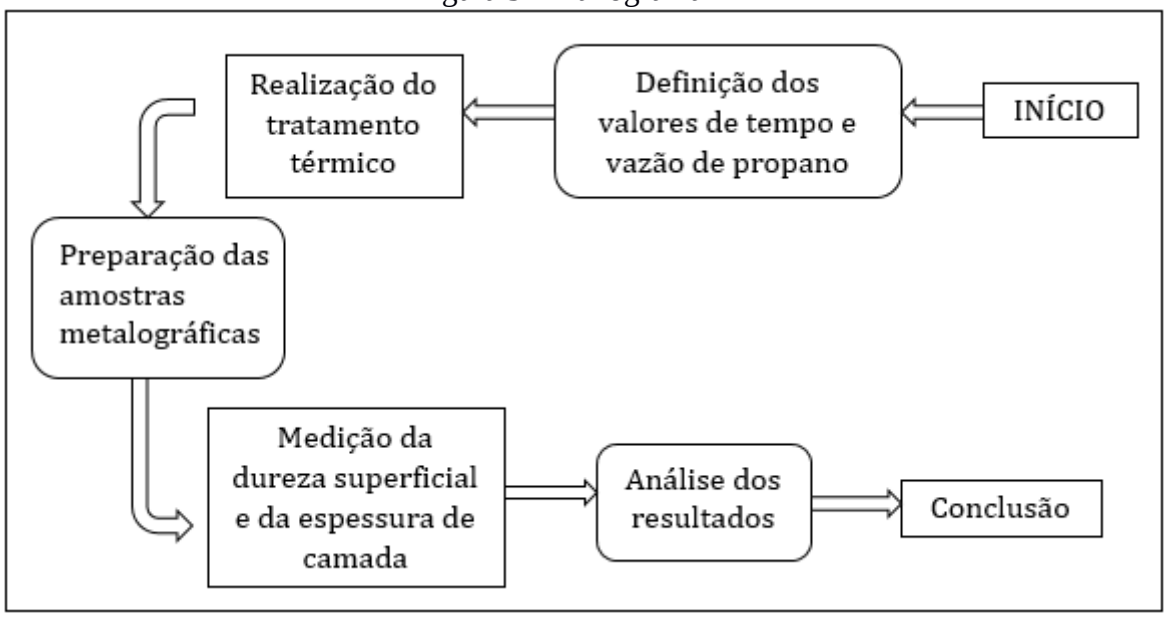
Ao final do tratamento térmico os parafusos deveriam atender às seguintes especificações: dureza superficial mínima de 450 HV e espessura da camada cementada de 0,10 ± 0,01 mm.

4.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Seguiram o fluxograma da Figura 3 sendo as etapas descritas na sequência.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 3 - Fluxograma



Fonte:(1)

4.2.1 Definições iniciais

A composição atmosférica do forno foi variada através da vazão de propano, sendo usados de 0,7; 0,8 e 0,9 m^3/h. O tempo de cementação foi variado através da velocidade da retorta, sendo usados os valores da Tabela 1 (24; 26,3 e 29,1 min).

A classificação das amostras segundo os percentuais de C e de Mn foi baseada nos certificados de matéria prima do fornecedor. Considerando o aço SAE 1018 os percentuais de carbono utilizados foram 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19 e 0,20. Em relação ao teor de manganês, as amostras foram classificadas em intervalos de 0,60-0,65%; 0,66-0,70%; 0,71-0,75%; 0,76-0,80%; 0,81-0,85% e 0,86-0,90%.

ISBN: 978-65-89908-00-5

O controle dos parâmetros foi feito através de uma planilha *Excel*, ilustrada na Tabela 2. A coluna esquerda se refere à identificação das amostras; as 4 seguintes, às variáveis independentes; as outras, as de saída (dureza superficial e espessura da camada). Para cada combinação de variáveis de entrada analisou-se 3 amostras (repetições), cementadas em momentos diferentes, sendo feitas 3 medidas por amostra para cada variável de saída (9 x 2 = 18 valores). Dado que nem todos os 6 %C estavam associados a todos os 6 %Mn, o número total de amostras foi de 88 para cada uma das variáveis de saída.

Tabela 2 – Ilustração da planilha de controle amostral

Nº de identificação	C (%)	Mn (%)	Tempo (IHM)	Vazão C_3H_8 (m^3/h)	Variável de saída	Valores das medições (nº de medidas)	Mín	Méd	Máx
1, 2, 3	x1	x2	x3	x4	Dur. superf. Esp. camada	3 x 3 3 x 3			

Fonte: (1)

4.2.2 Procedimentos metalográficos

Para obtenção das variáveis de saída foi seguido o procedimento abaixo, ilustrado na Figura 4:

a) corte dos parafusos em uma serra circular (Teclago-10T);
b) embutimento a quente em baquelite (embutidora Pantec-Panpress-30);
c) lixamento (sequência de lixas: 180, 320, 600, 1000 e 1200);

ISBN: 978-65-89908-00-5

d) polimento com pano metalográfico em uma politriz Teclago-PL01D;
e) ataque com solução nital (3%);
f) medições da dureza superficial em um microdurômetro digital HVS-1000-Pante-HV;
g) visualização da camada cementada e medição da sua espessura em um microscópio óptico Pantec-10PCON-60x.

Figura 4 – Imagens ilustrativas da sequência do procedimento metalográfico

Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

4.2.3 Análise dos resultados

Foi baseada em regressões, visando à obtenção dos coeficientes βs, para cada variável de saída Y (dureza superficial e espessura de camada), a partir das de entrada, conforme Equação 2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1(\%C) + \beta_2(\%Mn) + \beta_3(tempo) + \beta_4(vazão) \qquad (2)$$

Para cada variável de saída foi feita a regressão múltipla, com todas as VIs, e, posteriormente, a simples, para testar as consideradas influentes na 1ª análise.

Utilizou-se as funções "Regressão" e "Correlação" do *software Excel*, considerando sempre o intervalo de confiança de 95%.

Visando melhor compreensão e visualização dos resultados, utilizou-se o *software Statística* para gerar gráficos de superfície e de dispersão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentados os resultados relacionados à dureza superficial e, depois, de forma resumida, pela similaridade nas análises, à espessura da camada.

5.1 CORRELAÇÕES PARA DUREZA SUPERFICIAL

5.1.1 Regressão múltipla entre as variáveis independentes x dureza superficial

As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, os coeficientes e a estatística da regressão.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Tabela 3 - Coeficientes de regressão: variáveis independentes x dureza

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	175,26	14,84	145,74	204,78
%C	-235,25	47,20	-329,13	-141,36
%Mn	210,09	9,50	191,19	228,99
Tempo (T)	3,24	0,36	2,53	3,95
Vazão de C_3H_8 (VP)	137,71	9,13	119,54	155,87

Fonte: (1)

Tabela 4 - Estatística de regressão: variáveis independentes x dureza

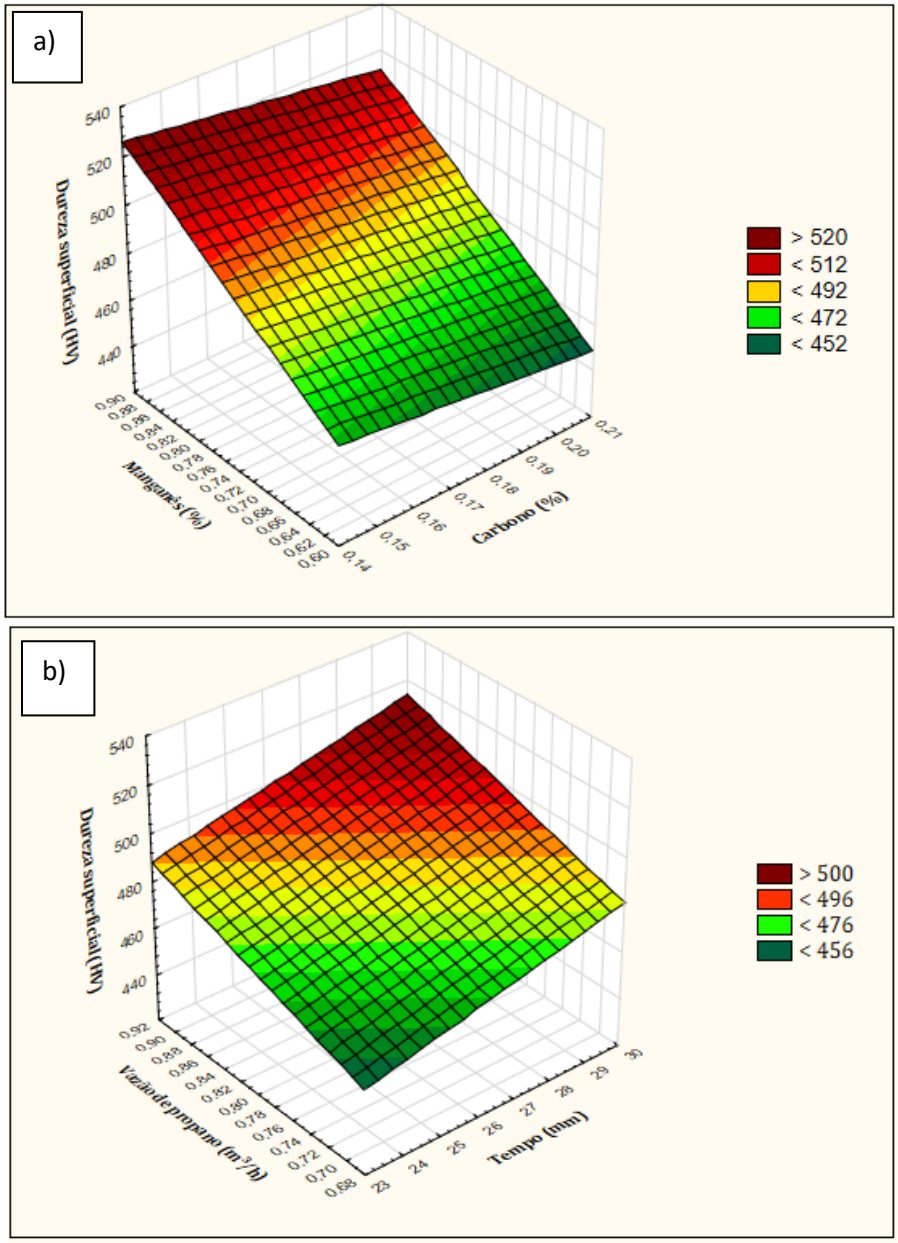
Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,95
R-Quadrado	0,92
R-quadrado ajustado	0,91
Desvio padrão	6,89

Fonte: (1)

A Figura 5 mostra gráficos de superfície relacionando as variáveis independentes à dureza superficial. Observa-se influências diretas do %Mn, do tempo e da vazão de propano, e inversa do %C.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 5 - Influências do %C e do %Mn (a) e da vazão de propano e do tempo (b) na dureza superficial''



Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

A partir dos resultados até aqui, observa-se que:

a) todos os coeficientes de regressão encontram-se nos dos respectivos intervalos de confiança de 95%, não contendo o valor zero. Logo %C, %Mn, tempo e vazão de propano têm influência significativa na dureza superficial;
b) pelo R múltiplo, o grau de correlação entre a dureza superficial e as variáveis independentes é de 95%;
c) pelo coeficiente de determinação R-Quadrado, 92% das variações da dureza superficial (DS) são explicadas pelas das variáveis independentes;
d) o modelo matemático buscado é descrito pela Equação 3.

$$DS = 175{,}26 - 235{,}25\ \%C + 210{,}09\ \%Mn + 3{,}24\ T + 137{,}71\ VP \qquad (3)$$

5.1.2 Regressão simples entre percentual de carbono x dureza superficial

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados dessa análise. Observa-se que o grau de correlação entre dureza superficial e %C é de 2% e, pelo R-Quadrado, que apenas 1% das suas variações são explicadas pelas do %C. O desvio padrão é cerca de 3 x maior do que na regressão múltipla.

Tabela 5 - Coeficientes de regressão: %carbono x dureza

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	480,52	25,99	428,84	532,20
%C	21,63	148,60	-273,78	317,05

Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

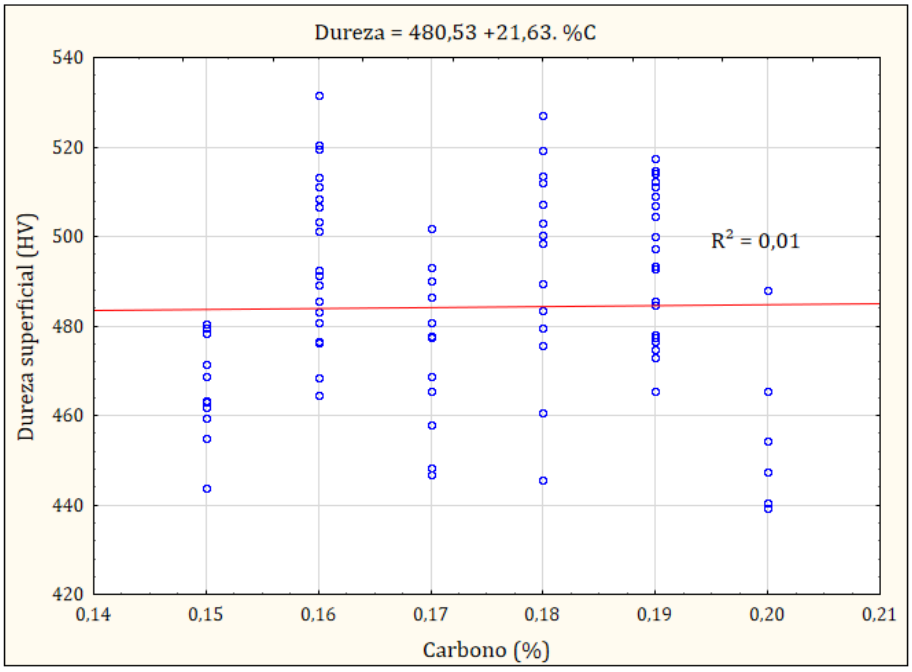
Tabela 6 - Estatística de regressão: %carbono x dureza

Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,02
R-Quadrado	0,01
R-quadrado ajustado	0,005
Desvio padrão	22,21

Fonte: (1)

A Figura 6 mostra a grande dispersão (desvio padrão) em torno da linha de tendência para a relação entre dureza superficial e %C. A regressão linear simples mostrou uma relação fraca entre as variáveis, o que vai de encontro à ideia inicial de que o %C fosse a variável mais influente.

Figura 6 – Gráfico de dispersão do %carbono na dureza superficial



Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

5.1.3 Regressão simples entre percentual de manganês x dureza superficial

As Tabelas 7 e 8 e a Figura 7 mostram os resultados obtidos. Observa-se um efeito direto do %Mn na dureza superficial. Pelo R múltiplo, o grau de correlação é de 74% e, por determinação R-Quadrado, 54% das variações de dureza superficial são explicadas pelas do %Mn. O desvio padrão é cerca de 2 x o da regressão múltipla.

O efeito do %Mn pode ser explicado por favorecer a fase austenítica e aumentar a encruabilidade do aço (4). Tais fatores contribuem para o aumento da dureza dos parafusos.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão: %manganês x dureza

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	334,33	14,98	304,54	364,11
%Mn	204,10	20,27	163,79	244,40

Fonte: (1)

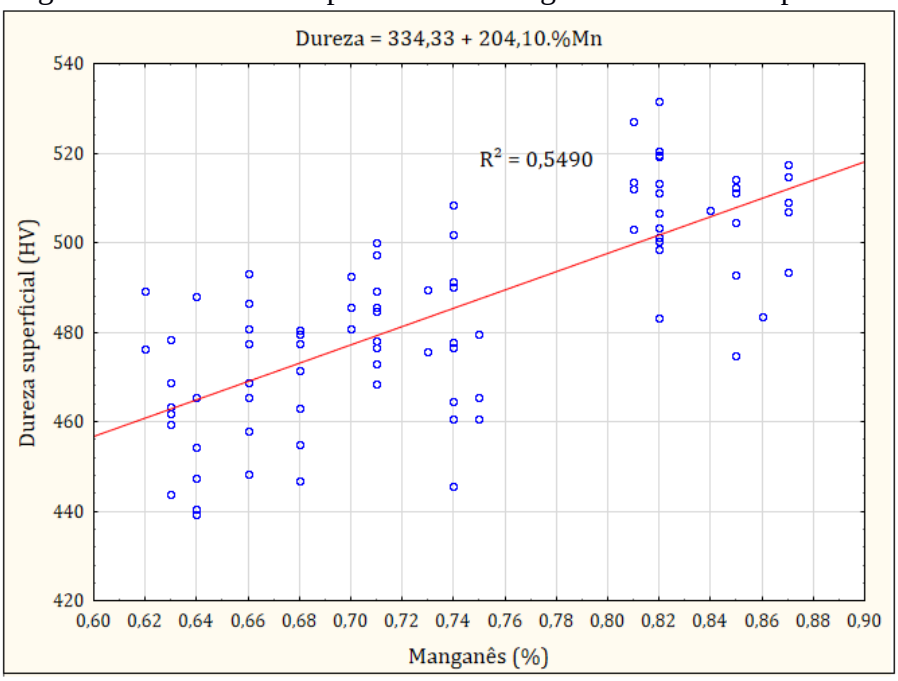
Tabela 8 - Estatística de regressão: %manganês x dureza

Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,74
R-Quadrado	0,54
R-quadrado ajustado	0,54
Desvio padrão	15,05

Fonte: (1)

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 7 - Gráfico de dispersão do %manganês na dureza superficial



Fonte: (1)

5.1.4 Regressão simples entre tempo x dureza superficial

As Tabelas 9 e 10 e a Figura 8 mostram os resultados obtidos.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão: tempo x dureza

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	389,14	28,50	332,48	445,79
Tempo	3,61	1,08	1,47	5,76

Fonte: (1)

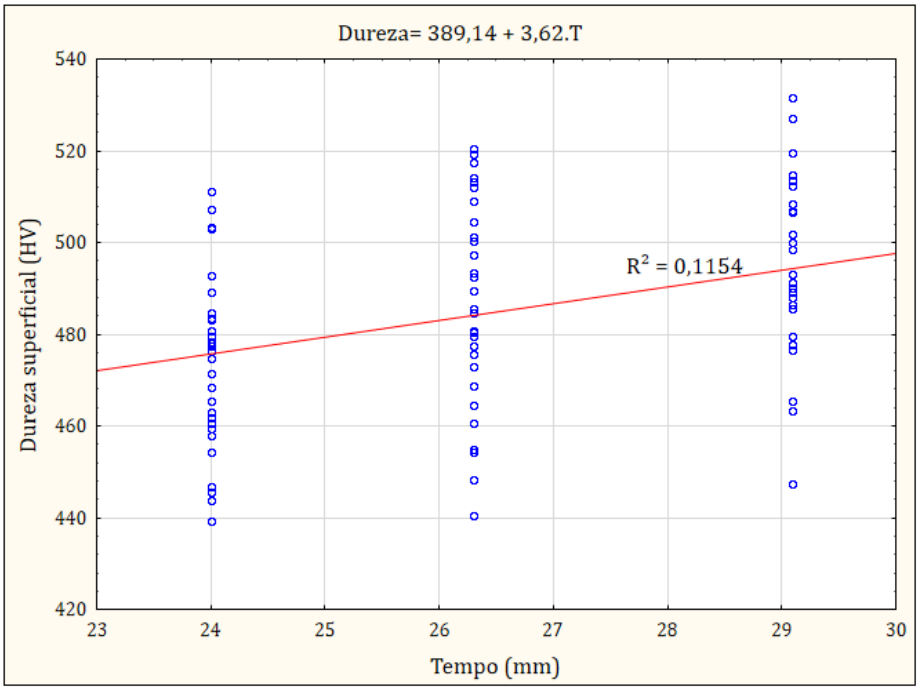
ISBN: 978-65-89908-00-5

Tabela 10 - Estatística de regressão: tempo x dureza

Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,34
R-Quadrado	0,12
R-quadrado ajustado	0,11
Desvio padrão	20,90

Fonte: (1)

Figura 8 - Gráfico de dispersão do tempo na dureza superficial



Fonte: (1)

Observa-se uma relação direta entre dureza superficial e tempo de cementação, cujo grau de correlação deles é de 34% (R múltiplo). Pelo R-Quadrado, 12% das

ISBN: 978-65-89908-00-5

variações de dureza superficial são explicadas pelas variações em tempo. O desvio padrão também é cerca de 3 x maior do que na regressão múltipla.

O efeito observado para o tempo era esperado, pois quanto mais os parafusos ficam submetidos à atmosfera cementante, mais carbono difunde para dentro do aço.

5.1.5 Regressão simples entre vazão de propano x dureza superficial

As Tabelas 11 e 12 e a Figura 9 mostram os resultados obtidos.

Tabela 11 - Coeficientes de regressão: vazão de propano x dureza

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	376,17	20,60	335,23	417,11
vazão de propano	134,97	25,58	84,12	185,81

Fonte: (1)

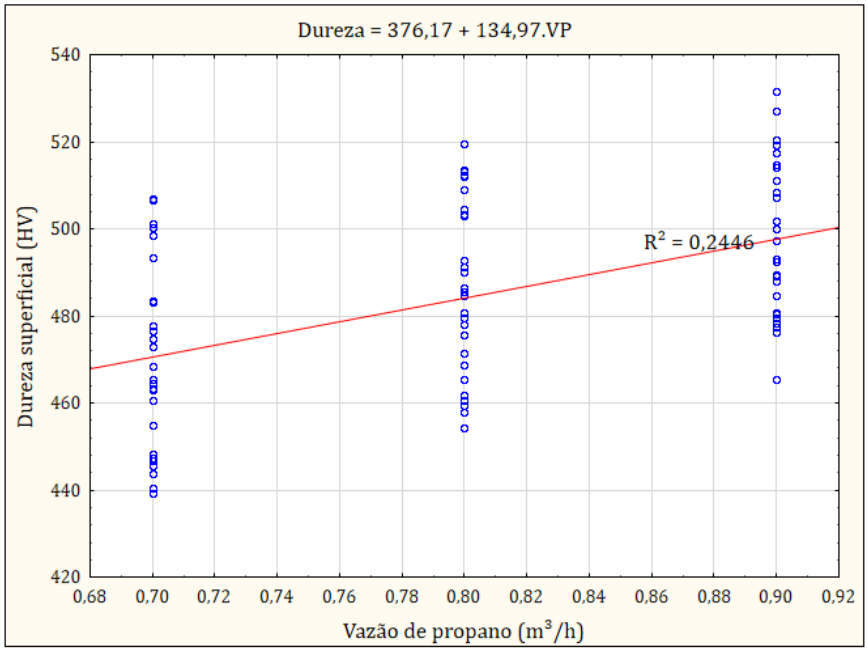
Tabela 12 - Estatística de regressão: vazão de propano x dureza

Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,49
R-Quadrado	0,25
R-quadrado ajustado	0,24
Desvio padrão	19,31

Fonte: (1)

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 9 - Gráfico de dispersão da vazão de propano na dureza superficial



Fonte: (1)

Observa-se que a vazão de propano se mostrou influente na dureza superficial (grau de correlação de 49%, com 25% das variações explicadas por ela), o que é explicado por proporcionar uma maior de disponibilidade de carbono na superfície do aço. De novo o desvio padrão foi maior do que na regressão múltipla (quase 3 x).

5.2 CORRELAÇÕES PARA ESPESSURA DA CAMADA

5.2.1 Regressão múltipla das variáveis independentes x espessura da camada

As Tabelas 13 e 14 mostram os resultados estatísticos obtidos.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Tabela 13 - Coeficientes de regressão: variáveis independentes x espessura

Parâmetros	Coeficientes	Erro padrão	95% inferiores	95% superiores
Interseção	-0,216	0,013	-0,2424	-0,1889
%C	-0,142	0,043	-0,2267	-0,0567
%Mn	0,067	0,009	0,0503	0,0845
Tempo (T)	0,010	0,000	0,0091	0,0104
Vazão de C_3H_8 (VP)	0,005	0,008	-0,0115	0,0214

Fonte: (1)

Tabela 14 - Estatística de regressão: variáveis independentes x espessura

Parâmetro	Valor
Nº de medidas	88
R múltiplo	0,96
R-Quadrado	0,93
R-quadrado ajustado	0,92
Desvio padrão	0,01

Fonte: (1)

A partir delas observa-se que:

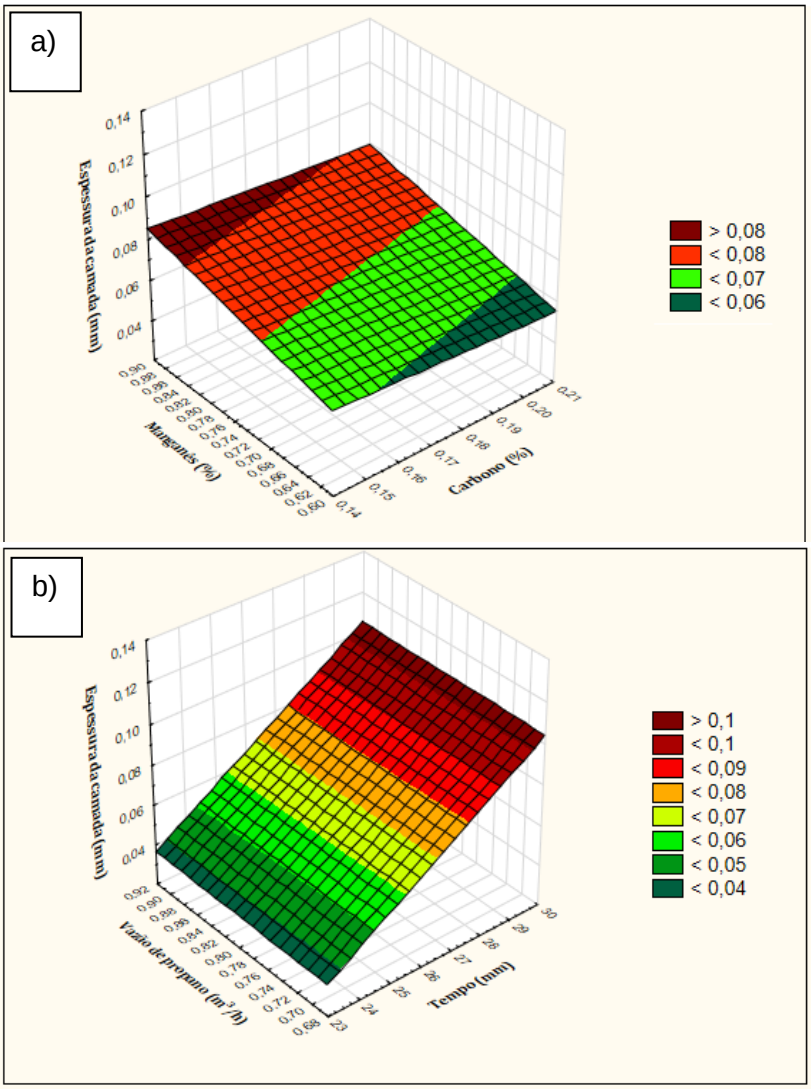
a) as variáveis %C, %Mn e tempo apresentam seus coeficientes angulares nos respectivos intervalos de confiança, que exclui o zero, indicando influência significativa sobre a espessura da camada. Já vazão de propano não;
b) a correlação entre espessura da camada e as outras variáveis é de 96%;
c) 92% das variações da espessura da camada são explicadas pelas das variáveis independentes;
d) o desvio padrão em torno da reta de regressão é de apenas 0,01;
e) o modelo matemático da espessura da camada é descrito pela Equação 4.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

$$EC = - 0{,}216 - 0{,}142\ \%C + 0{,}067\ \%Mn + 0{,}010\ T + 0{,}005\ VP \quad (4)$$

A Figura 10 mostra graficamente a relação entre as variáveis independentes e a espessura da camada.

Figura 10 - Influências do %carbono e do %manganês (a) e dos parâmetros do processo (b) na espessura da camada



Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

Na Figura 10b é nítida a influência - expressiva e direta – apenas do tempo de cementação na espessura da camada. Tal efeito pode ser explicado pelo limite de solubilidade do carbono na austenita que, a 900 °C, é de cerca de 1,2% (diagrama Fe-C). O excesso de carbono acumulado na atmosfera do forno não difunde no material.

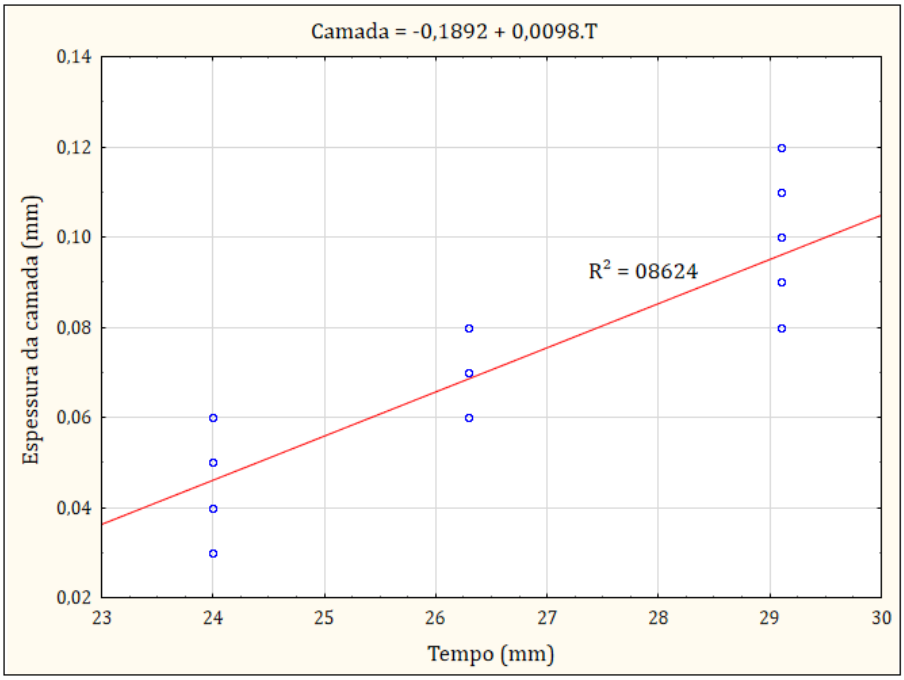
5.2.1 Regressões simples das variáveis independentes x espessura de camada

Assim como na dureza superficial, o %C no aço SAE 1018 praticamente não influiu (R-Quadrado = 1%) na espessura da camada. Entre %Mn e espessura da camada foi encontrado um R-Quadrado de 7,7%. Pelos valores pouco significativos e a limitação do número de palavras, optou-se por não mostrar tabelas e gráficos.

Por outro lado, observou-se uma influência bastante forte e direta da espessura da camada com o tempo (Figura 11). Dos 96% de variação da espessura da camada explicados pelas das variáveis independentes, 86% se referem apenas ao tempo. Esta relação pode ser explicada pela maior permanência dos parafusos na atmosfera do forno, favorecendo a difusão dos átomos no aço.

ISBN: 978-65-89908-00-5

Figura 11 - Gráfico de dispersão do tempo de processo na espessura da camada



Fonte: (1)

5.3 CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos. O valor 1 corresponde a uma total correlação e o 0, a nenhuma. Observa-se que as correlações variaram entre 0,03 e 15,84%, não sugerindo dependência entre si.

ENG MAT CON
CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
27 A 30 de abril 2021
ISBN: 978-65-89908-00-5

Tabela 15 – Grau de correlação entre as variáveis independentes

	%C	%Mn	T	VP
%C	1			
%Mn	0,1584	1		
T	0,0559	0,0591	1	
VP	0,0228	-0,0079	-0,0003	1

Fonte: (1)

5.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Para validar as Equações 3 e 4, foram comparados alguns dos valores reais, medidos, com os previstos por elas (Tabela 16).

Tabela 16 - Resultados previstos x medidos para as variáveis dependentes

Aço		Forno		Durezas (HV)			Espessuras (mm)		
C (%)	Mn (%)	T (min)	VP (m^3/h)	Calcul.	Medida	Diferença	Calcul.	Medida	Diferença
0,17	0,66	24	0,8	462	459	0,6%	0,04	0,04	0%
0,16	0,82	24	0,9	512	511	0,1%	0,06	0,06	0%
0,16	0,70	26,3	0,8	480	483	0,6%	0,07	0,07	0%
0,19	0,71	24	0,8	469	473	0,8%	0,04	0,05	25%
0,15	0,63	24	0,8	460	462	0,4%	0,04	0,04	0%
0,19	0,71	29,1	0,8	484	486	0,4%	0,10	0,10	0%
0,15	0,63	24	0,7	446	444	0,4%	0,04	0,05	25%
0,17	0,66	26,3	0,8	469	469	0%	0,07	0,07	0%
0,20	0,64	24	0,8	451	454	0,6%	0,04	0,04	0%
0,18	0,73	26,3	0,8	482	479	0,6%	0,07	0,07	0%

Fonte: (1)

ISBN: 978-65-89908-00-5

Observa-se que as diferenças entre os valores medidos e calculados variaram de 0 e 0,8%, à exceção de 2 da espessura da camada. Ressalta-se que a comparação delas se dá com relação a um valor base muito pequeno e a variação está dentro da permitida (± 0,01 mm). Tanto que as demais diferenças são nulas. Portanto, as equações matemáticas para previsão da dureza superficial e da espessura da camada foram consideradas válidas.

6 CONCLUSÕES

O estudo possibilitou uma análise bastante satisfatória dos efeitos dos %C e %Mn do aço SAE 1018, do tempo de processo e da vazão de propano na dureza superficial e na espessura da camada cementada.

Contribuiu também para um maior conhecimento na área e no planejamento e análise de experimentos envolvendo dados amostrais. Para isto os *softwares Excel* e *Statística* foram essenciais.

A regressão múltipla foi muito mais adequada à análise do que as simples.

Para a dureza superficial, as 4 variáveis independentes se mostraram influentes, sendo a relação mais forte – e direta – com o %Mn, seguido pela vazão de propano.

Para a espessura da camada, foi observada uma relação quase que total com o tempo, seguido por um efeito 10 x menor do %Mn. A vazão de propano não teve influência.

Ao contrário do pensamento inicial, o %C foi a variável independente que menos se mostrou significante nos resultados obtidos.

ISBN: 978-65-89908-00-5

7 REFERÊNCIAS

1 MORAIS, Welington V. **Estudo dos efeitos da composição atmosférica do forno e dos percentuais de carbono e manganês do Aço SAE 1018 no processo de cementação de parafusos.** 2018. 91 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia mecância) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul. 2018.

2 SASSI, Cecília P. **Modelos de regressão linear múltipla utilizando os softwares R e Statistica**: uma aplicação de conservação de frutas. São Carlos: Universidade de São Paulo (USP), 2011.

3 MONTGOMERY, Douglas C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução: Profa. Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

4 CHIAVERINI, Vicent. **Aços e ferros fundidos**. 4 ed. São Paulo: ABM, 1988.