

ADEQUAÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA, EM UMA LINHA DE RECOZIMENTO CONTÍNUO, UTILIZANDO A METODOLOGIA SEIS SIGMA.

P. B. P. Leão, H. F. G. de Abreu, M. J. G. da Silva

Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) - Universidade Federal do Ceará - Campus Universitário do Pici - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Bairro Pici - CEP: 60440-554 - Fortaleza - CE.

Atualmente, o processo de recozimento mais utilizado e rentável produtivamente é o recozimento contínuo, em que o ciclo total do tratamento térmico se passa em questão de alguns minutos, gerando excelentes propriedades mecânicas, sendo estas requeridas para a aplicação final do aço. Durante este processamento, deve-se ter um bom controle da qualidade do material, pois é nesta etapa em que ocorrem as últimas mudanças metalúrgicas do mesmo, antes da chegada ao cliente. Assim, a partir da mudança da composição de um aço microligado processado em planta industrial de recozimento, houve a necessidade do ajuste dos parâmetros do processo, para adequação do limite de escoamento as exigências dos clientes. No presente trabalho foram utilizadas ferramentas da metodologia seis sigma, gerando o ajuste do processo.

Palavras-chave: Aço microligado, recozimento, seis sigma, limite de escoamento.

INTRODUÇÃO

Em geral, o processo de recozimento contínuo, envolve a recuperação da propriedade de ductilidade e o fornecimento de uma durabilidade ao aço, devido a formação de uma camada de zinco, gerando uma excelente resistência a corrosão do mesmo. O aço produzido por esta rota, possui também vantagens como uma boa planicidade, superfície limpa e um menor custo se comparado com o recozimento em caixa ou batelada. (1)

Durante este processamento, deve-se ter um bom controle da qualidade do material, pois é nesta etapa em que ocorre as últimas mudanças metalúrgicas no aço, antes da chegada ao cliente. Por isso, deve-se ter muita cautela, devido a dependência de uma sequência bem ajustada de todo o processo, sendo muitas vezes necessário auxílio de ferramentas da qualidade, como o seis sigma.

Seis sigma é considerado o modelo de gestão de qualidade mais recente, sendo este desenvolvido na empresa norte-americana Motorola em 1987. (2)

Esta metodologia, pode ser definida como uma estratégia de gestão bem disciplinada e extremamente quantitativa, possuindo um objetivo principal de aumentar a lucratividade dos negócios, por meio da melhoria da qualidade do produtos e da melhor satisfação dos clientes e consumidores. (3)

O nome seis sigma, foi definido por conta da estatística, na qual, a letra grega σ é representada nesta, como o desvio padrão do valor visado. Portanto, seis sigma advém da distribuição normal, em que é possível encontrar seis desvios padrões entre a média e o limite inferior de especificação e outros seis a partir da média até o limite superior de especificação. (4)

Esta metodologia é aplicada através de um conjunto de ferramentas de qualidade e/ou estatística, sendo estas divididas e organizadas em etapas do projeto, baseada no modelo *Define-Measure-Analyse-Improve-Control* (DMAIC).

MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi um aço HSS (*High Strength Steel*) microligado ao titânio, de classe 340 MPa e que possui aplicação na indústria automotiva. A metodologia seis sigma foi aplicada no processo produtivo deste aço com o auxílio do software de estatística Minitab 16.

O histórico do banco de dados de produção foi útil para a descoberta do problema e para realizar análises estatísticas dos parâmetros do processo sob o limite de escoamento, do material modificado já produzido. Como o aço de composição química antigo era processado na temperatura de encharque de 790 °C, foram selecionadas as temperatura de 760, 780, 790, 805, 830 e 840 °C para o estudo do novo material. A cada temperatura, foram obtidos vinte e três amostras na direção de laminação, a partir da saída da linha de zincagem, gerando no total de 138 amostras.

Estas foram usinadas, nas medidas apresentadas na tabela 1 e ilustradas na figura 1, de acordo com a norma NBR ISSO 6892-1. Foram escolhidas para o estudo, apenas o material de espessura mais grossa com 1,62 milímetros, pois tinham maior tendência à ficarem fora de especificação.

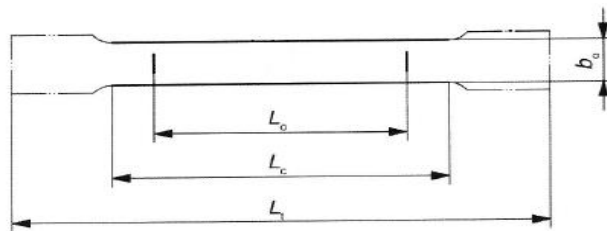


Figura 1 - Dimensões do corpo de prova. Fonte: NBR ISSO 6892-1

Dimensão	b_0	L_0	L_c	L_t
Valor (cm)	2	10	12,5	25

Tabela 1 - Medidas do corpo de prova usinado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Define (fase definir)

Nesta fase foi utilizado a voz do cliente, com o objetivo de localizar os principais problemas, através do alerta dos clientes. Portanto, foi aplicado um diagrama de Pareto, no qual, baseia-se na lei chamada 20/80. Esta significa que 80% das consequências, advêm de 20% das causas. Portanto, este diagrama foi utilizado em um banco de dados de reclamações dos principais clientes, este é apresentado na figura 2.

No diagrama de Pareto, foram obtidos como principais resultado os problemas de esfoliação (com 117 de frequência e 16% do total reclamado) e propriedade mecânica fora do especificado (com 114 de frequência e 16% do total reclamado). Porém, esfoliação é um defeito de matéria prima, que não é produzido na linha de zincagem, este é gerado em um processo anterior. Logo, propriedade mecânica fora do especificado, será o foco deste trabalho.

Dentre as reclamações de propriedade mecânica fora do especificado foi encontrado que 83,3% estavam relacionadas com o material de classificação ZSTE 340, a partir disto foi encontrado que este era um aço microligado ao titânio, que teve sua composição recém modificada.

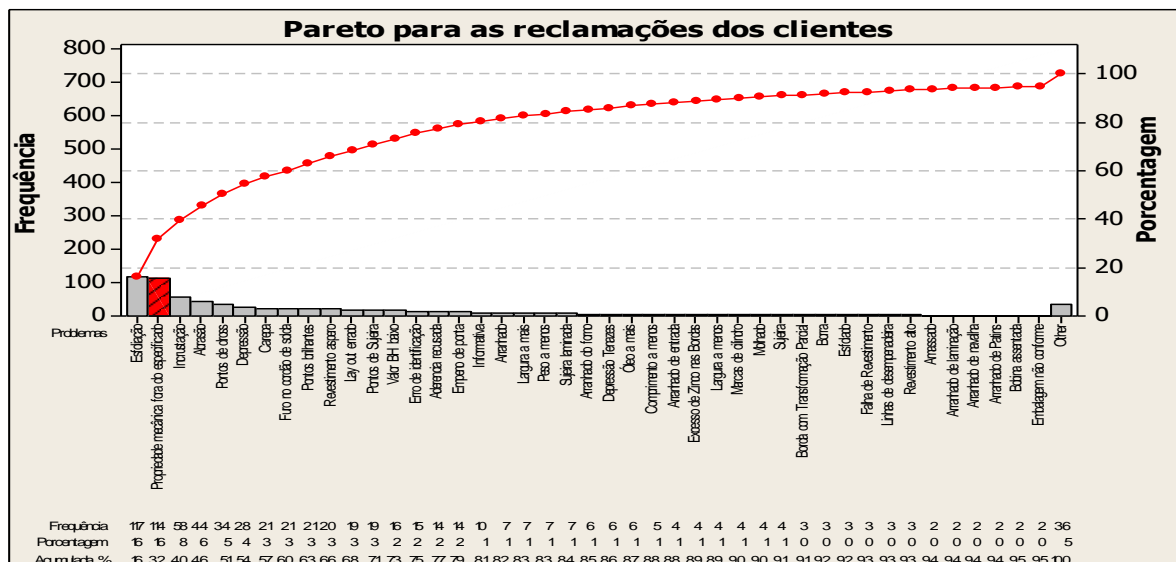


Figura 2 – Diagrama de Pareto para as reclamações dos clientes.

Mesure (fase medir)

Nesta etapa foi primeiramente utilizada a matriz causa e efeito. Onde foi possível priorizar e definir as causas significativas sobre as saídas do processo. Assim, foi realizado um levantamento das principais variáveis do processo. Em seguida, foi feita uma pesquisa com profissionais da área. Cada um dos participantes poderia dar notas de 0 à 10 de acordo com a correlação/influência das entradas (causa) do processo sobre as saídas (efeito).

Cada saída (Propriedade Mecânica e Microestrutura) do processo, também possui um peso de 0 à 10, que é escolhido pelo autor da matriz causa e efeito. Tal peso é multiplicado pela nota indicada por cada participante e, ao fim, estas são somadas. A tabela 2, apresenta os resultados para as 13 variáveis.

Mesmo possuindo um percentual relativamente significativo, o grau do aço não influenciará o desenvolvimento do estudo, pois será abordado apenas um tipo de aço. Dessa forma, as causas principais que deverão ser avaliadas, serão as três que possuem os maiores valores na matriz causa e efeito (temperatura de encharque, velocidade da tira e espessura da tira).

Tabela 2 – Matriz causa e efeito.

MATRIZ CAUSA E EFEITO									
10 - 9 - 8: Forte Correlação		7 - 6 - 5 - 4: Média Correlação			3 - 2 - 1: Baixa Correlação		0: Não há correlação		
Índice de Importância		10	9	10	9	10	9	TOTAL	Esforço de Eliminação da Variável de Entrada
Função:		Engenheiro da qualidade		Gerente da qualidade		Gerente da linha de zincagem			
X's do Processo		Propriedade mecânica	Microestrutura	Propriedade mecânica	Microestrutura	Propriedade mecânica	Microestrutura		
X ₁	Temperatura de encharque	10	10	10	10	10	10	570	Alto
X ₂	Temperatura de pré-aquecimento	1	1	1	1	0	0	38	Baixo
X ₃	Temperatura de resfriamento	6	8	6	6	7	7	379	Baixo
X ₄	Velocidade da tira	9	9	9	9	8	8	494	Alto
X ₅	Espessura da tira	6	7	8	8	8	8	427	Alto
X ₆	Largura da tira	6	7	5	5	0	0	218	Baixo
X ₇	Grau do aço	10	10	10	10	10	10	570	Alto
X ₈	Alinhamento da tira	0	0	0	0	0	0	0	Baixo
X ₉	Limpeza da tira	0	0	0	0	0	0	0	Baixo
X ₁₀	Pressão dos gases de proteção	0	0	0	0	0	0	0	Baixo
X ₁₁	Composição do gás de proteção	0	0	1	1	0	0	19	Baixo
X ₁₂	Estado da superfície da tira. (Suja/limpa).	0	0	0	0	0	0	0	Baixo
X ₁₃	Tensão da tira.	2	1	0	0	0	0	29	Baixo

Ainda na etapa medir foi avaliado o estado do processo. O histórico de dados de limite de escoamento para o novo material já processado foi tratado com base no teorema do limite central, no qual, os dados foram divididos em subgrupo de quatro amostras aleatórias, sendo assim, obtido a média de cada subgrupo. Portanto, foi obtido uma distribuição normal com *P-value* de 0.212.

As especificações do cliente eram que, os valores dos limites de escoamento estivessem entre 340 à 420 MPa. Com estas informações, foram calculados o C_p e o C_{pk} do processo. Logo, podemos observar a partir da figura 3, que a C_p foi 1.08, no qual, este pode ser calculado a partir da equação (A) (σ é o desvio padrão) e classificado de acordo com a tabela 3.

$$C_p = (LSE - LIE) / 6 \sigma \quad (A)$$

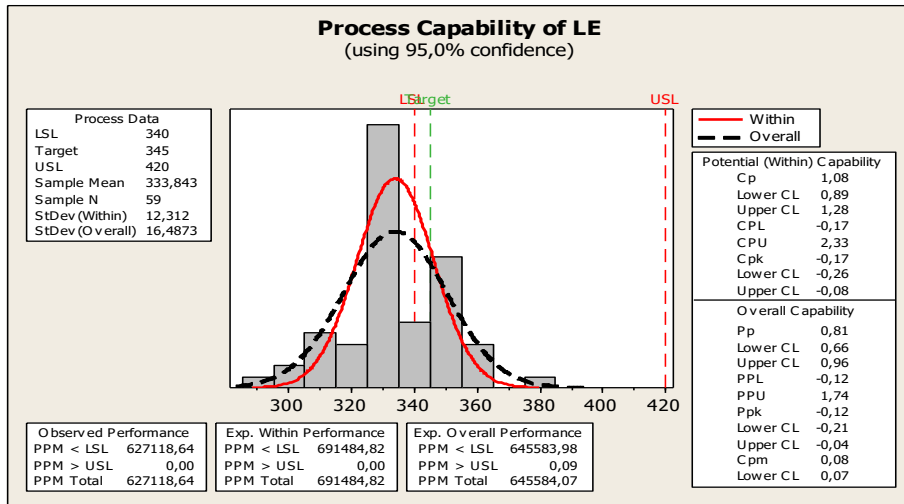


Figura 3 - Capacidade e capacidade do processo antes da mudança.

Tabela 3 -

Classificação	Valor do Cp	Valor do CpK
Capaz e adequado	$Cp \geq 1,33$	$CpK \geq 1,33$
Aceitável	$1 \leq Cp \leq 1,33$	$1 \leq Cpk \leq 1,33$
Incapaz e inadequado	$Cp < 1$	$Cpk < 1$

Classificação para a capacidade e capacidade do processo.

Em relação a capacidade, o processo encontra-se em um estado aceitável, porém, como a capacidade leva em conta apenas o desvio padrão e desconsidera a centralização do processo, faz-se necessário o cálculo da capacidade, para um ajuste central do processo. É visto, na figura 3 que Cpk inferior e Cpk superior, são respectivamente -0.17 e 2,33. Sendo uma regra geral, escolher o menor dos Cpk's, assim, Cpk é -0,17. A capacidade do processo, pode ser calculada a partir da equação (B) (σ é o desvio padrão) e

classificada através da tabela 3. Assim, podemos concluir que o processo está incapaz e inadequado.

$$C_{pK} = \text{MIN} [(LSE - \text{média}) / 3 \sigma , (\text{média} - LIE) / 3 \sigma] \quad (B)$$

O nível sigma do processo foi calculado com o intuito de obter o estado do processo em relação ao nível máximo que é seis sigma. Neste trabalho foi usado a estatística Z, para o cálculo do sigma do processo. Z representa a distância entre a média e o limite de especificação mais próximo em desvios padrão e é representado pela equação (C). Deve-se escolher o menor valor de Z. Devido a variação de 1.5σ , o cálculo sigma é representado pela equação (D).

$$Z = \text{MIN}[(LIE - \text{Média}) / \text{Desvio padrão}, (\text{Média} - LSE) / \text{Desvio padrão}] \quad (C)$$

$$\text{Capacidade } \sigma = Z_{\text{min}} + 1,5 \quad (D)$$

A partir da software Minitab 16, obtemos Z mínimo igual à -0,37, assim temos que a capacidade σ é igual à 1,13. Então, temos que o processo está com um **DPMO** e um rendimento de aproximadamente e respectivamente 579.259,7 e 42,07%. Outro dado a partir da estatística Z é a quantidade de não conformidade que podem ocorrer em um milhão de oportunidades. Temos que, o Partes Por Milhão (PPM) possui 645.583,98 limites de escoamento abaixo do limite inferior, para um milhão de bobinas produzidas. Concluimos, que o processo está bastante longe dos 6σ ou 3,4 DPMO.

Analyse (fase analisar)

Foi realizado somente a regressão simples entre velocidade e espessura, por conta da baixa correlação entre os outros parâmetros. A equação encontrada pelo software Minitab 16 é a equação (E) que é representada na figura 4-A.

$$\text{Vel.} = 261 - 352 * \text{Esp.} + 216 * (\text{Esp.}^2) - 45,9 * (\text{Esp.}^3) \quad (\text{E})$$

Este resultado está bem condizente com a realidade, pois metalurgicamente chapas laminadas contendo uma espessura maior ou uma maior massa, necessitam de um maior tempo de permanência no forno de recozimento da linha de zincagem.

A regressão múltipla foi utilizada para se obter a influência da temperatura e velocidade simultaneamente sobre o limite de escoamento. Os resultados estatísticos nos indicam apresentaram um R-quadrado ajustado de 46.7%, o que não é bom para o modelo, pois este valor representa a porcentagem da variação explicada, através da equação ajustada sobre os dados utilizados, no qual, o ideal é acima de 70%. Isso significa, que provavelmente o modelo necessita de uma outra variável explicativa. Dessa forma, a equação não servirá para prever exatamente o limite de escoamento com as variáveis em estudo.

No entanto, podemos obter informações de tendências a partir deste resultado. Estas foram adquiridas a partir de um gráfico de contorno, mostrado na figura 4-B. A imagem mostra que para temperaturas elevadas em baixas velocidades, obtemos limites de escoamento baixos e altos se o oposto ocorrer. Os resultados estão coerentes com a realidade e podem ser explicados por efeitos metalúrgicos, que ocorrem durante o processamento do aço. Por exemplo, se o processo está ocorrendo a uma temperatura elevada e a uma velocidade baixa, as condições estão favoráveis para que ocorra a recristalização do material, porém com um crescimento de grão excessivo, resultando em um limite de escoamento baixo.

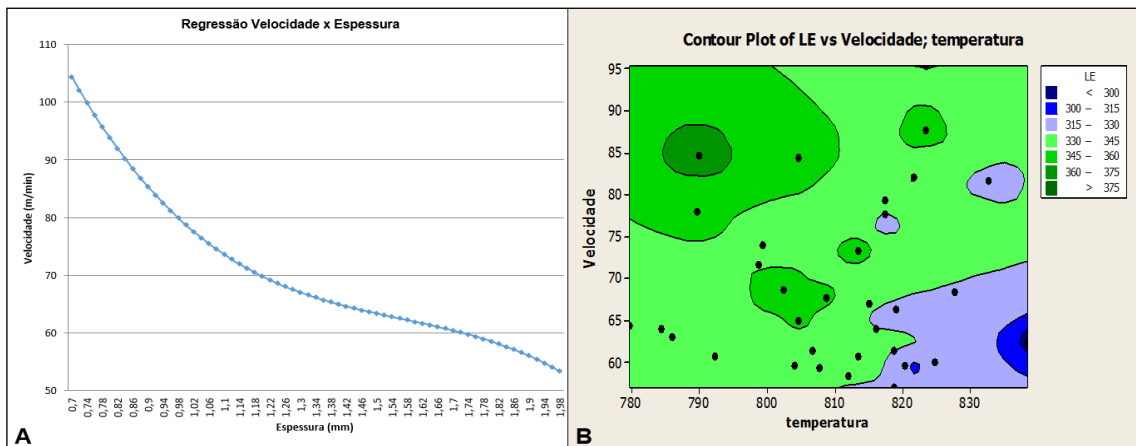


Figura 4 – A) Representação gráfica da regressão simples. B) Gráfico de contorno.

Improve (fase melhorar)

Através do histórico de dados de produção foram realizadas análises de influências das variáveis mais importantes sob o limite de escoamento. Os dados foram divididos de acordo com a tabela 4. O resultado é apresentado na figura 5, onde mostra que na linha de produção a temperatura tem a maior correlação com o limite de escoamento. Novamente, o efeito do aumento da temperatura com a queda do limite de escoamento é explicado pelo crescimento dos grãos.

A influência da velocidade no aumento do limite de escoamento é causada pelo tempo de permanência no forno, pois quanto menor o tempo, a chapa permanecerá menos sob a atmosfera do forno na temperatura de encharque, tendo assim, um menor crescimento de grãos. A espessura, também gera diminuição da propriedade em estudo, isto ocorre por dois fatores, seu processamento na linha de zincagem, pois espessuras maiores tendem a ser produzidas em velocidades menores, devido a capacidade da linha, tendendo assim a permanecer por um tempo maior no forno e conseqüentemente produzindo grãos maiores, diminuindo o limite de escoamento. A segunda causa ocorre, pelo motivo de que uma chapa mais grossa demora mais a resfriar resultando em grãos relativamente maiores.

Temperatura (°C)		Espessura (mm)		Velocidade(m/min)	
1-Baixa	Menor ou igual à 814	1-Pequena	Menor ou igual à 1,4	1-Baixa	Menor ou igual à 70
2-Alta	Maior que 814	2-Grande	Maior que 1,4	2-Alta	Maior que 70

Tabela 4 - Divisão dos dados de produção.

Assim, como a temperatura é a variável de maior influência esta foi avaliada. A figura 6, apresenta um *boxplot* ou diagramas de caixa para todos os limites de escoamento, adquiridos através dos ensaios de tração. Assim, foi possível obter a dispersão para cada ensaio e os *outliers*. Porém, a informação mais importante, foi a temperatura ideal para o processamento do novo material de 760 °C, mostrando que abaixo de 780 °C, o limite de escoamento permanece fora do especificado. O problema estava ocorrendo pelo fato de que o novo material, estava sendo processado a mesma temperatura que o material antigo à 790 °C, gerando propriedades abaixo do especificado.

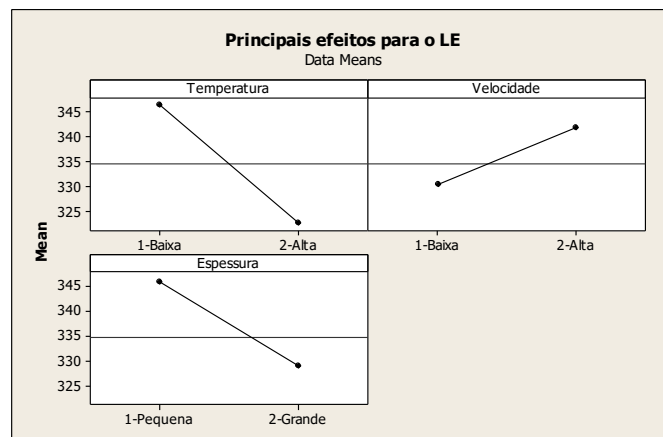


Figura 5 – Principais efeitos para o limite de escoamento, na linha de produção.

A figura 7-A, apresenta informações apenas dos valores obtidos para a temperatura de 760 °C, tendo que estes dados seguem uma distribuição normal, com *P-value* igual a 0,620. Dessa forma, a curva normal não só mostra que os valores estão dentro dos limites especificados, como também, estão totalmente centralizados entre eles.

No entanto, os clientes exigem que o limite de escoamento deste aço seja 340 MPa ou deslocado para próximo deste valor. Isso ocorre em

decorrência de menores esforços necessários, para que suas ferramentas estampem o material, gerando uma maior durabilidade a seus equipamentos.

Por fim, a temperatura ideal para o processamento deste aço seria 760 °C, se a propriedade desejada fosse a centralizada entre os limites de especificações. Como o desejado é próximo ao limite inferior a temperatura ideal terá que ser menor que 780 °C ou aproximadamente 770 °C.

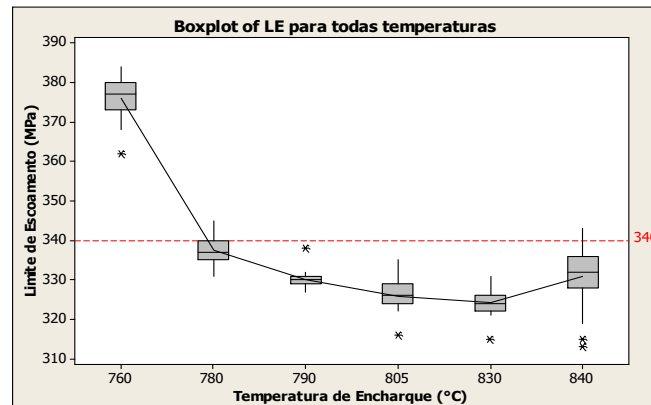


Figura 6 – Boxplot do limite de escoamento para todas as temperaturas.

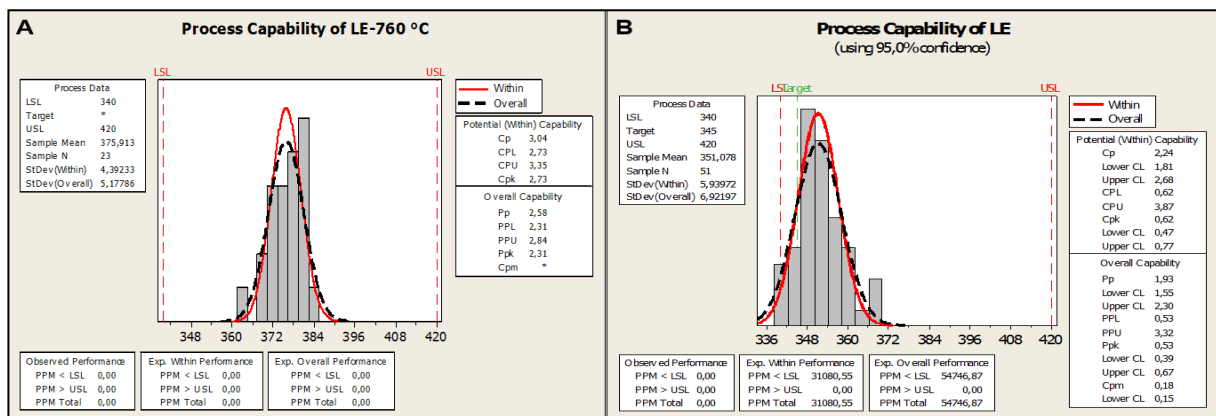


Figura 7 – A) Cálculo de capacidade para os limites de escoamento à 760°C.

B) Capacidade do processo para nova temperatura.

Após a aplicação dos resultados encontrados na linha de produção, os dados das bobinas que foram processadas com este ajuste foram analisados. No total, foram avaliadas 51 bobinas. Os novos dados são normais com um P-value de 0.077. Na figura 7-B, podemos ver que os valores do limite de escoamento estão como demandado pelos clientes. No entanto, para esta configuração não há a necessidade de medir a capacidade do processo, pois este valor terá um resultado ruim devido o deslocamento dos dados para um

dos lados. Assim, será levado em conta apenas a capacidade do processo que tem o valor de 2.24 e que de acordo com a tabela 3, este processo está capaz e adequado.

A partir do novo resultado da estatística Z e das equações (C) e (D), temos que o novo nível sigma é igual a 3.1. Portanto, o DPMO e o rendimento são aproximadamente e respectivamente 17.864,4 e 98,22 %. Por fim, podemos observar uma enorme melhoria no processo, já que inicialmente o rendimento era de aproximadamente 42,07%.

Control (fase controlar)

O gráfico de controle é uma ferramenta bastante útil para monitorar a variabilidade e avaliar a estabilidade do processo. Assim, se o processo possui apenas variações por conta de causas comuns, a saída deste terá uma distribuição estável e previsível em função do tempo, em outras palavras o sistema está sobre o controle estatístico. Se existem causas especiais, a variação na saída do processo, será instável e imprevisível com o decorrer do tempo. Neste último caso, o regime estará fora de controle estatístico. (5)

A partir da figura 8, podemos observar que não houve nenhuma causa especial. Tanto os dados estão entre os limites de controle, como estes também não apresentam características indesejáveis. Portanto, o processo com os parâmetros de temperatura utilizados, possuem comportamento de estabilidade, fornecendo um limite de escoamento adequado. Por fim, podemos utilizar a temperatura na faixa encontrada de 767 à 779 °C, como especificações do processo, variando de acordo com a combinação de velocidade e espessura.

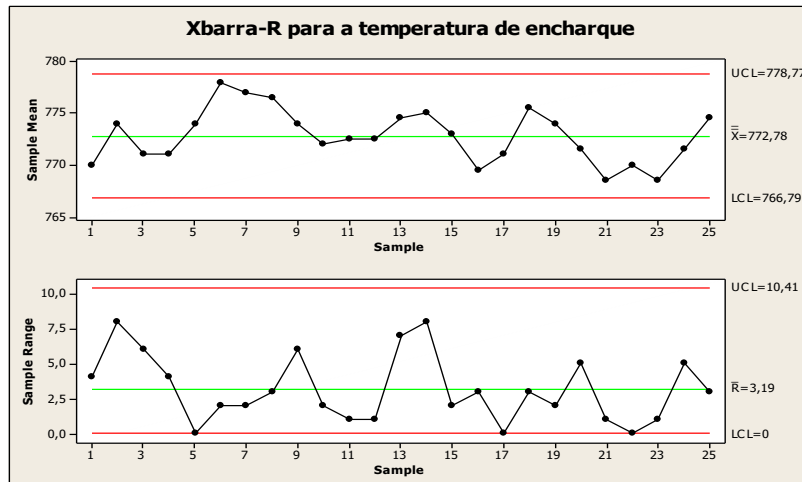


Figura 8 - Gráfico de controle para a temperatura.

CONCLUSÃO

A metodologia seis sigma, foi de grande auxílio para investigação na linha produtiva denotada, mostrando assim, que esta técnica possui fundamental importância no alcance de melhorias, em plantas produtivas metalúrgicas.

A faixa de temperatura estabelecida, mostrou ser estável, por meio do gráfico de controle. Sendo possível, sua utilização como especificação do processo.

REFERÊNCIAS

- (1) PICKERING, F.B.; CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. Materials science and technology: a comprehensive treatment. 7.ed. Wiley-VCH, dez. 1991. p. 222-279
- (2) HENDERSON, K. M.; EVANS, J. R. Successful implementation of Six Sigma: benchmarking Gen-eral Electric company. Benchmarking: an International Journal, v.7, n.4, p.260-282, 2000.

- (3) HARRY, Mickel; SCHROEDER, Richard. Six sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations. New York. Currency, 2000. 300 p.
- (4) ESTORILIO, C. C. A.; AMITRANO, F. G. Aplicação de seis sigma em uma empresa de pequeno porte. Produto & Produção, vol. 14 n.2, jun. 2013. p.01-25.
- (5) CHAVES, C. A.; SANTOS, N. J. Controle de qualidade. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. p.65-78.
- (6) LEÃO, P.B.P. Adequação do limite de escoamento de aço de alta resistência micro ligado ao titânio, utilizando ferramentas da qualidade através da metodologia seis sigmas. 2016. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.