

AUMENTO DA VELOCIDADE DE DECAPAGEM DE AÇOS “INTERSTITIAL FREE” NA ARCELORMITTAL VEGA¹

Leonardo Pinez Fernandes²
Gláucio Augusto Polini³

Resumo

O tempo de exposição necessário para que ocorra a decapagem química do aço em banhos de ácido clorídrico (HCl) pode variar de acordo com alterações nos parâmetros de processo, baseado nisto foi desenvolvido um simulador matemático de processo de decapagem, onde se identificou a possibilidade de reduções significativas no tempo necessário para realizar a decapagem na ArcelorMittal Vega e conseqüentemente resultou em maior velocidade de processamento e maior produtividade. As principais modificações de parâmetros de processo propostas neste trabalho baseiam-se em alterações na temperatura dos banhos de decapagem química e também na taxa de alongamento imposta na Aplainadora Sob Tensão (AST). Os testes na linha de produção, a definição do tamanho de amostra e a avaliação dos resultados foram realizados através de cálculos estatísticos baseados na estratégia "Seis Sigma", onde foi evidenciado aumento de velocidade do processo de decapagem na ordem de 36% para os aços "Interstitial Free", não gerando distúrbios na qualidade do produto.

Palavras-chave: Decapagem; Simulação de processo; Aços IF; Modelo matemático.

INCREASING THE SPEED OF THE PICKLING LINE FOR “INTERSTITIAL FREE” MATERIALS AT ARCELORMITTAL VEGA

Abstract

The exposure time needed to promote the chemical pickling on the steel at hydrochloride acid (HCl) baths can vary according to modifications in the process parameters, based on this fact it was developed a mathematical process simulator and it was possible to identify significant reductions on the time needed to realize the pickling at ArcelorMittal Vega and consequently resulted on higher processing speed and higher productivity. The main modifications on the process parameters proposed on this paper are based on modify on the temperature in chemical pickling baths and on the stretch ratio realized on the Stretch Bending Unit (SBU). The trials at production line, the definition of the size of the sample and the evaluation of the results were realized through statistical calculus based on the “Six Sigma” strategy where it was evidenced the increasing of the pickling process speed on the order of 36% for "Interstitial Free" steels, not generating disturbances in the quality of the product.

Key words: Pickling; Process simulation; IF steel; Mathematical model.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Mestrando em Engenharia de Materiais, Engenheiro Industrial Químico, Especialista em Melhoria Contínua e Black Belt, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Mecânica, Técnico de Processo de Produção, ArcelorMittal Vega, São Francisco do Sul, SC, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na literatura científica são encontrados vários trabalhos que preconizam a compreensão da influência dos parâmetros responsáveis pela decapagem química de aços de baixo teor de carbono laminados a quente, porém não é comum encontrar trabalhos que comprovaram em linha de produção, os resultados obtidos em laboratório.

Divergências entre resultados gerados em ambiente laboratorial e os resultados obtidos em uma linha de produção são frequentes e comuns, visto que na primeira situação existe um controle muito maior dos parâmetros e conseqüentemente uma variação muito menor, o que faz com que as linhas de produção tenham apenas um conhecimento superficial do seu processo, não sendo capaz de prever de forma quantitativa o que uma alteração em um determinado parâmetro pode gerar no resultado final.

Logicamente não se pode descartar a importância dos testes conduzidos em ambiente laboratorial pois estes são base para todo o conhecimento e desta forma direcionam os responsáveis pelos processos produtivos à tomada de decisão, mesmo que de uma forma qualitativa e não quantitativa.

Inserido neste cenário encontrava-se a ArcelorMittal Vega, com o agravante de que o processo de decapagem química representava a maior restrição para o aumento de produção da fábrica visto que a velocidade máxima de decapagem já havia sido alcançada para todos os materiais processados.

Diante desta oportunidade, verificou-se que os materiais da classe “*Interstitial Free*”, que representavam cerca de 30% do volume total produzido, possuíam potencial de aumento de velocidade na ordem de 44%.

1.1 Objetivo

Impulsionado pela necessidade de respostas mais precisas e por decisões mais orientadas decidiu-se criar um simulador matemático de processo de decapagem visando prever com maior precisão o que determinadas alterações nos parâmetros poderiam ocasionar no resultado final, ou seja, no tempo mínimo de exposição do aço ao ataque químico e conseqüentemente na velocidade do processo de decapagem, desta forma viabilizando a otimização do processo produtivo de uma forma assertiva.

1.2 Revisão da Literatura

O fenômeno de oxidação do ferro na superfície do aço tem grande relevância principalmente em materiais que passaram pelo processo de laminação a quente e posteriormente são submetidos ao processo de decapagem com o intuito da remoção desta camada. Segundo Leite⁽¹⁾ o desempenho dos processos de remoção do óxido é influenciado pela aderência entre a camada de oxidação e o aço, desta forma se torna necessário compreender o mecanismo de formação da camada de oxidação sobre o aço.

A oxidação do aço é um fenômeno de relação direta com a temperatura de acabamento (temperatura na qual o aço deixa a última cadeira de laminação) e com a temperatura de bobinamento (temperatura na qual o aço é enrolado em forma de bobina). Sun et al.⁽²⁾ descrevem em seu trabalho que a espessura da camada de oxidação está diretamente relacionada com a temperatura na qual o aço foi exposto

e também com o tempo de exposição a esta temperatura. Adicionalmente Sun² cita a formação de três tipos distintos de oxidação encontrada, sendo elas a wustita (FeO), a magnetita (Fe₃O₄) e a hematita (Fe₂O₃), em proporções que podem variar de acordo com a temperatura ao qual o aço foi exposto e também o tempo de exposição.

Segundo Fontana e Greene,⁽³⁾ elementos de liga como cobre, nióbio, titânio, boro ou molibdênio formam óxidos de características diferentes dos óxidos formados com o ferro e desta forma são mais ou menos propensos a remoção via decapagem química, porém devido a estes elementos de liga estarem presentes em baixíssimas concentrações nos aços de baixo teor de carbono, optou-se em não analisar a interferência destes na decapabilidade do aço desta forma o único parâmetro relacionado ao aço que foi estudado, foi a temperatura de bobinamento.

Parâmetros relacionados ao processo de decapagem como a taxa de alongamento do aço promovida na Aplainadora Sob Tensão, temperatura do banho ácido e a concentração de ácido clorídrico neste banho foram alvo de estudo, sendo a temperatura dos banhos de decapagem o fator mais influente na velocidade de decapagem, conforme demonstrado por Hudson e Warning.⁽⁴⁾

Adicionalmente Hudson e Warning⁽⁵⁾ demonstram que a influência da concentração de ácido clorídrico, da temperatura de bobinamento do aço e da temperatura do banho ácido no tempo de decapagem pode ser expressa por uma fórmula empírica desenvolvida a partir de experimentos laboratoriais.

O alongamento do aço, promovido anteriormente a sua entrada nos banhos de decapagem química possui papel decisivo no processo de remoção da camada de oxidação.

Segundo apresentado por Batista, Villegas e Oliveira⁽⁶⁾ e Chen, Yuen e Hull⁽⁷⁾ aumentando-se o alongamento imposto ao aço (através de esforços mecânicos) o tempo requerido para realizar a decapagem química do material é menor, porém com duas restrições, sendo a primeira apresentada por Chen, Yuen e Hull,⁽⁷⁾ que afirmam que o alongamento do aço é mais influente na decapagem de aços com alta temperatura de bobinamento devido às propriedades químicas e mecânicas da composição da camada de oxidação formada, ou seja, da proporção de wustita, magnetita e hematita gerada por esta temperatura. A segunda restrição é citada por Batista, Villegas e Oliveira⁽⁶⁾ que afirmam que o alongamento é um fator relevante até no máximo 5%, obtendo-se melhores resultados em 3%. Ambas as restrições foram favoráveis ao trabalho proposto visto que aços “*Interstitial Free*” possuem alta temperatura de bobinamento e baixo limite de escoamento, o que facilitaria seu alongamento mecânico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Simulador

Inicialmente se fez necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que pudesse orientar de uma forma assertiva a decisão de mudança dos parâmetros do processo de decapagem, desta forma foi desenvolvido o simulador matemático ilustrado na Figura 1, desenvolvido a partir de ajustes na fórmula proposta por Hudson e Warning,⁽⁵⁾ visando sua adequação para o processo da ArcelorMittal Vega.

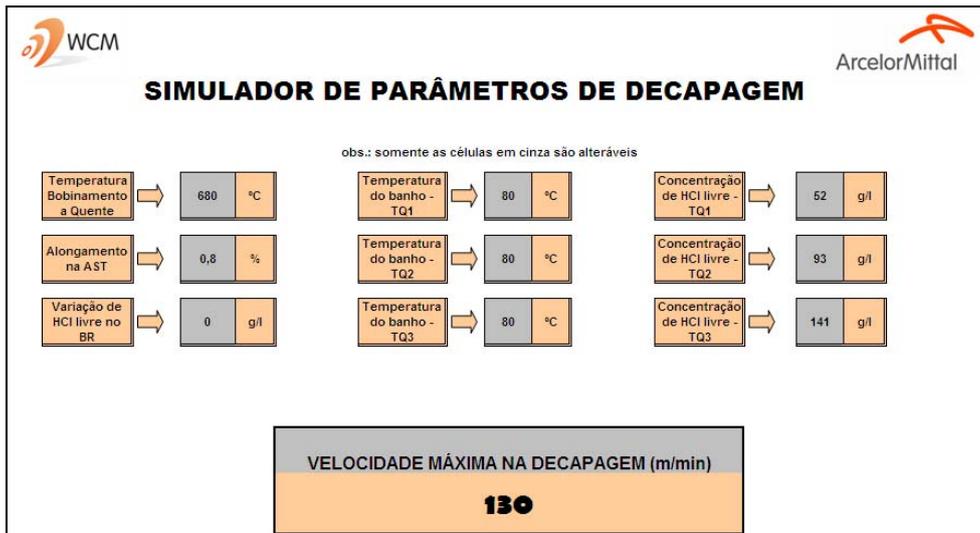


Figura 1. Simulador de parâmetros de decapagem.

Os parâmetros de entrada deste simulador são os descritos a seguir:

- temperatura de bobinamento a quente do aço;
- taxa de alongamento imposta ao aço;
- variação de HCl livre no banho regenerado (que alimenta a decapagem);
- temperatura do banho ácido nos tanques de decapagem; e
- concentração de HCl livre nos tanques de decapagem.

2.1.1 Cálculo do tempo mínimo

O tempo de exposição mínimo do aço no banho ácido de decapagem pode ser estimado de acordo com a Equação 1 elaborada por Hudson e Warning:⁽⁵⁾

$$\text{Log}(t) = A \cdot (1 + (k \cdot \%TR)) + B \cdot \text{log}(C_{\text{HCl}}) + D \cdot (T_f + 459)^{-1} \quad (1)$$

Representando:

- T_f = Temperatura do banho de decapagem (°F);
- t = Tempo de exposição;
- C_{HCl} = Concentração de ácido (HCl livre); e
- $\%TR$ = Percentual de alongamento imposto ao aço.

Os coeficientes “A, k, B, D” estão relacionados com o material a ser processado (temperatura de bobinamento à quente específica por grau de aço);

$$\text{LCT} = \begin{cases} A = -3,15 \\ k = 0,046 \cdot (0,000175 \cdot T_f) \\ B = -0,58 \\ D = 3069 \end{cases}$$

$$\text{HCT} = \begin{cases} A = -4,85 \\ k = 0,091 \cdot (0,00041 \cdot T_f) \\ B = -0,57 \\ D = 4312 \end{cases}$$

LCT = Baixa Temperatura de Bobinamento → $T = 550^\circ\text{C}$ ou 1022°F ;

HCT = Alta Temperatura de Bobinamento → $T = 720^\circ\text{C}$ ou 1328°F ;

Para as demais temperaturas de bobinamento a quente é realizada a interpolação dos coeficientes “A, k, B, D”.

2.1.2 Cálculo da velocidade teórica de processo

A máxima velocidade da linha também foi analisada por Hudson e Warning⁽⁵⁾ sendo estimada de acordo com a Equação 2.

$$\text{Velocidade}_{\text{max.}} = 60 * ((L_1/t_1) + (L_2/t_2) + (L_3/t_3) \dots + (L_n/t_n)) \quad (2)$$

Representando:

- L = Comprimento da tira efetivamente imersa em cada tanque.
- t = Tempo requerido para ocorrer a decapagem (calculado individualmente por cada tanque).

2.1.3 Cálculo da velocidade real de processo

Observou-se que o cálculo da velocidade teórica apresentava grande coerência, porém não refletia a realidade do processo industrial, desta forma foram realizados testes de velocidade para uma gama expressiva de materiais processados na ArcelorMittal Vega, com o intuito de verificar com precisão a máxima velocidade que estes materiais poderiam ser processados sem que houvesse nenhuma alteração significativa de processo.

Com base nestes resultados o simulador de processo foi alimentado com uma constante multiplicadora e assim foi possível obter resultados mais precisos e alinhados com os dados reais de uma linha de decapagem industrial.

2.2 Testes em Linha

Com base nos resultados gerados através do simulador de processos, verificou-se que o aumento de 5°C na temperatura do primeiro tanque de ácido poderia gerar um aumento de velocidade de 12% para materiais “*Interstitial Free*” e mantendo a alteração proposta na temperatura e adicionalmente incrementando o percentual de alongamento imposto ao aço em 1%, o aumento de velocidade poderia atingir 36%.

Adotando uma postura mais conservadora, decidiu-se modificar um parâmetro por vez e analisar o resultado obtido, assim modificando primeiramente a temperatura do primeiro tanque de decapagem e 12 meses após realizou-se a modificação da taxa de alongamento.

Os testes de modificação da temperatura e de modificação da taxa de alongamento fundamentaram-se na estratégia “Seis Sigma”, desta forma a escolha do tamanho da amostra, a análise das restrições e avaliação dos resultados basearam-se na estatística.

Para o controle adequado dos riscos envolvidos, foi desenvolvido um PFMEA (Análise do Efeito do Modo de Falha em Processos) que resultou no Plano de Gerenciamento de Riscos.

2.2.1 Tamanho da amostra

Fazendo uso do software “Minitab”, dimensionou-se o tamanho da amostra que para o teste de temperatura foi de 67 amostras e para o teste de alongamento foi de 47 amostras. O dimensionamento da amostra é baseado no desvio padrão do processo ao qual se deseja analisar e também na dimensão da diferença do parâmetro que se deseja comparar antes e depois da modificação. A Figura 2 mostra o gráfico de definição de tamanho de amostras para o teste de alongamento.

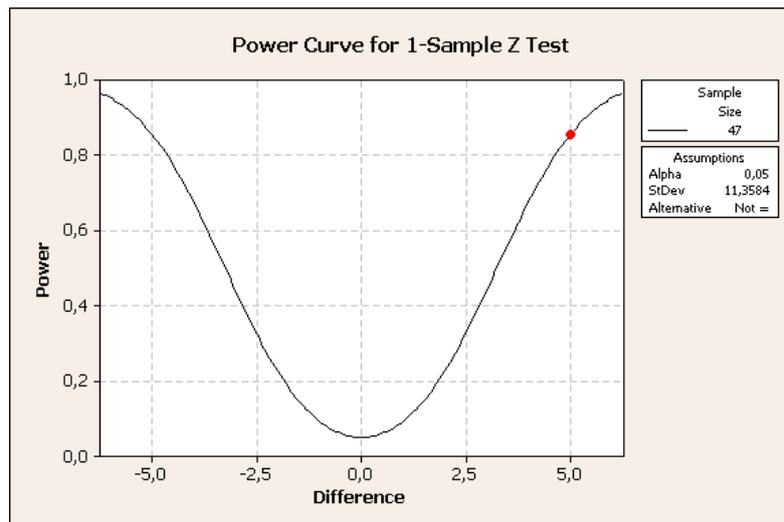


Figura 2. Determinação do tamanho de amostra. Fonte: Minitab 16

2.2.2 Análise das restrições

Através da realização de um “*Brainstorm*” com os responsáveis pelo processo de decapagem e posteriormente uma priorização dos dados verificou-se a existência de alguns fatores que poderiam comprometer a realização dos testes, sendo assim optou-se por analisar a capacidade desses fatores.

O primeiro fator a ser analisado foi a temperatura nos tanques de decapagem, controlada automaticamente através de termopares, trocadores de calor e válvulas proporcionais. Observou-se que após a linha de decapagem permanecer em marcha lenta por mais de 5 minutos e em seguida retornar a sua velocidade normal, a temperatura dos tanques sofria uma queda de 3°C a 5°C.

Na Figura 3 é possível observar a capacidade do processo de aquecimento do primeiro tanque de banho ácido, onde verifica-se que a probabilidade de que a temperatura ultrapasse o limite inferior estabelecido é de 7,37%.

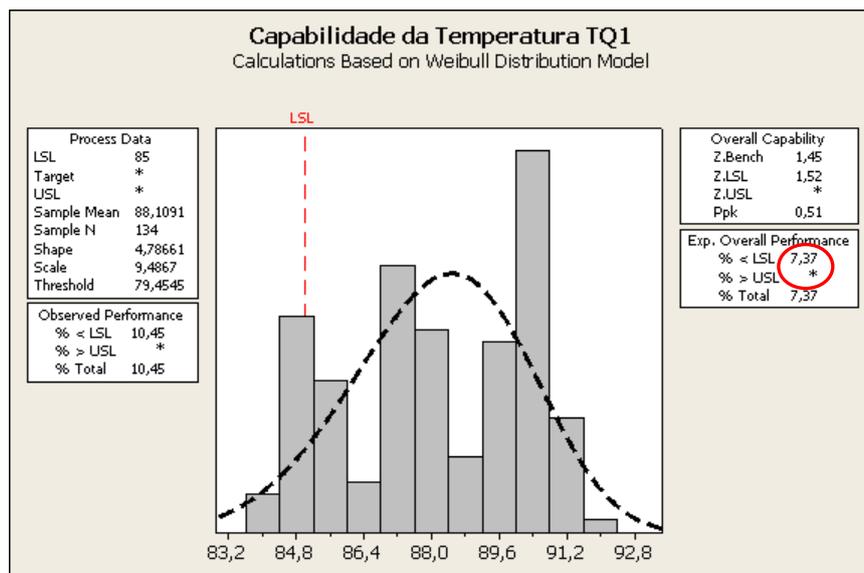


Figura 3. Capabilidade da temperatura do tanque 1. Fonte: Minitab 16

Desta forma optou-se por tornar mais suave a taxa de aceleração da passagem do aço pelos tanques, o que evitaria a entrada de ácido com temperatura abaixo do desejado.

Outro fator analisado foi a concentração de HCl livre nos banhos de decapagem, que é controlada manualmente pelos operadores que retiram amostras e realizam análises com intervalos de 2 horas.

Observando a Figura 4 verifica-se que a capacidade da concentração de ácido não é adequada onde observamos, por exemplo, que 9,52% das análises de HCl livre tendem a ultrapassar o limite de controle superior para o tanque 3 de decapagem.

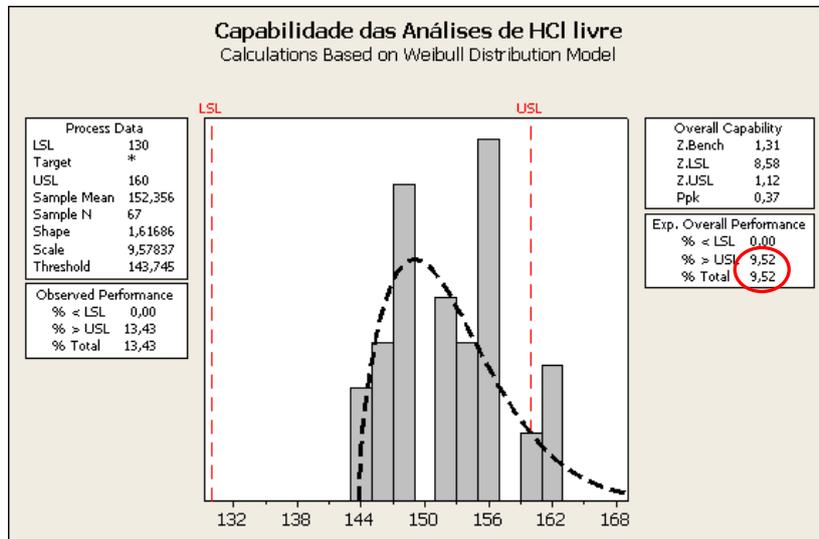


Figura 4. Capabilidade da concentração de HCl livre no tanque 3. Fonte: Minitab 16

Visando maior rigor durante o teste e menor interferência deste parâmetro no resultado final, optou-se pela realização de análises químicas com intervalo de 30 minutos.

Outro ponto de atenção concentrou-se na taxa de alongamento, que é gerada na Aplainadora Sob Tensão e poderia sofrer alterações durante os testes, o que poderia também influenciar nos resultados, sendo assim optou-se por analisar a capacidade deste processo de alongamento onde seu resultado pode ser verificado na figura 5 como sendo favorável ao teste, visto que existe a possibilidade de que 5,58 amostras em um universo de 1 milhão possam ser alongadas com uma taxa inferior a solicitada, desta forma não representando restrição.

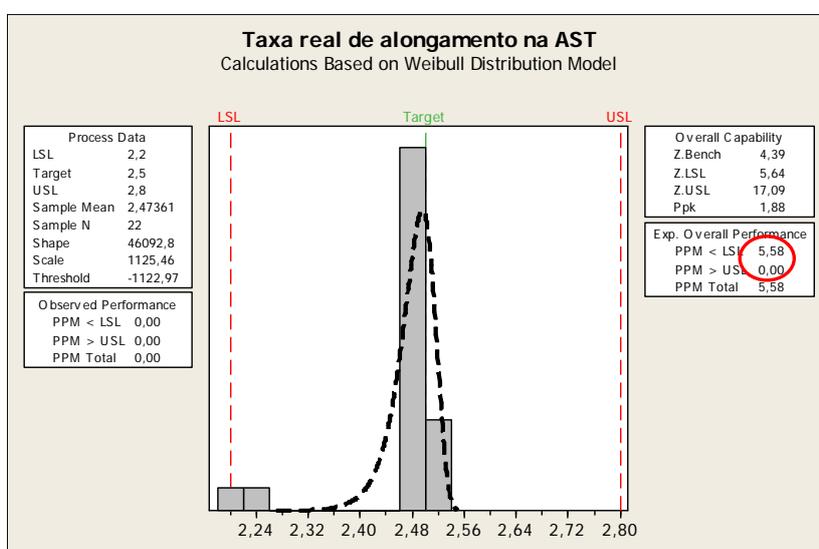


Figura 5. Capabilidade da taxa de alongamento para materiais "Interstitial Free".

Por fim, o último ponto de atenção para a execução dos testes em linha se dava pela tubulação, na qual o fluxo da solução ácida é bombeada até os tanques de decapagem. Devido as tubulações da linha de decapagem da ArcelorMittal Vega serem de polipropileno recobertas com resina e fibra de vidro, existia uma incerteza quanto a resistência deste material a um aumento de temperatura, que em alguns momentos poderia alcançar picos de 90°C.

Através da norma de fabricação dos tubos, a norma DIN 8077⁽⁹⁾ para tubos de polipropileno com classe de pressão de até 10 Bar (PN-10), elaborou-se o ábaco que está ilustrado na figura 6, onde é possível visualizar com maior facilidade a relação entre temperatura, pressão e tempo de vida útil para tubos de polipropileno com classe de pressão PN-10.

Desta forma foi possível calcular com precisão a vida útil dos tubos instalados na linha de decapagem e assim vislumbrar que o aumento de 5°C na temperatura do banho ácido seria responsável por reduzir o tempo de vida útil restante de 18 para 3 anos, desta forma viabilizando o teste.

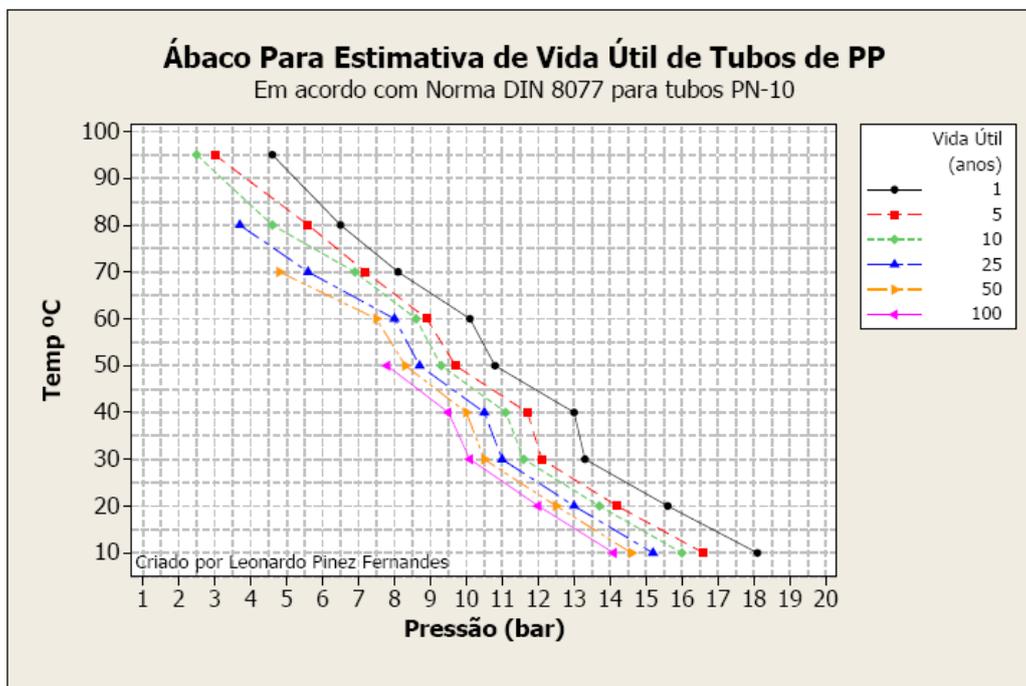


Figura 6. Ábaco para estimativa de vida útil de tubos de polipropileno classe de pressão PN-10.⁽⁹⁾

3 RESULTADOS

Como forma de avaliação dos resultados dos testes optou-se por analisar dois indicadores, sendo eles a velocidade máxima na qual o material foi processado e o número de defeitos de qualidade gerado nesta velocidade.

Para o primeiro teste, onde a temperatura do banho ácido do primeiro tanque sofreu acréscimo de 5°C, foi possível aumentar a velocidade de decapagem do aço em 12%. A avaliação do número de defeitos de qualidade gerados está expressa no Quadro 1 onde foi avaliado, por meio de capacidade, a probabilidade de ocorrência do defeito de subdecapado (PSBD), que é a permanência da oxidação após a decapagem.

Quadro 1. Capabilidade para PSBD – Teste de temperatura

| Variável | Defeitos | Unidades | Oport | Capabilidade Short Term a ser reportada - Sigma |
|-----------------|----------|----------|-----------|---|
| | <i>D</i> | <i>U</i> | <i>OP</i> | <i>Z.B</i> |
| PSBD (1º teste) | 0 | 24 | 1 | 6,00 |
| PSBD (2º teste) | 0 | 32 | 1 | 6,00 |
| PSBD (3º teste) | 1 | 11 | 1 | 2,84 |
| Total | 1 | | | 3,67 |

De acordo com o Quadro 1, o “Nível Sigma” para o teste é de 3,67, ou seja, a probabilidade de geração de defeitos de qualidade é de 0,02%, desta forma aprovando o teste para aumento de temperatura do banho ácido.

Para o segundo teste, onde a taxa de alongamento foi alterada em 1%, o resultado do experimento em linha de produção foi avaliado também através de análise de capacidade para a geração de defeito de qualidade, além da análise da velocidade máxima obtida no processo de decapagem que foi 36% maior que o valor original, isto é, o valor praticado anteriormente às modificações de temperatura do banho ácido e a taxa de alongamento.

O Quadro 2 demonstra o resultado obtido no teste de alongamento sendo 3,41 o “Nível Sigma” ou seja, a probabilidade de ocorrer subdecapado (PSBD) é de 0,02%.

Quadro 2. Capabilidade para PSBD – Teste de alongamento

| Variável | Defeitos | Unidades | Oport | Capabilidade Short Term a ser reportada - Sigma |
|-----------------|----------|----------|-----------|---|
| | <i>D</i> | <i>U</i> | <i>OP</i> | <i>Z.B</i> |
| PSBD (1º teste) | 1 | 36 | 1 | 3,41 |
| Total | 1 | | | 3,41 |

4 DISCUSSÃO

O resultado dos testes em linha de produção demonstraram consistência no cálculo realizado através do simulador matemático de processo tendo em vista que o resultado apresentado pelo simulador pode ser comprovado na prática em uma linha de decapagem industrial.

Houve coerência entre os dados reais obtidos através da decapagem do aço em escala industrial, e os conceitos apresentados na literatura de referência, no entanto as deduções matemáticas apresentadas na literatura não puderam ser aplicadas na íntegra em uma decapagem industrial e isso se deve ao fato de que as deduções matemáticas propostas na literatura foram obtidas através de dados experimentais gerados em laboratório onde as condições de processo podem ser controladas com maior rigor, isto é, próximas da condição ideal. Outro fato relevante que pode justificar a discrepância nos resultados é a existência de forte turbulência no interior dos tanques de decapagem, o que reduz o tempo mínimo necessário para promover a decapagem do aço e tal turbulência não foi avaliada em nenhuma das referências consultadas.

5 CONCLUSÃO

Considerando-se sempre as divergências existentes entre os resultados obtidos através de experimentos laboratoriais e os dados obtidos através de experimentos em linha de produção é possível criar simuladores de processo para outras linhas de

decapagem, porém sempre tendo em vista que nenhum processo é igual ao outro, desta forma sempre será necessário o ajuste da fórmula utilizada que sempre será individualizada de acordo com cada linha de decapagem.

Contudo conclui-se que pequenas alterações, porém precisas, nos parâmetros de processo podem gerar resultados relevantes na geração de receita e redução de custos às linhas de produção, desta forma considera-se imprescindível o desenvolvimento de simuladores de processo direcionados a linhas produtivas, como ferramenta de orientação técnica às decisões.

REFERÊNCIAS

- 1 LEITE, W. F. **Dissolução de óxidos formados a altas temperaturas nos aços elétricos variando-se a temperatura e a concentração da solução ácida na decapagem.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.
- 2 SUN, W. et al. **Oxide scales growth of low-carbon steel at high temperatures.** *Jurnal of materials processing technology*, 155 – 156, Australia, 2004.
- 3 FONTANA, M. G.; GREENE, N. D. **Oxidation and other high-temperature metal-gal reactions.** In: FONTANA, M. G. *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967. C. 11, p. 347-376.
- 4 HUDSON, R. M.; WARNING. C. J. **Factors influencing the pickling rate of hot-rolled low-carbon steel in sulfuric and hydrochloric acids.** *Metal Finishing*, v. 78, n. 6, p. 21-28, June 1980.
- 5 HUDSON, R. M.; WARNING. C. J. **Pickling of hot rolled strip: an overview.** *I&SM-31*, September 1991.
- 6 BATISTA, N. B.; VILLEGAS, E. A.; OLIVEIRA, I. T. **Influência de parâmetros de processo na decapagem de aços IF.** *40º Seminário de laminação – Processos e produtos laminados e revestidos*. Vitória, 2003.
- 7 CHEN, R. Y.; YUEN, W. Y. D.; HULL, R. **Effects of hot rolling conditions and scale breaking on the pickling performance of hot-rolled steel strip.** *SEASIS Quarterly*, Selangor Darul Ehsan, v. 29, n. 3, p. 68-82, July 2000.
- 8 ROTONDARO, Roberto G. **Seis sigma - Estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços.** São Paulo: Atlas, 1ª Edição, 2002.
- 9 Deutsches Institut für Normung e. V. **DIN 8077:2008-09 Polypropylene (PP) pipes - PP-H, PP-B, PP-R, PP-RCT – Dimensions.** Berlin, September 2008.