



AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DA LAMINAÇÃO A QUENTE NO INDICADOR DE RENDIMENTO METÁLICO DE PRODUÇÃO DE TUBOS DE AÇO SEM COSTURA

Gabriela Rezende Cardoso
gabrielarcardoso@yahoo.com.br
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia Minas Gerais
– IFMG, Congonhas, Minas Gerais,
Brasil

Sílvia Maria Santana Mapa
silvia.mapa@ifmg.edu.br
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas
Gerais, Belo Horizonte, Minas
Gerais, Brasil

Filipe José de Oliveira Gomes
filipe.gomes@vstubos.com
Vallourec & Sumitomo Tubos do
Brasil, Jeceaba, Minas Gerais,
Brasil

RESUMO

Para tornarem-se ou manterem-se competitivas diante da atual concorrência, as empresas têm utilizado técnicas estatísticas, como o experimento fatorial, que permitem avaliar processos produtivos de forma a melhorá-los, reduzindo, assim, a possibilidade de insucesso. A proposta deste trabalho é apresentar uma aplicação da técnica estatística Experimento Fatorial Completo 2^k em um processo de produção de tubos de aço sem costura, com o objetivo de estudar especificidades do principal indicador de rendimento metálico, denominado VZ (Verbrauch Zieff), que descreve o rendimento do emprego de insumos sobre a produção de tubos. Foram definidos quatro fatores para a análise: tipo de aço, calibre, parede de laminação e tratamento térmico. Para a realização do presente estudo, a metodologia adotada é a pesquisa de natureza empírica e descritiva, por meio de abordagem combinada, qualitativa e quantitativa. A realização do experimento fatorial utilizando os fatores escolhidos proporcionou como resultado uma visão, até então desconhecida pela empresa, de como os fatores e suas interações influenciam o indicador estudado, sendo os fatores tipo de aço e calibre comprovados estatisticamente significativos, e, com isso, gerando maior assertividade no planejamento de matéria prima e reduzindo, assim, custos gerais dos produtos.

Palavras-chave: Experimento Fatorial; Laminação; Rendimento Metálico.



1. INTRODUÇÃO

A produção de aço cresce a cada ano e em 2014 a produção mundial foi de 1,66 bilhões de toneladas, o que representou um aumento de 1,2% em relação a 2013. Os maiores produtores de aço naquele ano foram a China, Japão, Oriente Médio e Estados Unidos (Worldsteel, 2015). Segundo o Instituto Aço Brasil, IAB (2015), o parque siderúrgico brasileiro é representado por quatorze empresas privadas, fazendo com que o Brasil tenha hoje o maior parque industrial de aço da América do Sul, ocupando a nona posição no *ranking* da produção mundial de aço em 2014. Porém, atualmente, a indústria vivencia uma desaceleração da demanda interna de produtos siderúrgicos e opera com ociosidade em relação à capacidade instalada no país, com algumas empresas operando com cerca de 50% de sua capacidade. A retração do mercado interno e a desaceleração da economia foram acentuadas pelo aumento da competição do aço importado e pelo fraco desempenho da economia brasileira, o que representou em 2014 uma redução de 8,6% do consumo aparente em comparação com 2013 (IAB, 2015). Frente a este cenário desafiador, a gestão de custos deve ser aperfeiçoada para que a empresa sobreviva nos dias atuais.

Em 2016, foi realizado um levantamento pela Controladoria, onde o indicador de rendimento metálico chamado de VZ (Verbraucht Ziffer), apresentou potencial de redução de custos de 23,5% (dados internos da empresa em estudo) na etapa produtiva da laminação, justificando o presente estudo. O indicador VZ é calculado como a razão entre a quantidade consumida de matéria prima e quantidade produzida dentro do processo. Após o estudo realizado, foi possível planejar com maior assertividade a quantidade de matéria prima a ser empregada, reduzindo custos gerais dos produtos, a real ocupação da linha de produção, com redução de desperdícios, além de poder acompanhar sistematicamente a evolução do indicador, de forma a tomar decisões que gerem ganhos para o setor estudado, apontando, assim, sua relevância.

A empresa foco deste trabalho está localizada na região do Alto Paraopeba, Minas Gerais, e fabrica tubos de aço sem costura para o mercado interno e para a exportação, principalmente para os setores de óleo e gás. O presente estudo tem como objetivo a avaliação de parâmetros produtivos da laminação a quente, segundo a influência desses parâmetros na produtividade do processo, utilizando-se da ferramenta estatística Experimento Fatorial, conhecida na literatura como parte da metodologia DOE (*Design of Experiments*, ou Planejamento e Análise de Experimentos). Essa técnica é uma grande aliada, pois, com ela, pode-se analisar as variáveis envolvidas no comportamento do indicador de desempenho do processo e suas interações, assim como propor soluções que permitam uma otimização completa do processo e suas variáveis por meio do experimento fatorial, e sem a necessidade inicial de grandes investimentos.

2. A TÉCNICA ESTATÍSTICA DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

Com o aumento da competitividade, aumentou-se também a necessidade da otimização de produtos e processos cujo objetivo é a redução de custos e tempos. Isso motiva a busca por técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos estatísticos. A metodologia empregada no DOE é fundamentada na teoria estatística, podendo ser usada tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas para melhorar o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não sensível a fontes externas de variabilidade (Salles *et al.*, 2010).

Segundo Galdámez (2002), o DOE é uma técnica utilizada para se planejar experimentos de forma a obter excelência operacional que permita resultados mais confiáveis, podendo ser aplicado em diferentes setores e problemas. Santos (2017) aplicou o DOE para melhorar o nível de serviço de processamento de arquivos de dados para hospedagem de páginas *Web*, alcançando menor consumo de memória RAM e de núcleos de CPU. Outro setor onde nota-se o uso de DOE pode ser exemplificado com o trabalho recente de Hazir *et al.* (2018). Os autores aplicaram a técnica de planejamento fatorial 2^k completo, analisando cinco fatores de usinagem para a otimização de parâmetros de corte de uma máquina CNC, e conseguiram alcançar o objetivo, qual seja, obter um valor mínimo de rugosidade superficial em madeiras.

Experimentos são realizados com o objetivo de conhecer um determinado sistema e comparar os efeitos causados por vários fatores nele envolvidos por meio de uma série de testes, onde são realizadas mudanças nas variáveis de entrada do sistema, para que se possa verificar os efeitos das variáveis respostas, de modo que a variabilidade desta resposta seja mínima em função do efeito das variáveis independentes (ruídos) do sistema estudado (Montgomery *et al.*, 2012).

Costa (2011) e Button (2012) afirmam que as principais vantagens dos experimentos planejados são: com um número reduzido de ensaios, tem-se uma qualidade de informação elevada; permite ao experimentador otimizar uma variável resposta; um erro experimental pode ser calculado de modo a verificar até que nível pode-se confiar no resultado obtido; melhoria na produção; variabilidade reduzida e conformidade mais próxima da nominal; avaliação de materiais alternativos; determinação dos parâmetros-chave do planejamento do produto; melhoria no rendimento do processo e redução dos tempos; redução de custos de operação e custos totais; redução do tempo e variação do processo; melhoria da qualidade da informação obtida a partir dos resultados.

Conforme Montgomery *et al.* (2012), as principais terminologias dos experimentos são:



- Variável resposta: é a variável dependente que durante um experimento sofre algum tipo de efeito provocado por fatores;
- Fatores (x): são fatores alterados propositalmente no experimento para se avaliar o efeito produzido na variável resposta e, com isso, poder determinar os principais fatores;
- Níveis (n): São os diferentes grupos que se pretende comparar. Podem assumir valores quantitativos ou qualitativos. São as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Quando se tem dois níveis, estes são normalmente identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1);
- Tratamentos: são as combinações específicas dos níveis dos fatores de controle no experimento, ou seja, cada rodada será um tratamento diferente;
- Efeito (α): Definido como a mudança ocorrida na resposta quando se move um fator do nível baixo (-) para o nível alto (+);
- Efeito principal: é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado;
- Efeito de interação: é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator. Os valores de interação entre os fatores podem ser calculados levando-se em consideração os sinais já atribuídos às variáveis envolvidas, como se fosse uma operação matemática de multiplicação;
- Interações: por meio de uma influência mútua, dois ou mais fatores envolvidos no experimento se tornam significativos estatisticamente;
- Ruídos: são variáveis que podem influenciar a variável resposta definida no experimento, que podem ser controlados ou não;
- Aleatorização: é a prática de realizar a escolha das corridas (ou pontos experimentais) por meio de um processo aleatório, que em muitos casos garante as condições de identidade e independência dos dados coletados e evita erros sistemáticos;
- Blocos: É a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não controláveis que não são de interesse) dos experimentos por meio de agrupamentos de dados. Com esta técnica, procura-se criar um

experimento mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas;

- Repetição: é o processo de repetir cada uma das combinações (linhas) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação. Este conceito permite encontrar uma estimativa do erro experimental, que é utilizada para determinar se as diferenças observadas entre os dados são estatisticamente significativas e permite estimar os efeitos de um fator quando a média de um resultado for utilizada.

Segundo Werkema *et* Aguiar (1996), os planejamentos de experimentos podem ser classificados em vários tipos: Fatorial completo; Fatorial 2^k completo; Fatorial em blocos; Fatorial fracionário; Blocos aleatorizados; Blocos incompletos balanceados; Blocos incompletos parcialmente balanceados; Quadrados latinos; Quadrados de Youden; Hierárquico; Superfície de Resposta; Completamente aleatorizado com um único fator, entre outros.

Entre os métodos de planejamento experimental disponíveis na literatura, o Planejamento Fatorial Completo é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que, em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (Button, 2012).

Neste trabalho será abordado o Planejamento Fatorial Completo 2^k , pois serão investigados k fatores, analisados em dois níveis, alto e baixo. Esse tipo de planejamento é particularmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando se tem muitas variáveis a investigar. Esse procedimento fornece o menor número de corridas com os quais k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo. Consequentemente, esses planejamentos são largamente usados em experimentos de varredura de fatores (Calado *et* Montgomery, 2003).

3. METODOLOGIA DE ESTUDO

De acordo com Gil (2002), a pesquisa é um processo de desenvolvimento do método científico de maneira formal e sistemática, cujo principal objetivo é proporcionar respostas aos problemas propostos mediante a utilização dos procedimentos científicos, podendo ser classificada em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. Portanto, o estudo em questão pode ser classificado quanto ao seu objetivo como descritiva, ou seja, a pesquisa observa, registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos (variáveis).

Além disto, a pesquisa será aplicada, pois envolverá práticas e estudos que contribuirão para a identificação do proble-



ma levantado a partir de dados do estudo, de forma a alcançar aplicações reais. Quanto aos meios, a pesquisa é experimental e utiliza a técnica estatística de Experimento Fatorial Completo, que é uma ferramenta muito eficaz para estudar sistemas complexos, pois permite identificar as interações entre as variáveis envolvidas no problema, uma vez que a cada tentativa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas

Os autores Montgomery et Runger (2012), Galdámez (2002), Rodrigues *et al.* (2005) e Salles *et al.* (2010) recomendam que durante o processo de experimentação seja feito um plano estratégico para coordenar as atividades. A seguir, apresentam-se as atividades do procedimento experimental, conforme estes autores, que farão parte da abordagem metodológica desenvolvida para a condução do presente estudo.

3.1 Definição dos objetivos do experimento

Deve-se definir os problemas, os objetivos do experimento e, principalmente, definir quem participará das atividades do processo experimental. Conforme Werkema *et al.* (1996) os envolvidos devem saber da importância de analisar corretamente os fatores que influenciam no problema definido. Montgomery e Runger (2012) sugerem que o *brainstorming* seja utilizado para obter informações relevantes. Segundo Caten *et al.* (1996), os objetivos devem ser específicos, mensuráveis, não tendenciosos e devem ter consequência prática.

3.2 Parâmetros do experimento

Envolve a coleta de informações técnicas, nas quais as pessoas devem listar todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis de ajustagem e as variáveis de resposta. Nessa fase, as informações técnicas podem resultar de uma combinação entre a experiência e a compreensão teórica.

3.3 Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta

Selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), as faixas de variação dos níveis desses fatores e as respostas do experimento (variáveis dependentes), assim como definir o método de medição dos fatores de controle.

3.4 Seleção da matriz experimental

Selecionar ou construir a matriz experimental considerando o número de fatores de controle, o número de níveis e

os fatores não controláveis do processo. Além disso, deve-se definir as sequências das corridas aleatoriamente, o número de réplicas, as restrições dos experimentos e as possíveis interações que possam vir a ocorrer entre os fatores que estão sendo avaliados.

3.5 Realização do experimento

Segundo Bracarense (2012), a escolha do planejamento envolve consideração sobre o tamanho da amostra (número de replicações), seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais e se há formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas. Durante a realização, o experimento deve ser acompanhado para garantir o cumprimento correto do plano e para registrar quaisquer alterações ocorridas durante a execução. Recomenda-se a apresentação de relatórios no final do experimento, pois as informações contidas podem enriquecer os resultados obtidos pela análise de dados e validar se os experimentos foram corretamente executados. Erros no procedimento experimental nesse estágio, em geral, destruirão a validade do experimento.

3.6 Análise de dados

Conforme Montgomery e Runger (2012) e Werkema *et al.* (1996), os métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados, de modo que os resultados e conclusões sejam objetivos, e não uma opinião. Podem ser utilizados *softwares* estatísticos (Minitab, Action, Anova, entre outros) para auxiliar na geração de informação. Os conceitos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento, para descrever o comportamento das variáveis de controle, a relação entre elas e para estimar os efeitos produzidos nas respostas observadas. Ainda, permite decidir quando aceitar ou rejeitar as hipóteses formuladas anteriormente.

3.7 Interpretação dos resultados

Extração das conclusões práticas dos resultados a partir de gráficos e planilhas e recomendação de ações de melhorias.

3.8 Elaboração de relatórios

No relatório final, deve-se identificar as limitações práticas e teóricas encontradas, as recomendações para futuros experimentos e as conclusões obtidas, pois esse *feedback* pode ser de grande benefício para o processo de avaliação do desempenho dos experimentos industriais.



4. A EMPRESA ESTUDADA

A empresa estudada, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., ou simplesmente VSB, é uma *joint venture* com capacidade instalada de 600kt/ano e está localizada em Jeceaba, Minas Gerais. Produz tubos de aço sem costura para perfuração, revestimento de poços e na condução de petróleo e gás, tanto para o consumo no mercado interno quanto externo, principalmente no setor petrolífero. Vem consolidando sua posição no mercado devido, principalmente, ao alto índice de qualidade do seu produto final, conforme certificações já vigentes na empresa, como ISO Q1, API 5CT, API 5L, ISO 9001:2008 e ISO 17025. É uma usina integrada que conta com setores como Pelotização, Alto Forno, Aciaria, Laminação, Tratamento Térmico e Linhas de Acabamento.

4.1. Fatores e níveis

Foi realizado *brainstorming* com a equipe técnica do processo de laminação definindo-se os fatores (variáveis independentes) que possivelmente impactam no indicador em estudo (variável dependente). São eles: aço, calibre, parede de laminação e o tipo de tratamento térmico. Essas variáveis foram classificadas em dois níveis qualitativos, alto e baixo, conforme apropriada descrição de cada fator, descritas nos sub-itens seguintes.

Durante o processo de laminação, todos os dados das ordens de produção finalizadas são registradas por meio de *softwares* de gestão de produção e posteriormente são gerados os relatórios de produção oficiais, disponibilizados para análise e tomada de decisões. Para esse estudo, os dados brutos foram coletados do sistema no período de janeiro de 2014 a dezembro 2015, e, em seguida, tratados de forma a obter o VZ de cada ordem de produção em função das variáveis escolhidas.

4.1.1. Tipo de Aço

Os tubos produzidos de aços tipo *Lipe Pine* (LP), são tubos destinados à condução em diversos segmentos como, por exemplo, em minerodutos. Já os tubos produzidos do tipo OCTG (*Oil Country Tubes Goods*) são destinados para a perfuração. Na Figura 1 é possível verificar o comportamento do indicador VZ para todos os tipos de aços já produzidos e a variação desse indicador quando comparados entre eles. Na Figura 2 é possível observar

que, quando os aços foram agregados, os valores obtidos apresentaram certa variação, e, a partir dessa análise, foi definido qualitativamente o nível alto (LP) e nível baixo (OCTG) para o fator aço.

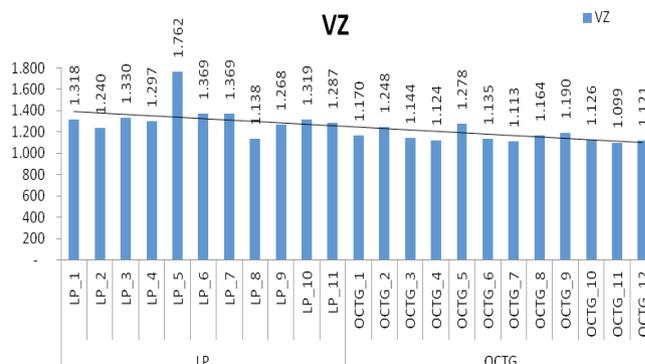


Figura 1. VZ dos aços produzidos

Fonte: Os próprios autores

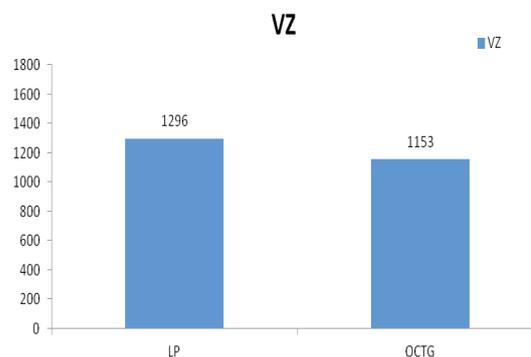


Figura 2. VZ dos aços após definição dos níveis

Fonte: Os próprios autores

4.1.2. Calibre

É definido como o diâmetro do tubo no laminador alongador, sendo que a empresa possui quatro calibres definidos, sendo eles (em mm): 239, 296, 382 e 435. Para a realização do experimento fatorial, os calibres foram segregados em 2 grandes grupos, sendo eles: Calibre I (239 e 296mm) e Calibre II (382 e 435mm). Na Figura 3 é possível verificar o comportamento do indicador VZ para os diferentes calibres e suas variações, e na Figura 4 é possível observar que quando os calibres foram agregados, os valores obtidos apresentaram certa variação, e, a partir dessa análise, foi definido qualitativamente o nível alto (Calibre II) e nível baixo (Calibre I).

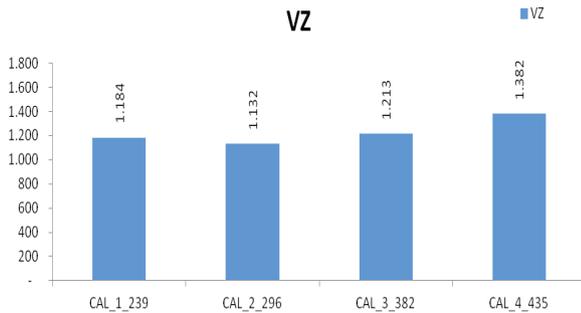


Figura 3. VZ para todos os calibres
 Fonte: os próprios autores

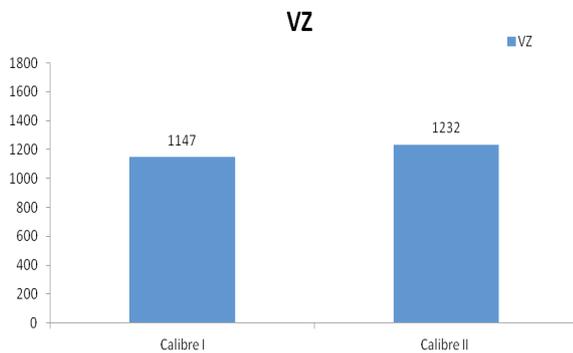


Figura 4. VZ por calibre após definição dos níveis
 Fonte: os próprios autores

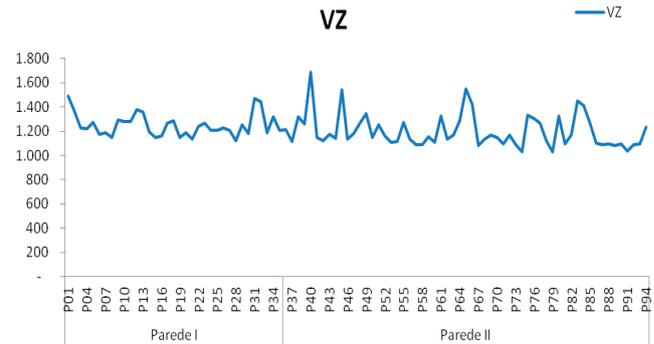


Figura 5. VZ para todas as paredes
 Fonte: os próprios autores

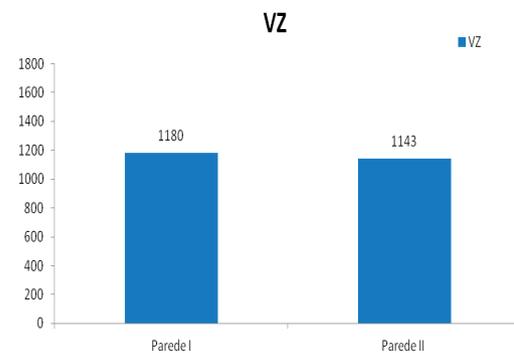


Figura 6. VZ por parede após definição dos níveis
 Fonte: os próprios autores

4.1.3. Parede de laminação

Devido à grande variabilidade de paredes lamináveis, os materiais foram segregados em dois grandes grupos, Parede I e Parede II, sendo que a Parede I está compreendida entre P01 e P35 (6,2 a 13,06 mm inclusive) e Parede II compreendida entre P36 e P94 (13,07 a 35,5 mm inclusive), conforme especificações da empresa. Na Figura 5, é possível verificar o comportamento do indicador VZ para todas as paredes laminadas no período selecionado e a variação desse indicador quando comparados entre eles. Na Figura 6 é possível observar que, quando as paredes foram agregadas, os valores obtidos apresentaram variação, e, a partir dessa análise, foi definido qualitativamente o nível alto (Parede I) e nível baixo (Parede II).

4.1.4. Tratamento térmico

Os tubos produzidos pela empresa podem ser temperados e normalizados (QT), cuja rota é o setor de tratamento térmico; e não temperado (NQT), cuja rota são linhas acabadoras. Na Figura 7 é possível verificar o comportamento do indicador VZ para os tipos de rotas e tratamentos térmicos. A partir dessa análise foram definidos os níveis alto (NQT) e baixo (QT) para o fator tratamento térmico.

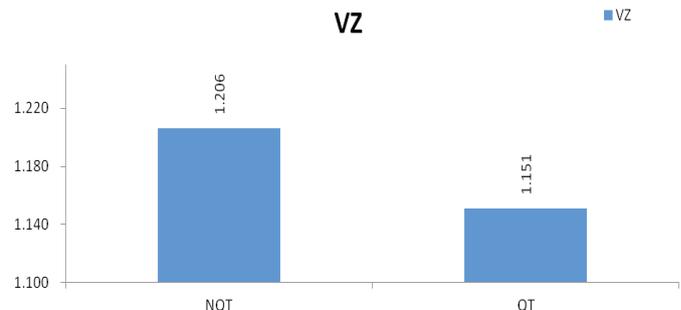


Figura 7. VZ para os tratamentos térmicos
 Fonte: os próprios autores



5. ANÁLISE DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

Após definir os 4 fatores e seus níveis conforme subitens acima, foi aplicado o Experimento Fatorial Completo 2^k , sem réplicas, sendo , gerando assim 16 tratamentos a serem analisados utilizando-se o *software* Minitab®, concedido pela empresa em estudo. Em seguida, foi executada a análise do experimento fatorial completo aplicando-se o princípio da esparsidade, sendo consideradas as interações e efeitos de segunda ordem, conforme ilustra a Figura 8.

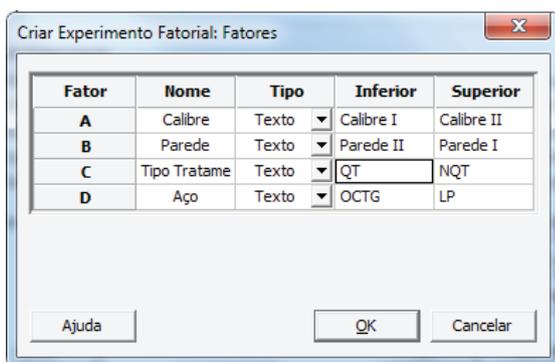


Figura 8. Criação do experimento

Fonte: os próprios autores

5.1. Princípio da Esparsidade

Segundo Montgomery e Runger (2012), à medida que o número de fatores aumenta em um experimento, o número de efeitos estimáveis também aumenta. Em algumas situações, o princípio da esparsidade dos efeitos se aplica, ou seja, o sistema é geralmente dominado pelos efeitos principais e interações de ordens baixas, onde as interações de terceira ordem ou mais são geralmente negligenciadas. Quando o número de fatores for moderadamente grande, como $k \geq 4$, uma prática comum é executar somente uma réplica, e então combinar as interações de ordens mais altas como estimativa de erro.

5.2. Gráfico de Pareto para os Efeitos e Gráficos Normal dos Efeitos

O gráfico de Pareto na Figura 9 mostra o valor absoluto dos efeitos e mostra uma linha vertical de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estende para além desta linha de referência é potencialmente importante. Essa linha de referência é determinada a partir de uma escala que depende da existência de um termo de erro. Os fatores A e B ultrapassaram a linha de referência, significando que esses são os fatores com maior significância. Nenhum dos demais fatores ou interações entre eles demonstrou ser estatisticamente significativo ao nível de $\alpha=0,05$.

O Gráfico Normal dos Efeitos, Figura 10, exibe efeitos negativos do lado esquerdo e efeitos positivos do lado direito da linha de referência, que indica onde seria de se esperar que os pontos caíssem se todos os efeitos fossem zero, tornando difícil a comparação da magnitude entre os efeitos positivos e negativos. É usado para comparar a magnitude relativa e a significância estatística de ambos os efeitos principais e interações. Pontos que não se enquadram perto da linha geralmente sinalizam efeitos significativos. O gráfico da Figura 10 mostra que os fatores B e A, Aço e Calibre respectivamente, exercem, nesta ordem, os efeitos mais significativos estatisticamente sobre o indicador VZ.

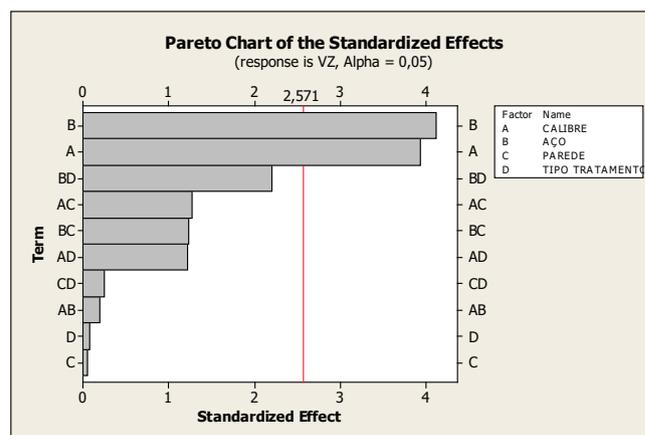


Figura 9. Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos

Fonte: os próprios autores

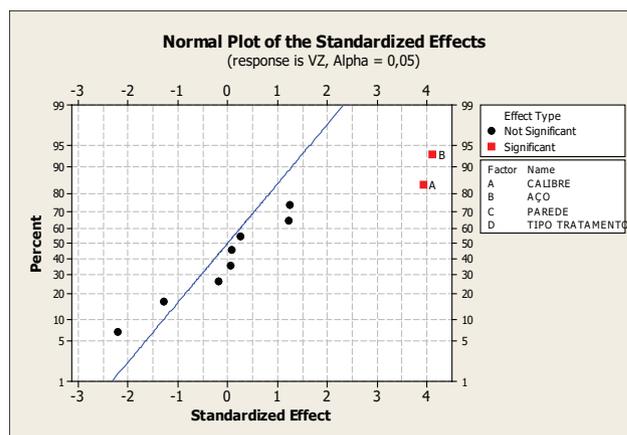


Figura 10. Gráfico Normal dos Efeitos

Fonte: os próprios autores

5.3. Interação entre os fatores

Quando as retas mostradas em gráficos de interação são paralelas, ou quase paralelas, significa que não há interações entre os fatores. Baseado nisso, é possível notar, a partir da Figura 11, que há certa interação entre os fatores analisados



(exceto entre os fatores Calibre e Aço), significando que os fatores e suas combinações possuem dependência, e que o efeito provocado pela mudança do nível de um fator na resposta afeta o nível de um outro fator.

Na prática, os fatores possuem certa interação, pois, baseado no banco de dados da empresa, pode-se notar que o Calibre I representou maior volume produzido contra o Calibre II, demonstrando que o conhecimento e experiência adquirida impacta em um menor resultado para VZ, pois, quanto maior a experiência, menores são os erros que geram defeitos. Ainda no Calibre I, os aços OCTG representam 97% do volume produzido, contribuindo para o VZ menor, pois, na prática, este tipo de aço é considerado fácil de laminar devido aos elementos de ligas existentes, que geram menor quantidade de defeitos. No Calibre II, nota-se que 78% do volume produzido se refere à aços LP, que possuem menor quantidade de ligas, dificultando sua laminação.

Quando analisamos os aços LP, percebemos que estes representaram 14% do volume produzido contra 86% de aços OCTG, reafirmando que o *know-how* possui impacto no VZ. Por representar menor volume, menores são as possibilidades de correção de falhas durante sua fabricação e maior é o impacto das perdas em sua totalidade. Conjuntamente com o volume, pode-se notar que 78% dos aços LP são aplicados ao Calibre II, cuja experiência ainda é pequena devido a sua baixa produção até o momento.

Analisando o fator Parede de laminação, nota-se que 68% do volume produzido de aço LP é aplicado em tubos de parede fina cujo VZ é maior. Na prática, os materiais cuja parede é mais fina apresentam maior VZ, pois a geração de defeitos acontece mais facilmente, devido ao próprio processo de laminação e suas etapas, como transporte, aquecimento, breakdown e ferramentas utilizadas. Com relação ao Tipo de Tratamento, foi possível notar, mediante a análise do banco de dados, que os materiais do tipo QT representam 60% do volume produzido, o que gera mais conhecimento e utilização de melhores práticas durante sua laminação. Além disso, 48% do volume produzido é feito no Calibre I, que possui menor VZ devido ao *know-how* adquirido ao longo dos anos e de aços OCTG, que também possuem menor VZ característico.

5.4. Avaliação dos efeitos principais

O gráfico de efeitos principais é utilizado para examinar diferenças entre médias de níveis para um ou mais fatores. Um efeito principal existe quando diferentes níveis de um fator afetam a resposta de maneira diferente. Pode ser definido como a alteração ocorrida na resposta quando se move do nível mais baixo (-) para o nível mais alto (+) de cada fator estudado, ilustrado por meio de uma linha que liga a média da resposta para cada nível de fator.

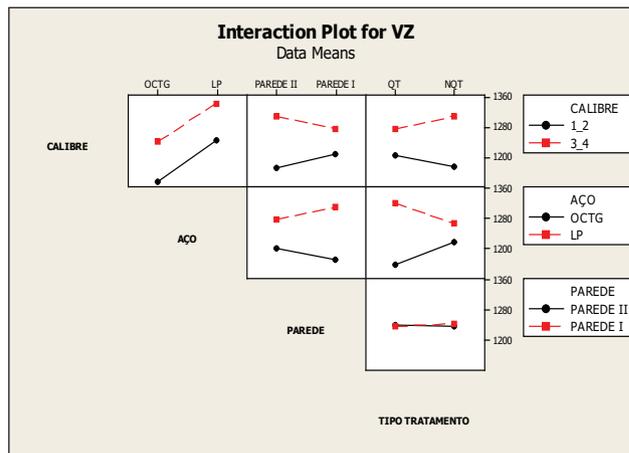


Figura 11. Gráficos de Interações

Fonte: os próprios autores

A partir dos Gráficos de Efeitos Principais da Figura 12, é possível perceber que os fatores Calibre e Aço apresentaram maior efeito principal, pois a linha que conecta as respostas médias para o nível baixo e o nível alto tem inclinação mais íngreme comparada aos demais efeitos. Os fatores Parede e Tipo de Tratamento não se mostraram significativos, pois a alteração do nível baixo para alto não foi estatisticamente significativa, como pode ser percebido pela pequena inclinação da reta que une os dois níveis.

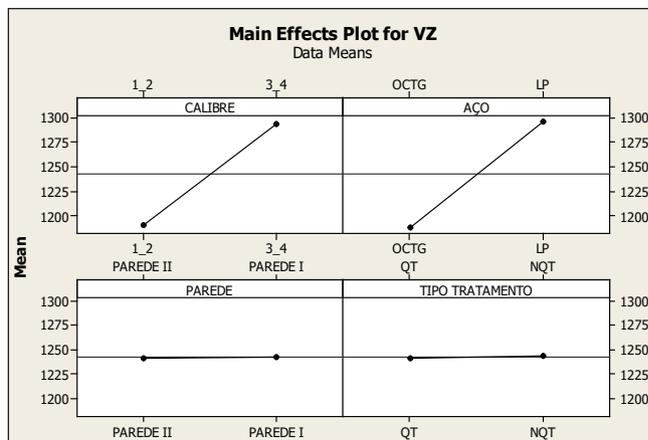


Figura 12: Planejamento de experimento fatorial completo

Fonte: os próprios autores

5.5. Avaliação da tabela ANOVA

A partir da Tabela 1, coluna P (*p-value*), é possível comprovar que os fatores Calibre e Aço são os fatores que apresentam maior significância, pois os *p-values* assumidos são menores que 0,05. Já os fatores Parede e Tipo de Tratamento apresentaram *p-value* maior que 0,05, confirmando as análises mostradas nos gráficos de efeitos principais. Analisando a coluna "Effect", é possível notar que os efeitos com maior



significância são relacionados aos fatores Calibre e Aço, pois quanto maior este valor, maior será seu efeito na variável resposta. O valor R-Sq representa a proporção da variabilidade na resposta que é explicada pelo modelo, sendo que o valor obtido foi de 89,33%. A Tabela 2 mostra a análise de variância do experimento, onde pode-se realizar as análises do p-value para verificar a significância dos efeitos principais e demais interações.

5.6. Análise dos resíduos

O histograma de resíduos mostra a distribuição dos resíduos para todas as observações. Conforme pode ser verificado na Figura 13, os dados seguem uma distribuição normal, o que caracteriza que não há evidência de assimetria ou *outliers*. O gráfico de Probabilidade Normal para os resíduos apresenta os resíduos versus seus valores esperados e esses resíduos da análise, sendo que apresentaram-se distribuídos normalmente.

Para o gráfico Versus Fits x Fitted Value, Figura 13, os resíduos devem estar, e estão, distribuídos aleatoriamente em torno de zero, caracterizando que não há evidência de variância não constante, termos faltantes ou *outliers*. O gráfico Versus Order x Observation Order representa graficamente os resíduos na ordem das observações correspondentes. É utilizado para verificar a influência da coleta das ordens ou outro fator no resultado do experimento. Os dados devem apresentar, e apresentaram, um padrão aleatório em torno da linha central, caracterizando que os termos de erro são correlacionados um com o outro.

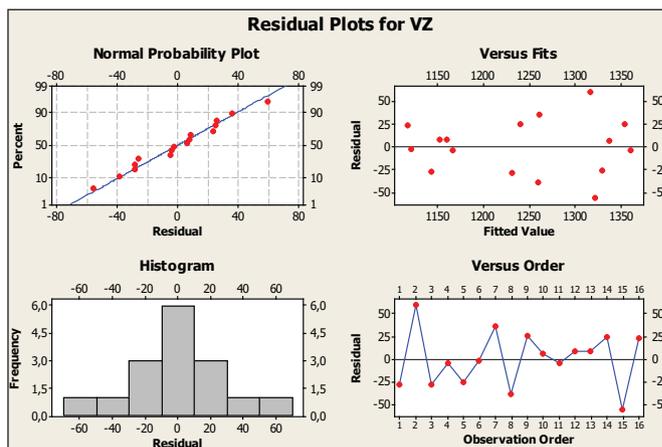


Figura 13. Geração dos dados analisados

Fonte: os próprios autores

5.7. Equação do modelo

O modelo matemático utilizando os fatores escolhidos para a estimativa do indicador de rendimento VZ obtido por meio da equação de regressão linear múltipla é:

Sendo as variáveis o Calibre, o Aço e o Tipo de Tratamento. Estes valores atribuídos à equação podem ser vistos na coluna "Coef" da Tabela 1. Ao final da expressão tem-se o erro experimental. Não foram utilizados os demais dados, pois as interações entre os fatores não mostraram significância estatística.

6. CONCLUSÃO DO EXPERIMENTO

Em diversos setores de uma empresa, muitas vezes, é necessário obter informações dos produtos e processos empiricamente. Sendo assim, faz-se necessário projetar experimentos, coletar dados e analisá-los de forma coerente, a fim de gerar conhecimento e ações. Baseado nisso, pode-se notar a importância do planejamento de experimentos na

Tabela 1. Geração dos dados analisados para os efeitos

Factorial Fit: VZ versus CALIBRE; AÇO; PAREDE; TIPO TRATAMENTO

Estimated Effects and Coefficients for VZ (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1242,23	13,16	94,42	0,000	
CALIBRE	103,19	51,60	13,16	3,92	0,011
AÇO	108,21	54,11	13,16	4,11	0,009
PAREDE	1,54	0,77	13,16	0,06	0,956
TIPO TRATAMENTO	2,17	1,09	13,16	0,08	0,937
CALIBRE*AÇO	-5,03	-2,51	13,16	-0,19	0,856
CALIBRE*PAREDE	-33,46	-16,73	13,16	-1,27	0,259
CALIBRE*TIPO TRATAMENTO	32,17	16,08	13,16	1,22	0,276
AÇO*PAREDE	32,52	16,26	13,16	1,24	0,271
AÇO*TIPO TRATAMENTO	-57,85	-28,93	13,16	-2,20	0,079
PAREDE*TIPO TRATAMENTO	6,63	3,31	13,16	0,25	0,811

S = 52,6230 PRESS = 141782
 R-Sq = 89,33% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 68,00%

Tabela 2. Geração dos dados analisados para a variância

Analysis of Variance for VZ (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	89464	89464,2	22366,0	8,08	0,021
CALIBRE	1	42594	42594,1	42594,1	15,38	0,011
AÇO	1	46842	46841,8	46841,8	16,92	0,009
PAREDE	1	9	9,5	9,5	0,00	0,956
TIPO TRATAMENTO	1	19	18,9	18,9	0,01	0,937
2-Way Interactions	6	26513	26513,0	4418,8	1,60	0,312
CALIBRE*AÇO	1	101	101,2	101,2	0,04	0,856
CALIBRE*PAREDE	1	4479	4479,0	4479,0	1,62	0,259
CALIBRE*TIPO TRATAMENTO	1	4139	4138,8	4138,8	1,49	0,276
AÇO*PAREDE	1	4230	4229,7	4229,7	1,53	0,271
AÇO*TIPO TRATAMENTO	1	13389	13388,5	13388,5	4,83	0,079
PAREDE*TIPO TRATAMENTO	1	176	175,8	175,8	0,06	0,811
Residual Error	5	13846	13845,9	2769,2		
Total	15	129823				

Unusual Observations for VZ



área da engenharia, permitindo resultados mais confiáveis e conferindo ao processo desempenhos superiores.

O objetivo principal desse estudo foi avaliar os parâmetros produtivos da laminação a quente a partir da aplicação de técnicas de planejamento e análise de experimentos (DOE), visando estudar o principal indicador de rendimento metálico, VZ. A partir disso, foram estudados quatro parâmetros que influenciam no VZ, e, com isso, pôde-se determinar os efeitos que cada fator exerce sobre a variável resposta, assim como avaliar a interação entre os fatores e como estes impactam no processo e no resultado. Estes objetivos foram atingidos, pois o estudo foi realizado com banco de dados pertinentes, trazendo à tona conhecimento relevante sobre o assunto, de modo a facilitar a tomada de decisão, além de se mostrar condizente com a realidade da empresa. O experimento atendeu razoavelmente bem às condições necessárias para validação, mesmo estando em ambiente industrial e tendo sido feito a partir de uma base histórica.

A condução da técnica e análise foi realizada conforme o planejado, tendo sido aplicado o Princípio da Esparcidade sem violar as condições importantes para a realização do experimento. Sendo assim, concluiu-se que os fatores estatisticamente significativos a serem utilizados para planejamento do indicador de rendimento metálico VZ, conforme análises, foram o Calibre e o Tipo de Aço. Para o fator Calibre, o resultado obtido nesse experimento foi condizente com experiência prática de laminação, pois o volume de produção do nível Calibre I em relação ao nível Calibre II é relevante, gerando maior *know-how* no Calibre I. Para o fator Tipo de aço, o resultado obtido também foi condizente com a experiência prática, pois aços LP (*Line Pipe*) são aços de maior complexidade produtiva e, por isso, mais sujeitos à geração de defeitos e consequente perdas durante laminação.

Os fatores Parede e o Tipo de Tratamento não se mostraram significantes estatisticamente. O nível Tipo de tratamento QT, apesar de possuir diferenças na linha de acabamento, não se mostrou relevante em relação ao nível Tipo de tratamento NQT. O nível Parede I, apesar de apresentar maiores perdas no processo produtivo, na prática não se mostrou relevante em relação ao nível Parede II. É importante frisar que a análise da tabela ANOVA veio corroborar as análises feitas graficamente.

A validade do modelo utilizado é constatada por meio da Análise de Variância (ANOVA) e uma forma de verificarmos se o modelo ajustado é adequado é olharmos o resultado do coeficiente de determinação (R^2), que mede o quanto a variável resposta é explicada pelo modelo, pois quanto maior o valor de R^2 melhor, sendo que no estudo realizado o R^2 foi de 89,33%.

Um ponto de atenção para a realização de experimentos, que induz barreiras ao estudo, é quanto ao controle rigoroso das variáveis a serem analisadas, diminuindo-se ao máximo o erro aleatório de variáveis não estudadas, pois estas podem gerar alta variabilidade que não sigam uma distribuição normal. Uma limitação desse estudo foi a verificação de causas especiais que impactam no VZ, tais como erros operacionais, *breakdowns* sucessivos, tamanho de lote, entre outros. Isso se dá pela dificuldade de rastreamento e controle de todas as ordens laminadas durante o período selecionado e durante a produção normal. Além disso, para realizar o experimento fatorial 2^k necessita-se de dois níveis por fator estudado, sendo assim, alguns fatores como, por exemplo, o calibre, exerce uma influência sobre a variável resposta de forma não linear, o que pode gerar um erro na avaliação direta deste fator.

Este foi o primeiro experimento fatorial realizado referente à análise do principal indicador de rendimento, VZ, e os fatores independentes adotados dentro da empresa em estudo, sendo que os resultados obtidos a partir das análises realizadas apontaram que a aplicação do DOE no processo de produção de tubos foi bem-sucedida, pois trouxe à tona conhecimento relevante sobre o assunto. Finalmente, um resultado de extrema importância foi mostrar à comunidade acadêmica e empresarial a validade de analisar cientificamente e estatisticamente um processo e, com isso, incentivar o uso dessas técnicas junto às empresas, pois estas permitem avaliação do processo de forma a melhorá-lo, reduzindo, assim, a possibilidade de insucesso. À medida em que foi sendo realizado o experimento, a tratativa dos dados e análises, foi-se adquirindo informações técnicas e práticas, além da familiarização com a técnica.

Sugere-se como estudos futuros a realização com acompanhamento da produção *in loco*, de forma a tomar conhecimentos das causas especiais para tratá-las adequadamente, pois o estudo realizado foi baseado em um banco de dados extenso (2 anos) aleatorizado, porém, sem a informação de possíveis causas especiais. Ainda como sugestão, pode-se aplicar a abordagem proposta em outros processos ou setores da empresa estudada, utilização de novos parâmetros produtivos relevantes e com dados mais recentes ou análises com um experimento fatorial com superfície de resposta (DCCR – Delineamento central composto rotacional), com o que será possível gerar maior nível de detalhamento, a partir de variáveis consideradas importantes nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

Bracarense, P. A. (2012), Estatística aplicada às ciências sociais, IESDE Brasil S.A, Curitiba, PR.



- Button, S. T. (2012), Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Calado, V.; Montgomery, D. (2003), Planejamento de Experimentos usando o Statistica, 1. ed., E-papers, Rio de Janeiro, RJ.
- Caten, C. S.; Ribeiro, J. L. D. (1996), "Etapas na Otimização Experimental de Produtos e Processos: Discussão e Estudo de Caso", Produção, Vol. 6, No. 1, Belo Horizonte, MG.
- Costa, M. C. B. (2011), "A importância do ensino da ferramenta de planejamento fatorial para estudantes de engenharia", XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Blumenau, SC.
- Galdámez, E. V. C. (2002), Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP.
- Gil, A. C. (2002), Projetos de pesquisa, 4. ed, Atlas, São Paulo.
- Hazir, E.; Erdinler, E. S.; Koc, K. H. (2018), "Optimization of CNC cutting parameters using designs of experiments (DOE) and desirability function", Journal of Forestry Research, Vol. 29, No. 5, pp. 1423-1434.
- Instituto Aço Brasil – IAB (2015), Números de mercado: Estatísticas, available from: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp> (Access 24 Jun 2016).
- Montgomery, D. C.; Runger, G. C. (2012), Probabilidade para engenheiros, 5. ed, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ.
- Rodrigues, M. I.; Lemma, A. F. (2005), Planejamento de experimentos e otimização de processos: Uma estratégia sequencial de planejamentos, 1 ed., Casa do Pão Editora, Campinas, SP.
- Salles, C. A.; Silva, J. B. A.; Silva, R. B. (2010), "Planejamento e análise de experimentos para avaliação de resultados de ensaios mecânicos em blendas de polipropileno e polietileno de alta densidade", XXX ENEGEP, São Carlos, SP.
- Santos, R. L. B. (2017), Análise de Dados e superfície de resposta: um estudo de caso para melhorar o desempenho de um serviço, Projeto Final (Bacharelado em Engenharia de Produção), Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.
- Werkema, M. C. C.; Aguiar, S. (1996), Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo, Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Worldsteel Association - World steel in figures 2015, available from: <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/2015/World-Steel-in-Figures-2015/document/World%20Steel%20in%20Figures%202015.pdf> (Access 24 de junho de 2016).

Recebido: 25 ago. 2016

Aprovado: 10 mar. 2018

DOI: 10.20985/1980-5160.2018.v13n4.1216

Como citar: Cardoso, G. R.; Mapa, S. M. S.; Gomes, F. J. O. (2018), "Avaliação de parâmetros da laminação a quente no indicador de rendimento metálico de produção de tubos de aço sem costura", Sistemas & Gestão, Vol. 13, No. 4, pp. 413-423, disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1216> (acesso dia mês abreviado. ano).