

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS  
GERAIS  
Engenharia de Automação Industrial

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS APLICADA À INDÚSTRIA  
METALÚRGICA**

Cinara Souza Lopes

Araxá  
2013

Cinara Souza Lopes

## **OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS APLICADA À INDÚSTRIA METALÚRGICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), campus Araxá, pela aluna Cinara Souza Lopes.

Orientador: Prof. Natal Junio Pires

Araxá  
2013

Dedico este trabalho aos meus queridos pais e irmãs.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu professor orientador Natal Junio Pires pelas sábias orientações, disponibilidade e apoio durante todo este processo.

À professora Leni Nobre por toda a sua dedicação e paciência conosco.

## RESUMO

A otimização de processos é uma importante ferramenta que busca aprimorar processos com o intuito de diminuir as perdas. Dentre as várias técnicas disponíveis para se proceder à otimização temos o planejamento fatorial. Quando há a necessidade de verificar a influência ou não de certas variáveis, podemos lançar mão do planejamento fatorial completo ou do planejamento fatorial fracionário. Esse último é conveniente quando há muitas variáveis. O processo de lingotamento na indústria metalúrgica gera um alto índice de refugo e, conseqüentemente, ocorre prejuízo financeiro, material e à natureza. Diminuir o índice de refugo significa, principalmente, diminuir os danos causados ao meio ambiente por causa dos rejeitos gerados pela indústria. Neste trabalho proponho a utilização de métodos estatísticos de otimização de processos para diminuir o índice de refugo com o auxílio do software Minitab™. Planejamento fatorial completo e de meia-fração foram aplicados aos dados para encontrar os pontos em que o índice de refugo é minimizado. Em resposta, foi encontrada a região onde este índice tende a zero.

Palavras-chave: otimização de processos, lingotamento, indústria metalúrgica, índice de refugo.

## **ABSTRACT**

Process optimization is an important tool that seeks to improve processes in order to reduce wastage. Among the various techniques available in optimization there is the factorial design. When there's a need to verify the influence or not of some variables, we can use the full factorial design or the fractional factorial design. The fractional factorial design is more useful when there are many variables. The process of casting the metal industry generates a high rate of reject causing financial, material and nature losses. Reduce the rate of reject means reducing the damage to the environment because of the waste generated by the industry. In this paper, I suggest using statistical methods of process optimization to reduce this rating using the Minitab™ software. Full and half fraction factorial design were applied to the data to find the points where the rate of reject is minimized. As a result, the region where this rate tends to zero was found.

Keywords: process optimization, casting, metallurgical industry, rate of reject.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de lingotamento contínuo .....	11
Figura 2 - Esquema de um sistema com suas entradas e saídas .....	16
Figura 3 - Representação geométrica do planejamento fatorial $2^2$ .....	18
Figura 4 - Gráfico dos principais efeitos para Espessura .....	21
Figura 5 - Efeito de interação para Espessura .....	22
Figura 6 – “Session” do Minitab exibindo os valores dos efeitos .....	25
Figura 7 - Resultado dos efeitos dos fatores principais para o experimento de ataque por plasma.....	26
Figura 8 - Gráfico de Pareto para o experimento de ataque por plasma.....	27
Figura 9 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos.....	28
Figura 10 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos para o experimento do ataque de plasma .....	32
Figura 11 - Gráfico de Pareto para o experimento de ataque por plasma.....	32
Figura 12 - Exemplo de trinca em um "billet" .....	33
Figura 13 - Gráfico de efeitos principais para o experimento fatorial completo do processo de lingotamento contínuo.....	38
Figura 14 - Gráfico de Pareto para o experimento fatorial completo do processo de lingotamento contínuo .....	39
Figura 15 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos para o experimento fatorial completo do lingotamento contínuo.....	40
Figura 16 - Gráfico do cubo para o experimento fatorial completo do lingotamento contínuo .....	41
Figura 17 - Esquema de representação das arestas do cubo .....	41
Figura 18 - Gráfico dos efeitos principais do experimento de meia-fração do lingotamento contínuo .....	44
Figura 19 - Gráfico de probabilidade normal para o experimento fracionário do lingotamento contínuo .....	45
Figura 20 - Gráfico do cubo para o experimento fatorial fracionário do lingotamento contínuo .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - O planejamento $2^2$ para o experimento do processo epitaxial .....	19
Tabela 2 - Níveis dos efeitos principais e de interação de um planejamento $2^4$ .....	23
Tabela 3 - Níveis e fatores do experimento de ataque por plasma .....	23
Tabela 4 - Planejamento fatorial $2^4$ para o experimento de ataque por plasma .....	24
Tabela 5 - Níveis para o planejamento fatorial $2^3$ .....	30
Tabela 6 - Planejamento fatorial $2^{4-1}$ para o experimento de ataque por plasma .....	30
Tabela 7 - Resumo dos fatores e seus níveis para do processo lingotamento contínuo .....	35
Tabela 8- Dados do planejamento fatorial completo para o experimento do lingotamento contínuo .....	36
Tabela 9 - Dados do planejamento fatorial fracionário para o experimento do lingotamento contínuo .....	43

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	10
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS E DEFINIÇÕES IMPORTANTES.....	15
1.1 Planejamento fatorial completo $2^k$ .....	17
1.2 Planejamento fatorial $2^k$ de meia-fração .....	28
CAPÍTULO 3 – O PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO AO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....	33
CAPÍTULO 4 – DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	47
CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

A otimização de processos consiste na obtenção de uma resposta ótima que atenda às exigências de um determinado processo. “Desta forma, podemos definir otimização como sendo um processo baseado em instruções que permitam obter o melhor resultado de uma dada situação” (BEVERIDGE; SCHECHTER, 1970). Otimizar é a busca por uma resposta que nos leve a melhorar algo até seu ponto máximo ou mínimo, ou seja, até onde esse alcançará uma suposta “perfeição”. Quando algo pode ser melhorado é feita uma análise através de certas instruções. “Cientificamente estas instruções são frequentemente expressas através de métodos matemáticos que procuram maximizar ou minimizar alguma propriedade específica do sistema em estudo” (EIRAS, et.al., 2000, p.1). A otimização de processos emprega métodos estatísticos para tratar os dados de um problema utilizando-se de um número mínimo de experimentos. É uma importante ferramenta que busca aprimorar processos de maneira econômica e eficiente.

Para aplicar os métodos estatísticos de maneira proveitosa é preciso saber qual o tipo de informação desejada, ou seja, aonde se quer chegar executando um experimento. O planejamento fatorial, por exemplo, é uma técnica utilizada para estudar a influência de duas ou mais variáveis em um determinado sistema. A metodologia de superfícies de resposta (MSR) é outra técnica que tem como objetivo otimizar o sistema através da construção de um modelo empírico, isto é, maximizar ou minimizar uma resposta que satisfaça determinados critérios. O simplex sequencial também determina o ponto ótimo, mas dispensa a construção de um modelo. Para identificar e aplicar a técnica mais apropriada para o seu problema é preciso estar claro qual o seu objetivo.

A metalurgia é a ciência que estuda os metais desde a sua extração até a sua transformação em material utilizado em outros processos. A indústria metalúrgica é uma indústria de base que desenvolve processos para tratar os metais e transformá-los em matéria-prima para outras aplicações, como por exemplo, a produção de ligas metálicas que são utilizadas em larga escala na indústria automobilística, aeronáutica e naval. Por ter processos que contém uma grande

quantidade de variáveis, a otimização de processos pode ser aplicada à indústria metalúrgica para tratar todas essas variáveis simultaneamente com o objetivo de fazer melhor com a mesma estrutura de chão de fábrica já existente e aproveitar o máximo da capacidade dos recursos como, por exemplo, mão de obra e equipamentos.

Um dos processos da indústria metalúrgica é o lingotamento. Lingotamento é o processo de solidificar, resfriar e transformar o material em lingotes, blocos, placas etc., que seguem para outro processo metalúrgico<sup>1</sup>. Há dois tipos de lingotamento: o convencional e o contínuo. No lingotamento convencional são utilizados moldes de ferro fundido (lingoteiras) para a solidificação do aço líquido. O aço líquido é, então, vazado nos canais de distribuição e as lingoteiras, preenchidas. Após a total solidificação do aço, os lingotes são retirados e, em seguida, são processados a quente no forjamento ou laminação. O lingotamento contínuo é um processo alternativo ao lingotamento convencional. O equipamento para o processo consiste de um distribuidor (“tundish”), um molde refrigerado e um sistema de endireitamento e corte dos tarugos. O aço líquido é vazado no “tundish” e passa pelo molde refrigerado de onde é continuamente extraído por um sistema de rolos. Após a completa solidificação e endireitamento, o produto final (“billets”) é cortado e conformado a quente, por meio da laminação. A FIG. 1 mostra um esquema representativo do processo de lingotamento contínuo.

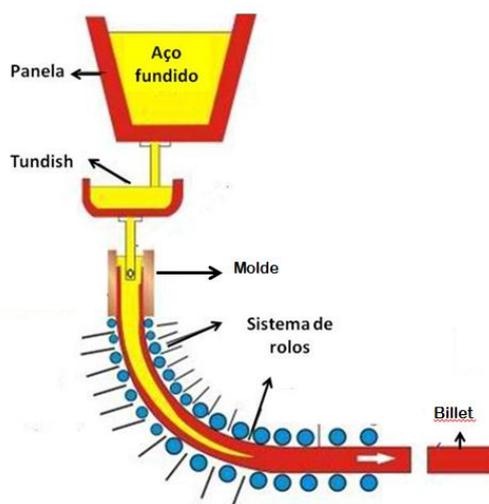


Figura 1 - Representação do processo de lingotamento contínuo  
Fonte: [ligasdecobre.wordpress.com/lingotamento-contínuo/](http://ligasdecobre.wordpress.com/lingotamento-contínuo/)

<sup>1</sup> Fonte: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lingotamento>> Acesso em:19/12/2013

Os produtos do lingotamento contínuo geralmente têm qualidade superficial superior aos do lingotamento convencional, o que torna o estudo de otimização deste processo e a implementação de novas tecnologias temas bastante visados na área de metalurgia. “A grande parte do aço produzido no mundo, aproximadamente 90%, é feita através do processo de lingotamento contínuo devido ao seu elevado grau de rendimento metálico” (ARLINDO, et.al., 2011, p.3). Porém, apesar de geralmente apresentar qualidade superior, o produto final não está livre de apresentar defeitos de forma, defeitos superficiais ou defeitos internos, gerando um índice de refugo considerável, o que significa prejuízos financeiros e ao meio ambiente. A problematização está justamente na otimização destes processos com intuito de diminuir esse índice.

Uma hipótese é aplicar o planejamento fatorial nas variáveis escolhidas para determinar quais são aquelas que apresentam mais relevância no processo, para daí iniciar o processo de identificação da região aonde o índice de refugo será minimizado.

Planejamentos fatoriais são frequentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores sobre uma resposta. Entretanto, vários casos especiais do planejamento fatorial em geral são importantes pelo fato deles serem largamente empregados em trabalhos de pesquisa e devido ao fato de eles formarem a base de outros planejamentos de considerável valor prático. (MONTGOMERY; RUNGER, 2009, p.342)

A metodologia deste trabalho consiste em aplicar a técnica de planejamento fatorial completo e fracionário de forma didática nos dados de um processo de lingotamento contínuo cedidos por uma empresa metalúrgica e comparar os resultados no que concerne à eficácia, custos e sustentabilidade. Por conter um grande número de variáveis, o software Minitab™ será utilizado para tratar esses dados.

O MINITAB™ é um software estatístico desenvolvido em 1972 pela Minitab INC State College nos EUA, com o propósito original de auxiliar professores a ensinar estatística básica. Rapidamente, virou uma referência no meio acadêmico por causa de sua interface simples, tornando o aprendizado fácil e dinâmico. Atualmente é largamente utilizado no meio empresarial para organizações de qualquer porte, oferecendo precisão e ferramentas de fácil uso para controle de qualidade, controle

estatístico de processo, planejamento de experimentos, confiabilidade, análise de sobrevivência e estatística geral<sup>2</sup>.

A Bridgestone Corporation, fabricante de pneus e borrachas, utilizou a ferramenta de design de experimentos do Minitab™ para aumentar a capacidade da fábrica e certificar novos pneus mais rapidamente. Os engenheiros escolheram aplicar o planejamento fatorial de dois níveis para realizar o menor número de experimentos possíveis, já que o teste em pneus é um processo destrutivo e, portanto, dispendioso. Queiroz, um dos administradores da fábrica, afirma que o design de experimentos do Minitab™ permitiu estudar as diversas variáveis simultaneamente, usando o menor número de testes para obter resultados confiáveis sem perda de tempo e recursos, reunindo mais dados do que o necessário. Como resultado, a Bridgestone obteve uma economia inicial de projeto de US\$ 74.200,00, otimizou a produção de pneus e economizou US\$2,5 milhões em custos de oportunidade.<sup>3</sup>

A tecnologia industrial cresce em ritmo exponencial. A indústria está em constante busca dos melhores equipamentos, dos melhores materiais, dos melhores resultados de produção, enfim, em busca pelo aperfeiçoamento. E aperfeiçoar é otimizar. Este trabalho tem como principal objetivo mostrar que as técnicas de otimização podem ser empregadas com eficiência na redução de problemas industriais, levando a resultados satisfatórios que irão economizar tempo e capital. E no meio industrial, onde a concorrência em busca de destaque é muito grande, esses fatores são de suma importância para o crescimento e “saúde” financeira de uma empresa.

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

Capítulo 2: Apresenta os conceitos de planejamento fatorial completo e planejamento fatorial de meia-fração e exemplos para ilustrar como proceder com os métodos de otimização.

---

<sup>2</sup> Fonte: < <http://www.minitab.com/pt-br/products/minitab/>> Acesso em: 19/12/2013

<sup>3</sup> Fonte: <[http://www.minitab.com/en-US/uploadedFiles/Company/News/Case\\_Studies/Bridgestone-EN.pdf](http://www.minitab.com/en-US/uploadedFiles/Company/News/Case_Studies/Bridgestone-EN.pdf)>. Acesso em: 02/05/2013

Capítulo 3: Apresenta a aplicação do planejamento fatorial completo e de meia-fração em dados do processo de lingotamento contínuo com o intuito de minimizar a resposta (índice de refugo).

Capítulo 4: Apresenta a discussão e a análise dos resultados encontrados no capítulo 3 para destacar a eficiência da aplicação dos métodos de otimização propostos.

E por fim, são apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 - CONCEITOS E DEFINIÇÕES IMPORTANTES

A automação industrial contribuiu para o aumento da eficiência dos processos modernos, maximizando a produção com um menor consumo de energia e matéria-prima. Porém, ela também trouxe complexidade na estrutura tecnológica dos processos modernos e, conseqüentemente, esses apresentam muitas variáveis que influenciam na performance de um processo. Compreender a relação de uma variável com as demais é um fator importante para a otimização de processos. Porém, é inviável econômica e logicamente que, para estudar esta relação, fixe valores para as demais variáveis enquanto apenas uma sofre alterações no seu valor absoluto. Os processos multivariados vêm substituindo as técnicas univariadas de otimização. Nos processos multivariados, além de levar a cabo a otimização em menor tempo, ainda conseguimos identificar a interação entre as variáveis em questão. A melhor saída é, portanto, mudar todas as variáveis simultaneamente.

A razão para isso é que as variáveis podem se influenciar mutuamente, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da outra. Esse comportamento, que chamamos de interação entre os fatores, é um fenômeno que ocorre com muita frequência. (BARROS NETO, et. al., 2010, p.16)

O planejamento fatorial é uma ferramenta estatística utilizada quando há interesse em conhecer e entender a influência de um fator sobre o outro realizando um número mínimo de experimentos. “Por um experimento fatorial, queremos dizer que, em cada réplica completa do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas” (MONTGOMERY, et.al., 2009, p.216). Portanto, o método consiste em identificar os fatores que atuam no sistema e as respostas de interesse, sendo essas últimas aquelas que deveriam ser maximizadas ou minimizadas. Cabe ressaltar que essa resposta será obrigatoriamente numérica.

Na literatura, encontra-se o planejamento fatorial usado em experimentos como, por exemplo, Silva (2008) que demonstra a influência de três fatores na avaliação da secagem do bagaço de cajá que é utilizado na indústria alimentícia, farmacêutica e na medicina popular. Galdámez (2002) também utilizou planejamento fatorial para análise de experimentos na melhoria de qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Como resultado, ele conseguiu identificar os parâmetros do

processo que mais causavam problema, ajustar os valores dos fatores envolvidos e conseqüentemente, aumentar a qualidade do produto final. Além disso, Marinho (2005) destaca em seu artigo a importância de se utilizar planejamento fatorial em pesquisas científicas em diversas áreas de conhecimento e Cunico (2008) reforça essa ideia descrevendo a conveniência dos procedimentos multivariados de otimização experimental.

Para um melhor entendimento do planejamento fatorial (FIG.2), é necessário conhecer alguns conceitos básicos como:

- Fator: é cada variável do sistema em estudo, ou seja, as variáveis que o experimentador pode identificar e manipular;
- Nível: condições de operação dos fatores. Podem ser identificados como nível baixo (-) ou nível alto (+) como, por exemplo, ao estudar a influência da temperatura em uma reação química esta pode ter definido 20°C como seu nível baixo e 80°C como seu nível alto;
- Efeito: mudança ocorrida na resposta quando se muda do nível baixo (-) para o nível alto (+). Matematicamente, é definido como apresentado na equação 1.

$$Efeito = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (1)$$

sendo,

- $\bar{y}_+$  : média dos valores de resposta obtidos com valores altos (+) do fator;
  - $\bar{y}_-$  : média dos valores de resposta obtidos com valores baixos (-) do fator.
- Respostas: são as variáveis de saída do sistema, as quais serão afetadas ou não pelas modificações realizadas nos fatores.

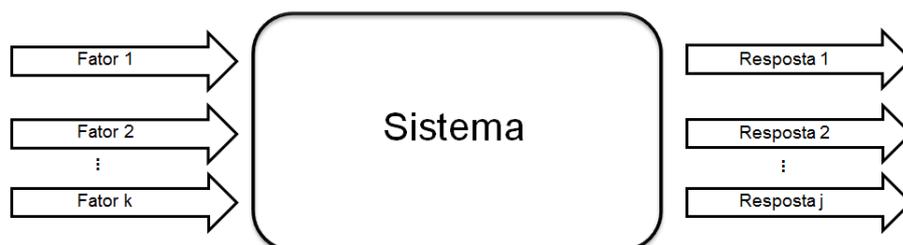


Figura 2 - Esquema de um sistema com suas entradas e saídas  
Fonte: BARROS NETO, 2010, p. 100.

Para iniciar o planejamento de um experimento, deve-se primeiro determinar quais serão os fatores e as respostas de interesse. Os fatores variam de acordo com cada sistema a ser estudado e podem ser escolhidos por sua relevância no processo. A determinação desses fatores é feita com base na experiência daquele que conduz a investigação. Em situações onde o investigador desconhece o sistema a ser otimizado, torna-se necessário e prudente conversar com o responsável pelo setor. As respostas a serem encontradas dependerão da forma como acontece a interação entre os fatores mencionados anteriormente. Segundo, deve-se “definir, com o máximo de clareza, o objetivo que pretendemos alcançar com os experimentos para que, então, possamos escolher o planejamento mais apropriado” (BARROS NETO, et. al., 2010, p.100), evitando tentativas desnecessárias. Estes objetivos podem, por exemplo, melhorar o rendimento de um processo e reduzir os custos de operação. Por fim, a análise correta dos gráficos mostrará as respostas que atendam aos objetivos iniciais.

A seguir, vamos mostrar através de conceitos e exemplos, a aplicação dos métodos de planejamento fatorial completo e incompleto.

### **1.1 Planejamento fatorial completo $2^k$**

Planejamentos fatoriais são usados quando deseja-se conhecer quais são os fatores que podem supostamente influenciar a resposta de um processo. Para executar este método, é preciso identificar quantos níveis ( $n$ ) cada fator ( $k$ ) envolvido no processo possui. Com esse dado, é possível calcular o número total de ensaios que serão necessários para realizar um planejamento fatorial completo. Suponha que se deseja estudar o efeito da temperatura em quatro níveis e do catalisador em três níveis em um sistema. A quantidade de ensaios necessários será a multiplicação da quantidade de níveis de cada fator. Neste exemplo, teremos  $4 \times 3 = 12$  ensaios diferentes, e o planejamento é chamado de fatorial  $4 \times 3$ .

O planejamento fatorial mais simples é aquele em que cada fator possui apenas dois níveis. “Para  $k$  fatores, isto é,  $k$  variáveis controladas pelo experimentador, um

planejamento completo de dois níveis exige a realização de  $2 \times 2 \times (\dots) \times 2 = 2^k$  ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial  $2^k$  (BARROS NETO, et. al., 2010, p. 102). O presente trabalho irá utilizar especificamente esse tipo de planejamento.

O tipo mais fácil de planejamento fatorial  $2^k$  é o  $2^2$ , ou seja, haverá apenas dois fatores (A e B) e cada um com dois níveis. É comum representar o nível alto pelo sinal positivo (+) e o nível baixo pelo sinal negativo (-). Esta representação é chamada de notação geométrica para o planejamento. Geometricamente, esse tipo de planejamento pode ser representado por um quadrado com as quatro combinações de tratamento (ou corridas) formando os vértices da FIG. 3.

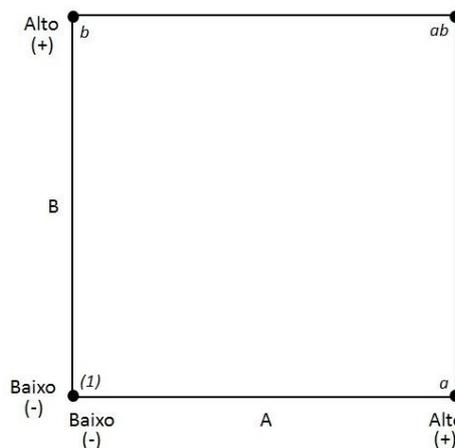


Figura 3 - Representação geométrica do planejamento fatorial  $2^2$   
Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 343.

A combinação de tratamentos é representada por uma série de letras minúsculas. “Se uma letra estiver presente, o fator correspondente é corrido no nível alto naquela combinação de tratamento; se ela estiver ausente, o fator é corrido no nível baixo” (MONTGOMERY, et. al., 2009, p. 343). Por exemplo, a combinação de tratamento “a” indica que o fator A está no nível alto e B no nível baixo. A combinação (1) representa ambos os fatores no nível baixo.

Um artigo no periódico “AT&T Technical Journal” (Vol. 65, Março/Abril 1986, pp. 39-50) descreve a aplicação dos planejamentos fatoriais com dois níveis para fabricação de circuitos integrados. Uma etapa básica do processo nessa indústria é fazer crescer uma camada epitaxial em pastilhas polidas de silicone. As pastilhas são montadas em uma base e posicionadas no interior de um recipiente em forma

de sino. Vapores químicos são introduzidos através de bocais próximos ao topo do recipiente. A base é girada e calor é aplicado. Essas condições são mantidas até que a camada epitaxial esteja espessa o suficiente.

A TAB. 1 apresenta os resultados de um planejamento fatorial  $2^2$ , usando os fatores:

- A → tempo de deposição com níveis (-) para curto e (+) para longo e;
- B → vazão de arsênio com níveis (-) para 55% e (+) para 59%.

Observe que diferentemente da resposta, os fatores também podem ser qualitativos, e não apenas quantitativos como devem ser as respostas.

Para este experimento foi utilizado quatro réplicas, ou seja, cada combinação de tratamento foi realizada quatro vezes sob as mesmas condições resultando em 16 corridas de testes. A variável de resposta é a espessura média em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) da camada epitaxial que é o resultado da média dos valores dos quatro experimentos realizados em cada combinação de tratamento. A TAB. 1 apresenta os resultados desse experimento.

Tabela 1 - O planejamento  $2^2$  para o experimento do processo epitaxial

Combinação de tratamentos	Fatores do planejamento			Espessura ( $\mu\text{m}$ )				Espessura ( $\mu\text{m}$ )	
	A	B	AB					Total	Média
(1)	-	-	+	14,037	14,165	13,972	13,907	56,081	14,020
a	+	-	-	14,821	14,757	14,843	14,878	59,299	14,825
b	-	+	-	13,880	13,860	14,032	13,914	55,686	13,922
ab	+	+	+	14,888	14,921	14,415	14,932	59,156	14,789

Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 344.

O preenchimento dos níveis na TAB. 1 é bastante simples. No primeiro fator, as linhas são preenchidas com os sinais alternadamente. No segundo, alternam-se os sinais a cada duas linhas. No terceiro, a cada quatro linhas e assim por diante, ou seja, sempre o próximo fator carregará o mesmo sinal pelo dobro de linhas em relação ao anterior. Onde há interação, como neste exemplo de AB, o resultado de cada linha é dado pela multiplicação algébrica.

Pela definição de efeito temos que:

- Efeito do fator A:

$$Efeito(A) = \left( \frac{14,825 + 14,789}{2} \right) - \left( \frac{14,020 + 13,922}{2} \right) = 0,836 \mu m$$

- Efeito do fator B:

$$Efeito(B) = \left( \frac{13,922 + 14,789}{2} \right) - \left( \frac{14,020 + 14,825}{2} \right) = -0,067 \mu m$$

- Efeito da interação entre os fatores AB:

$$Efeito(AB) = \left( \frac{14,020 + 14,789}{2} \right) - \left( \frac{14,825 + 13,922}{2} \right) = 0,031 \mu m$$

As estimativas numéricas dos efeitos indicam que o efeito do tempo de deposição (A) é grande e tem uma direção positiva (aumentando o tempo de deposição, aumenta a espessura), uma vez que, variando o tempo de deposição do nível baixo para o nível alto, muda a espessura média da camada epitaxial em 0,836  $\mu m$ . Os efeitos da vazão de arsênio (B) e da interação (AB) são pequenos, ou seja, não possuem muita relevância na resposta final.

Estes efeitos ainda podem ser analisados graficamente. O gráfico da FIG. 4, gerado pela rotina de design de experimentos do Minitab™, mostra o efeito dos fatores na espessura:

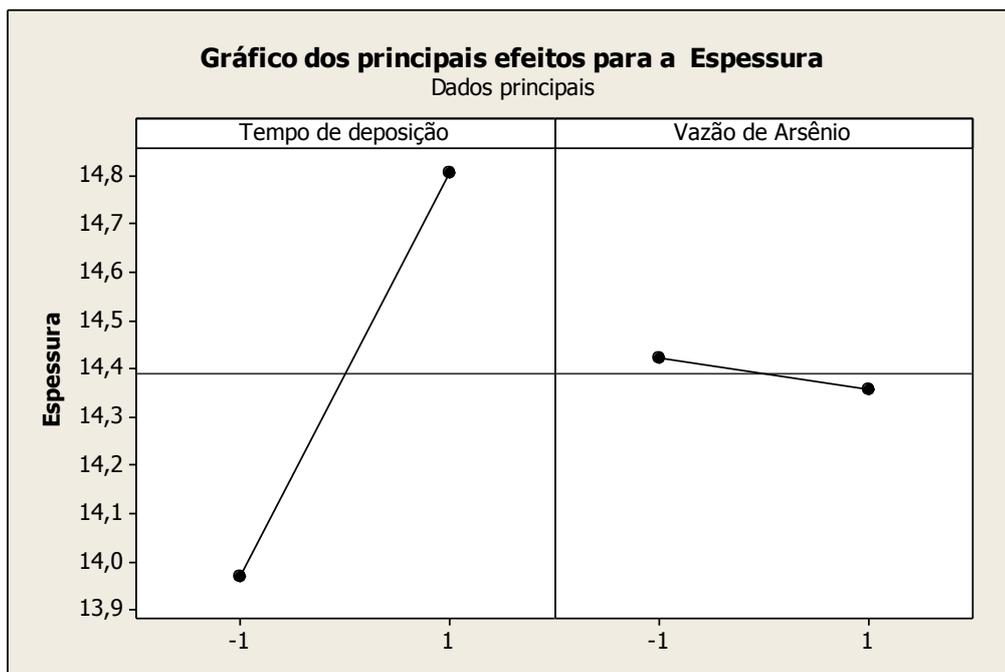


Figura 4 - Gráfico dos principais efeitos para Espessura  
Fonte: Minitab™

A FIG. 4 mostra como cada um dos fatores se comportou durante o experimento. A reta do tempo de deposição, quando este passou do nível -1 para o nível +1, teve uma inclinação considerável com um coeficiente angular positivo, mostrando que o fator A teve um efeito importante. Isso significa que ao mudar de nível tem-se um aumento na resposta média. A inclinação da reta do fator B mostra que o efeito da vazão de arsênio é pequeno, tem um coeficiente angular negativo e não possui muita significância no resultado final. Em termos de inclinação percebemos que o tempo de deposição é de longe mais influente sobre a resposta do que a vazão de arsênio.

A FIG. 5 ilustra o gráfico de efeito do fator de interação AB. O fato de as retas apresentarem um certo paralelismo indica que esse efeito também não teve uma influência significativa na resposta final, conforme já havíamos concluído durante a análise da resposta numérica.

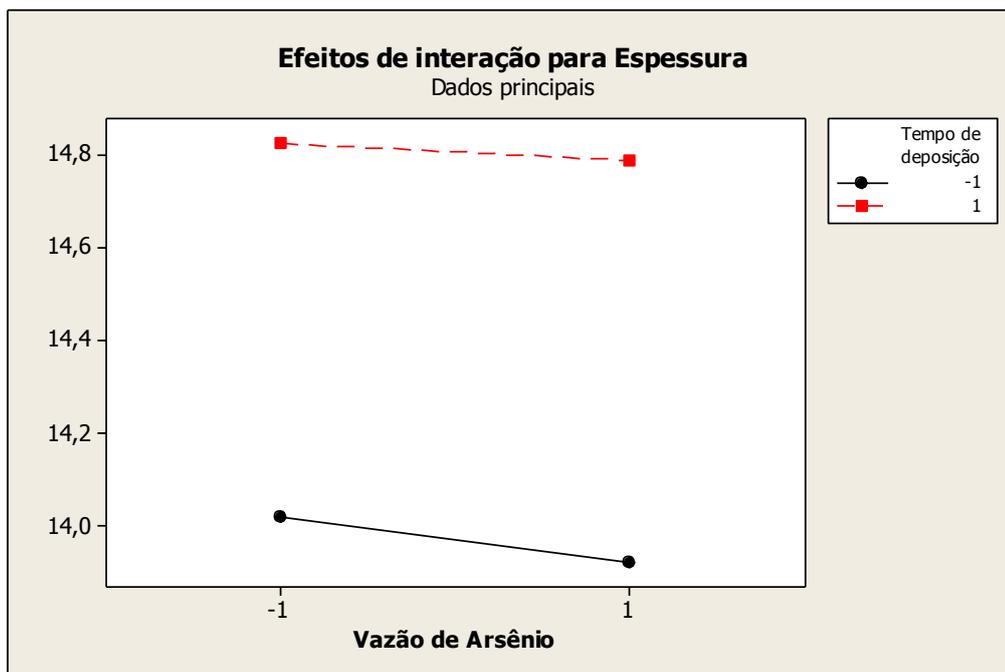


Figura 5 - Efeito de interação para Espessura  
Fonte: Minitab™

A análise dos gráficos permite chegar às mesmas conclusões do que aquelas feitas pela interpretação matemática. Através dela, é possível visualizar os efeitos que possuem mais influência na resposta final de forma rápida e eficiente. Os métodos apresentados podem ser facilmente estendidos para planejamentos com mais de dois fatores. Neste caso, o uso do Minitab™ se torna uma ferramenta essencial porque permite chegar à resposta de maneira direta com alta confiabilidade, sem perda de tempo com fórmulas matemáticas e realização de cálculos extensos.

Agora, suponha um planejamento  $2^4$ , ou seja, haverá quatro fatores (A, B, C e D) cada um com dois níveis (- e +). Em um planejamento fatorial completo, com uma única réplica, isso resulta em dezesseis corridas de testes resultando em: quatro efeitos principais, seis interações de segunda ordem, quatro interações de terceira ordem e uma interação de quarta ordem. A TAB. 2 mostra os efeitos principais e de interação desse tipo de planejamento e também os seus respectivos níveis. À medida que cresce o número de fatores, a solução computacional torna-se imprescindível como ilustrado no exemplo a seguir.

Tabela 2 - Níveis dos efeitos principais e de interação de um planejamento  $2^4$ .

Efeitos principais				Efeitos de interação										
A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fonte: BARROS NETO, et. al., 2010, p.131.

Um artigo no periódico “Solid State Technology” (Planejamento Ortogonal para Otimização de Processo e suas aplicações no Ataque por Plasma, Maio 1987, pp. 127 – 132) descreve a aplicação de planejamentos fatoriais no desenvolvimento de um processo de um ataque químico localizado sobre nitreto, por meio de uma sonda de plasma de pastilha única. O processo usa  $C_2F_6$  como gás reagente. Os fatores envolvidos são o escoamento do gás, a potência aplicada ao cátodo, a pressão na câmara do reator e o espaçamento entre o ânodo e cátodo. Os níveis desses fatores são mostrados na TAB. 3.

Tabela 3 - Níveis e fatores do experimento de ataque por plasma

Nível	Espaçamento (cm)	Pressão (m Torr)	Vazão de $C_2F_6$ ( $cm^3$ padrão/min)	Potência (W)
Baixo (-)	0,80	450	125	275
Alto (+)	1,20	550	200	325

Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 350.

A variável de resposta de interesse é a taxa de ataque do nitreto de silício. Uma única réplica será feita resultando em 16 corridas. A TAB. 4 apresenta os resultados para esse planejamento  $2^4$ .

Tabela 4 - Planejamento fatorial 2<sup>4</sup> para o experimento de ataque por plasma

Fatores principais				Resposta
A (Espaçamento)	B (Pressão)	C (Vazão de C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	D (Potência)	Taxa de ataque (Å/min)
-	-	-	-	550
+	-	-	-	669
-	+	-	-	604
+	+	-	-	650
-	-	+	-	633
+	-	+	-	642
-	+	+	-	601
+	+	+	-	635
-	-	-	+	1037
+	-	-	+	749
-	+	-	+	1052
+	+	-	+	868
-	-	+	+	1075
+	-	+	+	860
-	+	+	+	1063
+	+	+	+	729

Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 350.

O efeito do fator A é dado por:

$$\begin{aligned}
 \text{Efeito}(A) &= \left( \frac{669 + 650 + 642 + 635 + 749 + 868 + 860 + 729}{8} \right) - \\
 &\quad \left( \frac{550 + 604 + 633 + 601 + 1037 + 1052 + 1075 + 1063}{8} \right) \\
 &= -101,625 \text{ Å/min}
 \end{aligned}$$

Utilizando a mesma lógica matemática, chegamos à conclusão que:

- Efeito(B) = -1,625 Å/min;
- Efeito(C) = 7,375 Å/min;
- Efeito(D) = 306,125 Å/min;
- Efeito(AB) = -7,875 Å/min;
- Efeito(AC) = -24,875 Å/min;
- Efeito(AD) = -153,625 Å/min;
- Efeito(BC) = -43,875 Å/min;

- Efeito(BD) = -0,625 Å/min;
- Efeito(CD) = -2,125 Å/min;
- Efeito(ABC) = -15,625 Å/min;
- Efeito(ABD) = 4,125 Å/min;
- Efeito(ACD) = 5,625 Å/min;
- Efeito(BCD) = -25,375 Å/min e;
- Efeito(ABCD) = -40,125 Å/min;

Estes valores também podem ser encontrados na área “session” do Minitab, sem a necessidade de realizar cálculos manuais. Na FIG. 6 eles estão assinalados em vermelho.

**Factorial Fit: Taxa de ataq versus Espaçamento; Pressão; Vazão; Potência**

Estimated Effects and Coefficients for Taxa de ataque (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		776,06
Espaçamento	-101,62	-50,81
Pressão	-1,62	-0,81
Vazão	7,37	3,69
Potência	306,12	153,06
Espaçamento*Pressão	-7,88	-3,94
Espaçamento*Vazão	-24,88	-12,44
Espaçamento*Potência	-153,62	-76,81
Pressão*Vazão	-43,87	-21,94
Pressão*Potência	-0,63	-0,31
Vazão*Potência	-2,13	-1,06
Espaçamento*Pressão*Vazão	-15,63	-7,81
Espaçamento*Pressão*Potência	4,12	2,06
Espaçamento*Vazão*Potência	5,62	2,81
Pressão*Vazão*Potência	-25,37	-12,69
Espaçamento*Pressão*Vazão*Potência	-40,13	-20,06

Figura 6 – “Session” do Minitab exibindo os valores dos efeitos  
 Fonte: Minitab™

Observando os valores dos efeitos, nota-se que aqueles que apresentam os resultados mais significativos são o espaçamento, a potência e interação entre os fatores AD (espaçamento e potência, respectivamente). Os efeitos de interação BC e ABCD também são significativos, porém em menor escala do que aqueles citados anteriormente. Os resultados dos efeitos dos fatores A e D podem ser observados

no gráfico da FIG. 7 por meio do coeficiente angular da reta. Aquelas que possuem um ângulo de inclinação maior em módulo são as que apresentam efeitos mais significativos na resposta. Também é possível concluir pela inclinação que o espaçamento tem um efeito negativo enquanto que a potência, positivo.

Assim, se quisermos maximizar a resposta devemos trabalhar com o espaçamento no nível (-) e com a potência no nível (+). Em termos de pressão de vazão é indiferente para a resposta trabalhar no nível (-) ou (+). Entretanto, pode ser prudente neste caso, trabalhar com estes fatores no nível (-), pois nestas condições teremos menor gasto de energia no caso da pressão e menor desperdício no caso da vazão.

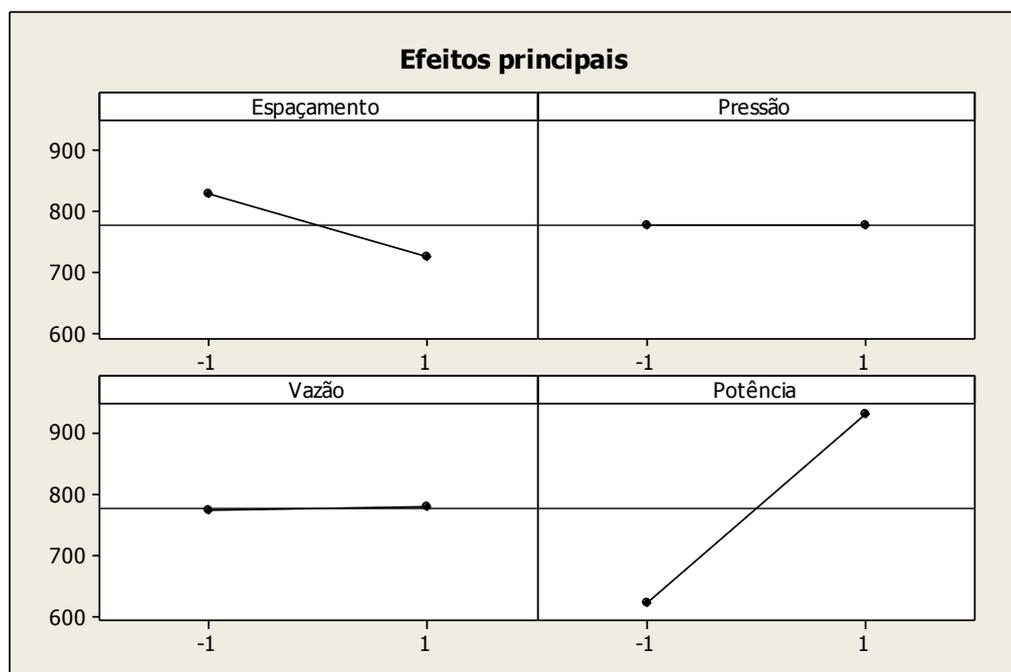


Figura 7 - Resultado dos efeitos dos fatores principais para o experimento de ataque por plasma  
Fonte: Minitab™

Os efeitos dos fatores principais e das interações podem ser vistos também no Gráfico de Pareto (FIG. 8). Aqueles em que a barra ultrapassa o valor de 29,4 são os mais significativos. Portanto, além dos fatores A e D, agora também é possível determinar a importância da interação AD na resposta final. A interação BC e a ABCD também ultrapassam este valor, mas, posteriormente, vamos justificar o motivo desses dois efeitos não serem considerados na resposta final.

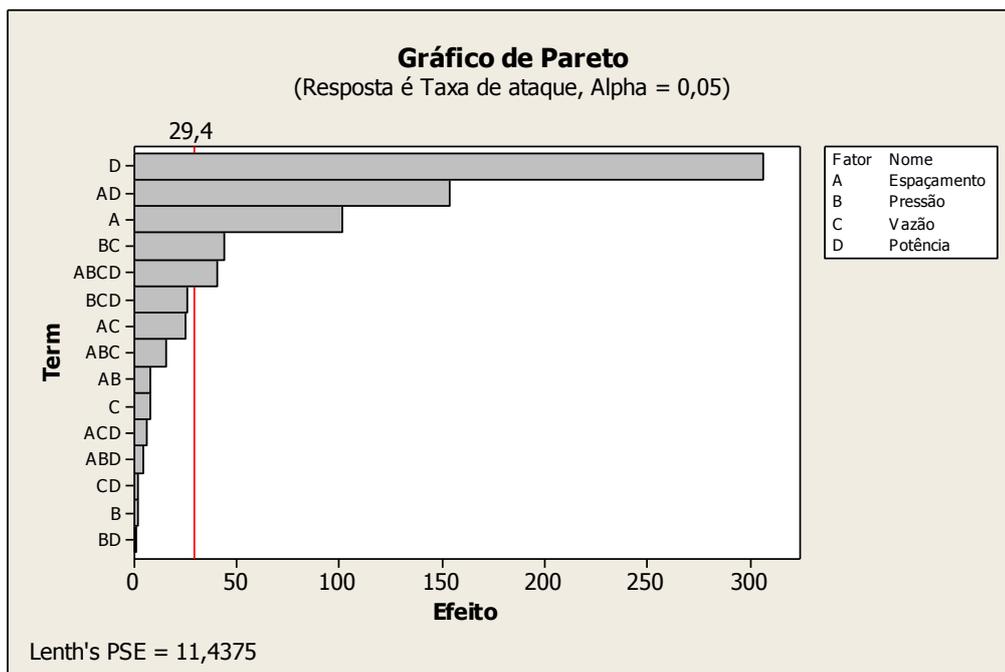


Figura 8 - Gráfico de Pareto para o experimento de ataque por plasma  
FONTE: Minitab™

O gráfico da FIG. 9 também apresenta os principais efeitos e é possível chegar às mesmas conclusões anteriores. A diferença é que nele pode ser visualizado qual será o ponto que mais se aproxima do ponto ótimo desejado. Os pontos que estão à direita da reta, maximizam a resposta e os pontos à esquerda, minimizam. Sua análise para chegar à resposta final deve levar em consideração quais as intenções do experimento. No exemplo apresentado, deseja-se maximizar a resposta. Portanto, trabalhar com o fator D no nível alto, ou seja, potência igual a 325W, causará um aumento na taxa de ataque químico.

Em resumo, para maximizar a taxa de ataque do nitreto de silício, devemos trabalhar com as seguintes condições:

- Espaçamento entre o ânodo e o cátodo em nível baixo, ou seja, 0,80cm;
- Potência aplicada ao cátodo em nível alto, ou seja, 325W;
- Vazão de  $C_2F_6$  no nível baixo, ou seja,  $125\text{cm}^3$  padrão/min. e;
- Pressão na câmara do reator no nível baixo, ou seja, 450m Torr.

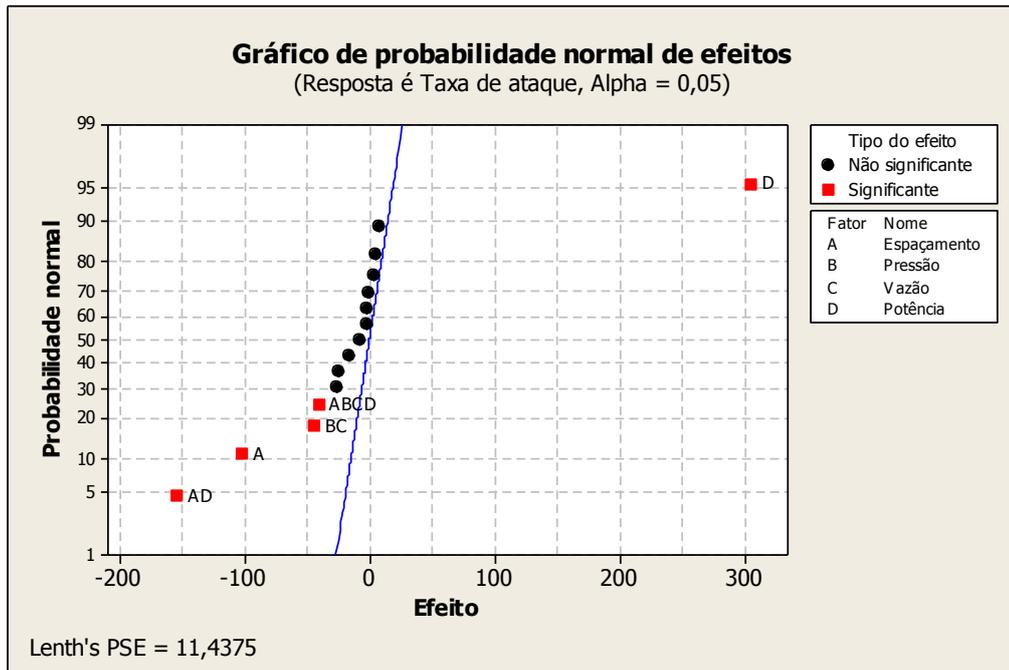


Figura 9 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos para o experimento de ataque por plasma  
 FONTE: Minitab™

## 1.2 Planejamento fatorial $2^k$ de meia-fração

À medida que a quantidade de fatores aumenta em um experimento fatorial, o número de efeitos estimados e a quantidade de corridas também aumentam. Um experimento com seis fatores resulta em seis efeitos principais, quinze interações de segunda ordem, vinte interações de terceira ordem, quinze interações de quarta ordem, seis interações de quinta ordem e uma interação de sexta ordem. Além disso, se cada combinação de tratamento for realizada apenas uma única vez teremos no total 64 corridas. Em muitos casos, para facilitar a análise e montagem inicial da otimização, consideram-se apenas os efeitos principais e as interações de ordens baixas. Este artifício é conhecido como o princípio da esparsidade dos efeitos.

As interações de terceira ordem e superiores são geralmente negligenciadas. Consequentemente, quando o número de fatores for moderadamente grande, com  $k \geq 4$  ou 5, uma prática comum é correr somente uma réplica do planejamento  $2^k$  e então combinar as interações de ordens mais altas como uma estimativa do erro. (MONTGOMERY, et. al., 2009, p.350)

Há a possibilidade de ocorrer interações significativas de ordem mais alta em experimentos sem réplicas. Nesses casos, segundo Montgomery (2009), não é apropriado usar uma média quadrática do erro, obtida pelas interações de ordens altas. O gráfico de probabilidade normal de efeitos, mostrado em um exemplo posterior, é a solução para esse problema. Os efeitos que forem negligenciáveis terão média igual a zero e tenderão a cair ao longo de uma linha reta neste gráfico. Já os efeitos significativos não se encontrarão perto desta linha porque não terão média igual a zero.

Se considerarmos que estamos interessados nos efeitos principais e nas interações de ordem mais baixas, podemos aplicar um planejamento fatorial fracionário porque envolve menos corridas do que em um planejamento fatorial completo  $2^k$  e também gera resultados satisfatórios. Uma meia-fração do planejamento  $2^k$  sem réplicas contém  $2^{k-1}$  corridas, ou seja, se o planejamento completo possui seis fatores e conseqüentemente 64 corridas, no planejamento fracionário ainda teremos 6 fatores, mas o número de corridas cai pela metade, ou seja, 32 corridas. Na prática, um planejamento fracionário é mais econômico financeiramente porque exige uma quantidade menor de testes pois evita que se faça experimentos com variáveis que possam ou não influenciar a resposta. Martendal (2007) destaca em seu estudo a eficiência deste tipo de planejamento por conseguir extrair uma grande quantidade de informações realizando um número mínimo de experimentos.

Considere um planejamento  $2^{3-1}$ , isto é, uma meia-fração de  $2^3$ . No total, este planejamento fracionário terá apenas quatro corridas. Suponha que, para compor nosso planejamento fracionário, selecionemos as combinações de tratamento *a*, *b*, *c* e *abc*. Essas combinações são mostradas na metade superior da TAB. 5. Note que o planejamento  $2^{3-1}$  é formado selecionando-se somente as combinações de tratamento que possuem sinal positivo para o efeito de maior ordem (ABC). Logo, ABC é chamado de gerador dessa fração. O cálculo dos efeitos se dá da mesma maneira que para um planejamento fatorial completo.

Tabela 5 - Níveis para o planejamento fatorial  $2^3$

Combinação de tratamentos	Efeito fatorial						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
<i>a</i>	+	-	-	-	-	+	+
<i>b</i>	-	+	-	-	+	-	+
<i>c</i>	-	-	+	+	-	-	+
<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>ab</i>	+	+	+	+	-	-	-
<i>ac</i>	+	-	-	-	+	-	-
<i>bc</i>	-	+	-	-	-	+	-
(1)	-	-	+	+	+	+	-

Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 360.

Para ilustrar o uso de uma meia-fração, considere o exemplo da última seção sobre o experimento do ataque por plasma. Vamos escolher as combinações de tratamento em que ABCD tem sinal positivo. A TAB. 6 mostra o planejamento fracionário para este experimento. Note que os fatores A, B e C constituem um planejamento básico  $2^3$  e o fator D é o resultado da multiplicação de sinais dos três fatores anteriores, ou seja,  $D = ABC$ .

Tabela 6 - Planejamento fatorial  $2^{4-1}$  para o experimento de ataque por plasma

Combinação de tratamentos	A	B	C	D	Taxa de Ataque
(1)	-	-	-	-	550
<i>ad</i>	+	-	-	+	749
<i>bd</i>	-	+	-	+	1052
<i>ab</i>	+	+	-	-	650
<i>cd</i>	-	-	+	+	1075
<i>ac</i>	+	-	+	-	642
<i>bc</i>	-	+	+	-	601
<i>abcd</i>	+	+	+	+	729

Fonte: MONTGOMERY, 2009, p. 361.

Os valores dos efeitos são:

- Efeito(A) = -127,00 Å/min;
- Efeito(B) = 4,00 Å/min;
- Efeito(C) = 11,50 Å/min;
- Efeito(D) = 290,50 Å/min;

- Efeito(AB) = -10,00 Å/min;
- Efeito(AC) = -25,50 Å/min e;
- Efeito(AD) = -197,50 Å/min.

Comparando esses valores com os dos efeitos obtidos do planejamento fatorial completo, vemos que as estimativas dos efeitos principais são muito parecidas em valor e sinal nos dois casos. Portanto, é possível determinar os efeitos principais utilizando apenas oito ensaios. Já os valores dos efeitos de interação podem acabar sendo superestimados como, por exemplo, o efeito de interação AD. Isso acontece porque com oito ensaios, é possível estimar apenas oito grandezas independentes. Depois do cálculo da média e dos quatro efeitos principais, restam apenas mais três graus de liberdade. “Seria ótimo poder reduzir o número de ensaios à metade sem ter que pagar nada por isso, mas infelizmente nada é de graça” (BARROS NETO, et.al., 2010, p.169). Apesar disso, não há motivos para depreciar o planejamento fracionário. Se considerarmos que as interações envolvendo o fator B não são importantes porque o seu efeito principal é desprezível, então concluiremos que o efeito de ABCD e BC também podem ser negligenciados. Além disso, “podemos esperar que os coeficientes do modelo obedeçam uma certa hierarquia, com os termos de ordem mais baixa mostrando-se mais importantes do que os de ordem mais altas” (BARROS NETO, et. al., 2010, p.131).

O gráfico normal de probabilidade (FIG. 10) e o gráfico de Pareto (FIG. 11) do planejamento fatorial fracionário são semelhantes aos do planejamento fatorial completo, a diferença está na ausência dos pontos BC e ABCD como itens significantes. Da mesma forma, observando esses gráficos, podemos chegar à mesma conclusão daquela exposta para o planejamento fatorial completo: para maximizar a resposta, o fator D deve trabalhar em nível alto. Logo, o planejamento fatorial fracionário é uma alternativa econômica de estudo ao planejamento completo quando há uma grande quantidade de fatores envolvidos em um experimento.

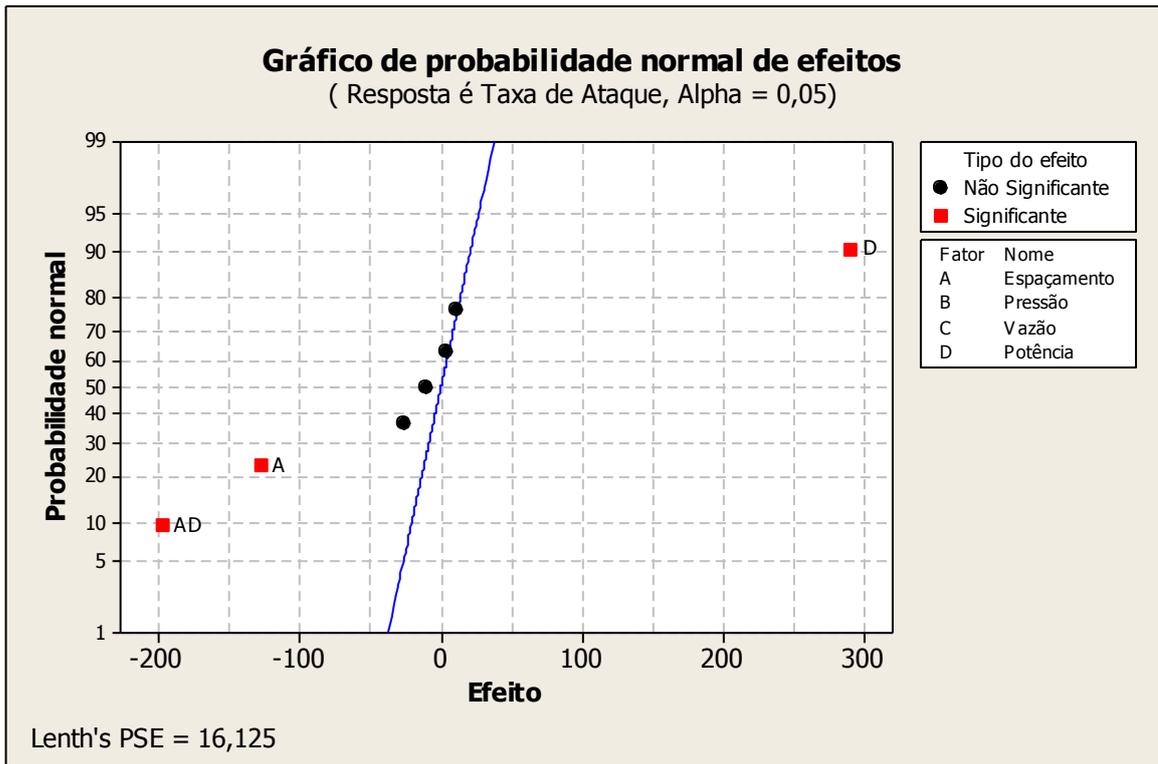


Figura 10 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos para o experimento do ataque de plasma  
 Fonte: Minitab™

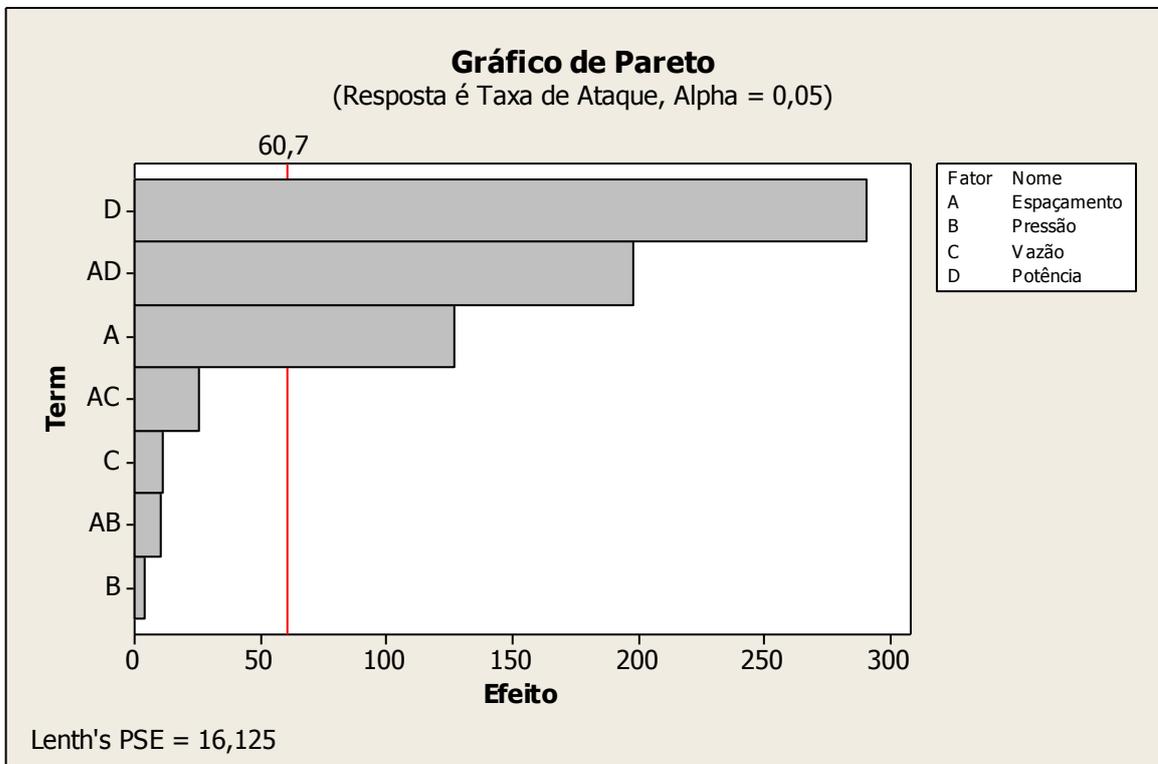


Figura 11 - Gráfico de Pareto para o experimento de ataque por plasma  
 Fonte: Minitab™

## CAPÍTULO 3 – O PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO AO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento contínuo é o processo de solidificação ininterrupta de um metal fundido homogêneo. É também o último processo da unidade de aciaria<sup>4</sup> onde é realizado o processo de fusão e o tratamento do aço líquido. Esse aço líquido passa pelo processo de lingotamento contínuo, solidifica-se e é transformado em "billet". Os "billets" são cortados em tamanhos pré-determinados e seguem para outra unidade da indústria, a laminação. Essa etapa do processo consiste na conformação mecânica para modificar a seção transversal do "billet" de acordo com as especificações do cliente. Portanto, o processo de lingotamento contínuo faz a conexão entre as unidades de aciaria e laminação.

A grande parte dos defeitos superficiais dos "billets" oriundos do processo de lingotamento contínuo, segundo Arlindo (2008), ocorrem durante a primeira etapa de solidificação. Os defeitos são geralmente superficiais, porém, eles podem se propagar ao longo do "billet" comprometendo suas propriedades. Isso pode ocorrer por diversos motivos como, por exemplo, pela preparação inadequada da máquina ou por oscilações senoidais na interface sólido/líquido no interior do "billet". Os defeitos superficiais que podem acontecer durante o processo são, por exemplo, trincas longitudinais e transversais. A FIG. 12 representa um exemplo de trinca em uma "billet".

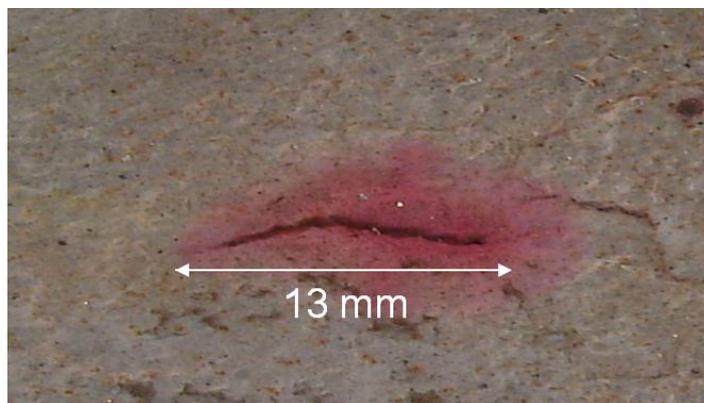


Figura 12 - Exemplo de trinca em um "billet"

---

<sup>4</sup> Unidade da indústria metalúrgica onde são realizados os processos de fusão e o tratamento do aço líquido, que posteriormente é solidificado em formatos pré-definidos.

O índice de refugo (IR) é uma taxa, calculada em porcentagem, que representa a quantidade de “billets” imperfeitos, ou seja, aqueles que apresentam defeitos superficiais e não podem ser repassados para o cliente. Matematicamente, é calculado como na equação 2.

$$IR = \left[ \frac{\text{Número de barras reprovadas}}{(\text{Número de barras reprovadas} + \text{Número de barras aprovadas})} \right] \times 100 \quad (2)$$

O nosso principal objetivo é minimizar este índice para diminuir os custos de retrabalho já que as barras reprovadas podem ser reprocessadas e servirem de matéria-prima para o mesmo processo. As barras são oriundas do processo de laminação, que tem como matéria-prima os “billets” produzidos pelo processo de lingotamento contínuo.

Para diminuir o índice de refugo, foram escolhidos seis fatores para compor o planejamento fatorial  $2^6$ , sendo três pertencentes à aciaria e os outros três, à laminação. Os parâmetros referentes à aciaria são:

- **Pó fluxante:** uma de suas funções é controlar a transferência de calor entre a parede do molde e a casca solidificada de metal líquido. A viscosidade e a basicidade deste pó são as características que afetam a taxa de transferência de calor. O nível (-) representa o pó 401/V5 com uma viscosidade igual a 0,6dPA.s. O nível (+) representa o pó BOK, com uma viscosidade igual a 0,5dPA.s. Comparando os dois, nota-se que o pó 401/V5 apresenta uma taxa de transferência de calor menor do que a do pó BOK porque sua viscosidade é maior e essas grandezas são inversamente proporcionais.
- **Oscilação do molde:** a função do oscilador do molde é possibilitar que a escória líquida de fluxante penetre nas interfaces das paredes do molde e forme uma casca solidificada, evitando a ocorrência de sangrias e “breakout”. Os níveis referentes a essa variável estão relacionados ao movimento oscilatório do molde. O nível (-) descreve uma curva de oscilação de formato senoidal, ou seja, o movimento tem a mesma amplitude bem como o mesmo tempo de subida e descida. O nível (+) representa um movimento não senoidal, isto é, o movimento possui a mesma amplitude descrita pelo

anterior, mas o tempo de descida do molde é menor do que o tempo de subida.

- Molde: como o aço diminui de volume na solidificação é preciso que as dimensões do molde reduzam, de maneira cônica, a fim de que o fluxo de calor se mantenha constante ao longo do molde. Além disso, a forma do molde influi na forma final do produto, evitando defeitos superficiais. O nível (-) representa manter o molde atual de menor conicidade e o nível (+) representa utilizar um novo tipo de molde (Diamold) com uma conicidade maior.

Os parâmetros referentes à laminação são:

- Caixa térmica: serve para reduzir a taxa de resfriamento do “billet”. O nível (-) significa que o “billet” é resfriado sem caixa térmica e o nível (+) representa com caixa térmica.
- Esmeril: remove os defeitos superficiais dos “billets” para evitar que alguma imperfeição possa gerar defeitos na barra após a laminação. O nível (-) indica a não utilização do esmeril e o nível (+), a utilização.
- Temperatura: na etapa inicial do processo de laminação o “billet” é aquecido a uma temperatura elevada para que seja realizado o seu desbaste. Essa variável se refere à temperatura a qual o “billet” vai ser submetido. O nível (-) representa uma temperatura igual a 1190°C e o nível (+) uma temperatura igual a 1210°C.

A TAB. 7 apresenta um resumo sobre os seis fatores e seus respectivos níveis.

Tabela 7 - Resumo dos fatores e seus níveis para do processo lingotamento contínuo

Representação	Fatores	Nível (-)	Nível (+)
A	Temperatura	1190°C	1210°C
B	Esmeril	Ausente	Presente
C	Caixa térmica	Ausente	Presente
D	Oscilação do molde	Senoidal	Não senoidal
E	Molde	Atual	Diamold
F	Pó fluxante	401/V5	BOK

Fonte: Elaboração própria.

Para realizar o planejamento fatorial completo  $2^6$  foram necessárias 64 corridas. A TAB. 8 apresenta o índice de refugo medido (resposta) em cada uma dessas corridas.

Tabela 8- Dados do planejamento fatorial completo para o experimento do lingotamento contínuo

Corrida	Temperatura	Esmeril	Caixa térmica	Oscilação	Molde	Pó fluxante	Resposta (%)
1	-	-	-	-	-	-	10,62
2	+	-	-	-	-	-	10,66
3	-	+	-	-	-	-	40,83
4	+	+	-	-	-	-	26,50
5	-	-	+	-	-	-	12,75
6	+	-	+	-	-	-	17,07
7	-	+	+	-	-	-	40,83
8	+	+	+	-	-	-	27,35
9	-	-	-	+	-	-	7,32
10	+	-	-	+	-	-	24,39
11	-	+	-	+	-	-	2,56
12	+	+	-	+	-	-	0,64
13	-	-	+	+	-	-	12,10
14	+	-	+	+	-	-	30,49
15	-	+	+	+	-	-	14,53
16	+	+	+	+	-	-	9,40
17	-	-	-	-	+	-	3,36
18	+	-	-	-	+	-	17,36
19	-	+	-	-	+	-	5,17
20	+	+	-	-	+	-	4,39
21	-	-	+	-	+	-	21,67
22	+	-	+	-	+	-	16,67
23	-	+	+	-	+	-	1,77
24	+	+	+	-	+	-	10,43
25	-	-	-	+	+	-	0,00
26	+	-	-	+	+	-	3,28
27	-	+	-	+	+	-	1,71
28	+	+	-	+	+	-	0,00
29	-	-	+	+	+	-	0,00
30	+	-	+	+	+	-	12,27
31	-	+	+	+	+	-	0,00

32	+	+	+	+	+	-	0,00
33	-	-	-	-	-	+	28,75
34	+	-	-	-	-	+	56,71
35	-	+	-	-	-	+	19,93
36	+	+	-	-	-	+	16,12
37	-	-	+	-	-	+	57,15
38	+	-	+	-	-	+	14,03
39	-	+	+	-	-	+	50,72
40	+	+	+	-	-	+	1,28
41	-	-	-	+	-	+	11,67
42	+	-	-	+	-	+	37,61
43	-	+	-	+	-	+	13,68
44	+	+	-	+	-	+	17,54
45	-	-	+	+	-	+	11,67
46	+	-	+	+	-	+	16,67
47	-	+	+	+	-	+	10,34
48	+	+	+	+	-	+	5,98
49	-	-	-	-	+	+	8,94
50	+	-	-	-	+	+	17,89
51	-	+	-	-	+	+	6,84
52	+	+	-	-	+	+	8,47
53	-	-	+	-	+	+	1,63
54	+	-	+	-	+	+	16,26
55	-	+	+	-	+	+	10,26
56	+	+	+	-	+	+	10,08
57	-	-	-	+	+	+	2,42
58	+	-	-	+	+	+	8,13
59	-	+	-	+	+	+	1,72
60	+	+	-	+	+	+	5,98
61	-	-	+	+	+	+	20,73
62	+	-	+	+	+	+	4,13
63	-	+	+	+	+	+	1,71
64	+	+	+	+	+	+	6,84

Fonte: Elaboração própria.

De início, vamos analisar o gráfico de efeitos principais (FIG. 13). Esse gráfico mostra que os fatores esmeril, oscilação, molde e pó-fluxante são os mais significantes. Outrossim, o esmeril, a oscilação e o molde têm efeitos negativos

(diminuem o índice de refugo) quando passam do nível baixo para o nível alto. Já o pó-fluxante apresenta efeito positivo (aumenta o índice de refugo).

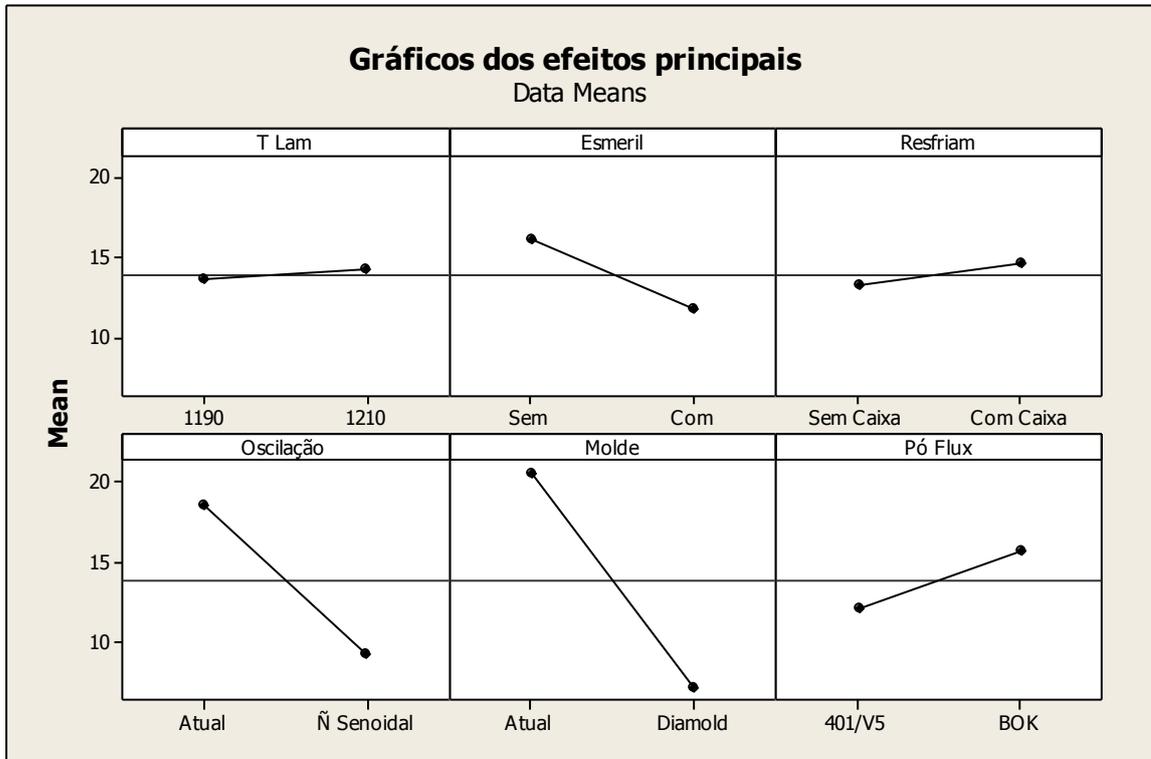


Figura 13 - Gráfico de efeitos principais para o experimento fatorial completo do processo de lingotamento contínuo  
Fonte: Minitab™

Para confirmar quais são os efeitos realmente notáveis no experimento, podemos observar o gráfico de Pareto (FIG. 14). Notamos que os efeitos realmente expressivos são o molde, a oscilação e o efeito de interação entre esmeril, oscilação, molde e pó-fluxante. Porém, como o esmeril e o pó-fluxante não são relevantes como efeitos principais, essa interação pode ser negligenciada.

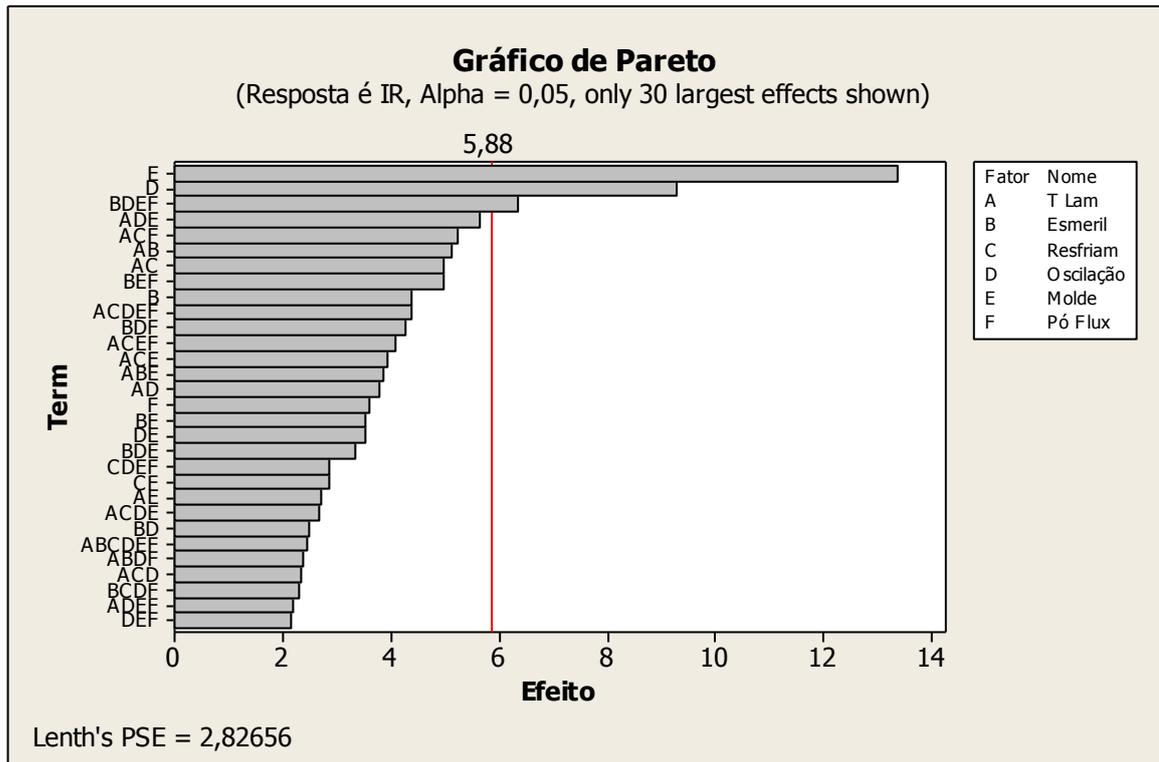


Figura 14 - Gráfico de Pareto para o experimento fatorial completo do processo de lingotamento contínuo  
Fonte: Minitab™

Como o nosso objetivo é diminuir a resposta, buscaremos empregar no processo as variáveis nos níveis que levam a uma diminuição no índice de refugo. Portanto, do gráfico de probabilidade normal (FIG. 15) podemos observar que as variáveis D (oscilação) e E (molde), ao serem passadas no nível (-) para o nível (+), levam a uma diminuição do índice de refugo. Deste modo, como a nossa intenção é a minimização da resposta, usaremos essas variáveis no nível (+), já que no nível (-) teríamos um aumento no nível de refugo.

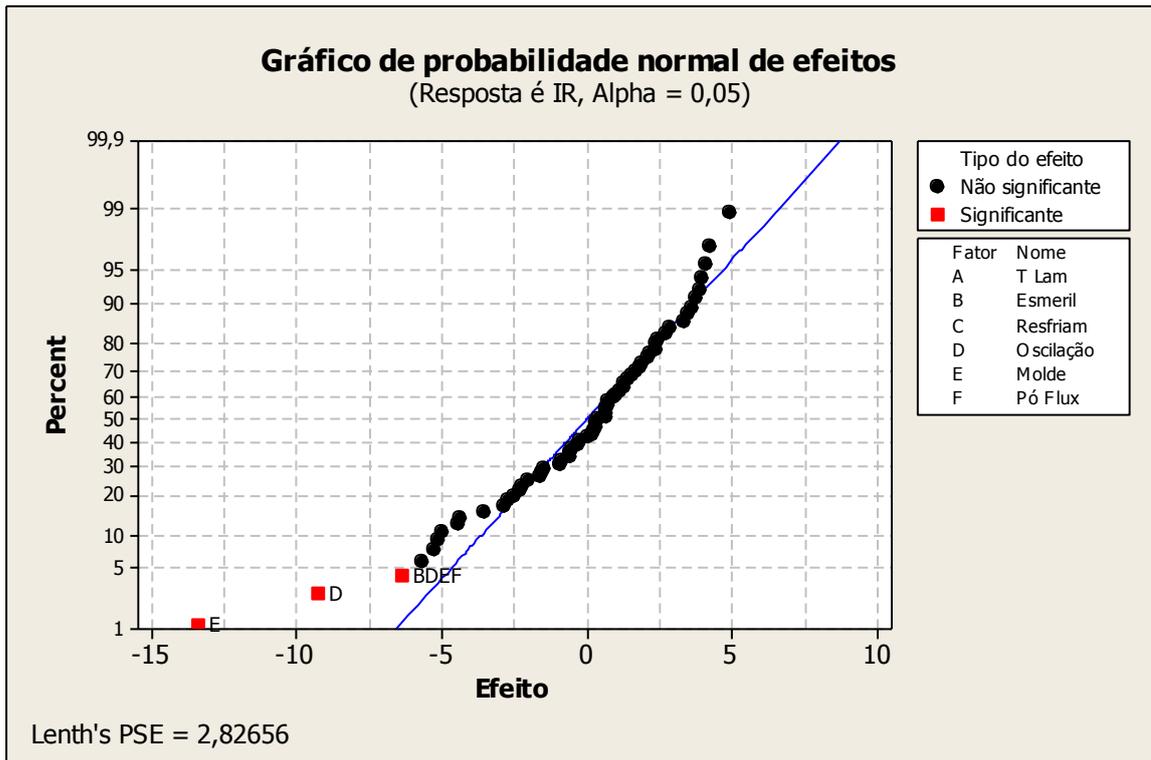


Figura 15 - Gráfico de probabilidade normal de efeitos para o experimento fatorial completo do lingotamento contínuo  
Fonte: Minitab™

Portanto, de acordo com a análise gráfica, devemos trabalhar com o fator oscilação e molde em nível alto, ou seja, oscilação não-senoidal e utilização do molde com maior conicidade (Diamold). Se verificarmos na TAB. 8, existem cinco momentos em que o índice de refugo tende a zero quando esses dois fatores estão em nível alto. São as corridas de número 25, 28, 29, 31 e 32. Isto posto, identificamos em qual região devemos trabalhar para que o índice de refugo seja minimizado.

É possível também visualizar no gráfico do cubo (FIG. 16) estes pontos em que o índice de refugo tende a zero, eles estão localizados no cubo menor do vértice superior direito e frontal do cubo maior. À medida que cresce o número de fatores, a representação geométrica torna-se mais complexa e conseqüentemente, sua análise também. Para uma melhor compreensão do gráfico de cubo, observe no esquema (FIG. 17) o que cada aresta do cubo desempenha e quais vértices representam os níveis alto e baixo para cada fator.

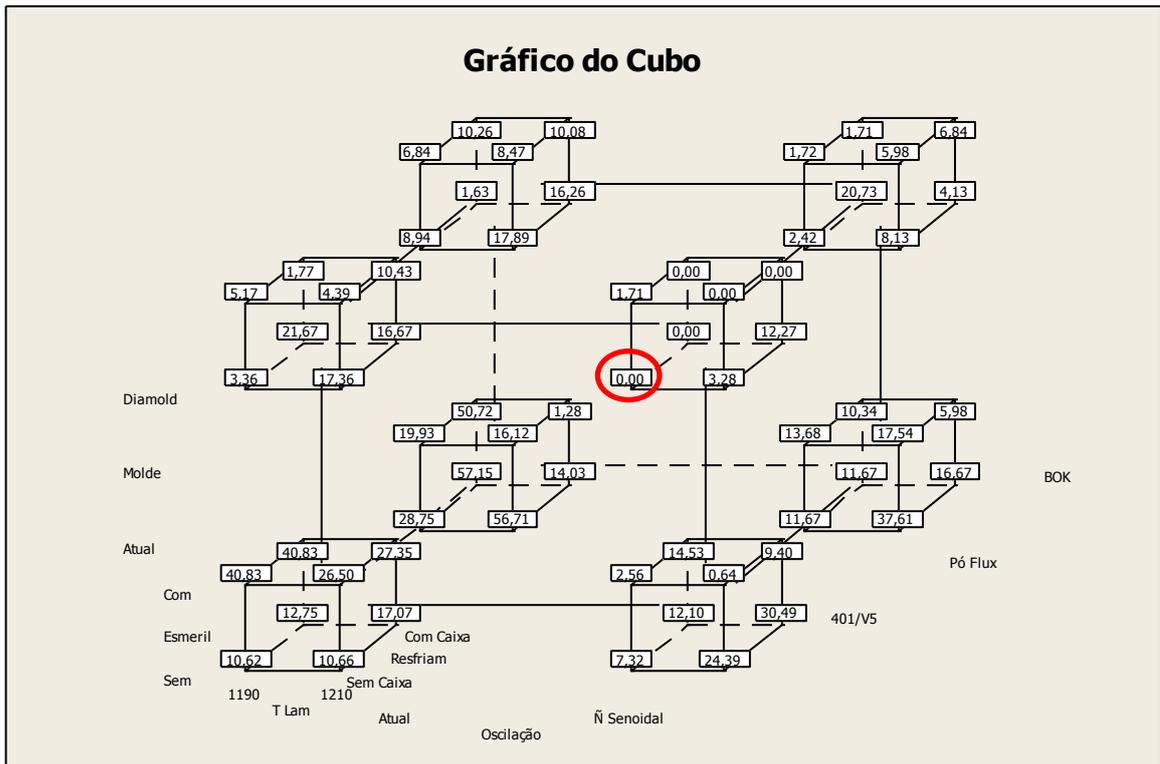


Figura 166 - Gráfico do cubo para o experimento fatorial completo do lingotamento contínuo  
 Fonte: Minitab™

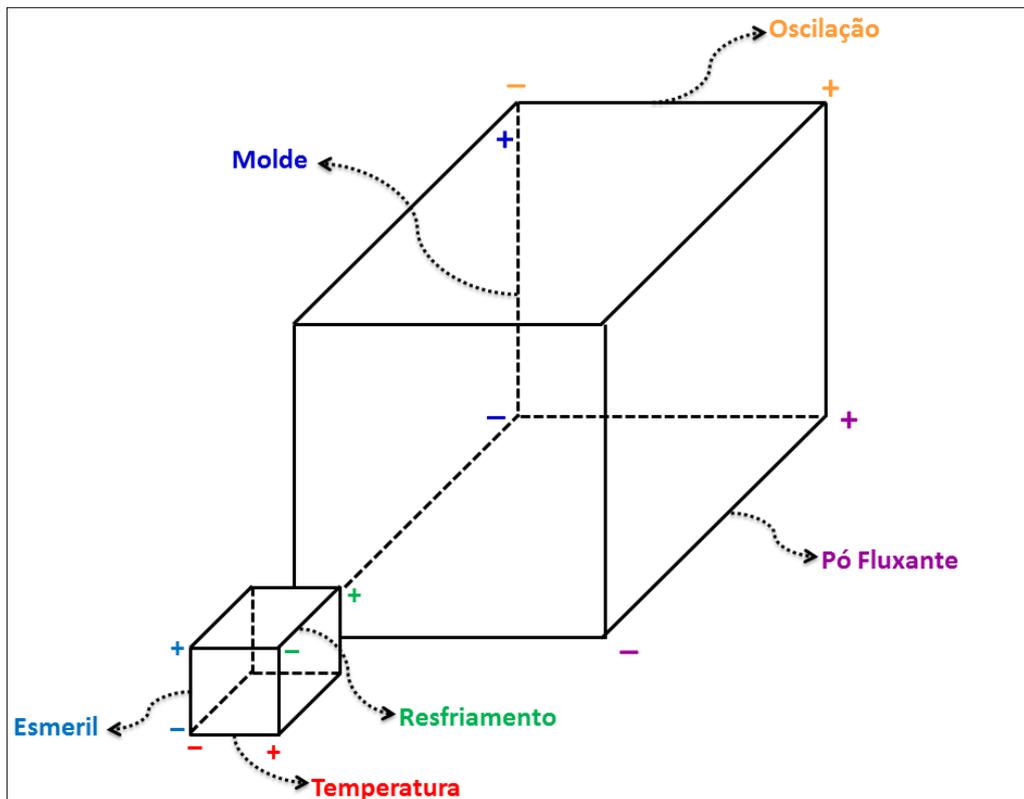


Figura 177 - Esquema de representação das arestas do cubo  
 Fonte: Elaboração própria.

Suponha, a título de ilustração, que decidimos trabalhar com o ponto assinalado em vermelho no gráfico do cubo (FIG. 16). Comparando-o com o esquema apresentado (FIG.17), temos que as condições de operação serão:

- A temperatura em nível baixo;
- O resfriamento em nível baixo;
- O esmeril em nível baixo;
- O pó fluxante em nível baixo;
- A oscilação em nível alto e;
- O molde em nível alto.

No entanto, quando se tem uma situação em que o número de fatores é demasiadamente grande, uma exploração menos pretenciosa pode ser a alternativa mais prudente. Assim, conforme já salientamos anteriormente, o planejamento fatorial meia fração poderá ser uma alternativa interessante em estudos iniciais onde se tem um número relativamente grande de fatores.

Vamos agora aplicar o planejamento fatorial fracionário  $2^{6-1}$  com o objetivo de demonstrar a viabilidade de uso deste planejamento na situação em questão. O gerador desta fração será quando a interação de todos os fatores estiver em nível alto. Como consequência, os sinais do fator pó-fluxante será a multiplicação de sinais dos outros fatores. A TAB.9 representa o planejamento fracionário.

Tabela 9 - Dados do planejamento fatorial fracionário para o experimento do lingotamento contínuo

Corrida	Temperatura	Esmeril	Caixa Térmica	Oscilação	Molde	Pó Fluxante	Resposta (%)
1	-	-	-	-	-	-	10,62
2	+	-	-	-	-	+	56,71
3	-	+	-	-	-	+	19,93
4	+	+	-	-	-	-	26,50
5	-	-	+	-	-	+	57,15
6	+	-	+	-	-	-	17,07
7	-	+	+	-	-	-	40,83
8	+	+	+	-	-	+	1,28
9	-	-	-	+	-	+	11,67
10	+	-	-	+	-	-	24,39
11	-	+	-	+	-	-	2,56
12	+	+	-	+	-	+	17,54
13	-	-	+	+	-	-	12,10
14	+	-	+	+	-	+	16,67
15	-	+	+	+	-	+	10,34
16	+	+	+	+	-	-	9,40
17	-	-	-	-	+	+	8,94
18	+	-	-	-	+	-	17,36
19	-	+	-	-	+	-	5,17
20	+	+	-	-	+	+	8,47
21	-	-	+	-	+	-	21,67
22	+	-	+	-	+	+	16,26
23	-	+	+	-	+	+	10,26
24	+	+	+	-	+	-	10,43
25	-	-	-	+	+	-	0,00
26	+	-	-	+	+	+	8,13
27	-	+	-	+	+	+	1,72
28	+	+	-	+	+	-	0,00
29	-	-	+	+	+	+	20,73
30	+	-	+	+	+	-	12,27
31	-	+	+	+	+	-	0,00
32	+	+	+	+	+	+	6,84

Fonte: Elaboração própria.

O gráfico dos efeitos principais (FIG. 18) indica que os fatores esmeril, oscilação, molde e pó-fluxante são os mais significantes. Além disso, o esmeril, a oscilação e o molde apresentam efeito negativo e o pó-fluxante apresenta efeito positivo.

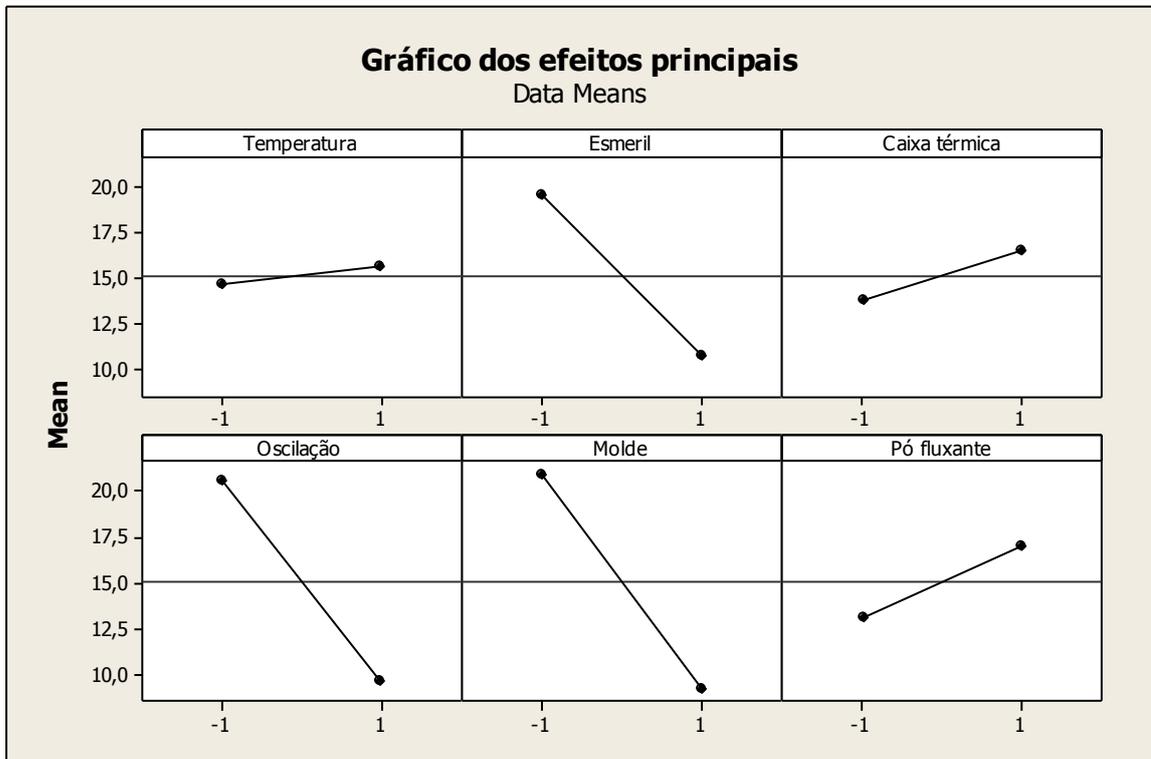


Figura 18 - Gráfico dos efeitos principais do experimento de meia-fração do lingotamento contínuo  
Fonte: Minitab™

O gráfico de probabilidade normal de efeitos (FIG. 19) evidencia que os principais efeitos que influenciam a resposta são molde, oscilação e esmeril. Os efeitos de interação AC, ACD e ACE serão negligenciados sob a luz do princípio da esparsidade de efeitos bem como o fator A não tem relevância para a resposta final. Para mais, as interações de terceira ordem explícitas no gráfico maximizam a resposta, tornando-as indesejáveis para o experimento.

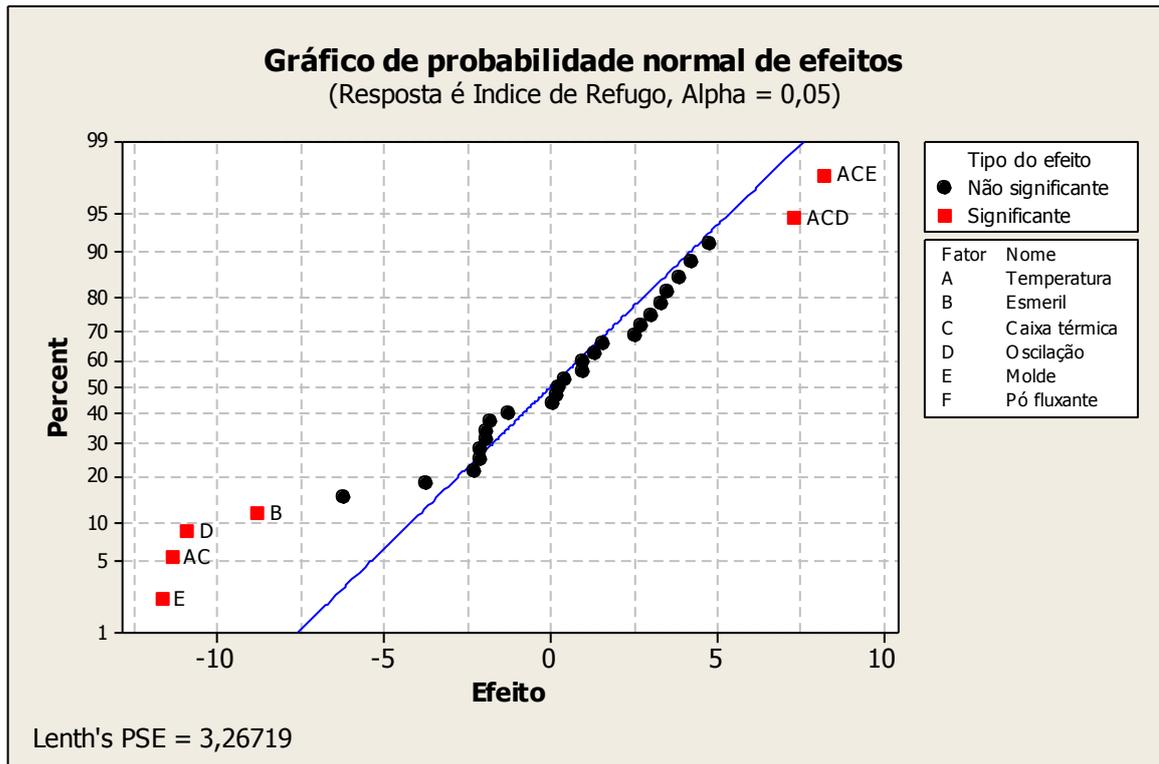


Figura 19 - Gráfico de probabilidade normal para o experimento fracionário do lingotamento contínuo  
Fonte: Minitab™

Por fim, o gráfico do cubo (FIG. 20) nos mostra a região que mais se aproxima do ponto ótimo desejado. Esses pontos em que o índice de refugo tende a zero são as corridas 25, 28 e 31 (ver TAB. 9). Conclui-se, pelo planejamento fracionário, que para diminuir o índice de refugo devemos trabalhar com os fatores oscilação, molde e esmeril em nível alto.

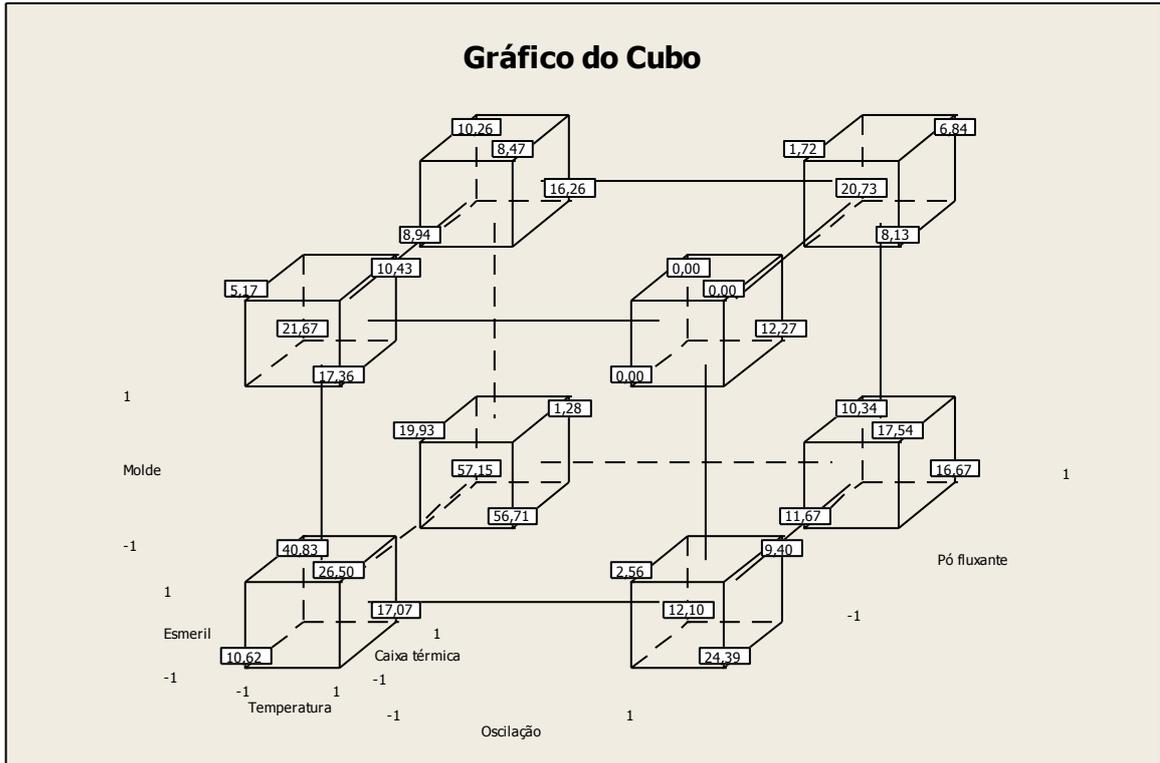


Figura 20 - Gráfico do cubo para o experimento fatorial fracionário do lingotamento contínuo  
 Fonte: Minitab™

Assim, podemos observar que em ambos os casos obtivemos resultados similares, com a diferença de que no planejamento fracionário tivemos a vantagem de diminuir pela metade o número de experimentos. Na indústria, e sobretudo no experimento em questão, isso resulta em significativa redução do custo para a realização da otimização.

## CAPÍTULO 4 – DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No estudo do processo de lingotamento contínuo, utilizando o planejamento fatorial completo, foram necessárias 64 corridas de testes. Com o auxílio do Minitab™ e através da análise gráfica descobrimos a região onde o índice de refugo tende a zero. Portanto, sabemos que temos cinco condições de trabalho disponíveis que eliminam o desperdício e o retrabalho. Além disso, concluímos que os fatores que mais contribuem para minimizar o índice são o tipo de molde utilizado bem como o movimento de oscilação que o molde descreve. No nosso caso, o molde atual deve ser trocado pelo Diamold e o movimento de oscilação não deve descrever um movimento senoidal, mas sim ter um tempo de descida do molde menor que o tempo de subida.

Para o planejamento fatorial fracionário foram necessárias 32 corridas. Utilizando o mesmo método de análise gráfica também comprovamos que o tipo de molde utilizado e a oscilação do molde são os fatores mais importantes na minimização do índice de refugo. A diferença entre esse planejamento e o anterior é que agora a utilização do esmeril é um fator relevante. O esmeril ajuda na remoção dos defeitos superficiais nos “billets” para evitar que alguma imperfeição possa gerar defeitos na barra após a laminação. Porém, a sua utilização só será válida se a trinca não for profunda. Caso contrário, não terá utilidade e o “billet” será reprocessado. Mas se considerarmos que o “billet” já foi produzido com uma alta qualidade superficial em consequência da utilização do Diamold e da oscilação não senoidal, portanto, não será necessário utilizar o esmeril.

Visando a economia em seu amplo sentido no processo de lingotamento contínuo, podemos ponderar em quais níveis as variáveis não significativas devem trabalhar. Por exemplo, é interessante manter o fator pó fluxante em nível baixo, pois por menor que seja seu efeito, quando esse passou no nível (-) para o nível (+), seu coeficiente angular foi positivo, o que poderia causar um pequeno aumento indesejado na resposta final. Os fatores caixa térmica, esmeril e temperatura também podem ser mantidos em nível baixo porque assim há economia de material

e energia elétrica. A corrida que representa essas condições de trabalho é a número 25 da TAB. 8. Nela, o índice de refugo é igual a zero.

Cada teste para a empresa custa em média R\$100.000,00. Portanto, um planejamento fatorial completo  $2^6$  custaria R\$640.000,00 enquanto um fatorial fracionário  $2^{6-1}$  custaria R\$320.000,00. Isto posto, entende-se que utilizar o planejamento de meia-fração reduziria os custos pela metade.

Além dos custos, o tempo é outro elemento importante e, por semana, em média, são realizadas seis corridas de testes. A fase de testes para realizar um planejamento fatorial completo seria de onze semanas. Porém, o resultado só pode ser visualizado no produto final que tem um “lead time” de dois meses. Sendo assim a solução do problema tem uma duração de aproximadamente dezenove semanas. Para o planejamento fracionário a fase de testes duraria, em média, cinco semanas. No total, a elucidação do problema ocorreria em treze semanas.

É interessante a utilização do planejamento de meia-fração para experimentos que possuem muitos fatores envolvidos. O nosso estudo comprova sua eficácia e demonstra economia de tempo e dinheiro. Além disso, a sustentabilidade é imprescindível. As ferramentas estatísticas resolvem problemas utilizando um número mínimo de testes. Quanto menos testes forem realizados, menor será a poluição produzida pela indústria. Resolver o problema em um tempo mais enxuto também contribui para este conceito, afinal, se o índice de refugo é zero então não há retrabalho, logo, não há mais poluição sendo gerada.

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a utilização de métodos estatísticos para a solução de problemas na indústria metalúrgica visando a otimização de processos. Planejamentos fatoriais foram utilizados para estudar as variáveis do processo de lingotamento contínuo com o objetivo de minimizar o índice de refugo.

Foram analisados seis fatores importantes pertencentes aos processos de lingotamento contínuo e laminação e, como resultado, o índice de refugo foi minimizado a zero, aprimorando a produção de aço. Ademais, os dois tipos de planejamentos aplicados no nosso objeto de estudo se mostram como soluções estatísticas eficientes a serem aplicadas na indústria.

O planejamento fatorial de meia-fração também se mostrou uma forma mais econômica e sustentável para solucionar o problema em comparação ao planejamento fatorial completo, nesta etapa do trabalho.

Sugerimos, para trabalhos futuros, a utilização da metodologia de superfície de resposta para estudar a região em que o índice de refugo tende a zero de forma mais detalhada para determinação do ponto ótimo, fazendo com que se tenha uma espécie de otimização da “otimização” já iniciada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARLINDO, Edmundo Cepeda; GUIMARÃES, Oswaldo Maestro; BLACKABY, Stuart. **Lingotamento Contínuo**. Disponível em: <<http://moodle.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=45749>>. Acesso em: 17/09/2013

BARRAL, Carlos Eduardo. **Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de Metalurgia Extrativa, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BEVERIDGE, G.S.G.; SCHECHTER, R.S. **Optimization: Theory and Practice**. New York: McGraw-Hill, 1970.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N.. **Planejamento fatorial: Uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/academica/article/view/14635>>. Acesso em: 02/05/2013

EIRAS, S. P.; et al. **Métodos de Otimização em Química**. 2000. Disponível em: <[www.chemkeys.com](http://www.chemkeys.com)> Acesso em: 17/03/2013

GALDÁMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MARINHO, Mary R. M.. **Planejamento fatorial: uma ferramenta poderosa para os pesquisadores**. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2005/artigos/PB-5-61001198468-1118313321435.pdf>>. Acesso em: 02/05/2013

MARTENDAL, Edmar. **Aplicação de planejamento fatorial fracionário e boxbehnken para otimização de extração com microgota para determinação de tricloroanisol e tribromoanisol de amostras de vinho por cromatografia a gás.** 2007. Dissertação (Pós-graduação em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

**Planejamento de experimentos utilizando o Minitab 14.** Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fdv.fosjc.unesp.br%2Fivan%2Fdownloads%2FAulas%2520em%2520PDF\\*Planejamento\\_de\\_Experimentos\\_-\\_minitab.pdf&ei=nEymUq2iHovpkAedklCIDQ&usg=AFQjCNE7ii9rpk4FEWRnc5W0iNaqOUruoQ&bvm=bv.57752919,d.eW0&cad=rja](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fdv.fosjc.unesp.br%2Fivan%2Fdownloads%2FAulas%2520em%2520PDF*Planejamento_de_Experimentos_-_minitab.pdf&ei=nEymUq2iHovpkAedklCIDQ&usg=AFQjCNE7ii9rpk4FEWRnc5W0iNaqOUruoQ&bvm=bv.57752919,d.eW0&cad=rja)> Acesso em: 11/07/2013

SILVA, Andréia Souto da. **Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SILVA, Guilherme F. B. Lenz. **Lingotamento Contínuo e Defeitos de Laminação.** Disponível em: <<http://moodle.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=45849%E2%80%8E>>. Acesso em: 14/03/2013