

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

TÉCNICAS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DoE – Design of
Experiment) APLICADO NO PROCESSO DE FORJAMENTO

Jerry Adriani Capitani Mendelski

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

PORTO ALEGRE

Dezembro – 2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

**TÉCNICAS DO PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DoE – Design of
Experiment) APLICADO NO PROCESSO DE FORJAMENTO**

JERRY ADRIANI CAPITANI MENDELSKI
Engenheiro Mecânico de Produção

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

PORTO ALEGRE
Dezembro – 2017

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós Graduação.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer - PPGE3M / UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros - FURG

Prof^a. Dr^a. Liane Werner - UFRGS

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho a todos que de certa forma contribuíram para conclusão do mesmo, seja para a maioria que representou sob a forma de apoio e força, mas também para os poucos que sustentaram a dúvida e a incerteza acerca do resultado final.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

A minha esposa Patrícia Flores Mendelski e minha filha Thariany Flores Mendelski pelo apoio, compreensão, carinho e amor dedicados nos últimos anos.

A minha mãe Adriana Amedea Mendelski (in memorian) e minha avó Isa Elígia Mendelski (in memorian) por ter me ensinado os valores corretos da vida e por ter me mostrado a importância do caráter, da verdade e da honestidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing. Lírío Schaeffer, pelos ensinamentos, auxílio e pela grande oportunidade.

Aos colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao Dr. Eng. Alberto Guerreiro Moreira Brito pelo auxílio e direcionamento dispensados ao longo deste estudo.

Ao acadêmico de engenharia metalúrgica André Rosiak pelo suporte nas atividades desenvolvidas no laboratório.

A todos os amigos, colegas e professores que de uma forma ou outra se fizeram presentes durante as fases de planejamento, elaboração e execução deste estudo.

A todos, o meu muito obrigado!

*"É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ..."*

Martin Luther King

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados da aplicação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos (DoE) em um processo de forjamento a quente de uma biela, sendo utilizado neste processo a liga ternária Al-Mg-Si (AA6351). Para efeitos de conhecimento desta operação foi realizado o mapeamento do processo e consequentemente identificadas (representativamente por grau de interferência e importância) as etapas de aquecimento e conformação, onde nas mesmas foram elencadas as variáveis de controle representativas pelo tipo de lubrificante (sendo considerado grafite ou Lubrodal AT 737), método de aplicação do lubrificante (diretamente no blank ou matriz), tempo de exposição do blank ao forno (20 minutos ou 27 minutos), temperatura de forjamento (430° C ou 500° C) e o tratamento do blank (estado T4 ou T6), onde com o auxílio do software Minitab foi possível a geração de uma matriz de interação dentre as variáveis selecionadas, que proporcionou assim a identificação de uma condição ótima para o processo, a qual identificou uma força de forjamento que comparada com a força de forjamento calculada através da Teoria Elementar da Plasticidade apresentou uma variação na faixa de 5%.

Palavras-chave: Planejamento de Experimentos, Otimização de Processos, Forjamento e Alumínio.

ABSTRACT

This work aims to present the results of the application of the technique of the Design and Analysis of Experiments (DoE) in a process of hot forging of a connecting rod, using in this process the ternary Al-Mg-Si alloy (AA6351). For the purposes of knowing this operation, the process mapping was carried out and the heating and conformation stages were identified (representatively by degree of interference and importance), where the representative control variables by the type of lubricant (considered graphite or Lubrodal AT 737), method of application of the lubricant (directly on the blank or die), blank exposition time to oven (20 minutes or 27 minutes), forging temperature (430 ° C or 500 ° C) and blank treatment (state T4 or T6), where with the help of Minitab software it was possible to generate an interaction matrix among the selected variables, which allowed the identification of an optimal condition for the process, which identified a forging force that compared with the force of forging calculated through the Elementary Theory of Plasticity presented a variation in the range of 5%.

Keywords: Design of Experiments, Process Optimization, Forging of Aluminum.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTOS	21
2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO	33
2.2.1 CURVA DE ESCOAMENTO	36
2.2.2 ATRITO.....	40
2.2.3 FORÇA DE FORJAMENTO.....	42
2.2.4 TEMPERATURA.....	43
2.2.5 TEORIA ELEMENTAR DA PLASTICIDADE	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	49
3.2 MÉTODO.....	54
4 DELINEAMENTO E EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	56
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	56
4.2. ESCOLHA DOS FATORES E NÍVEIS.....	58
4.3 ESCOLHA DO MODELO ESTATÍSTICO	61
4.4 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	62
4.4.1 CÁLCULO DA FORÇA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO TEP.....	62
4.4.2 MATRIZ EXPERIMENTAL.....	65
4.4.3 SEQUENCIA DE AQUECIMENTO E FORJAMENTO	66
5 APRESENTAÇÃO E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
5.1 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	67
5.1.1 AVALIAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM	68
5.1.2 AVALIAÇÃO DE SEGUNDA ORDEM	70
5.1.3 AVALIAÇÃO DE TERCEIRA ORDEM.....	73
5.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	79
5.3 COMPROVAÇÃO E CAPABILIDADE DO PROCESSO	81
6 CONCLUSÕES	86
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	88
8 REFERENCIA	88
APÊNDICE A - MATRIZ DE ENSAIOS	94

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Estratégia inicial para o planejamento de um experimento.....	24
FIGURA 2 – Roteiro para construção de Experimentos.....	24
FIGURA 3 – Modelo Básico de um Processo.....	25
FIGURA 4 – Etapas para o desenvolvimento de um DoE.....	26
FIGURA 5 – Principais ferramentas de DoE.....	28
FIGURA 6 – Projetos Fatoriais para 2, 3 e 4 variáveis.....	29
FIGURA 7 – Projeto Fatorial 2^k	30
FIGURA 8 – Projeto Fatorial 2^k - Modelo Cúbico	32
FIGURA 9 – Curva de escoamento para duas diferentes ligas de alumínio	38
FIGURA 10 – Curvas de escoamento a quente (400° C) para AA6351	39
FIGURA 11 – Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria plana (uso do método das tiras)	46
FIGURA 12 – Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de revolução extrudada ou trefilada (uso do método dos discos)	46
FIGURA 13 – Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria axial conformada em matriz fechada (uso do método dos tubos).....	47
FIGURA 14 – Representação da análise do equilíbrio de forças numa zona de qualquer geometria.	47
FIGURA 15 – Blanks de forjamento	49
FIGURA 16 – Geometria final da peça forjada.....	50
FIGURA 17 – Dimensões básicas da peça forjada	50
FIGURA 18 – Matriz de forjamento	51
FIGURA 19 – Prensa hidráulica de 6 MN, marca FKL	52
FIGURA 20 – Forno elétrico Sanchis	52
FIGURA 21 – Sistema de aquisição de dados	53
FIGURA 22 – Representação esquemática do sistema de aquisição de dados	54
FIGURA 23 – Detalhamento da sequência das atividades da pesquisa	55
FIGURA 24 – Processo de forjamento em matriz fechada.....	57

FIGURA 25 – Colocação do lubrificante na matriz - A e colocação do lubrificante no blank - B.....	59
FIGURA 26 – Matriz de Ensaios - Quantidade de Experimentos.....	61
FIGURA 27 – Geometria, secções para análise via TEP	62
FIGURA 28 – Secção AA	63
FIGURA 29 – Secção BB	63
FIGURA 30 – Secção CC.....	63
FIGURA 31 – Cálculo de Forças - TEP.....	64
FIGURA 32 – Evolução das Forças VS Intervalo de Tiras.....	65
FIGURA 33 – Matriz de Ensaios - Quantidade, Ordem e Fatores dos Ensaios	65
FIGURA 34 – Disposição dos Equipamentos para os Ensaios	66
FIGURA 35 – Matriz de Ensaios e Resultado das forças obtidas	68
FIGURA 36 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Primeira Ordem	69
FIGURA 37 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Segunda Ordem	70
FIGURA 38 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Segunda Ordem	72
FIGURA 39 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Segunda Ordem	72
FIGURA 40 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Terceira Ordem	74
FIGURA 41 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Terceira Ordem	75
FIGURA 42 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Redução do Modelo	76
FIGURA 43 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Redução do Modelo	76
FIGURA 44 – Gráfico de Efeitos Principais para Força.....	77
FIGURA 45 – Gráfico de Interação para Força	78
FIGURA 46 – Gráfico de Resposta Otimizada	80
FIGURA 47 – Teste de Normalidade.....	83
FIGURA 48 – Capabilidade do Processo	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais parâmetros do processo de forjamento.....	36
TABELA 2 - Coeficientes para curva de escoamento do alumínio AA6351	39
TABELA 3 - Descrição das variáveis de resposta	57
TABELA 4 - Fatores controláveis	60
TABELA 5 - ANOVA Primeira Ordem.....	69
TABELA 6 - ANOVA Segunda Ordem.....	71
TABELA 7 - ANOVA Terceira Ordem.....	73
TABELA 8 - ANOVA Redução do Modelo	75
TABELA 9 - Tabela Otimização de Resposta.....	79
TABELA 10 - Forças obtidas 30 amostras	82
TABELA 11 - Comparativo de Forças Média – Projetada x Processo Otimizado	82

LISTAS DE ABREVIATURAS

ANOVA – Análise de Variância

ASQ – Associação Americana da Qualidade (American Society for Quality)

CAD – Desenho Assistido por Computador (Computer Assisted Design)

CAE – Engenharia Assistida por Computador (Computer Assisted Engineering)

CAM – Manufatura Assistida por Computador (Computer Assisted Manufacturing)

Cp – índice de Capacidade Potencial

Cpk - Índice de Capacidade Relativo à Localização

DoE – Projeto de Experimentos (Design of Experiments)

HRC – Dureza Rockwell C (Hardness Rockwell C)

LdTM – Laboratório de Transformação Macânica

LVDT – Transdutor de Diferencial de Variável Linear (Linear Variable Differential Transformer)

Ppk – Índice de Desempenho Real

MSR – Metodologia de Superfície de Resposta (Response Surface Methodology)

PPU – Medida de Capacidade Geral do Processo

TEP – Teoria Elementar da Plasticidade

LISTAS DE SIMBOLOS

A – Área, mm²

A_d – Área de atuação, mm²

b₀ – Largura Inicial da Geratriz, mm

°C – Graus Celsius

EB – Fator Estado do Blank

F – Força, N

h₁ – Altura Final da Geratriz, mm

k – Tensão Limite Tensão de Elasticidade em Cisalhamento Puro, N

K – Fatores

k_f – Tensão de Escoamento, MN

k_w – Resistência a Deformação, MPa

k₀ – Tensão de Escoamento Inicial, MN

k_{f0} – Tensão de Escoamento quando ϕ é igual a um, Mpa

L – Fator Lubrificante

lk – Tensão Limite de Elasticidade em Cisalhamento Puro

m – Fator de Atrito

N – Número de experimentos

n – Variáveis

n^k – Planejamento Fatorial

n_{1,2,3} - constantes empíricas do material, as quais deve ser determinada experimentalmente

p – P valor

S_b – Largura de contato matriz-peça, mm

T – Temperatura, ° C

TF – Fator Temperatura de Forjamento

TEF – Fator Tempo de Exposição no Forno

X_n – Fatores Controláveis

Y_n – Variáveis de Resposta

Z_n – Fatores de Ruído

2^{K-1} – Planejamento Fatorial Fracionado

μ - Média Geral de Tratamentos

μ_i – Coeficiente de Atrito

τ_i – Efeito Principal Fator A

β_i – Efeito Principal Fator B

$(\tau\beta)_{ij}$ – Efeito da Interação dos Fatores A e B

$\varepsilon_{ij\dots k}$ – Erro Experimental

ϕ – Deformação Verdadeira

$\dot{\phi}$ – Velocidade de Deformação, s^{-1}

σ_R – Tensão Cisalhante

σ_N – Tensão Normal

1 INTRODUÇÃO

A conseqüente competitividade observada nos dias atuais provoca uma nova estruturação das relações do mercado, esta situação estabelece uma caracterização das demandas por oportunidades, tendo como base eminente as necessidades e anseios por ofertas e produtos não apenas com a maior qualidade, mas também com os menores custos atrelados para sua aquisição e, além disso, um conseqüente menor prazo de entrega.

Conforme BERNARDOS; VOSNIAKOS [2002] e BESSERIS [2009], a globalização da economia e o surgimento rápido e contínuo de novas tecnologias mobilizaram as organizações para a obtenção do grau máximo de competitividade, modernidade e qualidade, este panorama faz com que as empresas que não consigam se enquadrar a estas premissas venham a sofrer conseqüências através de restrições de mercado e assim uma proporcional diminuição das oportunidades de negócios.

Para estas organizações, a opção pela adequação a este novo cenário revela imediatamente uma necessidade urgente de alteração de suas perspectivas e conceitos com relação a seus sistemas de produção e assim uma conseqüente reavaliação da dimensão qualidade de seus produtos.

No que se refere à dimensão Qualidade e suas perspectivas para as próximas décadas a ASQ (American Society for Quality) em um estudo realizado afirma que “a busca da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovadora, flexível e rápida na implementação das soluções eficazes que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor” AQC [2000]. O estudo aponta que hoje a busca pela excelência e a chamada diferenciação dos produtos ou serviços ofertados não é restringida apenas pela adequação do produto ou serviço às especificações dos clientes, somente a dimensão Qualidade já não garantem plenamente o sucesso financeiro das empresas e, por conseqüência, sua sobrevivência neste acirrado cenário de competição.

Neste sentido a inovação a flexibilidade e velocidade serão os fatores críticos e fundamentais para o sucesso das empresas e assim, as mesmas poderão adquirir uma vantagem competitiva perante o mercado. Fazer certo e conforme as especificações dos clientes não são mais suficientes às empresas, é necessário

cada vez vais vislumbrar novos mercado, novas oportunidade, novas tecnologia que possam alicerçar um programa de inovação e melhoria seja dos produtos ou serviços ofertados assim como também de todo o fluxo produtivo que agrega valor a este produto ou serviço.

TUSHMAN e NADLER [1997] afirmam que necessariamente existem dois tipos distintos de inovação: a inovação de produto e a inovação de processo. A inovação de produto se restringe apenas em modificações morfológicas, na estrutura considerando-se a relação existente entre o uso ou ao design dos produtos / processos ofertados, enquanto a inovação do processo tem uma abrangência focada em identificar e realizar mudança na forma (processo) com que o produto é concebido ou em relação de como o serviço é fornecido ou executado sua gestão.

Inseridas neste novo cenário mercadológico, a cada dia que passa as organizações canalizam esforços com o objetivo de alcançar a melhoria de seus produtos e a otimização de seus processos produtivos, estas ações buscam alternativas eficientes que possam viabilizar o tão desejado equilíbrio entre custo de fabricação e benefícios proporcionados aos clientes, sem afetar a dimensão Qualidade de seus produtos. Por este motivo os processos de fabricação devem ser aperfeiçoados, pois se caracterizam como peças-chaves dentro do sistema produtivo, sendo responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos.

Novas tecnologias e novos métodos de produção estão sendo almejados e cada vez mais acrescentados as realidades atuais das organizações, os riscos ao implementar uma nova tecnologia ou propor alterações significativas nos processos produtivos podem inviabilizar estas ações e por isso a necessidade de estudos e pesquisas para o total domínio da tecnologia é extremamente importante.

Tendo este contexto como base, o envolvimento da equipe e das pessoas alocadas, as quais possuem a responsabilidade de alteração e em alguns casos até mesmo a implantação de novas tecnologias, possui uma semelhança aos trabalhos executados por pesquisadores ou cientistas, os quais precisam projetar experimentos, coletar dados e analisá-los. Com o objetivo de aplicar controles mais rígidos através de testes e simulações, que contribuam para o atendimento destes novos itens, experimentos são empregados para resolução de problemas de manufatura, processo decisório entre diferentes processos de manufatura, diferentes

conceitos de produto e entender a influência de determinados fatores, GALDAMEZ e CARPINETTI [2004].

Inserida neste novo cenário, cada vez mais a estatística está sendo requerida e utilizada como ferramenta importante para a otimização e o desenvolvimento tecnológico industrial, a estatística não é tão simplesmente uma ferramenta ou nenhum conjunto de técnicas a serem usadas apenas nos projetos. Devido ao ritmo acelerado de mudanças que ocorrem no ambiente econômico, conjuntamente com o “benchmarking,” a “re-engenharia,” e a “satisfação total do cliente”, esses métodos são necessários para o trabalho do dia-dia e uma vez entendidos e aplicados, proporcionarão habilidade e o entendimento que irão lhe garantir melhores análises, comunicação e tomada de decisões, BALESTRACCI; BARLOW [2007].

Com base num pensamento estatístico, uma das maneiras propostas para o alcance das características para diferenciação ou fatores chaves existentes a fim de atender as necessidades e expectativas dos consumidores é com a utilização das técnicas de Planejamento de Experimentos (DoE - Design of Experiments). A utilização do planejamento de experimentos pode contribuir decisivamente com o desenvolvimento industrial pela otimização das grandezas de interesse, pela determinação dos fatores influentes sobre essas grandezas e, eventualmente, pelas suas interações e minimização dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou produto, BONDUELLE [1994].

O DoE é uma sequência seriada de testes aplicados para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a acurácia estatística possível na resposta e o menor custo, induzindo com isso mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída.

O uso do DoE possibilita que haja uma estruturação e sequenciamento de ensaios de forma que os mesmos possam demonstrar os objetivos iniciais estabelecidos pela pesquisa. A eficiência de experimentos projetos é superior em termos de informação a qualquer outra sequência não estruturada de ensaios, o DoE fornece as ferramentas para criação de planejamentos de experimentos e

análise gráfica de resultados na melhoria de processos, de maneira rápida e eficiente.

Conforme PALLÚ [2005], as principais técnicas do DoE já existiam e potencialmente poderiam estar sendo sistematicamente aplicadas em empresas há muitos anos. Porém, a maioria destas técnicas requer uma quantidade exaustiva de cálculos tornando providencial o emprego de software estatístico e o suporte de bases de dados eletrônicas, ainda conforme o autor, um fator que tem impulsionado a aplicação do DoE em empresas são as ferramentas computacionais de análise estatística, assim como soluções corporativas que, cada vez mais, facilitam a realização das análises e a manutenção e gerenciamento de dados, neste sentido a tendência é que tais técnicas tornem-se cada vez mais próximas de aplicações práticas e, portanto, cada vez mais utilizadas.

Em uma aplicação prática e atuante as vantagens, para quem faz o projeto de experimentos, são expressas através da diminuição dos números de ensaios; estudo de um número considerável de fatores; detecção das interações entre os fatores; definição dos níveis ótimos; melhoria e precisão de resultados e a otimização dos mesmos.

Para os processos de conformação plástica dos metais, pode-se citar o processo de forjamento, em virtude das suas condições específicas às quais se caracterizam por peculiares equipamentos e ferramental, atreladas ainda a complexidade na execução e preparação das atividades, estes processos de manufatura são encarados mais como uma arte e não como uma ciência, pois envolvem criatividade, intuição e principalmente a experiência dos engenheiros que atuam na área. Conforme GLYNN [1995] e VIECELLI [1995] os engenheiros planejam processos utilizando manuais, ábacos obtidos empiricamente e principalmente as experiências por eles acumuladas. Desta forma, esses processos são realizados pelo método da “tentativa-e-erro”, o que aumenta significativamente o custo do processo, item crítico do ciclo produtivo segundo YANG [1993] e SONG [1999].

A incorporação de tecnologias computacionais e softwares específicos CAD/CAE/CAM, são recursos utilizados para atendimento das demandas do processo produtivo de forjados, pois possibilitam aprimorar ações de

desenvolvimento admitindo maior facilidade, eficácia e agilidade na obtenção de produtos e processos inovadores.

Com auxílio do programa comercial Minitab®, este trabalho desenvolve sistemática para o uso de métodos estatístico em um processo de melhoria e otimização de uma operação de forjamento de uma da uma peça com a liga de alumínio (Al) AA6351, através da utilização do método DoE o qual permite a análise de componentes principais, capaz de considerar adequadamente a estrutura de correlação existente nas respostas de interesse, enquanto seja possível reduzir o número de funções-objetivo ou restrições obtidas experimentalmente através de um arranjo de superfície de resposta, mostrando através de exemplos que o ponto de ótimo para os processos múltiplos pode ser encontrado substituindo-se as respostas originais por um índice multivariado, formado por uma soma ponderada de seus componentes principais significativos e que, em comparação com outros métodos já consagrados, o método proposto não diverge consideravelmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLANEJAMENTOS DE EXPERIMENTOS

O conceito inicial do DoE foi introduzido pela primeira vez no início da década de 1920, em uma pequena Estação de Pesquisa em Agricultura na Inglaterra, por um cientista chamado Ronald Fisher, através da aplicação dos conceitos do DoE por este cientista o experimento se tornou válido e assim indicaram que o mesmo poderia ser conduzido na presença de muitas condições naturais variáveis, tais como: temperatura, condições do solo e chuva. Os princípios do projeto de experimentos inicialmente empregado na agricultura foram adaptados com êxito nas indústrias e também nas aplicações militares, desde 1940, JOHN; JAMES, [1996].

Ao realizar-se uma análise nas estruturas estabelecidas e implantadas nos diversos processos produtivos existentes, pode-se perceber que os mesmos são configurados e projetados a fim de alcançar a redução dos custos atrelados a eles e a conseqüente diminuição do custo final do produto.

A inevitável evolução tecnológica resulta em uma quase urgente necessidade de reavaliação e redimensionamento dos parâmetros operacionais até então estabelecidos e considerados como primordiais, para a maximização do sistema e conseqüente minimização dos custos.

Conforme SHREVE e BRINK JR. [1997], para garantir a maximização dos processos e proporcionar assim a redução dos custos, sendo realizada a substituição ou atualização dos processos implantados, é preciso dedicar muita atenção e despender muito dinheiro com a incessante pesquisa e desenvolvimento. Desta forma pode-se perceber que a real necessidade de evolução das condições de trabalho e o próprio processo produtivo estão atrelados à disponibilidade de imediata de tempo e das condições financeiras existentes.

ANTONY [2003] relata que, normalmente em processos produtivos, é corriqueiro o interesse em conduzir experimentos para explorar as relações existentes entre as variáveis de entrada e de saída do processo. Porém, o autor salienta que para um experimento ser válido é necessário o mesmo usar uma abordagem totalmente científica, com o intuito de proporcionar um correto planejamento e conseqüentemente uma eficaz análise.

Conforme abordado por COSTA [1997], existem diretamente dois aspectos ligados a qualquer tipo de estudo experimental: o chamado planejamento do experimento e a conseqüente análise estatística dos resultados, segundo o autor eles estão intimamente relacionados, já que a técnica de análise depende diretamente do planejamento utilizado.

Considerando-se a base da estatística experimental, o planejamento de experimentos estatísticos refere-se ao processo de realizar um estudo, de tal forma que os dados obtidos possam ser analisados por meios de métodos estatísticos e levem a conclusões válidas.

Segundo VILLAS BOAS [1992], a opção pela utilização de um modelo estatístico com o objetivo de planejar e avaliar os resultados de uma investigação é uma correta e decisiva ferramenta, pois possibilita ao pesquisador uma forma precisa para a interpretação do fenômeno investigado.

Ainda segundo o autor, em um experimento planejado, sendo seguidos estes passos, os resultados serão obtidos não só sobre a influência individual de cada variável estudada, mas também abrangendo toda a possível gama de interações entre o total de variáveis consideradas.

A experimentação sistemática é crucial para investigar os fatores que influenciam os resultados. Depois de identificar esses fatores, podem-se efetuar ajustes nos processos ou nas formulações, melhorando imediatamente o processo, a confiabilidade e a qualidade da resposta, COLEMAN [1993].

A prática e a utilização de análises e avaliações baseadas no DoE estão difundidas em praticamente todos os campos de estudos, normalmente visando descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema.

ANTONY [2003] estabelece que experimentos sejam realizados hoje em muitas organizações de forma a aumentar a nossa compreensão e conhecimento de vários processos de fabricação. Experiências em empresas de manufatura é muitas vezes uma série de ensaios ou testes que produzem resultados quantificáveis para melhoria da qualidade do produto / processo, é fundamental compreender o comportamento do processo, a quantidade de variabilidade e seu impacto nos processos.

Um experimento planejado pode ser estabelecido e assim definido como um teste, ou uma série de testes, em que mudanças deliberadas são feitas nas variáveis

de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída.

Para ANTONY [2003], dentro de um ambiente de engenharia, as experiências são muitas vezes conduzidas para explorar, estimar ou confirmar. Exploração refere-se à compreensão dos dados do processo, enquanto a estimativa refere-se à determinação dos efeitos das variáveis de processo ou fatores sobre a característica de desempenho de saída e assim a confirmação implica na verificação dos resultados previstos obtidos a partir da experiência.

Considerando os aspectos e características fabris, experimentos realizados em estudos dentro de um ambiente industrial possuem o seu foco e direcionamento em basicamente estabelecer uma melhora no desempenho dos produtos confeccionados e também nos processos existentes de fabricação, onde a melhoria pode ser obtida, MONTGOMERY [2005].

Nos processos de fabricação, é frequente o interesse primário em explorar a relacionamentos entre as principais variáveis (ou fatores) do processo de desempenho (ou características de qualidade). Por exemplo, em uma operação de corte de metal, a velocidade de corte; taxa de alimentação; tipo de fluído de corte; profundidade de corte; etc. podem ser tratados como variáveis de entrada e o acabamento superficial da peça processada pode ser considerada como uma característica de desempenho de saída.

Neste sentido ANTONY [2003] enfatiza que em uma experiência projetada, o engenheiro faz com frequência mudanças nas variáveis de entrada (ou fatores) e, em seguida, determina como o desempenho da saída varia de acordo as alterações propostas. É importante notar que nem todas as variáveis afetam o desempenho da mesma forma, alguns podem ter fortes influências no desempenho da produção do produto, alguns podem ter influências médias e também em alguns casos não ter nenhuma influência em tudo.

O sucesso no propósito de aplicação da ferramenta DoE está diretamente relacionado ao alcance dos objetivos identificados por: i) detecção das interações entre os fatores; ii) definição dos níveis ótimos / melhoria e iii) exatidão dos resultados / otimização dos mesmos. Neste sentido, a interface existente entre a fase de planejamento do experimento e a fase de análise estatística dos resultados está estruturada conforme a Figura 01.

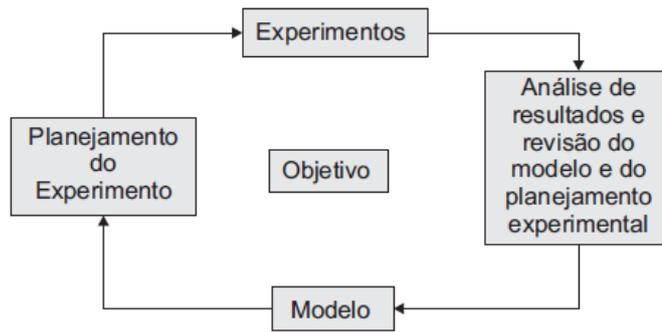


Figura 01 - Estratégia inicial para o planejamento de um experimento

KHAMNEH [2016] estabelece que o principal objetivo do DoE é reduzir o número de experiências e identificar variáveis efetivas que influenciam os resultados experimentais através da aplicação de um método claro e específico. Os métodos do DoE são escolhidos considerando fatores como o número de variáveis, o nível de variáveis, a interações das variáveis, o número de experimentos permitido e a linearidade dos mesmos.

Uma vez definido a estrutura do processo e conseqüentemente definida a estratégia inicial a ser seguida, a continuidade do estudo é efetivada sendo respeitada uma seqüência de ensaios com análises estatísticas dos resultados observados ao longo de todo o processo, conforme a Figura 02.

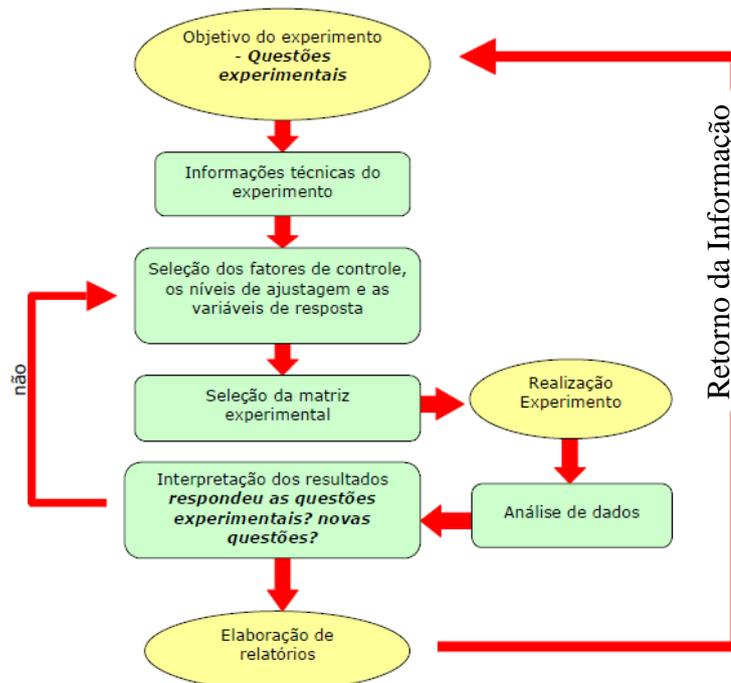


Figura 02 - Roteiro para construção de Experimentos

Fonte: Adaptado de HAALAND & O'CONNELL (1993) e ANTONY et al. (1998)

Normalmente, os experimentos são utilizados em estudos para verificar o desempenho de processos e sistemas. O processo pode ser uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma um material de entrada em um produto de saída, que pode possuir uma ou mais respostas.

A definição das informações técnicas do experimento e a consequente seleção dos fatores de controle possuem uma representatividade importante no estudo, durante esta etapa devem-se identificar os fatores que são controláveis na linha de produção (X_1, X_2, \dots, X_p) e os fatores de ruído (Z_1, Z_2, \dots, Z_p), que são fontes causadoras de variabilidade e podem ser controlados em experimentos de laboratório, mas não são controláveis na linha de produção. A Figura 03 expressa esta relação.

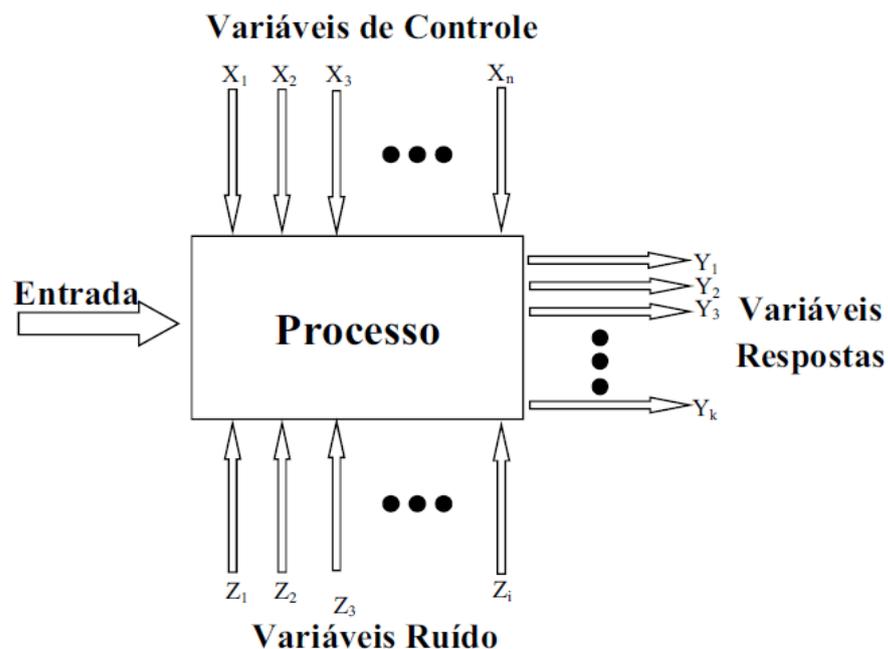


Figura 03 - Modelo Básico de um Processo
Fonte: Montgomery (2005)

O DoE propõe uma abordagem forte e eficaz para a melhoria de um processo. Devido a isso, existe a necessidade que todas as partes interessadas no estudo possuam uma ideia correta e adequada a respeito do objetivo e propósitos do fenômeno que se pretende avaliar, de como os dados serão obtidos e um entendimento das ferramentas de análise utilizadas. Desta forma COLEMAN &

MONTGOMERY [1993] propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um DOE – Figura 04:

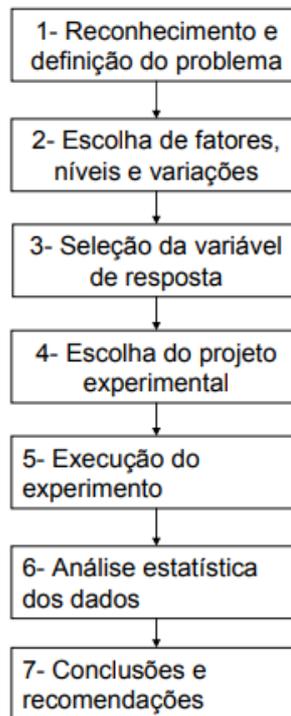


Figura 04 - Etapas para o desenvolvimento de um DoE
Fonte: Coleman & Montgomery (1993)

WERKEMA e AGUIAR [1996] definem que para uma melhor compreensão e um conseqüente maior o entendimento prático, reforçando assim a usabilidade e o real sentido da técnica estatística, deve-se considerar as seguintes terminologias como correntes no decorrer da aplicação do DoE:

- Unidade experimental é considerada a unidade básica para a qual será executada a medida da variável resposta;
- Fatores são as variáveis cuja influência sobre a variável resposta está sendo estudada no experimento;
- Níveis de um fator são os diferentes modos de presença de um fator no estudo considerado;
- Tratamentos são as combinações específicas dos níveis de diferentes fatores;
- Ensaio é cada realização do experimento em uma determinada condição de interesse, isto é, um ensaio corresponde à aplicação de um tratamento a uma unidade experimental;

- Variável resposta é o resultado de interesse registrado após a realização de um ensaio.

Conforme ANTONY [2003] as seguintes características precisam ser consideradas para a medição de um sistema:

- Acuracidade: Refere-se ao grau de proximidade entre o valor medido e o verdadeiro valor ou valor de referência;
- Precisão: É uma medida da dispersão dos resultados de várias observações e não está relacionado com o valor verdadeiro. Trata-se de uma medida comparativa dos valores observados e é apenas uma medida dos erros aleatórios. É expresso quantitativamente como o desvio padrão dos valores observados de repetidos resultados em condições idênticas;
- Estabilidade: Um sistema de medição é considerado estável se as medições não mudam ao longo do tempo. Em outras palavras, eles não devem ser adversamente influenciados pelo operador e mudanças ambientais;
- Capacidade: Um sistema de medição é capaz se as medições estiverem livres de viés (preciso) e sensível. Um sistema de medição com sensibilidade (a variação em torno da média deve ser pequena em comparação com os limites de especificação ou propagação do processo e precisão).

A escolha do DoE tem por finalidade definir informações sobre o relacionamento dos diferentes fatores, demonstrando assim quais são os impactos de cada fator na resposta analisada e como eles se relacionam em nível de interação entre fatores. As técnicas mais utilizadas no DoE são o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado e a Metodologia da Superfície de Resposta.

A Figura 05, apresentado por GALDAMEZ e CARPINETTI [2004], reúne de maneira resumida as principais características relacionadas a cada uma destas técnicas.

Ferramenta	Características
Planejamento fatorial	Utilizada quando todas as combinações dos níveis dos fatores de controle são realizadas.
Planejamento fatorial 2^k	Técnica com dois níveis e 2^k número de combinações de k fatores.
Planejamento fracionado 2^{k-p}	Utilizado quando há vários fatores de controle e não é viável economicamente para as empresas realizar todas as combinações dos experimentos.
Metodologia de superfície de resposta	<i>Response Surface methodology</i> (MSR) é um conjunto de técnicas de planejamento e análise de experimentos usadas na modelagem matemática de respostas. Ou seja, procura-se identificar os relacionamentos existentes entre os parâmetros, representados por variáveis quantitativas, como tempo, velocidade, pressão, temperatura, etc., e as respostas do sistema analisado.
Planejamento fatorial 2^k , com pontos centrais	Esse método consiste em adicionar um ponto de experimentação no nível intermediário aos níveis investigados para os k fatores de controle. Esta técnica é recomendada para verificar a existência do efeito curvatura no sistema analisado.
Gráficos	Os gráficos de efeitos principais ilustram a variação média das respostas em função da mudança no nível de um fator, mantendo os outros fatores constantes.
	Os gráficos de efeitos de interação descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores.
	O gráfico de probabilidade normal é utilizado nas situações em que não é possível repetir um experimento e é importante obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância dos efeitos principais e de interação.

Figura 05 - Principais ferramentas de DoE
Fonte: Galdamez e Carpinetti (2004)

Conforme definido por PAIVA [2006], o arranjo experimental mais comumente utilizado em estudos DoE é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais elevados ao número de fatores. Desta forma no caso típico de fatoriais em dois níveis, o número de experimentos (N) para se avaliar os k fator é dado por $N = 2^k$.

Os arranjos fatoriais completos podem ser gerados para qualquer quantidade de fatores e os níveis de cada fator se alteram nas colunas segundo uma mesma ordem tal que para a primeira coluna, os níveis se alteram a cada experimento (2^0); para a segunda coluna, os níveis se alteram a cada 2^1 ; para a terceira coluna, os níveis se alteram a cada 2^2 e assim por diante. O procedimento se repete para tantas colunas quantas forem os K fatores até a k-ésima coluna.

Um experimento com fatoriais completos cobre todo o espaço experimental, porém, enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos cresce exponencialmente.

Uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável.

Segundo BUTTON [2005], o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta.

MONTGOMERY [2005] estabelece que ao ser definido um experimento fatorial onde os K fatores são representados por n níveis (isto é, valores de referência para teste e análise), o mesmo é conhecido como planejamento fatorial n^k . Quando apenas dois níveis são utilizados, são comumente representados por alto (+) e baixo (-), e tem-se um experimento 2^k .

Na literatura são facilmente encontrados casos de aplicação desse modelo com três ou mais fatores - ver Figura 06, como há somente dois níveis para análise de cada fator, assume-se que a variável de resposta apresente comportamento linear entre esses níveis. Os níveis podem ser quantitativos como temperatura, pressão ou tempo, ou então qualitativa, como operador, máquina ou tipo específico de lubrificante. Os níveis são representados por: (+) máximo e (-) mínimo.

Duas variáveis			Três Variáveis				Quatro Variáveis				
Experimento n°	Variáveis		Experimento n°	Variáveis			Experimento n°	Variáveis			
	x_1	x_2		x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3	x_4
1	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-
2	+	-	2	+	-	-	2	+	-	-	-
3	-	+	3	-	+	-	3	-	+	-	-
4	+	+	4	+	+	-	4	+	+	-	-
			5	-	-	+	5	-	-	+	-
			6	+	-	+	6	+	-	+	-
			7	-	+	+	7	-	+	+	-
			8	+	+	+	8	+	+	+	-
							9	-	-	-	+
							10	+	-	-	+
							11	-	+	-	+
							12	+	+	-	+
							13	-	-	+	+
							14	+	-	+	+
							15	-	+	+	+
							16	+	+	+	+

Figura 06 - Projetos Fatoriais para 2, 3 e 4 variáveis.
Fonte: Lundstedt (1998)

CHUNG [2004] estabelece e esquematiza o projeto fatorial 2^k (02 níveis com K fatores) como mostra a Figura 07.

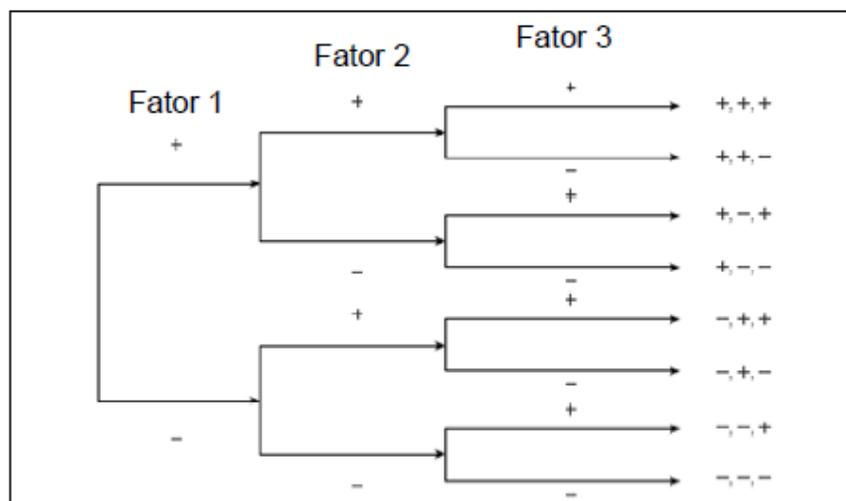


Figura 07 - Projeto Fatorial 2^k .
Fonte: Chung (2004)

BOX, HUNTER E HUNTER [2005], definem que os planejamentos fatoriais 2^k requerem relativamente poucas provas por fator estudado; a interpretação dos resultados obtidos pode ser feita pelo uso de aritmética elementar e recursos gráficos; são particularmente úteis nos estágios iniciais de um trabalho experimental, pois frequentemente apontam a direção para uma investigação mais avançada; têm uma análise estatística bastante simplificada; e forma a base para muitos outros planejamentos, como o planejamento fatorial fracionado 2^{k-1} .

Nas condições em que o número de fatores cresce para mais de cinco variáveis, o número total de experimentos pode representar um número consideravelmente grande para um projeto fatorial completo, fato que exige um considerável tempo para execução dos mesmos assim como todas as experimentações necessárias, às quais seriam também em um grande número.

Como opção para situações nestes casos, onde necessitasse um número grande de experimentos, tem-se como alternativa negligenciar alguns fenômenos como interações de alta ordem ou aqueles fatores que não tem influência, ou seja, aqueles que representam ter pouco efeito sobre a resposta desejada. Estas interações são confundidas com fatores principais ou interações de segunda ordem

e são chamados de projetos fatoriais fracionários, conforme definido por GABRIELSSON [2002].

Para GIESBRECHT e GUMPERTZ [2004], os experimentos fatoriais fracionados possuem uma utilidade quando o objetivo do estudo é examinar um grande número de fatores para assim determinar quais dos mesmos podem ser o mais significativo, ou então quando o tempo ou o recurso disponível para os estudos são curtos. Nos experimentos fatoriais fracionários, ocorre que alguns dos efeitos podem ser confundidos entre si e por isso o seu uso é recomendado quando se estima que certos resultados possam ser descartados, geralmente de interações de ordem superior (terceira ou ordens superiores).

Normalmente o termo confundido é utilizado quando um ou mais efeitos não possam ser atribuídos de forma inequívoca para um único fator, interação ou bloco, desta forma, a maior dificuldade para projetos fatoriais fracionários é a perda de informações que pode ocorrer devido aos efeitos principais confundidos com os efeitos de interação se a resolução for menor que quatro.

Segundo BUTTON [2005], o modelo estatístico para um experimento fatorial é definido através da equação 01, interação 3º ordem k – enésima ordem.

$$y_{ij\dots k} = \mu + \tau_i + \beta_j + \dots + (\tau\beta)_{ij} + \dots + \varepsilon_{ij\dots k} \quad (01)$$

Onde $i = 1, 2, \dots, a$, $j = 1, 2, \dots, b$, $k = 1, 2, \dots, n$; $y_{ij\dots k}$ é o valor da variável de resposta; μ é a média geral do experimento; τ_i é o efeito principal do fator A; β_j é o efeito principal do fator B e assim sucessivamente; $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos fatores A e B; e $\varepsilon_{ij\dots k}$ é o erro experimental associado à observação $y_{ij\dots k}$. Conforme Figura 08 segue exemplo de modelo estatístico para um experimento fatorial definido como 2^3 .

RIBEIRO E CATEN [2000] colocam como vantagens dos projetos fatoriais 2^k a simplicidade de ser analisada, grande utilidade nos estágios iniciais de pesquisa quando o número de fatores a serem pesquisados é muito grande e também onde os outros projetos seriam considerados inviáveis.

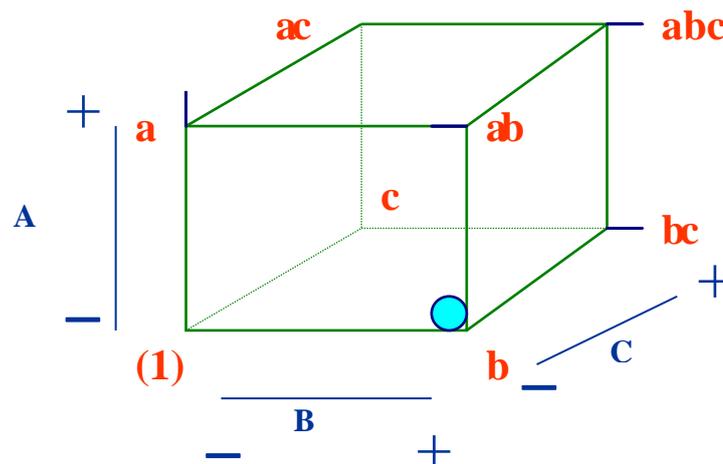


Figura 08 - Projeto Fatorial 2^k - Modelo Cúbico.

Como esses experimentos só têm dois níveis de cada fator, eles fornecem o menor número de tratamentos, assim, eles são bastante utilizados na seleção de fatores importantes e que serão utilizados num experimento futuro.

Suposições a considerar em projetos fatoriais do tipo 2^k :

- i. Os fatores são a níveis fixos;
- ii. Os projetos são completamente aleatorizados;
- iii. As hipóteses de normalidade são satisfeitas;
- iv. Onde outros projetos seriam inviáveis.

A utilização do Planejamento Fatorial Completo procura estabelecer os efeitos principais dos fatores e a interação entre os mesmos, pois conforme MONTGOMERY [2005] observar apenas os valores dos efeitos principais pode nada significar para o pesquisador, seja pelo fato de não conhecer o processo em experimentação, ou pela falta de parâmetros para decidir se os valores apresentados são significativos ou não.

Devido a isso, deve-se agregar a informação de potenciais interações entre os fatores testados e uma medida de significância dessas influências, além disso, o uso de gráficos para visualizar os efeitos principais e as interações auxilia na interpretação e comunicação dos resultados.

Cabe ressaltar que a aplicação do DoE não substitui nem inviabiliza o conhecimento técnico intrínseco do especialista da empresa sobre o assunto a ser estudado, o domínio e conhecimento da situação são de fundamental importância.

Neste sentido, o alinhamento do conhecimento sobre o processo, conjugado com a técnica, é que possibilita a efetivação de corretos planejamentos de experimentos, ou seja, planejamentos mais eficientes, de menor custo (mais informação com menos pontos experimentais) e que possibilitem aos seus idealizadores responderem, com base em inferência estatística, a resposta a seus problemas.

2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO

Conforme estabelecido por PACHECO [2007], os produtos originados de materiais metálicos podem ser confeccionados através de diversas formas, as quais são classificadas como: tecnologia de corte (usinagem), tecnologia de fusão (fundição), tecnologia de sinterização ou metalurgia do pó, ou ainda a tecnologia de conformação plástica dos materiais.

Para MÜLLER [2010], os primeiros passos das técnicas de deformação plástica são identificados no final da Idade da Pedra, no Oriente Médio onde existem referências sobre a fabricação por martelamento de objetos forjados em ouro, cobre e prata os quais eram destinados para utilização artística e em encontros religiosos, conforme o autor estes materiais eram colhidos, no mesmo estado em que podiam ser encontrado na natureza, selecionados e logo após conformados, através de golpes, sendo esta técnica então denominada como forjamento.

Com o advento dos fornos, começaram a surgir às primeiras tentativas de produção de ligas metálicas através da fundição do minério de cobre com os outros metais disponíveis. Desta forma, a primeira liga metálica desenvolvida foi o bronze e a partir de então houve a oportunidade de produzir peças forjadas com características mecânicas superiores àquelas que eram habitualmente conseguidas com o cobre. Este fato deu origem à Idade do Bronze, por volta de 2000 a.C., um novo período da história da humanidade, MARTINS [2005].

Ainda conforme o autor, o século XX possibilitou a aplicação de estudos científicos do processo de conformação mecânica, onde se pode destacar o ensinamento destas técnicas nas universidades, o que proporcionou inúmeras contribuições para a sociedade, tais como o uso de ligas leves (alumínio, magnésio e titânio) e a utilização do método de elementos finitos como técnica principal de

análise de processo de deformação plástica e desenvolvimento de vários processos tecnológicos, dentre os quais se destaca, pela sua importância, o forjamento.

O desenvolvimento dos processos de extrusão, recalque, laminação transversal e processos de forjamento automático, impulsionaram novos estudos na área de lubrificantes, aços especiais, novos controles no processo, objetivando vida de componentes e resistência mecânica maior das máquinas e equipamentos, assim como, das ferramentas.

De todos os processos de fabricação, a conformação mecânica tem um decisivo papel por produzir peças as quais possuam características específicas, tais como excelentes propriedades mecânicas atrelada com a possibilidade de uma reduzida perda de material, proporcionando desta forma um custo reduzido para a fabricação, onde parte-se de uma geometria relativamente simples, que após prévio aquecimento ou não, e uma ou mais operações, podemos gerar uma ou mais peças com a mais complexa geometria.

CHIAVERINI [1995] enfatiza que uma das principais vantagens do processo de forjamento está atrelada a obtenção de peças que possuam características observadas através de elevada resistência, integridade e uniformidade estruturais, redução em usinagem requerida, economia de matéria-prima e peso de material forjado.

SCHAEFFER [2001] estabelece a definição que forjamento se baseia em um processo de fabricação em série de peças metálicas direcionadas às mais variadas aplicações. Em sua essência, o processo pode ser classificado em forjamento a frio, morno ou a quente em função da temperatura de recristalização que ocorre durante a conformação. Ainda conforme o autor, outra forma de classificação diz respeito à geometria das matrizes, podendo ser aberta, fechada com rebarba ou fechada sem rebarba.

DOEGE [2000] define que o processo de forjamento a quente distinguem-se do realizado a morno pela faixa de temperatura na qual é realizado, isto é, faixa de temperatura em que ocorrem os mecanismos de recuperação e recristalização. Para o forjamento a quente de aços as temperaturas estão entre 1100 e 1280° C.

Para obter-se uma visão mais ampla do processo de forjamento e conseqüentemente os respectivos parâmetros necessários, é de suma importância ter o conhecimento de alguns conceitos básicos relacionados ao processo de

forjamento, tais como: tensões existentes, deformações obtidas, velocidade de deformação, temperatura, curva de escoamento do material, coeficiente de atrito, entre outros parâmetros - SCHAEFFER [2001].

Conforme KOBAYASHI [1989], em um processo de forjamento, existem diversas variáveis atuantes no sistema e que interferem assim como impactam no comportamento estrutural do equipamento em função dos mecanismos de ação e reação. Dentre estas variáveis estão o próprio material a ser conformado, as dimensões das matrizes, as respectivas condições e interação entre metal e matriz, os mecanismos de deformação plástica, as características do produto final, as condições de transferência de calor lingote / ambiente e, finalmente, o tipo de equipamento usado para o processo.

Considerando a gama de variáveis existentes no processo de forjamento, abaixo segue tabela representativa - Tabela 01, que relaciona todos os parâmetros envolvidos num processo de forjamento a quente.

Estes parâmetros traduzem-se em fenômenos físicos que interagem durante a conformação mecânica.

Conforme BÖRDER [2005], a forjaria do futuro deve buscar eficiência no uso da energia do processo e na proteção ao meio ambiente. Sua capacidade operacional irá depender de uma efetiva integração dos recursos tecnológicos, ambientais e humanos. Ainda segundo o autor, devido ao fato de o forjamento não ser um processo amigável, as forjarias devem estruturar-se para atrair recursos humanos e manter sua força de trabalho em um processo de constante atualização e motivação, visando obter resultados efetivos dos investimentos aplicados.

Tabela 01 - Principais parâmetros do processo de forjamento
 Fonte: Adaptado de Schaeffer (2016)

Componente do Processo	Parâmetros do Processo de Forjamento
Matéria Prima	<ul style="list-style-type: none"> • Composição Química • Microestrutura • Propriedades Mecânicas • Defeitos Superficiais • Geometria da Geratriz • Temperatura da Geratriz
Equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Força e Potência • Velocidade • Tipo de Máquina • Pressurização do Lubrificante • Sistema de Alimentação
Matriz	<ul style="list-style-type: none"> • Material • Geometria • Acabamento Superficial • Refrigeração • Tensões e Deformações
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Curva de Escoamento • Módulo de Elasticidade • Parâmetros Térmicos
Lubrificação	<ul style="list-style-type: none"> • Composição Química • Viscosidade x Temperatura • Resistência a Queima • Não Poluente • Atrito
Peça Acabada	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerâncias • Fibragem • Propriedades Mecânicas

2.2.1 CURVA DE ESCOAMENTO

No processo de forjamento, o comportamento específico do material pode ser claramente expresso através de sua curva de escoamento ou curva tensão de deformação, a qual demonstra a tensão necessária para a deformação plástica do material, sendo esta tensão denominada "tensão de escoamento" (k_f). O conhecimento da curva de escoamento pode ser considerado como o passo inicial para o estabelecimento de um processo de forjamento, ou então o que vem logo após a definição do material a ser conformado.

A tensão de escoamento é um dos principais parâmetros e o seu conhecimento é indispensável para o cálculo da força e o trabalho / energia.

Conforme KNOLL [2007], a curva de escoamento depende necessariamente de um conjunto de fatores, entre os quais estão relacionados à deformação, a velocidade de deformação e a temperatura, além de fatores do próprio material, como também a respectiva composição química e a microestrutura.

Necessariamente as curvas de escoamento são obtidas de forma experimental, na situação de deformação a frio, a tensão de escoamento em função da deformação verdadeira (ϕ) pode ser representada por uma equação matemática:

$$k_f = C \cdot \phi^n \quad (02)$$

Com o passar dos anos, vários métodos para levantamento de curvas de escoamento foram desenvolvidos, tais como: ensaios de tração e de compressão. No caso específico de um ensaio de tração, por exemplo, a tensão de escoamento é obtida através do cálculo do quociente da força atuante pela área instantânea do corpo de prova, força aplicada, após o início do escoamento plástico do material, onde k_f é a tensão de escoamento, F é a força e A é a área.

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (03)$$

As curvas de escoamento podem ser determinadas por ensaios de tração, compressão, torção e compressão plana. Para os casos em que as deformações são grandes, recomenda-se o ensaio de compressão ou de torção, conforme definido por ROYLANCE [2001] e MARTINS [2011].

Conforme HECK [2013], a tensão de escoamento de ligas de uma mesma família pode representar uma ampla faixa de variação e pode ser selecionada devido aos elementos de liga ou aos tipos de tratamentos térmicos e processamentos realizados.

A Figura 09 demonstra as curvas de escoamento do alumínio para duas diferentes ligas. O autor destaca ainda que a permanência de um metal por certo tempo em uma temperatura elevada, seguida de um resfriamento com velocidade moderada, pode 'destruir' (parcialmente ou totalmente) o encruamento, o que é de muita valia quando se deseja dar sucessivos passes para deformar em larga escala um determinado metal.

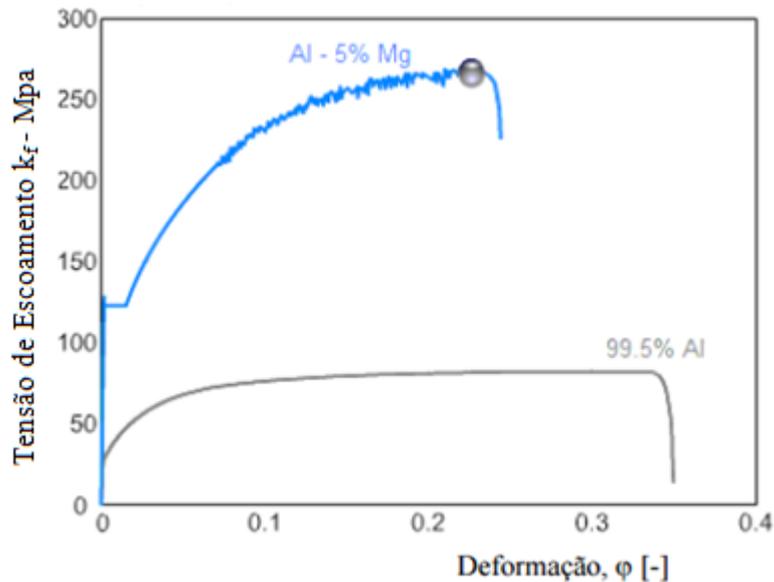


Figura 09 - Curva de escoamento para duas diferentes ligas de alumínio
 Fonte: Aluminium (2013)

HENSEL e SPITEL [1978] desenvolveram formulações matemáticas empíricas para a curva de escoamento a altas temperaturas, na regressão matemática expressada pela fórmula 04 pode-se confirmar que com o aumento gradual da temperatura da peça (T) ocorre à redução da tensão de escoamento (k_f) e desta forma pode-se relacionar também que com o aumento da temperatura de forjamento da peça reduz a quantidade de energia necessária para a conformação da mesma.

$$k_f = k_{f_0} \cdot e^{-n_1 \cdot T} \cdot \phi^{n_2} \cdot \dot{\phi}^{n_3} \quad (04)$$

onde:

k_f = tensão de escoamento [MPa];

k_{f_0} = tensão de escoamento quando ϕ é igual a um [MPa];

n_1, n_2, n_3 = constantes empíricas do material, as quais deve ser determinadas experimentalmente;

T = temperatura [°C];

ϕ = deformação logarítmica [-];

$\dot{\phi}$ = velocidade de deformação [s^{-1}].

Conforme a tabela 02 pode-se observar os coeficientes da Equação (04) para a liga de alumínio AA6351, e seus os limites de aplicação.

Tabela 02 - Coeficientes para curva de escoamento do alumínio AA6351
Autor: BRITO (1998)

k_{r0}	n_1	n_2	n_3	Validade
303,50	0,004295	0,102691	0,057361	T_r (200 °C a 500 °C)
				ϕ (1,2 máx)
				$\dot{\phi}$ (0,1s ⁻¹ a 10,0 s ⁻¹)

Um exemplo de curva de escoamento é apresentado por BRITO [1998] para deformação a quente do alumínio, conforme mostra a Figura 10.

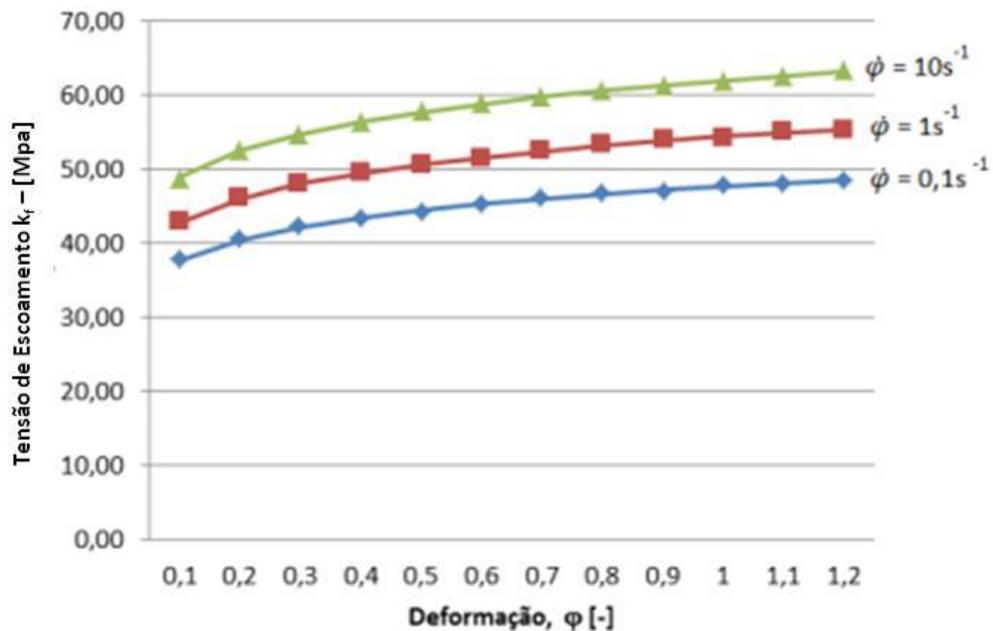


Figura 10 - Curvas de escoamento a quente (400° C) para AA6351
Fonte: Brito (1998)

2.2.2 ATRITO

No processo de forjamento, o movimento existente entre a matriz e o material que está sendo conformado pode sofrer uma influência ou até mesmo em alguns casos ser interrompido devido à existência do atrito. O atrito tem muitas desvantagens, como a exigência de uma maior força de conformação, a contribuição para o desgaste prematuro das ferramentas, o aumento da temperatura do sistema e a necessidade de maior energia envolvida no processo.

Conforme BÖESCH [2011] existe certa dificuldade em medir o atrito, apesar de já existirem muitos testes para este fim, sendo, porém, observados poucos testes considerados como adequados para aplicações de conformação de metal a quente.

Para AVITZUR [1995], na prática os valores de atrito são muito difíceis de determinar devido à complexidade dos fenômenos e também devido à dificuldade de se medir a máxima tensão de cisalhamento dos materiais, assim, o autor se refere à dificuldade de medida da máxima tensão de cisalhamento nas complexas (e indeterminadas) condições de tensão características de cada geometria de ferramenta, de cada par ferramenta / material ou das particulares formas de aplicação de força do equipamento de conformação plástica.

Ainda AVITZUR [1995], devido à complexidade do fenômeno não se empregará o valor da força de atrito e sim um valor aparente resultante das múltiplas interações ferramenta material em cada uma das condições de conformação plástica.

Comumente o atrito é descrito pela Lei de Coulomb, sendo o coeficiente de atrito, μ_i , definido através do quociente entre a tensão cisalhante (σ_R) e a tensão normal (σ_N), conforme a equação (05).

$$\mu_i = \frac{\sigma_R}{\sigma_N} = \frac{F_R}{F_N} \quad (05)$$

A constância do coeficiente de atrito requer que o crescimento da força normal seja acompanhado pelo crescimento da área real de contato o que foi demonstrado na década de 1960 por Bowden e Tabor. O crescimento da área real de contato ocorre inicialmente pela deformação plástica das asperezas mais altas e em seguida mediante a deformação de asperezas sucessivamente menores.

Entretanto, no caso dos processos de conformação plástica o crescimento da força normal leva a interferência entre as asperezas que se deformam de modo que o crescimento da área real pode não ser mais linear com a elevação da força normal.

Em uma etapa posterior do processo, a tensão normal passa a ser tão elevada que o material acaba por escoar, onde parte da energia devida à aplicação da força normal não será mais empregada para vencer a resistência devida à força de atrito, mas sim empregada para deformar plasticamente o material.

Outra forma possível de descrever o atrito é pela lei de Prandtl, onde nesta formulação calcula-se o fator de atrito interfacial conforme a equação 06. BRITO [2006].

$$m = \frac{\sigma R}{lk} \quad (06)$$

Onde m é o fator de atrito, σR é a tensão de cisalhamento na interface material/ferramenta e lk é a tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro.

A lei de Prandtl determina que a tensão de cisalhamento devido ao atrito é independente da tensão de contato entre as duas superfícies. Os valores limites para o fator de atrito são $m=0$ quando não existe atrito e $m=1$ para condições de aderência.

Esta lei deve ser aplicada sempre que as tensões de contato forem muito elevadas, quando o coeficiente de atrito, μ_i , deixa de ter significado.

Por outro lado, a utilização da lei de Prandtl em situações com tensões de contato reduzidas pode levar a estimativas exageradas do valor da tensão de cisalhamento devido ao atrito. BRITO [2006].

A utilização de lubrificantes, durante o processo de forjamento, é um fator de extrema importância, pois os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada. Para isso, os mesmos devem obedecer a alguns critérios, como agir na prevenção da aderência e soldagem da peça na matriz, ser isolante térmico para reduzir perdas de calor, ser inerte com os materiais da peça e das matrizes, não ser abrasivo, possuir fácil aplicação e remoção e custo acessível.

Conforme ALTAN [1999] existem basicamente três tipos de lubrificação que governam as condições de atrito em conformação de metais:

- Condições a seco: não existe lubrificação na interface, apenas contato entre duas superfícies;
- Condições hidrodinâmicas: quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as superfícies da peça e das matrizes;
- Lubrificação de contorno: condição de lubrificação intermediária entre atrito seco e lubrificação hidrodinâmica.

A conseqüente redução do atrito no processo representa de forma direta uma redução da carga aplicada e conseqüentemente da energia despendida para a realização do processo.

Estudos feitos por BUENO [2011] mostra que o coeficiente de atrito para a liga de alumínio AA6351, através do ensaio do tubo cônico, a uma temperatura de 450°C, com lubrificante de grafite à base de água, varia entre $\mu=0,01$ e $\mu=0,02$ para grandes deformações, sendo este o lubrificante mais adequado para o alumínio.

2.2.3 FORÇA DE FORJAMENTO

O conhecimento da força e da energia necessárias ao forjamento de uma peça são parâmetros fundamentais em qualquer projeto de forjamento, tanto para a determinação do equipamento de forja quanto para o dimensionamento correto das ferramentas.

A força de forjamento possui uma relação direta e eminente com a tensão de escoamento, da mesma forma, a respectiva composição química da liga a ser conformada e a temperatura de forjamento aplicada contribuem também de forma direta para a determinação da força de forjamento.

A força de forjamento pode ser obtida através da multiplicação do valor da área de atuação (A_d) expresso em mm^2 pela resistência à deformação k_w expressa em MPa - ver equação 07.

$$F = A_d \times k_w \quad (07)$$

SCHAEFFER [2001] define que a resistência à deformação, k_w , expressa em MPa, calculada empiricamente definida por Siebel na equação 08.

$$k_w = k_f \left(1 + \frac{\mu \cdot s_b}{2 \cdot h_1} \cdot \frac{h_1}{4 \cdot b_0} \right) \quad (08)$$

Onde: k_f é a tensão de escoamento do material em MPa e μ_i é o coeficiente de atrito, adimensional.

Com a tensão de escoamento, encontra-se a força necessária para o forjamento.

Conforme FERESHTEH-SANIEE [2002], existe um grande número de métodos específicos para a determinação destas forças, desde fórmulas empíricas bastante simplificadas, passando por modelos analíticos baseados na teoria elementar da plasticidade, também chamada de TEP, além de sofisticados métodos numéricos como elementos finitos, implementados em programas de computador.

No item 2.2.5 será exemplificado o cálculo da TEP para o modelo em estudo.

2.2.4 TEMPERATURA

As temperaturas de forjamento influenciam nas condições de lubrificação da matriz e do blank, por consequência na vida da ferramenta e por fim nas propriedades do produto final, e, mais significativamente, conseguem determinar a velocidade máxima de deformação, a qual pode ser aplicada para produzir peças em conformidade com as especificações dos clientes sem necessariamente danificar as matrizes. Neste sentido ALTAN [1999] ressalta a importância de analisar e escolher a temperatura ideal para o forjamento da peça, pois ela influencia de forma significativa a produtividade do processo.

A força de forjamento está relacionada principalmente com a composição química da liga e com a temperatura de forjamento. Por exemplo, a liga de alumínio 1100 necessita bem menos pressão de forjamento do que o aço 1020. Já para as

ligas de Al tal como a 7075, de alta resistência mecânica, há necessidade de maiores pressões de forjamento para conformar a mesma geometria.

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio e com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior que a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é denominado como trabalho a quente e, abaixo dessa temperatura, o trabalho é denominado como a frio.

No trabalho mecânico a frio, provoca-se o aparecimento no metal do chamado efeito de encruamento que representa o aumento da resistência mecânica através da deformação plástica. O trabalho mecânico a frio permite aumentar a resistência mecânica de certos metais não ferrosos que não são endurecíveis por tratamentos térmicos.

No trabalho mecânico a quente, a deformação plástica é realizada numa faixa de temperatura, e durante um determinado tempo em que o encruamento é eliminado pela recristalização do metal.

TYNE [2012] menciona que existem diversas faixas de temperatura estabelecidas para o processo de forjamento e para o respectivo uso das ligas de alumínio, onde a temperatura específica do forjamento dependerá da liga a ser utilizada. Desta forma, o comportamento no escoamento inclui um potencial ao amolecimento em altas deformações, resultando em uma tendência ao escoamento localizado. Peças com formas muito complexas podem ser forjadas utilizando-se condições isotérmicas e baixas velocidades de pressão, onde este tipo de forjamento é, algumas vezes, chamado de forjamento de precisão.

Segundo MARTELLO [2007], a temperatura de forjamento a quente para ligas de alumínio está situada entre a temperatura de recristalização e a de solubilização. Acima da linha “solidus” ocorrem defeitos irreparáveis, havendo fusão de algumas fases ou compostos de baixo ponto de fusão no contorno de grão, ocasionando a fragilização do material. Também é indicado evitar velocidade de deformação muito alta para não ocasionar aumento de temperatura, o que poderia provocar a fusão da liga, resultando em defeitos durante o resfriamento da peça.

2.2.5 TEORIA ELEMENTAR DA PLASTICIDADE

Atualmente, existem diferentes métodos aproximados, tanto analíticos como numéricos, para analisar o comportamento da conformação dos metais. Porém, nenhum deles é completamente perfeito por hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo matemático, assim como também todos os métodos de análise necessitam da identificação de dados de entrada tais como a descrição do comportamento do material sob as condições do processo, isto é, dados de tensão de escoamento, um valor quantitativo para descrever o atrito, índice de encruamento e coeficiente de resistência.

Em diversos casos, o cálculo analítico da carga aplicada em forjamento em matrizes fechadas com o aparecimento de rebarba pode ser feito pela Teoria Elementar da Plasticidade (TEP).

Medidas de otimização são estudadas com o propósito de reduzir custos no processo de fabricação de peças. O uso da Teoria Elementar da Plasticidade como método de otimização surge como alternativa a simulação numérica.

No desenvolver dessa teoria, certas condições são respeitadas. As ferramentas de trabalho possuem simetria para a formação de uma peça forjada simétrica, as massas e forças de inércia das ferramentas podem ser desprezadas, dentre outras. A tensão de escoamento k_f é dada em função da deformação, da velocidade de deformação e da temperatura média da ferramenta e da peça.

Conforme SCHAEFFER [2004], o desenvolvimento desta teoria leva a três particularizações: “Método das tiras”, “Método dos discos” e o “Método dos tubos”, os quais são modelos análogos, usados para a solução de problemas relacionados com os processos de trefilação, extrusão, forjamento e laminação, onde dependendo da geometria, plana ou axial, do componente a ser forjado, utiliza-se o método adequado à sua geometria, então, faz-se a discretização em elementos na forma de tiras, discos ou tubos, assim, pode-se prever o esforço em cada segmento.

No mesmo sentido, CORREA [2013] identifica que para geometrias planas usa-se o Método das Tiras - Figura 11; para simetria axial usa-se o Método dos Tubos - Figura 13, utilizado nos processos de extrusão ou trefilação, ou dos Discos utilizado nos processos de forjamento em matriz fechada com geometrias simétricas - Figura 12.

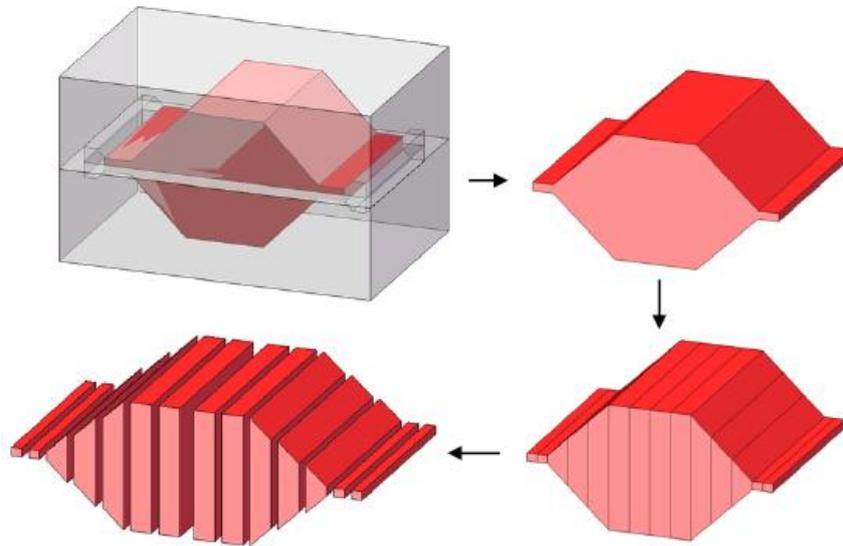


Figura 11 - Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria plana (uso do método das tiras)

Fonte: Adaptado Correa (2013)

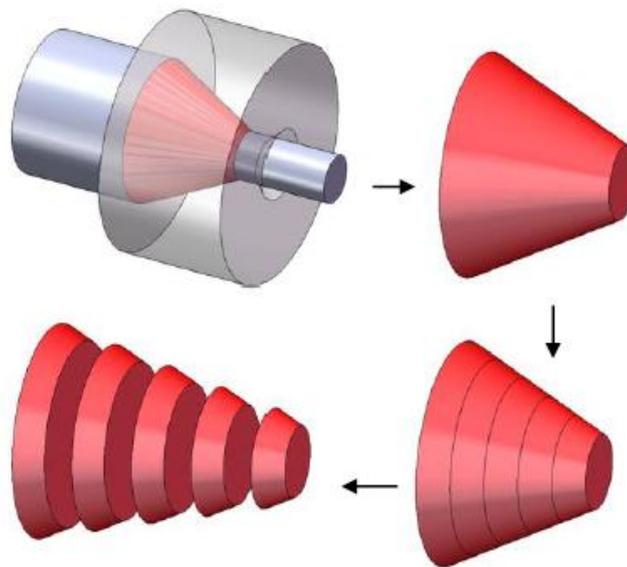


Figura 12 - Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria de revolução extrudada ou trefilada (uso do método dos discos)

Fonte: Adaptado Correa (2013)

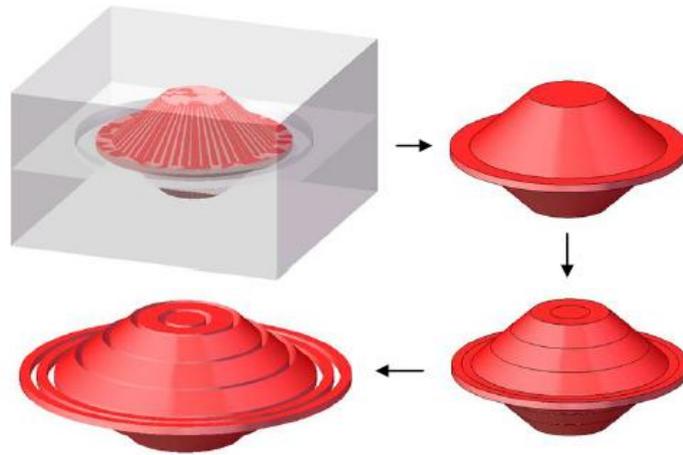


Figura 13 - Representação de um elemento infinitesimal em uma peça de simetria axial conformada em matriz fechada (uso do método dos tubos)
 Fonte: Adaptado Correa (2013)

Em termos gerais, a TEP consiste em dividir a peça conformada em vários elementos de volume e, a partir da análise das forças atuantes em cada um destes elementos, chega-se a uma equação diferencial de primeira ordem – Figura 14.

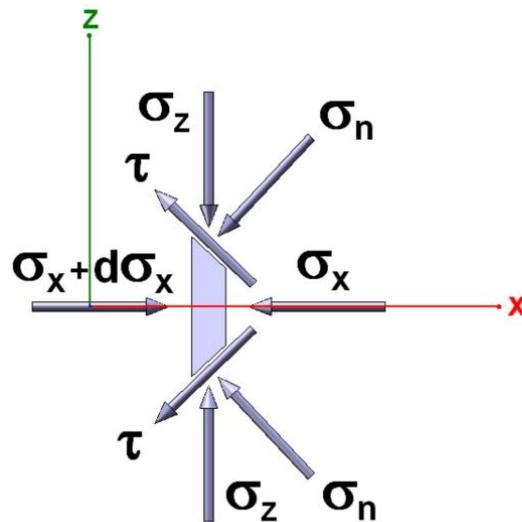


Figura 14 - Representação da análise do equilíbrio de forças numa zona de qualquer geometria

Respectivamente os métodos são representados pelas equações (09) (10) (11):

- Método das Tiras:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (09)$$

- Método dos Discos:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{r} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{r} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (10)$$

- Método dos Tubos:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_r [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (11)$$

Antes da resolução da equação diferencial é necessário o real conhecimento da temperatura de trabalho (T), a determinação das forças em cada tira (φ_i) e das velocidades de deformação em cada fatia ($\dot{\phi}$). Assim com estas variáveis é possível encontrar o valor da tensão de escoamento (k_f) e posteriormente calcular as tensões localizadas no corpo forjado.

Nos métodos analíticos, tais como os métodos de tiras, dos tubos e dos discos, referidos como Teoria Elementar da Plasticidade (TEP), um modelo matemático é desenvolvido, com base nas sucessivas matemáticas, para cálculo da carga aplicada no processo de forjamento em matriz fechada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos conceitos que foram apresentados no capítulo anterior, este capítulo tem o objetivo de descrever os materiais utilizados, bem como o método experimental executado neste trabalho.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

No presente trabalho, o estudo referente à aplicação da técnica de projeto e análise de experimentos aplicado no processo de forjamento, foi analisado através de experimentos práticos.

Para a realização dos ensaios referentes ao Projeto de Experimento, optou-se pela utilização de pré-formas de alumínio com diâmetro de 25,4 mm e comprimento de 110 ± 1 mm, ilustrados na figura 15.



Figura 15 - Blanks de forjamento.

A Figura 16 apresenta a geometria final da peça forjada. As dimensões básicas da peça forjada são apresentadas na Figura 17. A massa da peça sem rebarba é de 72,7 g.



Figura 16 - Geometria final da peça forjada.

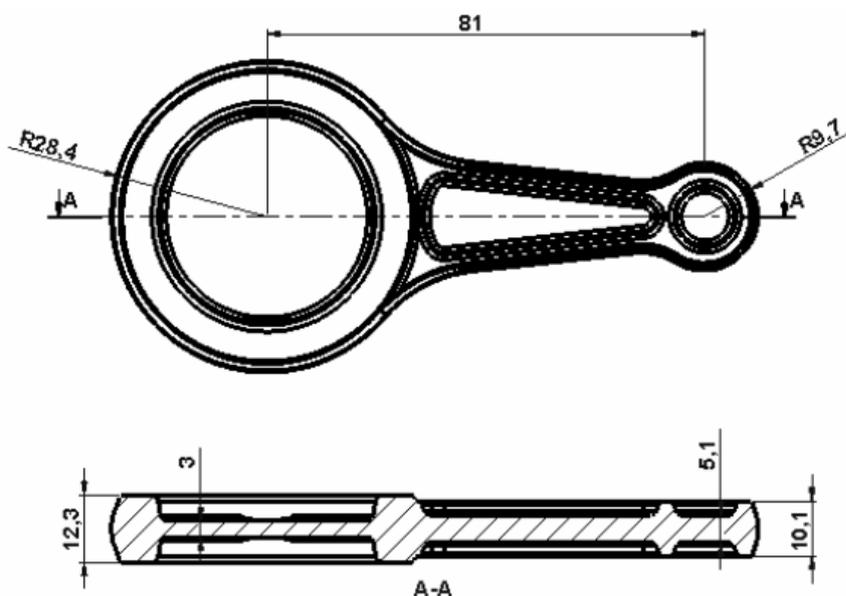


Figura 17 - Dimensões básicas da peça forjada.

O ferramental utilizado nos ensaios possui dois pinos guias, cementados e temperados com 60HRC, de 12 mm de diâmetro para corrigir eventuais deslocamentos entre as gravuras superior e inferior devido a folgas no equipamento, fixação incorreta do ferramental ou movimentação deste durante a conformação - ver figura 18.



Figura 18 - Matriz de forjamento.

A folga entre o pino, fixado na ferramenta superior com seu alojamento na matriz inferior é 0,1 mm. Estes pinos iniciam a guiar o ferramental 30 mm antes do fechamento das matrizes prevenindo a formação de dobras ou falhas de material na peça forjada devido a possíveis movimentos do ferramental, transversais a direção da aplicação da força no início da atuação dos pinos.

A cavidade das matrizes possui ângulo de saída, ângulo utilizado na peça para facilitar sua extração da gravura, de 3° e raio de boca, que é o raio existente na parede lateral por onde a rebarba é expulsa da peça, de 2 mm. As matrizes são fixadas à máquina através de grampos apropriados para evitar a ocorrência de movimentos relativos entre as matrizes durante o processo de conformação.

Para o forjamento da peça em estudo utilizou-se uma prensa hidráulica da marca FKL, a qual possui capacidade de força de 6 MN e velocidade de compressão inicial de 3,4 mm/s - ver figura 19.



Figura 19 - Prensa hidráulica de 6 MN, marca FKL.

Para o aquecimento prévio dos blanks, foi utilizado um forno resistivo da marca Sanchis - ver figura 20.



Figura 20 - Forno elétrico Sanchis.

Para o monitoramento das forças necessárias para a conformação das peças, utilizou-se uma célula de carga, sendo o sinal adquirido pelo aparelho Spider 8, da empresa HBM e tratado pelo software Catman Express - ver figura 21.

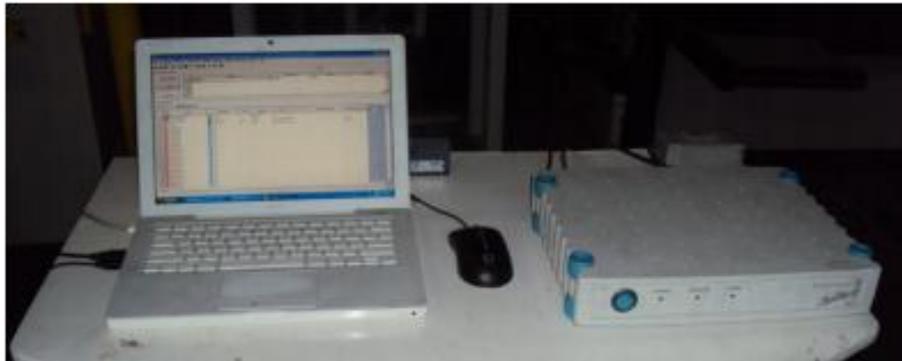


Figura 21 - Sistema de aquisição de dados.

O deslocamento da prensa foi monitorado por um extensômetro de contato, tipo transdutor de deslocamento variável linear (LVDT), o qual também foi acoplado ao Spider 8 e tratado pelo mesmo software.

JÚNIOR [2007] exemplifica de forma esquemática através da Figura 22 a comunicação e aquisição de dados da máquina com o computador, onde no instante da conformação do blank através do deslocamento da placa móvel da prensa hidráulica, a qual contém fixada a parte superior da ferramenta, em direção a placa fixa da prensa hidráulica que contém a parte inferior da ferramenta, o transdutor assim como a célula de carga enviam ao sistema de instrumentação Spider 8 os dados a serem compilados e posteriormente analisados pelo software Catman Express.

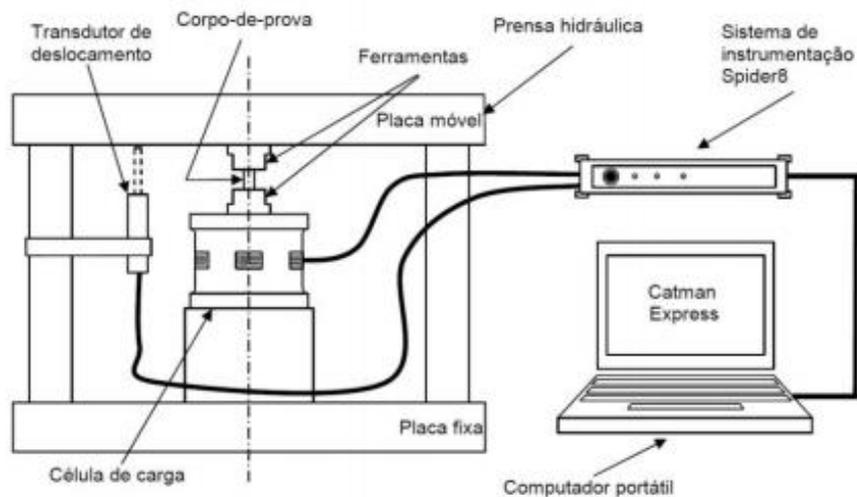


Figura 22 - Representação esquemática do sistema de aquisição de dados.
 Fonte: JÚNIOR (2007).

3.2. MÉTODO

A definição do método de pesquisa a ser seguido é importante, pois assim o processo estudado é tratado de forma sistemática, contribuindo para obtenção de informações que sejam objetivas e de relevância científica. Desta forma, o problema de pesquisa é exposto novamente para que em seguida o método experimental seja definido – Figura 23.

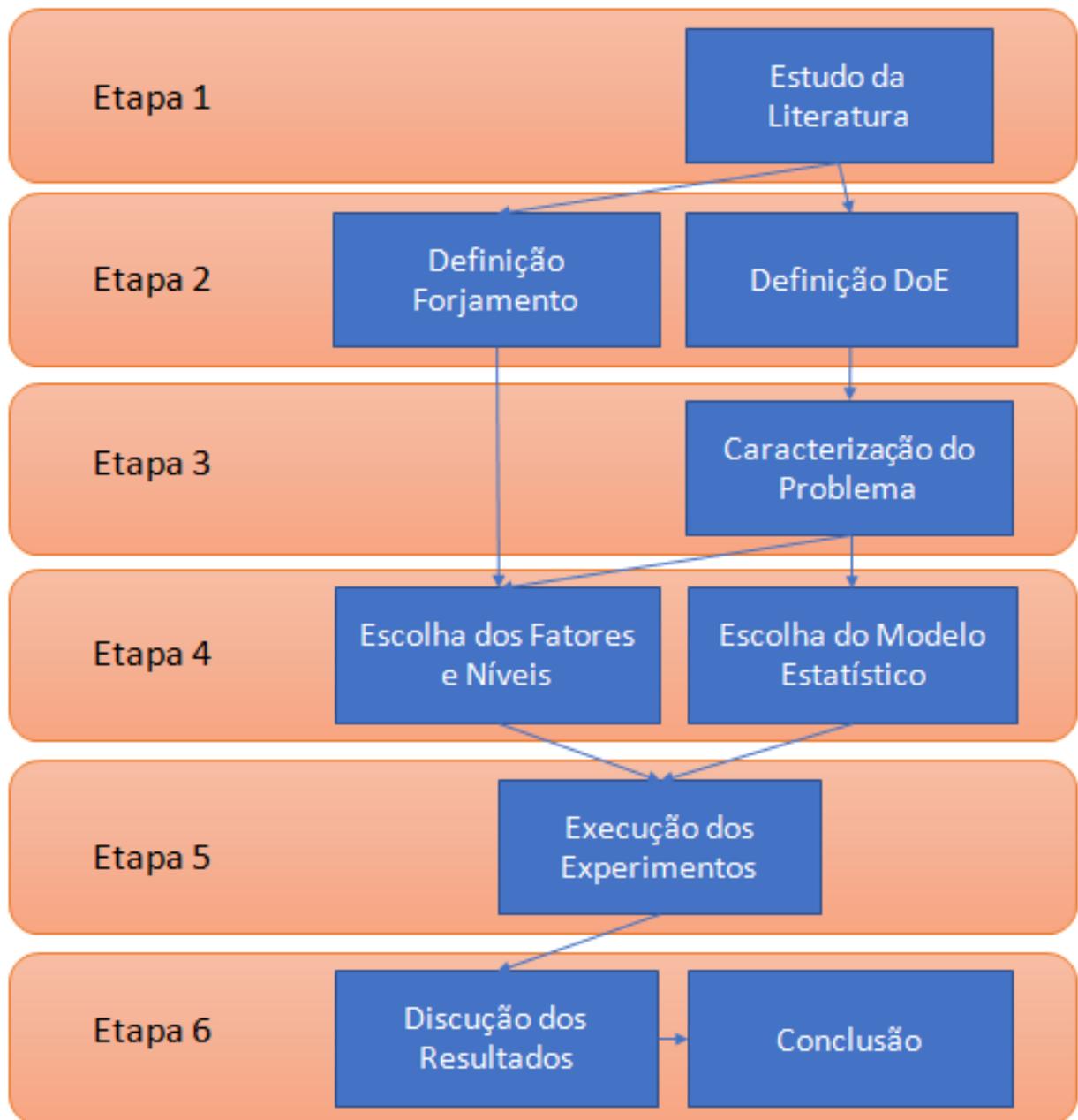


Figura 23 - Detalhamento da seqüência das atividades da pesquisa

No presente trabalho, utilizou-se o delineamento fatorial completo com o auxílio do software Minitab 14.

4 DELINEAMENTO E EXECUÇÃO O EXPERIMENTO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A descrição do objeto de estudo o caracteriza como um problema complexo de otimização, pois se deseja obter a otimização de múltiplas respostas, considerando que o processo de forjamento a quente em matriz fechada empregado, possui múltiplos parâmetros de entrada.

Deste modo, uma abordagem científica para este tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam definidas corretamente, permitindo a obtenção de resultados coerentes e significativos.

Visando otimizar a força necessária para a conformação mecânica das amostras, o trabalho baseou-se na experimentação como método de pesquisa.

Dentre as técnicas de experimentação, foi empregado o DoE para que os dados apropriados possam ser coletados e posteriormente analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas.

O processo de forjamento a quente em matriz fechada consiste na conformação de uma geratriz inicial através de deformação plástica, sendo a movimentação da matriz superior na direção perpendicular à geratriz cilíndrica, enquanto a matriz inferior é estacionária - Figura 24.

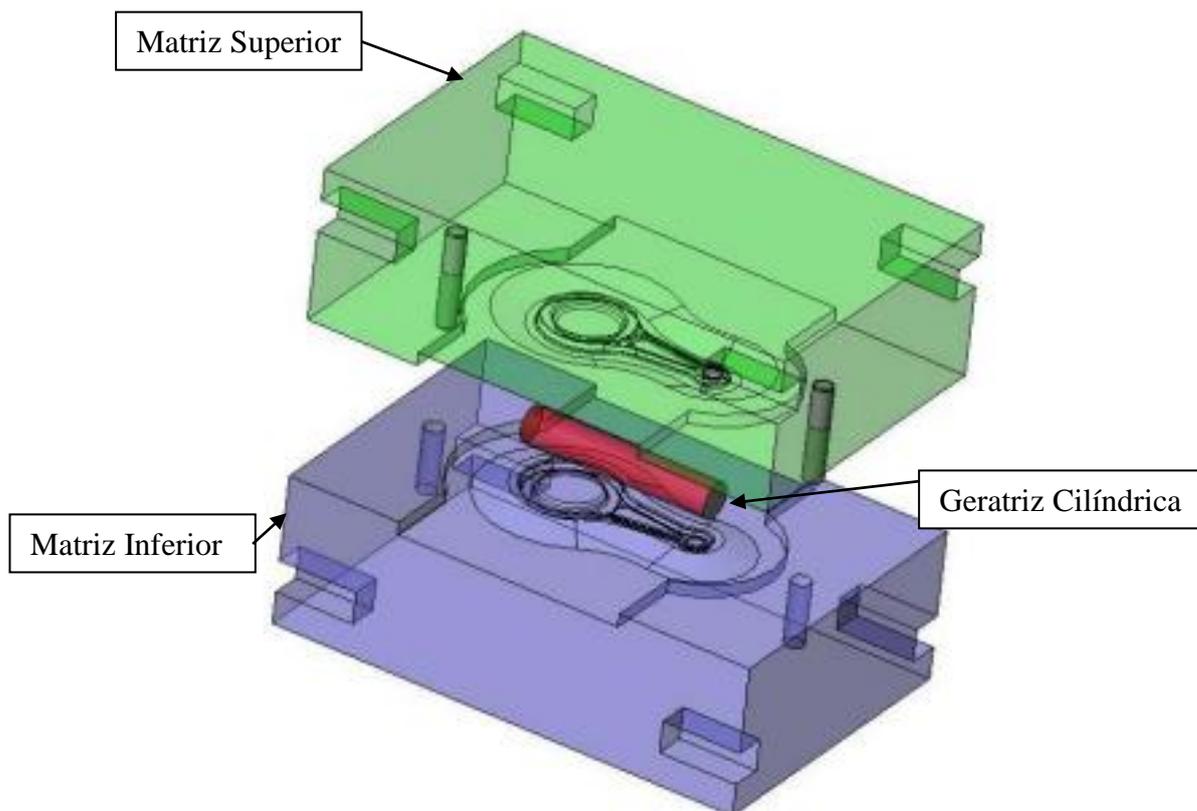


Figura 24 - Processo de forjamento em matriz fechada.

O problema do estudo foi definido como a necessidade de redução / otimização da força aplicada ao processo de forjamento, condição considerada essencial para as empresas que procuram uma redução dos custos envolvidos no processo produtivo, desta forma a variável resposta foi identificada como Y1 = força com a condição definida como “menor melhor” e suas respectivas especificações variando com um alvo estabelecido de 1,96 MN e uma especificação máxima de 2,94 MN, conforme descrito na Tabela 03.

Tabela 03- Descrição das variáveis de resposta

Variáveis de Resposta	Tipo (maior, menor ou nominal)	Alvo (MN)	Especificações	
			Min	Max
Y1: Força	Menor melhor	1,96		2,94

4.2. ESCOLHA DOS FATORES E NÍVEIS

Para realizar o trabalho de modelagem, algumas variáveis tornam-se limitantes como é o caso do equipamento utilizado. Em uma prensa por exemplo, as características estão relacionadas com a capacidade de impor força-energia ao sistema, que depende muito do seu dimensionamento. Em um processo de forjamento, a opção pela otimização dos recursos necessários para a realização e assim a consequente redução dos custos produtivos está diretamente ligada à proposta de possíveis alterações nos parâmetros de trabalho estabelecidos e que são considerados significantes e relevantes na operação.

Desta forma podem-se destacar ações com o objetivo de minimização do custo de matéria prima, ferramental, mão-de-obra, custos de set-up e custos de manufatura, onde é possível observar os custos gerados pelo consumo de energia durante a realização da operação de forjamento.

Todo experimento realizado está associado a erros experimentais. As fontes geradoras destes erros são denominadas de fatores de ruídos, os quais são os fatores que não podem ser removidos nem controlados. Após uma análise do processo, identificou-se como fatores de ruídos a matriz de forjamento, a geometria do blank e a temperatura ambiente.

No processo de forjamento, o movimento existente entre a matriz e o material que está sendo conformado pode sofrer uma influência ou até mesmo em alguns casos ser interrompido devido à existência do atrito. A utilização de lubrificantes, durante o processo de forjamento, é um fator de extrema importância, pois os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada.

Assim sendo, a consequente redução do atrito no processo representa de forma direta uma redução da carga aplicada e assim também uma redução da energia despendida para a realização deste processo. Devido a isso, a análise e a avaliação de propostas com diferentes tipos de lubrificantes estabeleceu o lubrificante comercial Lubrodal AT 737, fabricado pela empresa Fuchs do Brasil como nível (-) e o lubrificante pó de grafite da marca Vonder com granulometria 100 foi estabelecido como nível (+).

Adicionalmente ao tipo de lubrificante, a aplicação e utilização do mesmo podem ser realizadas de duas formas distintas. A primeira delas é aplicando-o

diretamente na matriz, conforme a Figura 25A. A segunda forma de aplicação do lubrificante é utilizando-o na matéria prima, antes da mesma ser alojada na matriz de forjamento, como se pode ver na Figura 25B.



Figura 25 – Colocação do lubrificante na matriz - A e colocação do lubrificante no blank - B.

Conforme a equação 05, a relação então observada pode-se confirmar que com o aumento gradual da temperatura da peça (T) ocorre a redução da tensão de escoamento (k_f) e desta forma conseqüentemente com o aumento da temperatura de forjamento, reduz assim a quantidade de energia necessária para a conformação da mesma.

Desta forma, observando-se esta relação, optou-se pelo monitoramento e controle do tempo de exposição das amostras no forno de aquecimento, onde estabeleceu-se um tempo mínimo para encharque de 20 minutos e uma tempo máximo de 27 minutos sendo esse o tempo total para o processamento de toda as amostras existentes no forno, desta forma foram definidos respectivamente os períodos de 20 minutos para o nível (-) e 27 minutos para o nível (+), assim como a temperatura de forjamento de 430° C para o nível (-) e a temperatura de 500° para o nível (+). Estabelecendo assim as faixas de tempo mínimas e máximas de exposição das amostras à temperatura estabelecida, bem como as faixas mínimas e máximas referentes a temperatura de forjamento.

Como proposta de estudo, este trabalho busca avaliar os parâmetros que interferem de forma direta e indireta na força necessária para a conformação da amostra, caracterizando com isso o consumo de energia durante o processo de forjamento, sendo assim foram considerados cinco fatores para serem analisados, a

dois níveis, conforme a Tabela 04. A escolha destes fatores baseou-se na representatividade dos mesmos, de forma individual e também suas respectivas interações, em relação à força necessária para a correta conformação da peça em estudo.

Tabela 04 - Fatores controláveis

Fatores controláveis	Níveis	
	(-1)	(+1)
<i>Tipo de Lubrificante</i>	Grafite	Lubrodal AT 737
<i>Colocação do Lubrificante</i>	Blank	Matriz
<i>Tempo de exposição no forno</i>	20 minutos	27 minutos
<i>Temperatura de Forjamento</i>	430° C	500° C
<i>Estado do Blank</i>	T4	T6

Para os fatores de controle “Tipo de Lubrificante”, “Colocação do Lubrificante” e “Estado do Blank”, a definição dos mesmos em relação às condições representativas do nível -1 e nível +1 foram estabelecidos aleatoriamente devidos os mesmos serem fatores com níveis de comparação nominais, para os fatores “Tempo de exposição no forno” a definição do nível -1 como vinte minutos e nível +1 como vinte e sete minutos foi realizada considerando-se um tempo mínimo de estabilização do blank no forno a uma temperatura constante sendo considerado nível -1 um tempo mínimo de vinte minutos e nível +1 tempo máximo de exposição do blank no forno de vinte e sete minutos. Para o fator “Temperatura de Forjamento”, a definição dos níveis -1 e +2 foi realizada conforme da definição de uma faixa de temperatura aceitável para a conformação a quente da liga de AA6351.

4.3. ESCOLHA DO MODELO ESTATÍSTICO

Com base na definição dos fatores de entrada, assim como a definição do modelo estatístico a ser usado, as informações foram alimentadas no software Minitab®. Para isso foram analisados cinco fatores (variáveis) em dois níveis (+ e -), onde desta forma serão realizados experimentos de ordem padrão fatorial completo, representado por 2^k , ou seja, 2^5 a qual estabelece um total de 32 ensaios combinados sendo os mesmos realizados sem repetição.

A Figura 26 apresenta a matriz de ensaios gerada pelo Minitab® onde se pode realizar a correlação do número dos respectivos fatores, identificados nas colunas, com a quantidade de ensaios propostos identificados nas linhas onde as cores apresentadas na tabela indicam o grau de intensidade para cada escolha que se pode vir a ter, sendo: vermelho (não faça o experimento, pois não há garantia de que se terá respostas concretas), amarelo (não faça o experimento, pois ainda há risco) e verde (faça o experimento).

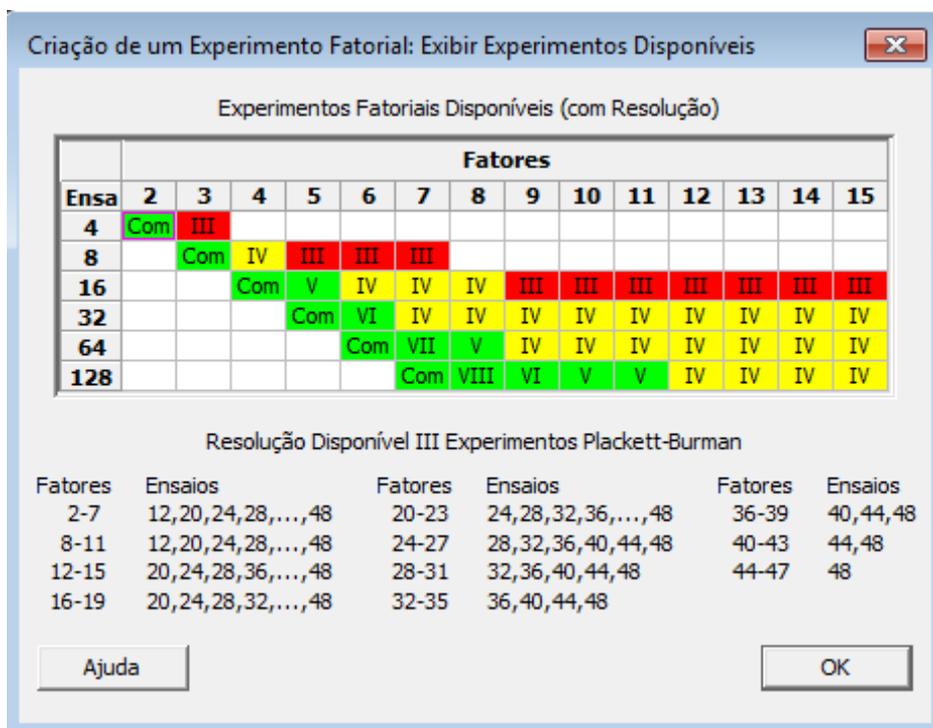


Figura 26 - Matriz de Ensaios - Quantidade de Experimentos.
Fonte: Minitab®

Conforme a imagem acima, considerando-se os cinco fatores propostos para o estudo representados pela linha horizontal, a qual enumera o total de fatores disponíveis, combinados com os seus respectivos dois níveis propostos, da mesma forma enumerados pela linha vertical, as quantidades de ensaios necessárias são estabelecidas com o cruzamento das informações de ambas as linhas, estabelecendo assim um total de 32 ensaios.

4.4. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.4.1 CÁLCULO DA FORÇA DE FORJAMENTO PELO MÉTODO TEP

Para o cálculo da força pela Teoria Elementar da Plasticidade, a peça foi dividida em três partes – Figura 27, sendo duas delas aplicadas o método de tubos (secções AA – Figura 28 e CC – Figura 30) e uma o método de tiras (secção BB – Figura 29), métodos abordados na subseção 2.2.5 TEORIA ELEMENTAR DA PLASTICIDADE.

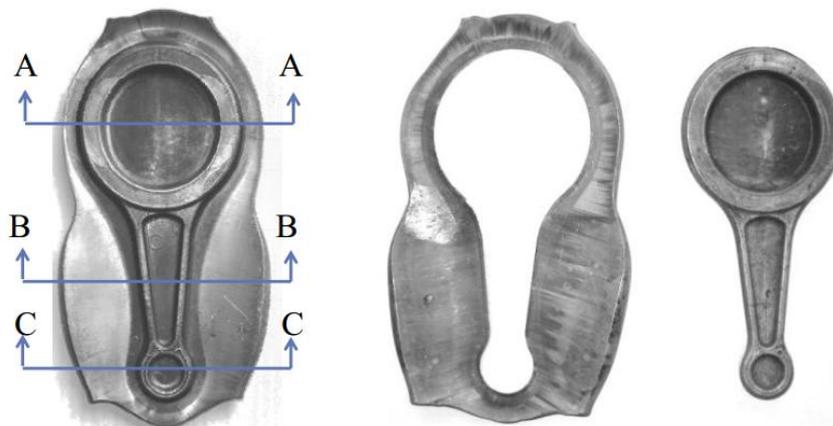


Figura 27 – Geometria, secções para análise via TEP.

Secção AA:

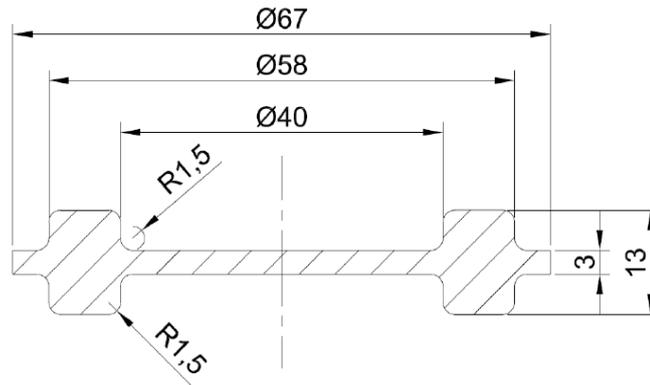


Figura 28 – Secção AA.

Secção BB:

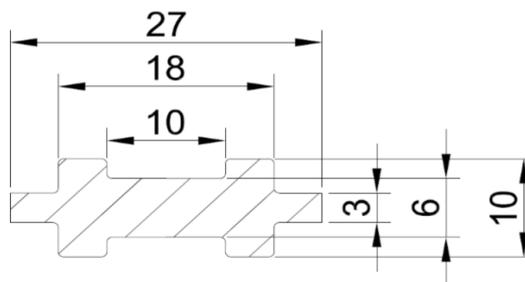


Figura 29 – Secção BB.

Secção CC:

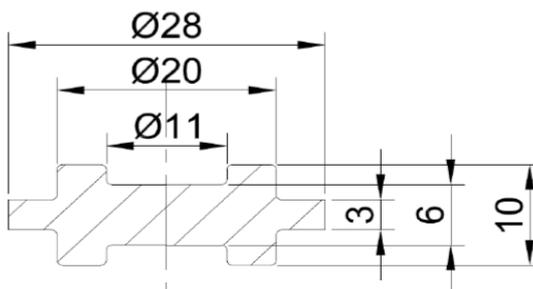


Figura 30 – Secção CC.

Inicialmente os cálculos foram realizados tendo como base uma subdivisão de 30 tiras ao total na peça, posteriormente as subdivisões de tiras foram aumentadas

gradativamente sendo contempladas as quantidades de 298, 376, 496, 745 e 1490 tiras.

O gráfico abaixo demonstra a evolução das forças calculadas, onde conforme o aumento do número de tiras pode-se evidenciar que a força calculada tende a comportar-se de forma linear. – Figura 31:

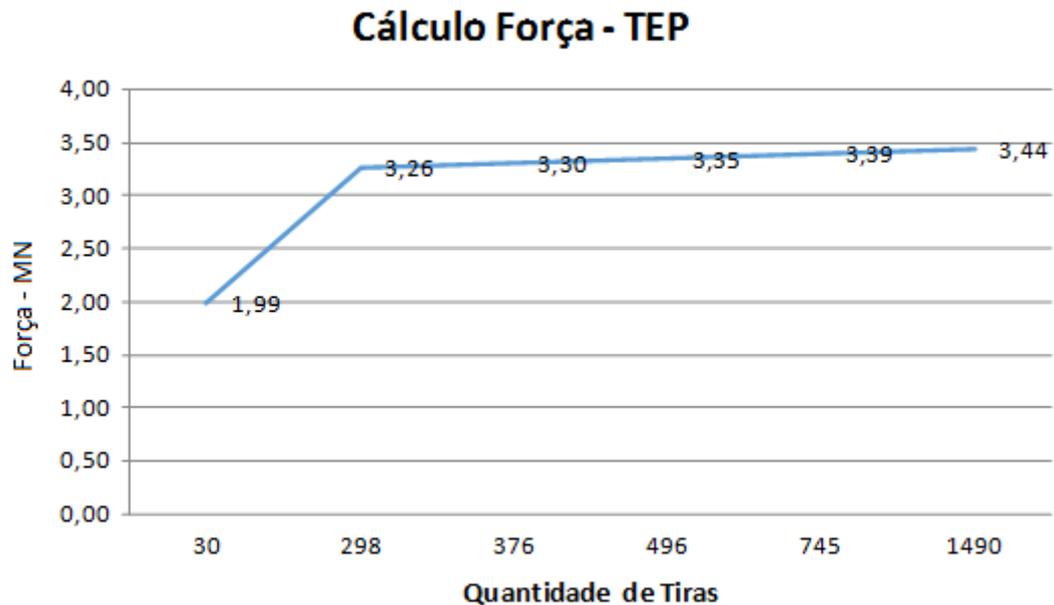


Figura 31 – Cálculo de Forças - TEP.

Comparando as forças obtidas, considerando-se as quantidades de tiras utilizadas nos cálculos, pode-se perceber uma tendência de estabilidade das forças a partir da quantidade de 496 tiras, conforme Figura 31 é possível perceber que a partir da quantidade total de 298 tiras a variação de força entre as quantidades de 376, 496, 745 e 1490 apresentam uma variação máxima de 1,4%, demonstrando assim a tendência de estabilidade da força calculada - Figura 32.

Conforme cálculos realizados, sendo considerada uma temperatura de 480° C, com blank de 110 mm de comprimento e diâmetro 25,4 mm a força obtida, com um total de 1490 tiras é igual a 3,44 MN.

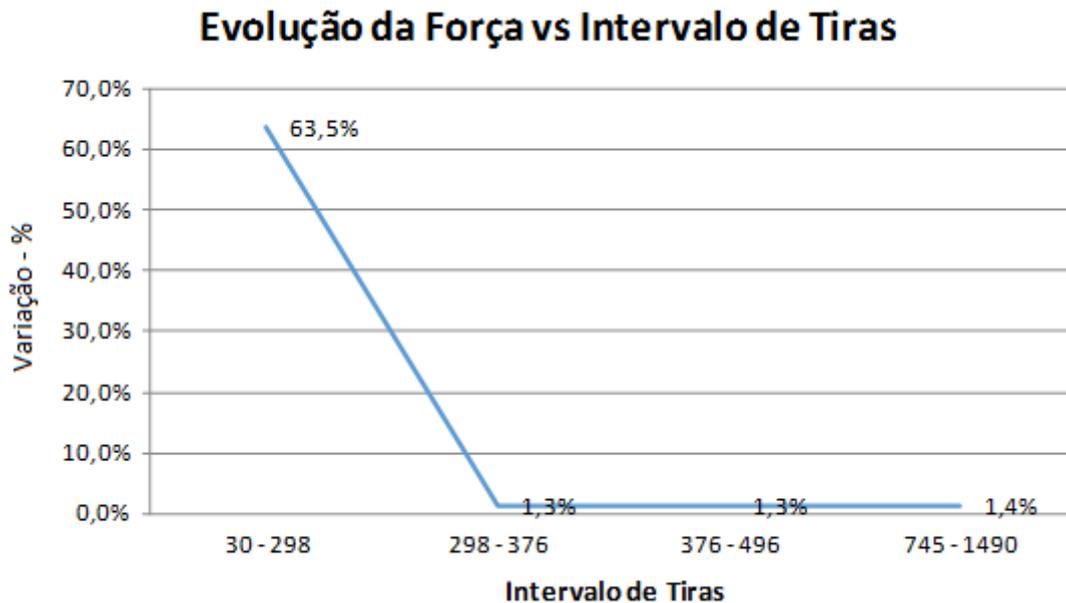


Figura 32 – Evolução das Forças VS Intervalo de Tiras.

4.4.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Na aplicação prática realizada, considerando-se o experimento fatorial assim como os fatores de entrada e suas respectivas ordens, foi possível originar uma sequência de ensaios os quais de forma estatística relacionam tecnicamente os fatores de entrada, bem como suas respectivas ordens, desta forma o experimento foi planejado em 32 rodadas, onde a matriz experimental dos ensaios pode ser verificada de forma parcial na Figura 33, com uma visualização completa no Apêndice 01.

Minitab - Sem titulo									
Arquivo Editar Dados Calc Estat Gráfico Editor Ferramentas Janela Ajuda Assistente									
Worksheet 1 ***									
	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6-T	C7-T	C8-T	C9-T
	OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	Lubrificante	Colocação do Lubrificante	Tempo de Exposição no Forno	Temperatura de Forjamento	Estado do Blank
1	31	1	1	1	Lubrodal AT 737	Blank	27 minutos	500° C	Estado T6
2	25	2	1	1	Lubrodal AT 737	Matriz	20 minutos	500° C	Estado T6
3	30	3	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	500° C	Estado T6
4	20	4	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	430° C	Estado T6

Figura 33 – Matriz de Ensaios - Quantidade, Ordem e Fatores dos Ensaios.
Fonte: Minitab®

4.4.3 SEQUENCIA DE AQUECIMENTO E FORJAMENTO

Os blanks foram aquecidos em um forno resistivo por um período de 20 minutos até a homogeneização de sua temperatura, onde a especificação da temperatura utilizada respeitou a definição de 430° C para o nível (-) e a temperatura de 500° para o nível (+). Após a respectiva homogeneização da temperatura, o tempo de exposição das peças no forno foi definido conforme os períodos de 20 minutos para o nível (-) e 27 minutos para o nível (+). Adicionalmente a este processo, as matrizes foram aquecidas através de uma chama geradas por gás liquefeito, até atingirem aproximadamente 90° C.

O forno de aquecimento das geratrizes foi posicionado ao lado da prensa em num local específico, a fim de, reduzir a distância e o tempo de movimentação dos “blanks” aquecidos até a prensa, reduzindo assim, a perda de calor. As temperaturas das geratrizes e do ferramental foram controladas através de um termopar tipo K.

Figura 34.

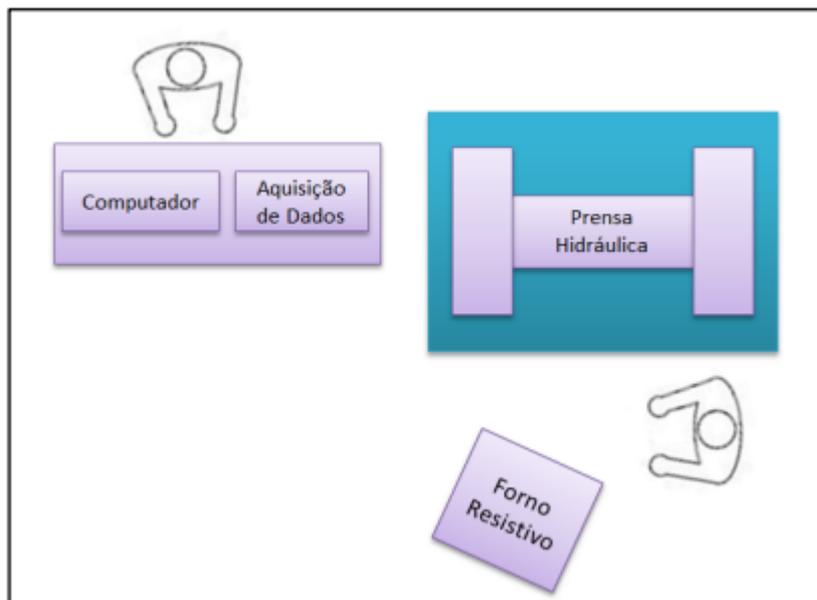


Figura 34 – Disposição dos Equipamentos para os Ensaios.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da aplicação dos conceitos e técnicas do DoE, descritos anteriormente no capítulo 2, demonstrando os ensaios experimentais realizados, com o intuito de determinar as principais variáveis de controle, bem como suas interações assim como os níveis ótimos de regulação do respectivo processo de forjamento.

A parte experimental dessa dissertação foi realizada no laboratório de transformação mecânica, LdTM localizado na UFRGS em Porto Alegre.

Uma vez estabelecida e definida a MATRIZ EXPERIMENTAL, capítulo 4.4.2, executou-se os ensaios propostos conforme configurações e ordem estabelecidas na matriz, onde após cada peça conformada pode-se verificar e identificar a força necessária para a respectiva conformação desejada.

5.1 INTERPRETAÇÕES DOS DADOS

Após a realização da sequencia de experimentos planejados, foram coletados os dados obtidos referentes à força necessária para a conformação mecânica de cada respectivo blank, considerando as condições do processo estabelecidas na Matriz Experimental, sendo os mesmos tabulados respectivamente na coluna C10 e posteriormente compilados no software Minitab® para a consequente análise estatística dos mesmos – ver Figura 35.

Com o objetivo de verificar a influência das variáveis de controle, suas possíveis interações assim como o nível de importância dos fatores na variável resposta (força de forjamento), a análise de variância (ANOVA) foi realizada, adotando-se um nível de 5% de significância, onde desta forma é possível avaliar se a variável independente ou uma interação tem efeito significativo sobre a variável resposta estudada, ou seja, caso o p encontrado no estudo da ANOVA seja menor que 0,05 sendo o efeito significativo que influencia de forma decisiva a variável resposta.

Minitab - DoE Final.mpj - [Worksheet 1 ***]

Arquivo Editar Dados Calc Estat Gráfico Editor Ferramentas Janela Ajuda Assistente

	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6-T	C7-T	C8-T	C9-T	C10
	OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	Lubrificante	Colocação do Lubrificante	Tempo de Exposição no Forno	Temperatura de Forjamento	Estado do Blank	Força Obtida - MN
1	17	1	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	430° C	T6	2,44
2	29	2	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	500° C	T6	2,41
3	24	3	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	430° C	T6	2,82
4	1	4	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	430° C	T4	2,17
5	2	5	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	430° C	T4	2,27
6	11	6	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	500° C	T4	1,88
7	20	7	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	430° C	T6	2,72
8	16	8	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	500° C	T4	2,04
9	7	9	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	430° C	T4	2,34
10	3	10	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	430° C	T4	2,17
11	4	11	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	430° C	T4	2,61
12	30	12	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	500° C	T6	2,17
13	5	13	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	430° C	T4	2,30
14	21	14	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	430° C	T6	2,47
15	23	15	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	430° C	T6	2,54
16	14	16	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	500° C	T4	2,54
17	28	17	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	500° C	T6	2,27
18	9	18	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	500° C	T4	2,11
19	31	19	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	500° C	T6	2,17
20	22	20	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	430° C	T6	2,79
21	12	21	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	500° C	T4	2,14
22	18	22	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	430° C	T6	2,37
23	26	23	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	500° C	T6	2,14
24	27	24	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	500° C	T6	2,17
25	13	25	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	500° C	T4	2,14
26	8	26	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	430° C	T4	2,61
27	6	27	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	430° C	T4	2,72
28	10	28	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	500° C	T4	2,04
29	32	29	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	500° C	T6	2,54
30	19	30	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	430° C	T6	2,27
31	15	31	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	500° C	T4	2,00
32	25	32	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	500° C	T6	2,30

Figura 35 – Matriz de Ensaios e Resultado das forças obtidas.

Fonte: Minitab®

5.1.1 AVALIAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM.

Inicialmente, foi realizada uma análise do nível de significância dos fatores em primeira ordem, onde os mesmos foram avaliados individualmente considerando-se a identificação dos fatores controláveis com efeito significativo na variável resposta.

A Tabela 05 apresenta a ANOVA do efeito dos 05 fatores relativos à variável resposta força necessária para forjamento.

Na variável de resposta, força de forjamento, pode-se concluir através da tabela ANOVA, Tabela 05, gerada pelo programa Minitab®, que os fatores: Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno, Temperatura de Forjamento e Estado do Blank tiveram efeito significativo, a um nível de significância de 5%, enquanto o fator Colocação do Lubrificante apresentou um valor-p igual à 0,921, sendo assim maior que 0,05 e por sua vez não sendo considerado significativo.

Tabela 05 – ANOVA Primeira Ordem

Análise de Variância - Primeira Ordem

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1,31076	0,262153	12,34	0
Linear	5	1,31076	0,262153	12,34	0
Lubrificante	1	0,26302	0,263023	12,38	0,002
Colocação do Lubrificante	1	0,00021	0,000213	0,01	0,921
Tempo de Exposição no Forno	1	0,20137	0,201366	9,48	0,005
Temperatura de Forjamento	1	0,64874	0,648741	30,53	0
Estado do Blank	1	0,19742	0,19742	9,29	0,005
Erro	26	0,55244	0,021248		
Total	31	1,86321			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,145766	70,35%	64,65%	55,09%

As significâncias dos fatores observados pela tabela ANOVA, podem também serem verificadas através do gráfico Normal dos Efeitos Padronizados Primeira Ordem – Figura 36, onde os pontos que estiverem mais afastados da reta são significantes, identificados através da cor vermelha.

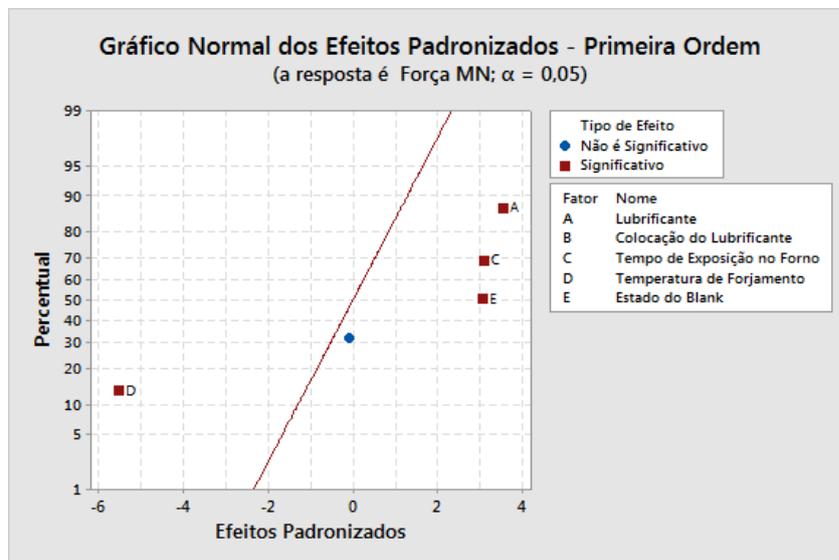


Figura 36 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Primeira Ordem.
Fonte: Minitab®

Além disso, o gráfico indica a direção dos efeitos onde os fatores Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno e Estado do Blank tem um efeito padronizado positivo. Quando o processo muda de nível baixo para nível alto do fator, a resposta aumenta. Temperatura de Forjamento têm efeito padronizado negativo. Quando a Temperatura de Forjamento aumenta, a resposta diminui.

Desta forma, segundo o gráfico de Pareto representado pela Figura 37, todos os efeitos que ultrapassam a linha no valor de 2,056 apresentam um nível de significância, onde pode-se verificar que o fator Temperatura de Forjamento, gera o efeito local mais intenso sobre a quantidade de força necessária para a execução do forjamento.

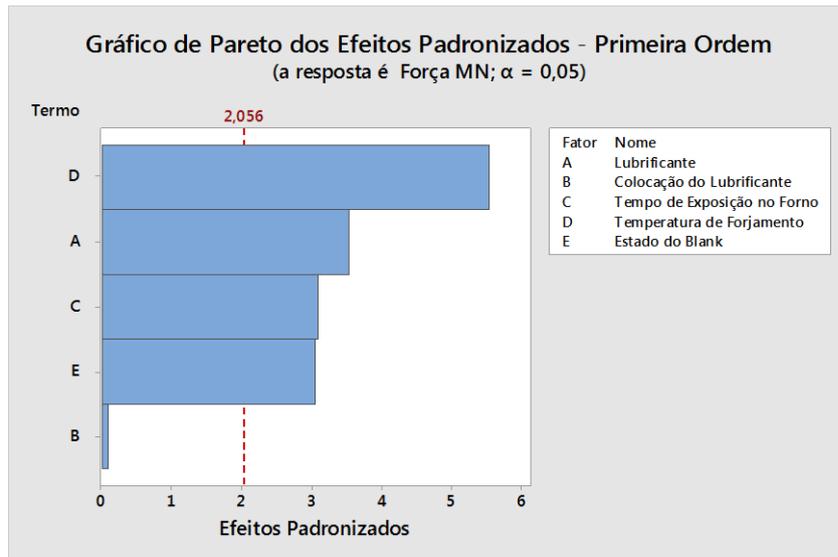


Figura 37 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Primeira Ordem.
Fonte: Minitab®

Seguindo a ordenação gerada, têm-se os fatores Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno e Estado do Blank sequencialmente significativos.

5.1.2 AVALIAÇÃO DE SEGUNDA ORDEM.

Posteriormente a avaliação de primeira ordem, foi realizada uma análise do nível de significância dos fatores em um nível de segunda ordem, onde os mesmos foram avaliados individualmente, bem como as suas respectivas interações de segunda ordem, considerando-se para isso os fatores controláveis com efeito significativo na variável resposta, bem como o resultado de suas interações.

Na continuidade das análises, optou-se pela eliminação manual dos fatores não significativos e assim executando novamente a análise até que sobrassem apenas interações e fatores significativos, desta forma conforme observada a não

significância do fator Colocação do Lubrificante, o mesmo foi retirado da avaliação ANOVA de segunda ordem, assim como as interações as quais possuíam este fator.

Este processo é referenciado como "redução do modelo". À medida que os fatores são removidos do modelo, mais graus de liberdade tornam-se disponíveis para o cálculo dos valores-P. O número de modelos necessário para a avaliação depende do número de fatores em sua análise.

Desta forma, considerando-se a redução do modelo a Tabela 06 que apresenta a ANOVA dos 05 fatores relativos à variável de força necessária para forjamento e suas respectivas interações de segunda ordem.

Tabela 06 – ANOVA Segunda Ordem

Análise de Variância - Segunda Ordem					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	1,43478	0,143478	7,03	0
Linear	4	1,31055	0,327637	16,06	0
Lubrificante	1	0,26302	0,263023	12,89	0,002
Tempo de Exposição no Forno	1	0,20137	0,201366	9,87	0,005
Temperatura de Forjamento	1	0,64874	0,648741	31,8	0
Estado do Blank	1	0,19742	0,19742	9,68	0,005
Interações de 2 fatores	6	0,12423	0,020705	1,01	0,442
Lubrificante*Tempo de Exposição no Forno	1	0,02112	0,021124	1,04	0,32
Lubrificante*Temperatura de Forjamento	1	0,06998	0,069978	3,43	0,078
Lubrificante*Estado do Blank	1	0,02103	0,021034	1,03	0,321
Tempo de Exposição no Forno*Temperatura de Forjamento	1	0,01193	0,011925	0,58	0,453
Tempo de Exposição no Forno*Estado do Blank	1	0,00011	0,000111	0,01	0,942
Temperatura de Forjamento*Estado do Blank	1	0,00006	0,000056	0	0,959
Erro	21	0,42843	0,020401		
Total	31	1,86321			
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,142833	77,01%	66,06%	46,61%	

Assim como observado na avaliação de primeira ordem, considerando-se a variável de resposta, força de forjamento, pode-se concluir através da tabela ANOVA, gerada pelo programa Minitab®, que os fatores: Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno, Temperatura de Forjamento e Estado do Blank tiveram efeito significativo, a um nível de significância de 5%, tendo referência o valor-p<0,05.

Como relação aos valores obtidos pelo valor-p das interações de dois fatores, os mesmos obtiveram um valor-p superior a 0,05 sendo assim os mesmos considerados como não significativos.

As significâncias dos fatores observados pela tabela ANOVA, podem também serem verificadas através do gráfico Normal dos Efeitos Padronizados Segunda

Ordem – Figura 38, que efetivamente enumera estes quatro itens como significantes através da cor vermelha.

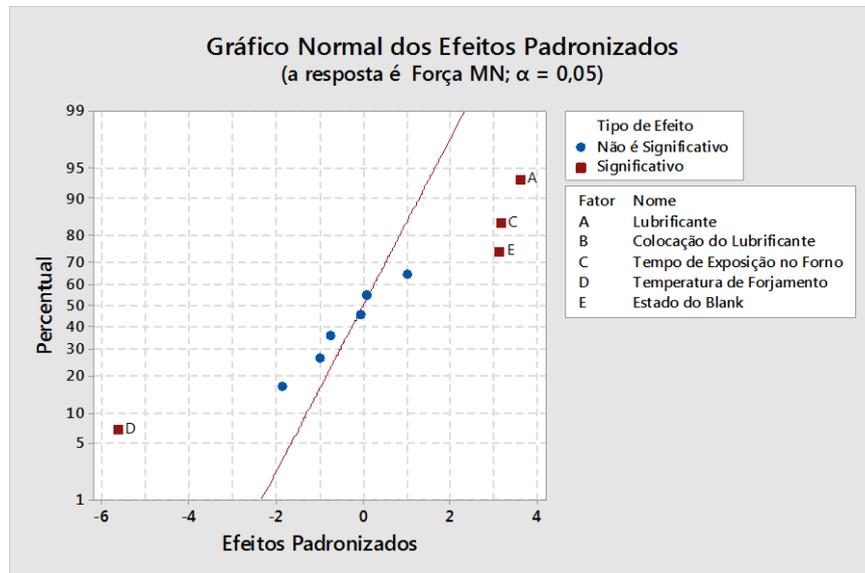


Figura 38 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Segunda Ordem.
Fonte: Minitab®

No mesmo sentido, segundo a Figura 39, pode-se afirmar que o fator Temperatura de Forjamento, gera o efeito local mais intenso sobre a quantidade de força necessária para a execução do forjamento.

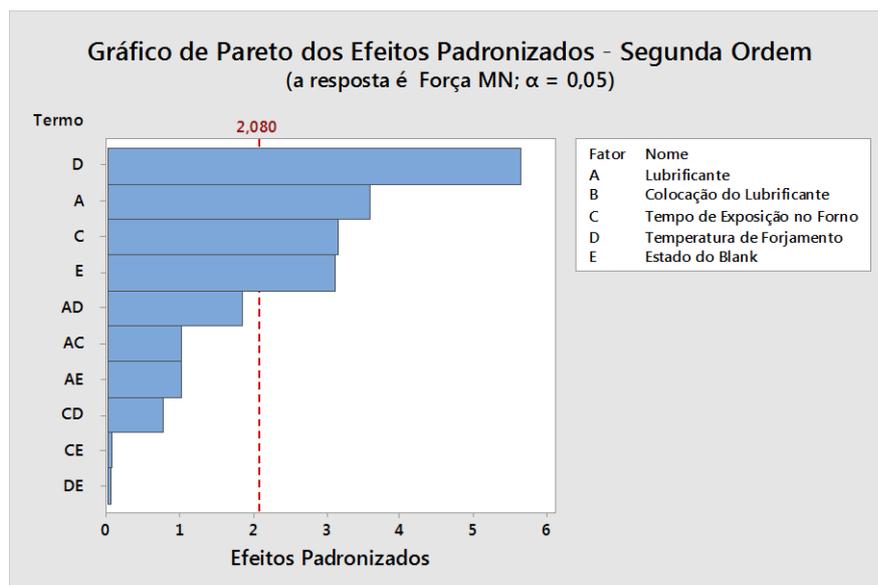


Figura 39 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Segunda Ordem.
Fonte: Minitab®

Seguindo a ordenação gerada, têm-se os fatores Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno e Estado do Blank sequencialmente significativos.

5.1.3 AVALIAÇÃO DE TERCEIRA ORDEM.

Adicionalmente, foi realizada uma análise do nível de significância dos fatores em terceira ordem, onde os mesmos foram avaliados individualmente, bem como as suas respectivas interações de terceira ordem, considerando-se para isso os fatores controláveis com efeito significativo na variável resposta, bem como o resultado de suas interações, onde para tanto, preliminarmente foi observada e executada das condições de redução do modelo já executadas antes na avaliação de segunda ordem.

Abaixo segue a Tabela 07 que apresenta a ANOVA dos 05 fatores relativos à variável de força necessária para forjamento.

Tabela 07 – ANOVA Terceira Ordem

Análise de Variância - Terceira Ordem					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	1,43957	0,102827	4,13	0,003
Linear	4	1,31055	0,327637	13,15	0
Lubrificante	1	0,26302	0,263023	10,55	0,005
Tempo de Exposição no Forno	1	0,20137	0,201366	8,08	0,011
Temperatura de Forjamento	1	0,64874	0,648741	26,03	0
Estado do Blank	1	0,19742	0,19742	7,92	0,012
Interações de 2 fatores	6	0,12423	0,020705	0,83	0,562
Lubrificante*Tempo de Exposição no Forno	1	0,02112	0,021124	0,85	0,37
Lubrificante*Temperatura de Forjamento	1	0,06998	0,069978	2,81	0,112
Lubrificante*Estado do Blank	1	0,02103	0,021034	0,84	0,371
Tempo de Exposição no Forno*Temperatura de Forjamento	1	0,01193	0,011925	0,48	0,498
Tempo de Exposição no Forno*Estado do Blank	1	0,00011	0,000111	0	0,948
Temperatura de Forjamento*Estado do Blank	1	0,00006	0,000056	0	0,963
Interações de 3 fatores	4	0,0048	0,001199	0,05	0,995
Lubrificante*Tempo de Exposição no Forno*Temperatura de Forjamento	1	0,00034	0,000336	0,01	0,909
Lubrificante*Tempo de Exposição no Forno*Estado do Blank	1	0,00001	0,000005	0	0,989
Lubrificante*Temperatura de Forjamento*Estado do Blank	1	0,00292	0,002922	0,12	0,736
Tempo de Exposição no Forno*Temperatura de Forjamento*Estado do Blank	1	0,00153	0,001535	0,06	0,807
Erro	17	0,42363	0,024919		
Total	31	1,86321			
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,157859	77,26%	58,54%	19,44%	

Comprovando os resultados obtidos nas avaliações de primeira e segunda ordem, considerando-se a variável de resposta, força de forjamento, pode-se concluir através da tabela ANOVA, gerada pelo programa Minitab®, que os fatores: Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno, Temperatura de Forjamento e Estado do Blank tiveram efeito significativo, a um nível de significância de 5%.

Como relação aos valores obtidos pelo valor-p das interações de dois e três fatores, os mesmos obtiveram um valor-p superior a 0,05 sendo assim os mesmos considerados como não significativos.

As significâncias dos fatores observados pela tabela ANOVA, podem também serem verificadas através do gráfico Normal dos Efeitos Padronizados Terceira Ordem – Figura 40, que efetivamente enumera estes quatro itens como significantes através da cor vermelha.

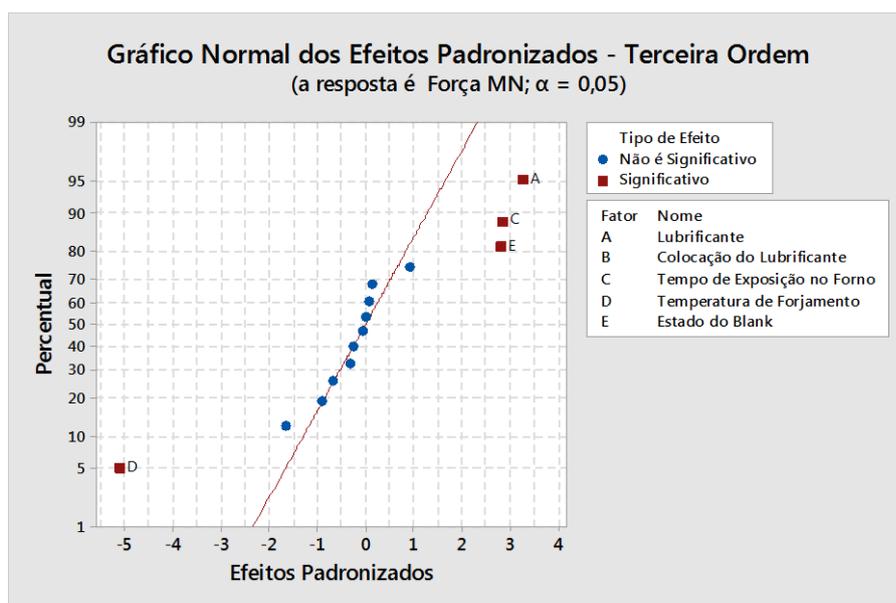


Figura 40 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Terceira Ordem.
Fonte: Minitab®

Complementarmente, segundo a Figura 41, pode-se confirmar que o fator Temperatura de Forjamento, gera o efeito local mais intenso sobre a quantidade de força necessária para a execução do forjamento.

Segundo a ordenação gerada, têm-se os fatores Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno e Estado do Blank sequencialmente significativos.

O software Minitab® disponibiliza ferramenta específica que possibilita a execução da redução do modelo através do comando “Stepwise”. Esta

disponibilidade possibilita a confirmação do processo de redução do modelo executado manualmente nas etapas de análise de segunda e terceira ordens.

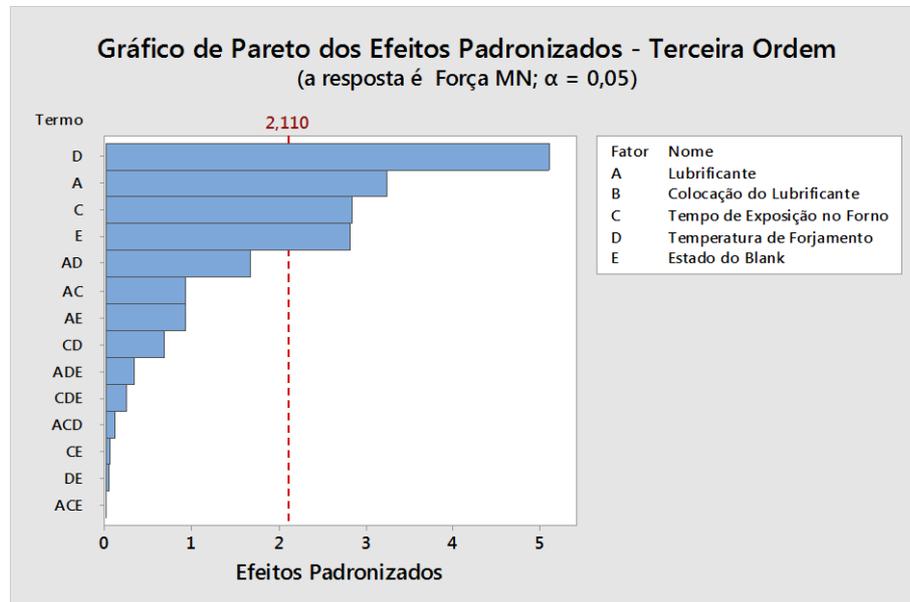


Figura 41 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Terceira Ordem.
Fonte: Minitab®

Abaixo segue a Tabela 08 que apresenta a ANOVA resultado da Redução do Modelo, relativo à variável de força necessária para forjamento.

Tabela 08 – ANOVA Redução do Modelo

Análise de Variância - Redução do Modelo

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	1,3105	0,32764	16,01	0
Linear	4	1,3105	0,32764	16,01	0
Lubrificante	1	0,263	0,26302	12,85	0,001
Tempo de Exposição no Forno	1	0,2014	0,20137	9,84	0,004
Temperatura de Forjamento	1	0,6487	0,64874	31,69	0
Estado do Blank	1	0,1974	0,19742	9,64	0,004
Erro	27	0,5527	0,02047		
Total	31	1,8632			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,143069	70,34%	65,94%	58,34%

Considerando-se os resultados obtidos pela Redução do Modelo, através do comando “Stepwise” do Minitab®, foi possível evidenciar e comprovar a efetiva significância dos fatores Temperatura de Forjamento, Lubrificante, Tempo de Exposição no Forno e Estado do Blank na variável resposta força de forjamento,

sendo o fator Temperatura de Forjamento responsável pela geração de uma influência mais intensa sobre a variável resposta estudada. Figura 42.

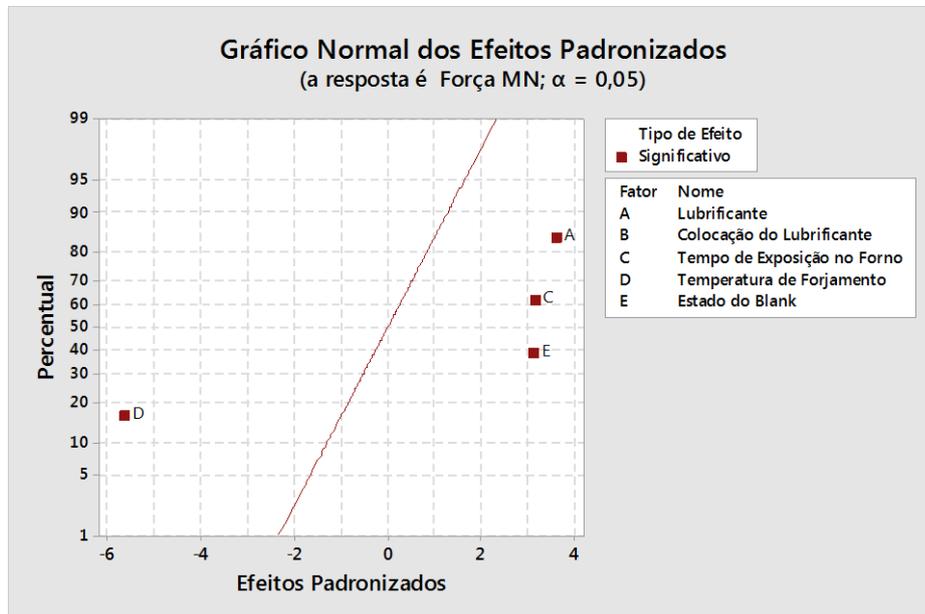


Figura 42 – Gráfico de Probabilidade Normal Significância dos Fatores – Redução do Modelo.
Fonte: Minitab®

A Figura 43 mostra a maior influência do Fator D, Temperatura de Forjamento, na variável resposta.

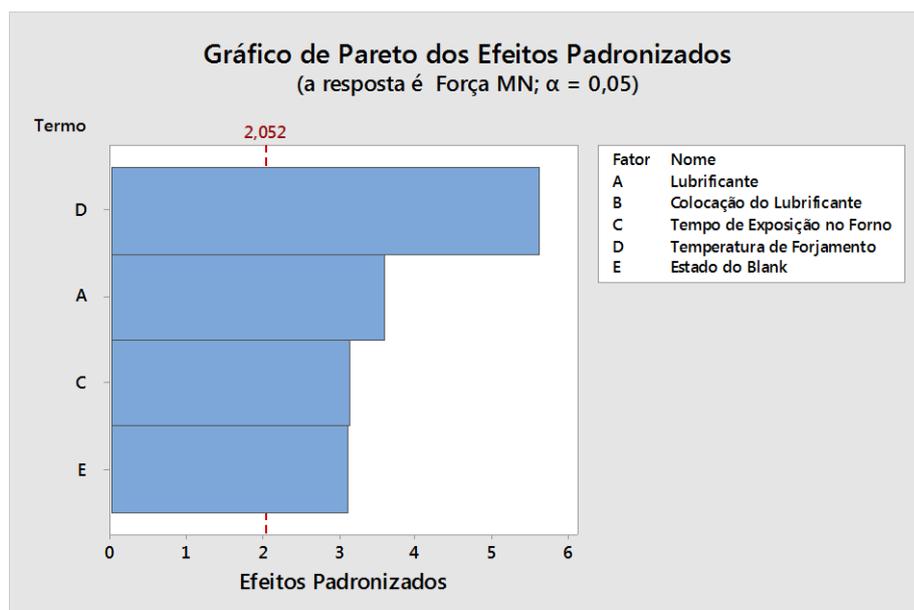


Figura 43 – Gráfico de Barras Significância dos Fatores – Redução do Modelo.
Fonte: Minitab®

Para os fatores identificados como significativos na análise ANOVA, foram gerados alguns gráficos a partir da ferramenta Minitab®, os gráficos fatoriais incluem o gráfico de efeitos principais e o gráfico de interações. Um efeito principal é a diferença na resposta média entre dois níveis e um fator.

A Figura 44 mostra o gráfico da influência das principais variáveis na variável resposta, individualmente onde exceto o fator Colocação do Lubrificante, os demais se apresentaram significativos na pesquisa.

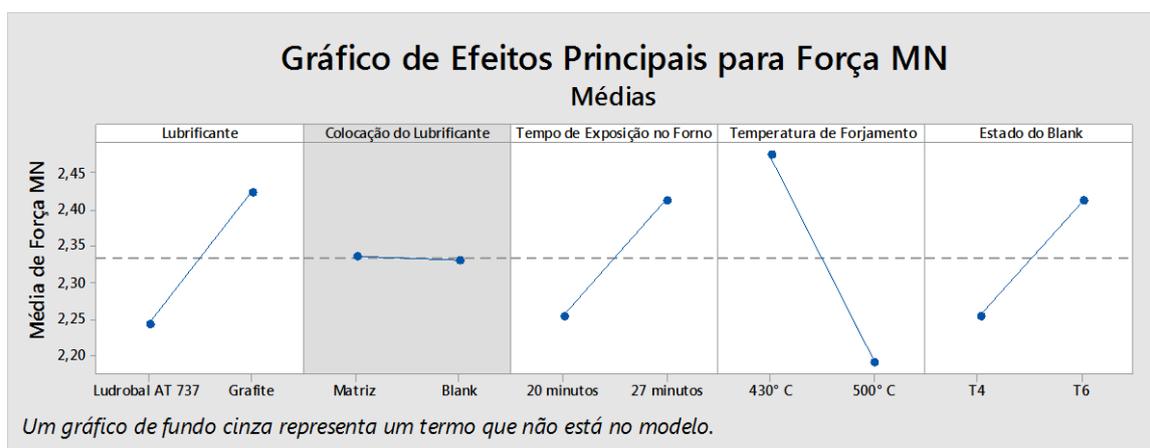


Figura 44 – Gráfico de Efeitos Principais para Força.
Fonte: Minitab®

O gráfico de efeitos principais mostra as médias de forças necessárias para o forjamento sendo considerado individualmente cada um dos fatores de estudo com seus respectivos níveis de utilização. Cada ponto representa a força de forjamento média para um nível de um fator.

A linha central horizontal mostra a força de forjamento média de todos os ensaios. Cada um dos painéis do gráfico representa a relação existente das médias de forças obtidas com a utilização de cada fator específico considerando seus respectivos níveis.

Observa-se que os fatores quando analisados individualmente têm relevâncias distintas, desta forma é possível perceber que a utilização de menores quantidades de força para o forjamento está atrelada a utilização do lubrificante Lubrodal AT 737, do tempo de exposição no forno de 20 minutos, da temperatura de forjamento especificada em 500° C e do estado T4 do blank.

Se não houve interações significativas entre os fatores, um gráfico de efeitos principais descreveria adequadamente as relações entre cada fator e a resposta. No

entanto, como a interação é significativa, é também necessário examinar o gráfico de interação.

Uma interação significativa entre dois fatores pode afetar a interpretação dos efeitos principais.

O gráfico de interações mostra o impacto de todos os fatores na resposta, como uma interação significa que o efeito de um fator depende do nível do outro fator, avaliar as interações é importante. Os gráficos de interação são mais comumente usados para visualizar interações durante ANOVA onde as linhas paralelas em um gráfico de interação não indicam nenhuma interação. Quanto maior for a diferença na inclinação entre as linhas, maior o grau da interação.

Cada ponto no gráfico de interações, Figura 45, mostra a força de forjamento média em diferentes combinações de níveis de fator, a análise das interações permite chegar à conclusão de que não existem interações entre os fatores estudados.

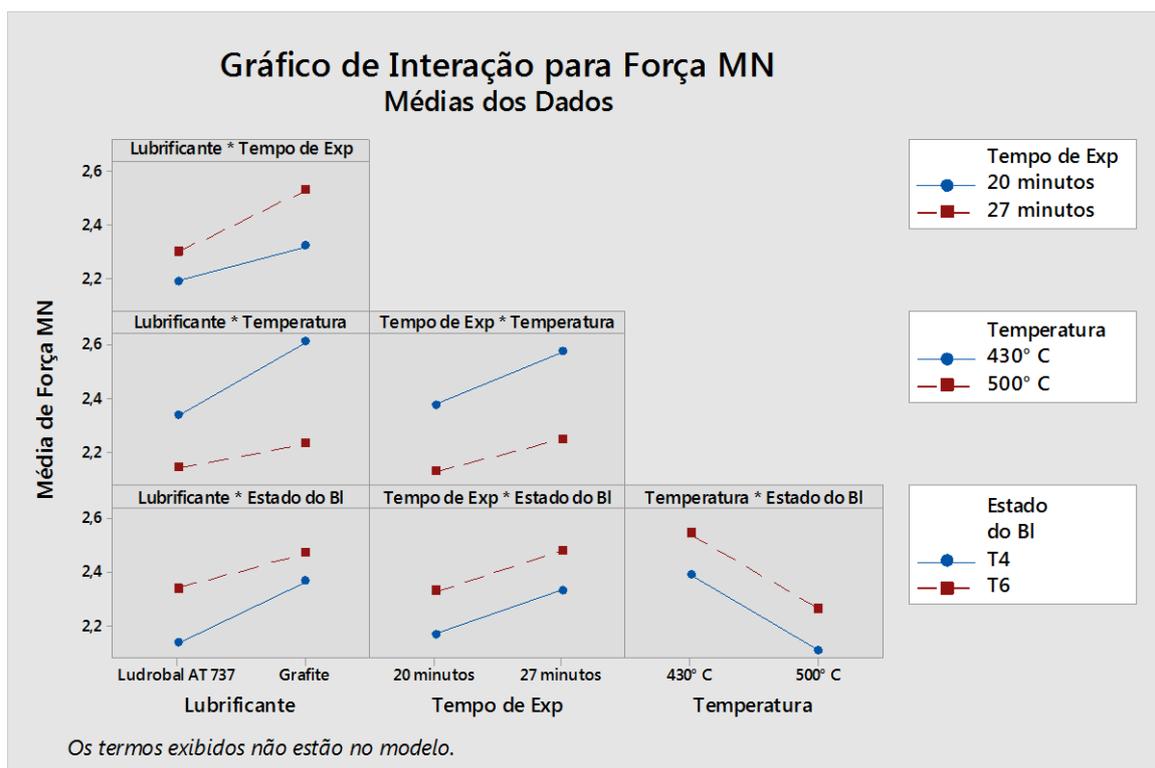


Figura 45 – Gráfico de Interação para Força.
Fonte: Minitab®

Basicamente a utilização do gráfico de interações é uma forma de comprovação do que já foi mostrado nos gráficos anteriores de Probabilidade Normal e de Pareto.

5.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A superfície de resposta é uma metodologia que utiliza análise fatorial e análise de regressão para a determinação de uma condição ótima de operação em uma superfície de resposta. Seus dois principais objetivos são determinar com um experimento qual o próximo passo para buscar um ponto ótimo da superfície de resposta e determinar a equação da superfície de resposta próxima ao ponto ótimo. Essa foi a metodologia adotada nos experimentos realizados. Os resultados estão apresentados na tabela 09.

Tabela 09 – Tabela Otimização de Resposta

Otimização da Resposta: Força MN							
Parâmetros		Meta	Inferior	Alvo	Superior	Peso	Importância
Resposta	Força MN	Mínimo		1,88387	2,82229	1	1
Solução			Tempo de Exposição no Forno	Temperatura de Forjamento	Estado do Blank	Força MN Ajuste	Desirability Composta
Solução	1	Ludrobal AT 737	20 minutos	500° C	T4	1,94243	0,937605
Predição de Múltiplas Respostas							
Variável	Configuração						
Lubrificante	Ludrobal AT 737						
Tempo de Exposição no Forno	20 minutos						
Temperatura de Forjamento	500° C						
Estado do Blank	T4						
Resposta	Ajuste	EP do Ajustado	IC de 95%	IP de 95%			
Força MN	1,9424	0,0566	(1,8264; 2,0585)	(1,6268; 2,2581)			

A partir dos resultados do experimento realizou-se uma modelagem através da regressão múltipla, tendo apenas os efeitos significativos apontados pela análise de variância como regressores. A regressão linear múltipla emprega o princípio de mínimos quadrados, estimando uma equação matemática onde através dos valores das variáveis independentes, prevê o valor da variável dependente. Ajusta-se um modelo de regressão para a média de cada uma das variáveis de resposta em função dos fatores controláveis.

No ajuste dos modelos de regressão, utilizam-se níveis codificados dos fatores controláveis, pois isso permite estudar o efeito puro e poder comparar os coeficientes obtidos da regressão, facilitando o ajuste dos modelos. Para a equação

de regressão gerada pelo Minitab®, em virtude da aleatoriedade na definição dos níveis -1 e +1 para os fatores Lubrificante e Estado do Blank os quais são qualitativos, vesse necessário um ajuste no modelo geral representado pela equação 12:

$$F = 2,3333 + 0,0907xL + 0,0793xTEF - 0,1424xTF + 0,0785EB \quad (12)$$

Onde:

F = Força de forjamento obtida [MN];

L = Fator Lubrificante;

TEF = Fator Tempo de Exposição no Forno;

TF = Fator Temperatura de Forjamento;

EB = Fator Estado do Blank.

A partir da Figura 46 é possível verificar, que as combinações que minimizam a utilização da força no processo de forjamento projetam uma força mínima da 1,94 MN, sendo necessária para isso a combinação dos fatores conforme já definido na Otimização da Resposta. O valor de y no gráfico representa o Mínimo da Força em MN correspondente ao processo quando o mesmo for executado nas condições definidas pela linha vermelha do gráfico.

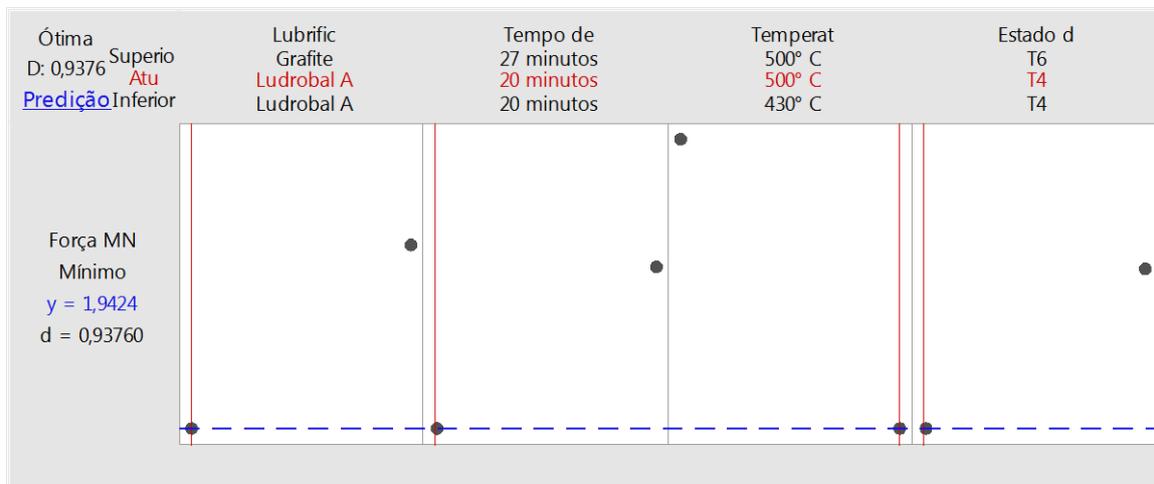


Figura 46 – Gráfico de Resposta Otimizada.
Fonte: Minitab®

5.3 COMPROVAÇÃO E CAPABILIDADE DO PROCESSO

Após a definição da condição ótima de operação, a qual estabeleceu os níveis ótimos dos fatores estudados, a fim de obter a minimização da variável resposta força de forjamento, foi realizada uma sequência de ensaios com o objetivo de efetivamente testar o modelo otimizado e conseqüentemente proposto pelo estudo DoE, verificando desta forma se valores reais obtidos pela força de forjamento em uma análise prática, comprova o valor obtido, a qual estabelece assim uma força mínima projetada de 1,94 MN, comprovando assim o resultado do estudo.

Paralelamente a comprovação do estudo, utilizando-se dos mesmos dados e informações do ensaio de comprovação, optou-se pela avaliação do processo como um todo, sendo assim possível a definição do nível de capacidade do processo, obtida na operação através do cálculo dos respectivos índices de Cp (Índice de Capacidade Potencial) e Cpk (Índice de Capacidade Relativo à Localização).

Desta forma, considerando-se as condições obtidas para a otimização do variável resposta, o estudo de comprovação dos dados foi realizado através da obtenção de uma amostra de peças forjadas em condições definidas pela otimização da operação as quais estabelecem respectivamente a temperatura de forjamento fixada em 500° C, sendo utilizado como lubrificante Lubrodal AT737 com um tempo de exposição no forno de 20 minutos e o blank na condição T4, devido ao fator colocação do lubrificante não representar um fator com nível de significância, a forma de aplicação do mesmo ficou convencionada de forma que o mesmo seja aplicado diretamente na matriz de forjamento quando do momento de conformação de cada amostra.

Com base nos resultados obtidos em 30 forjamentos obteve-se a Tabela 10.

Ao analisarmos os resultados do ensaio de comprovação, verificou-se que a média das forças necessárias para o forjamento das amostras apresentou um valor real médio de 2,05 MN.

Tabela 10 – Forças obtidas 30 amostras

<i>Amostras</i>	<i>F (MN)</i>	<i>Amostras</i>	<i>F (MN)</i>	<i>Amostras</i>	<i>F (MN)</i>
1	2,00	11	1,99	21	1,87
2	2,02	12	1,96	22	2,08
3	2,01	13	1,91	23	2,19
4	1,98	14	2,02	24	2,19
5	1,98	15	2,02	25	2,19
6	2,09	16	1,98	26	2,27
7	2,08	17	1,96	27	2,28
8	1,96	18	1,93	28	2,19
9	2,06	19	1,92	29	2,17
10	1,96	20	1,96	30	2,23
Média			2,05		

Continuamente, avaliando o valor da força projetada obtida pelo estudo DoE, a qual estabeleceu um valor médio de 1,94 MN, comparativamente com o valor real da força obtido através dos ensaios em condições estipuladas pela otimização do estudo DoE, a qual foi obtido o valor médio de 2,05 MN, pode-se verificar uma grande proximidade entre os dois valores, tendo apenas um erro de aproximação de 5,6% - Ver tabela 11.

Tabela 11 – Comparativo de Forças Média – Projetada x Processo Otimizado

<i>Condição</i>	<i>Força MN</i>	<i>Erro de Aproximação</i>
Força Projetada	1,94	
		5,6%
Processo Otimizado	2,05	

Desta forma é possível verificar a comprovação dos resultados em relação ao modelo delineado pelo estudo DoE, uma vez que a força projetada pelo estudo apresentou um erro de apenas 5% em relação a força real obtida pela otimização do processo.

Os estudos de capacidade têm por objetivo verificar se um dado processo atende ou não as especificações de engenharia (do produto). Esta análise costuma ser realizada através do cálculo e interpretação de índices específicos para tal finalidade.

Na realização dos estudos de capacidade, dois cuidados devem ser tomados para que os resultados obtidos tenham sentido, primeiramente o processo deve ser estável (ausência de causas especiais de variação) e sequencialmente os valores individuais devem seguir a distribuição normal.

Se o processo não for estável, não há sentido em se verificar a sua capacidade, pois o mesmo não será previsível quanto ao seu comportamento e, conseqüentemente, não se pode analisar o atendimento as especificações de engenharia com base nas amostras fornecidas por este.

Se a distribuição dos valores individuais do processo não for normal, os índices de capacidade poderão fornecer interpretações errôneas, já que esta é a distribuição assumida no seu cálculo, para uma verificação da condição de normalidade do processo, com auxílio do Minitab® foi realizada uma avaliação de normalidade dos valores obtidos no teste de forjamento para a comprovação do estudo, onde se verificou a não normalidade dos dados coletados através de teste de hipóteses - Anderson-Darling, – ver Figura 47.

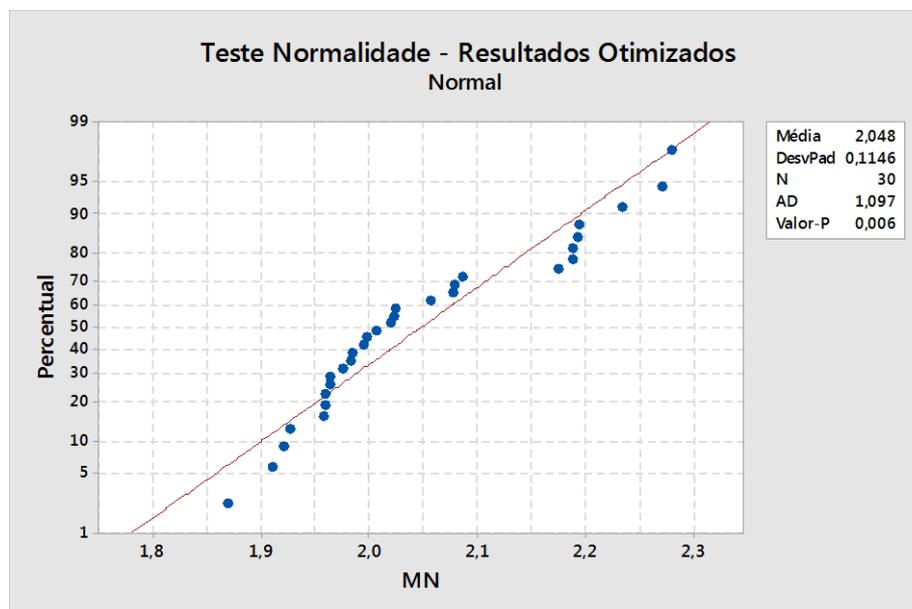


Figura 47 – Teste de Normalidade.
Fonte: Minitab®

A Figura 44 mostra o resultado do teste de Andreson-Darling obtido, como se pode reparar a hipótese de normalidade é rejeitada pelo valor de p menor que 0,05. Sendo assim, os dados devem ser trabalhados como não normais a fim de se não incorrer em erros de super ou subestimar os índices de capacidade.

Uma vez estabelecida a não normalidade, é possível executar ações para tratar os dados não normais a fim de se avaliar sua capacidade. Dentre as opções mais comuns optou-se por realizar a transformação dos dados.

Primeiramente verificou-se a transformação Box-Cox, porém o resultado não foi satisfatório, optou-se então pela análise da capacidade do processo considerando a transformação de Johnson.

Para a realização dos cálculos e a consequente obtenção da capacidade do processo, faz-se necessário relacionar os valores obtidos nos ensaios práticos de comprovação, juntamente com os limites de tolerância estabelecidos pelo processo.

No caso específico da obtenção da força optou-se por estabelecer um estudo unilateral onde devido o processo ser caracterizado como uma variável de resposta tipo “menor melhor”, o limite superior de especificação foi estabelecido conforme a média de força obtida através do cálculo da TEP, valor correspondente a 3,44 MN e consequentemente sem a utilização do limite inferior.

Com a definição destes dados, foi calculado o índice Ppk com auxílio do software Minitab. – Figura 48:

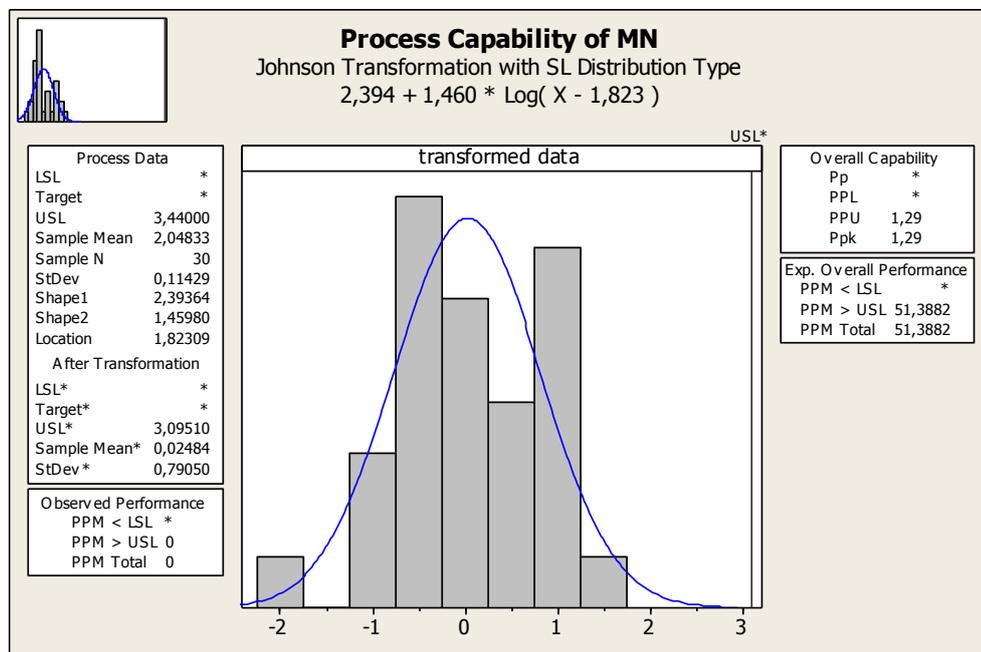


Figura 48 – Capacidade do Processo.
Fonte: Minitab®

O Ppk é o índice de desempenho real do processo, o Ppk fornece uma medida do desempenho real através do desvio-padrão s da amostra em estudo e

não considera o processo centrado na média das especificações, pois o índice é calculado em função da pior metade dos dados.

Se o $Ppk > 1$, isto indica que o processo é capaz de atender a especificação, conforme dados observados, o Ppk obtido na amostra analisada foi 1,29 evidenciando que o processo é capaz.

Desta forma, foi possível estabelecer a conformidade do processo em estudo e a capacidade do mesmo em fornecer peças dentro das especificações definidas pelo cliente, se adotado esta otimização.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstra a capacidade, bem como a real possibilidade da utilização e o consequente direcionamento prático de métodos estatísticos, através da utilização das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos (DoE - Design of Experiments) no processo de forjamento de uma peça.

Adicionalmente as vantagens competitivas obtidas quando da utilização dos sistemas CAD / CAE / CAM na indústria de forjados, a opção pela adoção da ferramenta DoE permite a execução de ações de avaliação e análise durante a fase de projeto e desenvolvimento de um produto forjado, por engenheiros e técnicos de processo e projeto, assim como permite um direcionamento mais eficaz das ações a serem realizadas em um processo de melhoria ou otimização de processos de fabricação já implantados e consolidados.

A visão sistêmica adquirida quando da aplicação do DoE, como pode ser visto ao longo do estudo, permite através de um direcionamento que privilegia um cunho científico, racionalizar a forma de avaliação das variáveis existentes e minimizar a possível perda durante a execução dos ensaios comprobatórios, perdas estas minimizadas pelas quantidades totais de ensaios realizados, pelo tempo necessário para a realização e pela possibilidade de, após a execução dos ensaios, ser possível identificar em um modelo matemático qual a proporção dos componentes que ao final podem proporcionar a obtenção de um produto final considerado ótimo.

O principal objetivo deste trabalho foi demonstrar através de um estudo de caso prático a execução de uma otimização de um processo de forjamento a quente de uma biela confeccionada em Al AA6351, onde através da aplicação prática da ferramenta DoE foi possível mapear por inteiro o processo em questão e de forma ordenada e sistêmica definir os fatores de entrada, tanto os principais como os de ruído e também estabelecer como variável de saída a força de forjamento necessária para a conformação do produto.

Desta forma, o DoE demonstrou que dos cinco fatores estudados, apenas um (Colocação do Lubrificante) não foi comprovadamente classificado como representativo e influente na variável resposta força, os outros quatro de forma independentes e sem interações, representam um nível de significância importante na força de forjamento, cabendo ressaltar que o fator Temperatura de Forjamento

demonstrou maior contribuição desta dentre os outros três fatores os quais apresentam nível de significância similares ou próximos.

Através da aplicação desta condição melhor do processo, foi realizado ensaio para comprovação destas condições onde através da reprodução dos fatores e níveis ótimos estabelecidos pelo estudo DoE foi possível obter uma média de força necessária para forjamento na no valor de 2,05 MN.

Através do ajuste ótimo realizado para este experimento e posteriormente comprovado sua eficácia, definiu-se que o lubrificante utilizado deve ser do tipo Lubrodal AT 737, com um tempo de exposição no forno de 20 minutos combinado com uma temperatura de forjamento de 500° C e o estado do blank de Al na condição T4, a fim de reduzir custos do processo de forjamento.

Basicamente, as metodologias aplicadas proporcionaram uma melhor compreensão sobre as variáveis que exercem influência no processo de forjamento, onde foi possível obter um modelo matemático que representa com precisão esse processo e suas interações. Com isso, existe a possibilidade de melhor compreender os resultados a serem obtidos por este processo quando houver a necessidade de alguma alteração dos parâmetros definidos, onde com o auxílio dos sistemas CAD / CAE / CAM as ações podem deixar de ser caracterizadas como tentativa e erro.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros apresentadas ao longo deste trabalho podem ser resumidas nas seguintes propostas:

- Reavaliar as variáveis de ruído e verificar a possibilidade de inclusão de algumas delas como variável de controle assim possibilitando aumentar a quantidade de fatores e realizar assim uma avaliação mais específica do processo de forjamento;
- Realizar a implantação do estudo em uma empresa que produza peças forjadas a fim de possibilitar uma real otimização de um processo comercial e verificar o valor total otimizado através do DoE;
- Realizar a prática estabelecida neste estudo em um estudo de caso onde posse ser realizado uma avaliação do processo de forjamento de uma peça em aço;
- Expandir o estudo realizado para os processos de conformação de chapas e metalurgia do pó.

8 REFERÊNCIA

Aluminium, A. E. **Aluminium Matter**. Disponível na Internet via <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=1&pageid=1>, 2013. Capturado 29 de maio, 2017.

ANTONY, J. **Desing of Experiments for Engineers and Scientists**. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2003.

AQC - **Annual Quality Congress.**, 2000, Foresight XXI. Disponível na Internet via www.asq.org. Capturado 10 de junho, 2000.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de metais: Fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC-USP, 1999.

AVITZUR, B. **Friction during metal forming**. In: BLAU, J., P. ASM Handbook. 2ª edição, 1995.

BALESTRACCI, D.; BARLOW, J. **Quality improvement: "Data sanity": statistical thinking applied to everyday data**. 2.ed. Englewood: Center for Research in Ambulatory Health and Care Administration, 2007.

BERNARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. **Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments**. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2002.

BESSERIS, G. J. **Multi-response unreplicated-saturated Taguchi designs and superranking in food formulation improvement**. International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, v.26 (4), 2009.

BONDUELLE, A. **Caractérisation du panneau de particules surface mélaminé par son aptitude a l'usinabilité**. Tese de Doutorado, 205p., Université de Nancy I. Nancy, 1994.

BÖESCH P.R.; M. V. **Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão**. Revista Thema, 2011.

BÖRDER, C. **Análise do Coeficiente de Atrito no Ensaio do Anel para o Forjamento à Quente**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BOX, G.; HUNTER, J.S.; HUNTER, W.G. **Statistics for Experimenters—Design, Innovation and Discovery** (2nd edn). Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley: New York, 2005.

BRITO, A.M.G.; PREDIGER, S.A. **Aspectos do levantamento de curvas de escoamento**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 18., 1998, Porto Alegre. II Conferência internacional de forjamento/Brasil, n 9, Porto Alegre, 1998.

BRITO, A. **Análise teórico-experimental dos processos de expansão, redução e inversão de extremidades de tubos de parede fina em matriz.** Tese de doutorado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre/RS, 2006.

BUTTON, S. T. 2005. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado.** São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. Apostila. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila.pdf>. Acesso em: 11/05/2016.

BUENO, A. F.; MARTINS, V.; BÖESCH, P.; MORAES, A.; SCHAEFFER, L. **Avaliação do coeficiente de atrito para liga de alumínio AA6351 pelo método do tubo cônico em comparação com simulação numérica.** ABM, 2011.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação.** 2º ed. Vol. 2. São Paulo: McGraw, 1995.

CHUNG, C.A. **Simulation Modeling Handbook: a practical approach.** Washington D.C: CRC press, 2004.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment.** Technometrics, v.35, n.1, 1993.

CORREA, F. J. **Uso do método dos tubos para calcular esforços compressivos no forjamento em matriz fechada.** Revista Forge (2013), ed. Jan/abril, 2013.

COSTA, C. E. S. **O DoE como Ferramenta da Qualidade para o Desenvolvimento de Produtos a Base de Solo Estabilizado com Rejeitos Industriais.** In: 17º Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Gramado - RS. Anais do 17º ENEGEP, 1997.

DOEGE, E.; BOHNSACK, R. **Closed die technologies for hot forging.** Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v.98, 2000.

FERESHTEH-SANIEE, F.; JAAFARI, M. **Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging.** Journal of Materials Processing Technology, v. 125, 2002.

GABRIELSSON. J.; LINDBERG, N.; LUNDSTEDT, T. **Multivariate Methods in Pharmaceutical Applications.** Journal of Chemometrics, v. 16, 2002.

GALDAMEZ, E. V. C; CARPINETTI, L. C. R. 2004. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica.** Gestão e Produção, 2004.

GIESBRECHT, F. G.; GUMPERTZ, M. L. **Planning, Construction, and Statistical Analysis of Comparative Experiments.** Wiley Series in Probability and Statistics, 2004.

GLYNN, D.; LYONS, G.; MONAGHAN, J. **Forging sequence design using an expert system.** Journal of Material Processing Technology, Amsterdam, v.55, 1995.

HAALAND, P.D.; O'CONNELL, M.A. **Discussion: a systematic approach to planning for a desined industrial experiment**. COLEMAN, D.E.; MONTGOMERY, D.C. *Technometrics*, v.35, n.1, 1993.

HECK, N. C. **Tensão de Escoamento**. DEMET / PPGEM / UFRGS. Acesso em abril de 2013, disponível em Núcleo de Termodinâmica Computacional para Metalurgia: <http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06638/IEM-Texto-6.pdf>, 2013.

HENSEL, A.; SPITTEL, T. **Kraft Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren**. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstffindustrie, 1978.

JOHN, S. K.; JAMES, W. K. **Desing of Experiments an Overview and Application Example**. Medical Device & Diagnostic Industry, 1996.

JÚNIOR, A. L. **Análise da influência das propriedades do material e parâmetros do processo na simulação numérica do processo de forjamento**. Dissertação de mestrado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre/RS, 2007.

KHAMNEH, M. E.; PAYKANI, M. A.; SHAHVERDI, S.; HADAVI, S. M. M.; EMAMI M. **Optimization of spring-back in creep age forming process of 7075 Al-Alclad alloy using D-optimal design of experiment method**. journal homepage: www.elsevier.com/locate/measurement, 2016.

KOBAYASHI, S.; OH, S.; ALTAN, T. **Metal forming and the finite-element method**. New York: Oxford University Press, 1989.

KNOLL, P.; LIMA, D.; SCHAEFFER, L. **Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do Alumínio por ensaio de compressão. Corte e Conformação de Metais**, n. 28, 2007.

LUNDSTEDT, T. E.; Seifert, L. Abramo, B.; Thelin, J.; Nystrom, J.; Pettersen, R. **Bergman Experimental design and optimization Chemom**. *Intell. Lab. Syst.*, 42, 1998.

MARTELLO, L. **Desenvolvimento do Processo de Forjamento da Liga de Alumínio AA6351 com Auxílio de Computação Numérica**. Dissertação de Mestrado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre/RS, 2007.

MARTINS, P.; RODRIGUES, J. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia Da Deformação Plástica** (Vol. II). Lisboa: Escolar Editora, 2005.

MARTINS, V. **Previsão da tensão de escoamento do aço 42CrMo4 em altas temperaturas** - uma revisão. ABM, 2011.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed., New York, John Wiley & Sons, 2005.

MÜLLER, A. **Introdução Histórica aos Processos de Forjaria e Cutelaria e Estudo de Casos Do RGSUL**. Anais da 14ª Conferência Internacional de Forjamento, 2010.

PACHECO, J. L. **Apostila da Disciplina de Fabricação por Deformação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC). Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.

PAIVA, A. P. de. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas**. Universidade Federal de Itajubá - Instituto de Engenharia Mecânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, PR, Brasil, 2006.

PALLÚ, E. **Otimização experimental da purificação do ácido fosfórico por extração líquido-líquido**. Curitiba, PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2005.

RIBEIRO, J. L. D. E.; CATEN, C. S. **Projeto de Experimentos: Série Monográfica Qualidade**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

ROYLANCE, D. **Stress-Strain Curves**. Acesso em 29 de Maio de 2017, disponível em MIT - Massachusetts Institute of Technology: <http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/ss.pdf>, 2001.

SCHAEFER, L. **Conformação Mecânica** – Porto Alegre/RS: Imprensa Livre, 2ª Edição, 2004.

SCHAEFFER, L. – **Forjamento – Introdução ao Processo**. – Editora Imprensa Livre. Porto Alegre, 2001.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**: Editora Imprensa Livre. Porto Alegre, 2016.

SCHAEFFER, L. **Treinamento de Forjamento**: Possibilidades para aumentar a produtividade (Razões para baixar custos). CBCM. Porto Alegre, 2016.

SHREVE. R. N.; BRINK JR. J. A. **Indústria de Processos Químicos**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1997.

SONG, J. H.; IM, Y. T. **Expert system for the process sequence design of a ball stub**. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v. 89-90 (0), 1999.

TUSHMAN, M.; NADLER, D. **Organizando-se para a inovação**. In: STARKEY, K. Como as organizações aprendem. São Paulo: Futura, 1997.

TYNE, C. V. **Materiais para Forjamento Ligas de Al**. Acesso em 18 de Julho de 2017, disponível em <http://www.revistaforge.com.br/artigo/materiais-para-forjamento-ligas-de-aluminio-arteiil/?conteudo=1>, 2012.

VIECELLI, A.; SCHAEFFER L. **Um software para o projeto de matrizes para peças assimétricas com rebarba**. Máquinas e Metais, 1995.

VILLAS BOAS, R. C. **Qualidade na formulação de misturas**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, (Série Qualidade e Produtividade; 1992.

WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Planejamento e Análise de Experimentos: Como Identificar e Avaliar as Principais Variáveis Influentes em um Processo**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, V.8, 1996.

YANG, G.; OSAKADA, K. **A review of expert systems for process planning of cold forging**. Manufacturing Review, New York, v.6, n.2, 1993.

APÊNDICE A - Matriz de Ensaio - Quantidade, Ordem e Fatores dos Ensaio

OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	Lubrificante	Colocação do Lubrificante	Tempo de Exposição no Forno	Temperatura de Forjamento	Estado do Blank	Força MN
17	1	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	430° C	T6	2,44
29	2	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	500° C	T6	2,41
24	3	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	430° C	T6	2,82
1	4	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	430° C	T4	2,17
2	5	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	430° C	T4	2,27
11	6	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	500° C	T4	1,88
20	7	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	430° C	T6	2,72
16	8	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	500° C	T4	2,04
7	9	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	430° C	T4	2,34
3	10	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	430° C	T4	2,17
4	11	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	430° C	T4	2,61
30	12	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	500° C	T6	2,17
5	13	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	430° C	T4	2,30
21	14	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	430° C	T6	2,47
23	15	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	430° C	T6	2,54
14	16	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	500° C	T4	2,54
28	17	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	500° C	T6	2,27
9	18	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	500° C	T4	2,11
31	19	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	500° C	T6	2,17
22	20	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	430° C	T6	2,79
12	21	1	1	Grafite	Blank	20 minutos	500° C	T4	2,14
18	22	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	430° C	T6	2,37
26	23	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	500° C	T6	2,14
27	24	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	500° C	T6	2,17
13	25	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	27 minutos	500° C	T4	2,14
8	26	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	430° C	T4	2,61
6	27	1	1	Grafite	Matriz	27 minutos	430° C	T4	2,72
10	28	1	1	Grafite	Matriz	20 minutos	500° C	T4	2,04
32	29	1	1	Grafite	Blank	27 minutos	500° C	T6	2,54
19	30	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	20 minutos	430° C	T6	2,27
15	31	1	1	Ludrobal AT 737	Blank	27 minutos	500° C	T4	2,00
25	32	1	1	Ludrobal AT 737	Matriz	20 minutos	500° C	T6	2,30