

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

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

PPGE-3M

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE  
PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE UTILIZANDO DOE  
(PROJETO DE EXPERIMENTOS).

Marcelo Fernandes Farias

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2017

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

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

PPGE-3M

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE  
PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE UTILIZANDO DOE  
(PROJETO DE EXPERIMENTOS).

MARCELO FERNANDES FARIAS  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) - UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2017

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

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS RS

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Eduardo Cristiano Milke – IF Sul-rio-grandense

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> José Carlos Krause de Verney – ULBRA RS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

*Dedico este trabalho:  
Minha família pelo estímulo constante para que  
siga sempre em frente apesar das dificuldades.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Dr. Lírio Schaeffer pela disponibilidade e dedicação na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Engº Alberto Moreira Guerreiro Brito, ao bolsista André Rosiak e ao Engenheiro Jerry Adriani Mendelski pelo inestimável apoio na realização dos experimentos.

Ao PPGEM pela oportunidade de acesso ao conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Ao LdTM pela disponibilidade de equipamentos e materiais necessários aos ensaios.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
	2.1 <i>Processo de Forjamento .....</i>	3
	2.2 <i>Forjamento da liga ABNT4140.....</i>	5
	2.3 <i>Aço ABNT 4140.....</i>	6
	2.4 <i>Atrito na ferramenta.....</i>	8
	2.5 <i>Lubrificante.....</i>	10
	2.6 <i>Temperatura.....</i>	11
	2.7 <i>Geometria da Geratriz.....</i>	11
	2.8 <i>Projeto de Experimentos (DOE).....</i>	12
	2.8.1 <i>Conceitos gerais de experimentação.....</i>	15
	2.8.2 <i>Condução dos Experimentos .....</i>	16
	2.8.3 <i>Técnicas de planejamento e análise de experimentos .....</i>	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
	3.1 <i>Equipamentos.....</i>	26
	3.1.1 <i>Prensa .....</i>	26
	3.1.2 <i>Forno de Aquecimento .....</i>	26
	3.2 <i>Matrizes de Forjamento.....</i>	27
	3.3 <i>Sistema de Aquisição de Dados .....</i>	28
	3.4 <i>Materia prima e geratriz de forjamento .....</i>	30
	3.5 <i>Lubrificantes .....</i>	30
	3.6 <i>Sequência de aquecimento e forjamento.....</i>	31
	3.7 <i>Método de Análise DOE.....</i>	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do experimento .....	2
Figura 2 – Diagrama de equilíbrio ferro carbono (CALLISTER, 2008) .....	6
Figura 3 – Modelo geral de um processo ou sistema. Adaptado de (MONTGOMERY, 2005) .....	14
Figura 4 – Gráfico de Efeitos Principais (Planejamento Fatorial $2^k$ ) .....	22
Figura 5 – Gráfico dos Efeitos de Interação.....	22
Figura 6 – Regiões de rejeição e não-rejeição para uma distribuição F. (LEVINE, BERENSON e STEPHAN, 1998) .....	25
Figura 7 – Prensa FKL com capacidade de 6,7MN. ....	26
Figura 8 – Forno Sanchis utilizado nos experimentos .....	27
Figura 9 – Modelo das Matrizes utilizadas. ....	28
Figura 10 – Dimensões básicas em mm da biela forjada .....	28
Figura 11 – Equipamentos para aquisição de dados: a) HBM Spyder 8 b) Computador LG R48 .....	29
Figura 12 – Esquema do sistema de aquisição de força e deslocamento .....	29
Figura 13 – Barra de aço ABNT 4140 seccionada.....	30
Figura 14 – Gráfico do comportamento da temperatura do forno durante o processo de aquecimento das amostras. ....	32
Figura 15 – Disposição dos equipamentos para os ensaios .....	33
Figura 16 – Geratriz sendo posicionada sobre a matriz inferior .....	34
Figura 17 – Biela forjada - Amostra #1 (ensaio #1) .....	38
Figura 18 – Biela forjada - Amostra #2 (ensaio #5) .....	38
Figura 19 – Biela Forjada - Amostra #3 (ensaio #2) .....	39
Figura 20 – Biela Forjada - Amostra #4 (ensaio #7) .....	39
Figura 21 – Biela Forjada - Amostra #5 (ensaio #4) .....	40
Figura 22 – Biela Forjada - Amostra #6 (ensaio #6) .....	40
Figura 23 – Biela Forjada - Amostra #7 (ensaio #3) .....	41
Figura 24 – Biela Forjada - Amostra #8 (ensaio #8) .....	41
Figura 25 – Posição das medições realizadas.....	42
Figura 26 – Diagrama de Efeitos Principais na Força de Prensagem .....	49
Figura 27 – Diagrama de interação de fatores.....	50
Figura 28 – Diagrama de Pareto para efeitos ( $\alpha=0,05$ ) .....	50
Figura 29 – Diagrama de Pareto para efeitos ( $\alpha=0,3$ ) .....	51
Figura 30 – Gráfico de contorno para variável resposta utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6 ..	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas Típicas do Aço AISI 4140 (ASM INTERNATIONAL, 1990). ...	7
Tabela 2 – Composição Química Nominal do Aço AISI 4140 (ASM INTERNATIONAL, 1990) .....	8
Tabela 3 – Experimento Fatorial de Dois Fatores (MONTGOMERY, 2005) .....	18
Tabela 4 - Matriz de Planejamento Para Experimento Fatorial $2^3$ (DEVOR, CHANG e SUTHERLAND (1992).....	19
Tabela 5 – Identificação dos grupos separados por temperatura de forjamento .....	31
Tabela 6 – Fatores e níveis selecionados para o estudo .....	36
Tabela 7 – Medições complementares das peças geradas.....	43
Tabela 8 – Máxima carga de prensagem para cada ensaio.....	43
Tabela 9 – Combinação de níveis geradores da menor força de prensagem.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS

DOE	Desing Of Experiments (Projeto de Experimentos)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e Aço)
CFC	Cúbico de Face Centrada
SAE	Society of Automotive Engineers (Associação de Engenheiros Automotivos)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normatização)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Associação Americana para Testes e Materiais)
JIS	Japanese Industrial Standards (Padrões Industriais Japoneses)
SCM	Steel Construction Manual (Manual de Construção em Aço)
BS	British Standards (Padrão Britânico)
HRC	Hardness Rockwell C (Dureza Rockwell C)
HB	Hardness Brinell (Dureza Brinell)
H0	Hipótese nula
H1	Hipótese alternativa
ANOVA	Análise de Variância
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear (Linear Variable Differential Transformer)
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica - UFRGS

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>m</b>	Fator de atrito	[adimensional]
<b>k</b>	Tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>p</b>	Tensão normal de contato	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>x<sub>n</sub></b>	Fatores controláveis	[ - ]
<b>z<sub>n</sub></b>	Fatores não controláveis	[ - ]
<b>N</b>	Quantidade total de ensaios	[ - ]
<b>k</b>	Número de fatores selecionados para o experimento	[ - ]
<b>C</b>	Número de níveis de cada fator	[ - ]
<b>F</b>	Força de Prensagem	[N]
<b>T<sub>F</sub></b>	Temperatura de Forjamento	[°C]
<b>d</b>	Deslocamento	[mm]
<b>d<sub>G</sub></b>	Diâmetro da Geratriz	[mm]
<b>T<sub>A</sub></b>	Temperatura de Ambiente	[°C]
<b>y</b>	Variável Resposta	[ - ]
<b>a</b>	Quantidade de níveis do fator A	[ - ]
<b>b</b>	Quantidade de níveis do fator B	[ - ]
<b>E</b>	Efeito estimado	[ - ]
<b>h</b>	Espessura da peça Forjada	[mm]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\sigma_e$	Tensão de escoamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_r$	Tensão máxima	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu$	Coefficiente de atrito	[ - ]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\delta$	Alongamento	[%]
$\delta_A$	Redução de área	[%]
$\alpha$	Nível de significância	[ - ]
$\mu$	Média dos resultados	[ - ]
$\tau$	Efeito principal do fator A	[ - ]
$\beta$	Efeito principal do fator B	[ - ]
$\tau\beta$	Efeito da interação dos fatores A e B	[ - ]
$\varepsilon$	Erro experimental	[ - ]
$\gamma$	Efeito principal do fator $x_3$	[ - ]

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Lei de Amonton e Coulomb .....	9
Equação 2 - Lei do atrito constante.....	9
Equação 3 - Modelo estatístico do planejamento fatorial .....	18
Equação 4 - Modelo estatístico do experimento fatorial $2^3$ .....	20
Equação 5 - Equação do efeito estimado .....	21
Equação 6 - Quantidade de ensaios necessários.....	36

## RESUMO

Atualmente o Projeto de Experimentos (DOE) vem sendo largamente utilizado para determinar os fatores de projetos e processos mais significativos afetando uma variável resposta e para estabelecer modelos empíricos entre os fatores, entretanto este método ainda é pouco utilizado e processo de forjamento a quente.

O presente trabalho analisa a influência individual e cumulativa de alguns parâmetros controláveis de um processo de forjamento a quente em matriz fechada na força de prensagem necessária para sua realização. Esta análise foi realizada utilizando a técnica de Projeto de Experimentos (DOE). Para a determinação da influência dos parâmetros de processo selecionados na variável resposta do Projeto de Experimentos (DOE), uma série de ensaios variando o lubrificante utilizado, o diâmetro da geratriz e a temperatura de forjamento foram realizados. A variável resposta para o experimento foi definida como a força de prensagem exigida do equipamento para a realização do forjamento. Para este trabalho foi utilizado o material ABNT 4140 fornecido em barras trefiladas de 28,6mm (1.1/8") posteriormente forjado a quente em matriz fechada. Os resultados mostraram que o fator que mais influencia na força de prensagem para a situação ensaiada é o lubrificante. Os demais fatores, mesmo combinados, não apresentaram uma influência significativa na variável resposta. O presente estudo demonstra que é possível a utilização de técnicas de ajuste e definição de parâmetros de processo de forjamento a quente de maneira confiável e sem a necessidade da aplicação dos complexos programas de simulação computacional e os métodos de tentativa e erro ainda presentes na indústria. Finalmente este trabalho reforça a versatilidade do Projeto de Experimentos (DOE) ainda pouco aplicado em processos de forjamento.

Palavras chaves: Projeto de Experimentos, DOE, Forjamento a Quente

## **ABSTRACT**

Nowadays the Design of Experiments (DOE) has been widely used to determine the most significant project and process factors affecting a response variable and to establish empirical models among the factors, although this method is still little used and the process of hot forging.

This work analyzes the individual and cumulative influence of some controllable parameters in a closed die hot forging process in the pressing force required for its realization. This analysis was performed using a Design of Experiments (DOE) method. To determine the influence of variable factors selected in response Design of Experiments (DOE), a several tests varying the lubricant, the diameter of the billet and the forging temperature was performed. The response variable for the experiment was defined as pressing force. For this study, it was used the ABNT 4140 steel provided in drawn bars of 28,6mm (1 1/8 "). The fator that had more influence over the pressing force was the lubricant. Other factors, whether or not combined, did not show a significant influence on the response variable. This study demonstrates that it is possible use techniques to set hot forging process parameters reliably and without necesside the application of complex computer simulation programs or the trial and error system. Finally, this work reinforces the versatility of Design of Experiments (DOE) wich is still little used in forging processes.

Keywords: Design of Experiments, DOE, Hot Forging

# 1 INTRODUÇÃO

O método de Projeto de Experimentos (DOE<sup>1</sup>,) vem sendo largamente utilizado para determinar os fatores de projetos mais significativos afetando uma variável resposta e para estabelecer modelos empíricos representando o relacionamento entre os fatores significativos (VIJIAN e ARUNACHALAM, 2006). A metodologia utilizada para a obtenção dos resultados foi o Projeto de Experimentos (DOE), que define estatisticamente a contribuição de cada fator analisado no efeito observado.

O forjamento é possivelmente a mais antiga operação de conformação mecânica, na qual também estão inseridos os processos de laminação, trefilação, extrusão, conformação de chapas, etc. No processo de forjamento, basicamente, o material é conformado entre duas matrizes, sob a ação de um maquinário específico (martelos ou prensas), visando adquirir a forma final desejada (HELMAN e CETLIN, 1983).

Os processos de conformação de um modo geral e em especial o forjamento de metais a quente traz uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do material quando comparados com produtos produzidos por outros processos de transformação como a usinagem e a fundição. Entender o efeito das variáveis envolvidas no processo de forjamento é importante para o sucesso e o avanço tecnológico necessário da indústria do forjado (BUENO, MARTINS, *et al.*, 2011).

O aço ABNT 4140 é utilizado em aplicações que requerem combinação de boa resistência mecânica e tenacidade, mas em serviços de moderada severidade. Apresenta média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta (PHILIPS e MCCAFFREY, 1993).

O objetivo principal deste trabalho é apontar qual fator, dentre os fatores analisados, exerce maior influência na força de prensagem no processo de forjamento a quente estudado. Ainda visa demonstrar que ferramentas mais acessíveis, como o DOE, podem ser usadas para a determinação de alguns parâmetros de processo no forjamento a

---

<sup>1</sup> DOE é a designação em lingua inglesa para *Desing Of Experiments* cujo significado é traduzido como Projeto de Experimentos.

quente em matriz fechada como uma alternativa aos complexos e onerosos programas de simulação computacional com bastante sucesso. Esta seria uma opção aos processos de "tentativa e erro" ainda muito usuais em alguns processos industriais.

Para isso foi realizada uma avaliação dos principais fatores controláveis envolvidos em um processo de conformação a quente com relação a sua contribuição na força resultante de prensagem. Na realização deste trabalho foi utilizada a metodologia de Projetos de Experimentos (DOE) conforme ilustrado no diagrama de blocos na Figura 1.

O presente trabalho foi dividido, basicamente em cinco etapas: A primeira propõe uma revisão de literatura que forneceu informações sobre o processo de forjamento, materiais e metodologia envolvidos; A segunda etapa determinou os principais fatores que seriam considerados no presente estudo. A terceira etapa foi a definição de quantos e quais seriam os níveis de cada fator escolhido; A quarta etapa consistiu na realização do experimento físico. E por fim na quinta etapa foi realizado o processamento dos resultados obtidos.

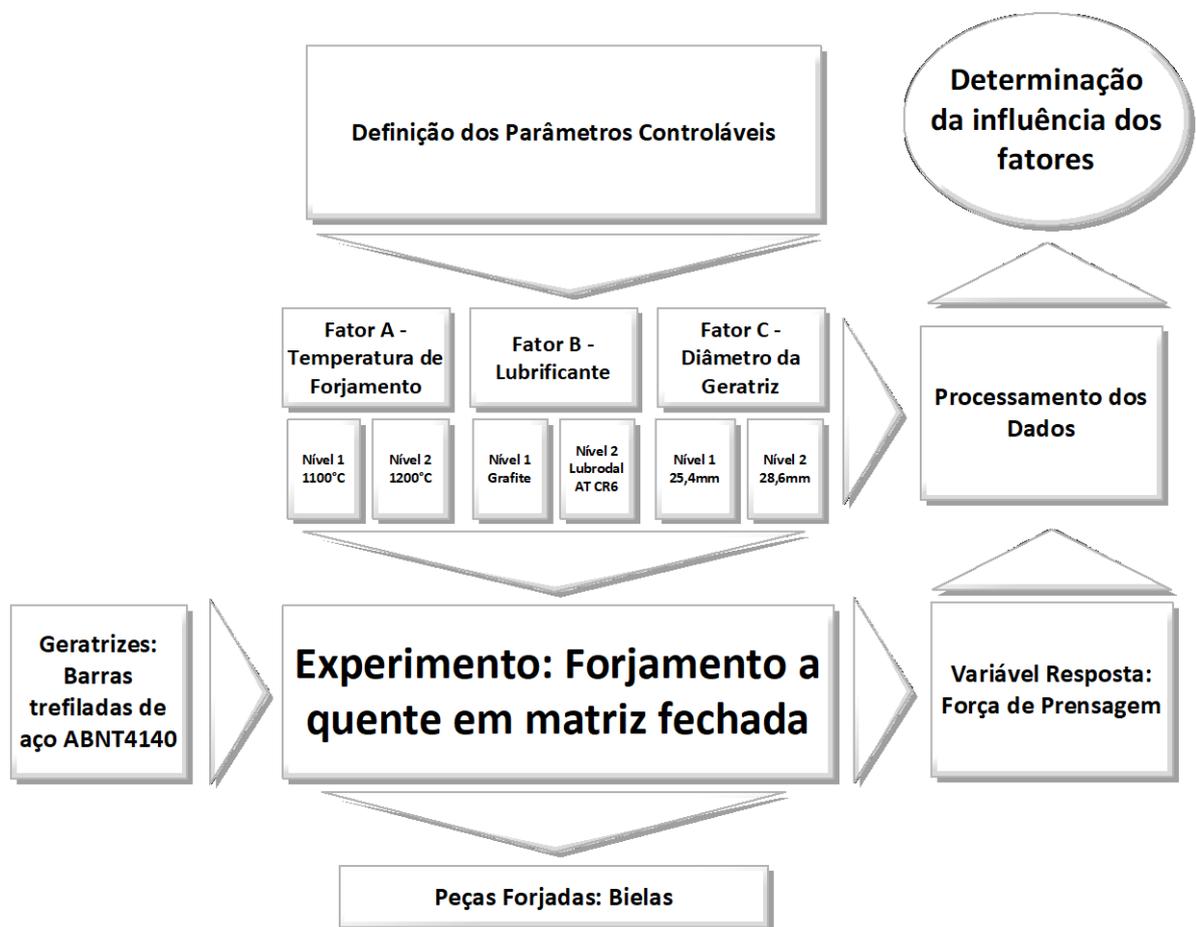


Figura 1 – Diagrama de blocos do experimento

### ***2.1 Processo de Forjamento***

Segundo Müller (MÜLLER, 2010), as primeiras referências à tecnologia da deformação plástica encontram-se no Oriente Médio, no final da idade da pedra. Com a revolução industrial (1760-1840), a necessidade de novos produtos metálicos aumentou significativamente. Também é nesta época em que se constroem os primeiros navios e as locomotivas a vapor, aumentando muito a demanda por novos produtos e impulsionando o desenvolvimento dos processos de transformação mecânica dos metais. O século XX caracterizou-se pelo estudo científico do processo de conformação mecânica. Nesta época inicia-se o ensinamento desta técnica nas universidades, o que trouxe inúmeras contribuições para a sociedade, tais como uso de ligas leves e a utilização 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 (MARTINS e RODRIGUES, 2005).

A indústria do forjamento obteve uma significativa evolução entre as décadas de 1.920 e 1.960 quando foram estabelecidos os primeiros desenvolvimentos científicos a respeito da teoria da plasticidade e tecnologia de materiais. Desde então a ciência é uma importante base econômica para as indústrias de tecnologia de conformação (FERREIRA, 2006).

Em 1971, no Japão, impulsionados pelo crescimento da indústria automotiva, pesquisadores desenvolveram estudos para identificar a viabilidade de produzir forjados a partir de ligas leves em matriz fechada com apenas uma etapa de processo. A busca por economia de material e energia fez com que pesquisadores procurassem alternativas ao processo de usinagem, onde há grande desperdício de matéria prima (YOSHIMURA, 2000).

Forjamento é o processo de conformação de metais no qual uma geratriz é deformada nas mais variadas formas geométricas com grandes deformações plásticas. O processo consiste na deformação plástica de uma geratriz através de sua compressão entre matrizes para a obtenção de uma determinada forma final (KOLLER, SCHAEFFER e OLIVEIRA, 2004). Esse processo pode ser classificado como forjamento em matriz aberta

ou em matriz fechada. No forjamento em matriz aberta, o corpo de prova é conformado entre duas matrizes de geometrias relativamente simples de modo que apenas uma parcela do corpo é conformada pelas matrizes, enquanto que no forjamento em matriz fechada o corpo de prova é completamente envolvido pelas matrizes. No primeiro caso o material conformado escoia de forma livre, já no segundo caso o material escoia de forma restrita pelas matrizes que envolvem o material (SCHAEFFER, 2001).

O forjamento, juntamente com a fundição e usinagem, são os três processos de fabricação mais utilizados na produção de artigos metálicos (ASM HANDBOOK, 1993).

No forjamento convencional de bielas o material desperdiçado com a rebarba é de cerca de 20% a 40% da peça original. No forjamento sem rebarba, a distribuição do volume da pré-forma deve ser controlada com precisão para evitar sobrecarregar as matrizes e a cavidade. Adicionalmente, o pré-molde deve ser suficientemente simples para ser produzido em massa (VAZQUEZ e ALTAN, 2000).

A escolha do modo a ser empregado, matriz fechada ou aberta, dependerá da geometria da peça e do nível de precisão requerido da mesma. Existem casos em que a utilização dos dois modos se faz necessário, sendo nestas situações empregado o forjamento em matriz aberta como um pré-recalque, ou aproximação da geometria para o forjamento em matriz fechada (FERREIRA, 2006).

Os processos de conformação de um modo geral e em especial o forjamento de metais a quente traz uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do material quando comparados com produtos produzidos por outros processos de transformação como a usinagem e a fundição. Entender o efeito das variáveis envolvidas no processo de forjamento é importante para o sucesso e o avanço tecnológico necessário da indústria do forjado. As propriedades mecânicas obtidas pelo processo de forjamento garantem uma condição ideal para diversos tipos de peças, que necessitam de alta resistência e possuem geometrias complexas (BÖRDER, 2005).

Diversos pesquisadores têm usado diferentes métodos de análise para estudar o fluxo de metal durante o processo de conformação mecânica e estimar a carga de forjamento requerida para a operação. Esses métodos podem ser classificados como métodos analítico e numérico. Os resultados dos métodos experimentais vêm com o propósito de validar esses métodos em questão. Entretanto, tanto métodos matemáticos

como numéricos têm como propósito reduzir o custo dos experimentos (FERESHTEH-SANIEE e JAAFARI, 2002).

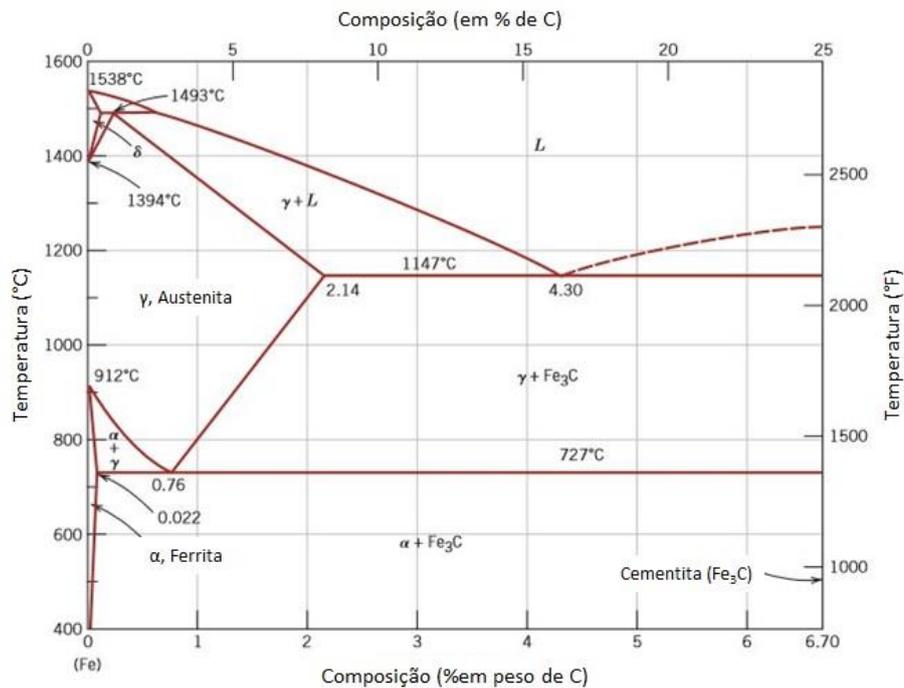
A fabricação de componentes através do processo de forjamento caracteriza-se pelo grande aproveitamento da matéria-prima e pela produção econômica de produtos que exigem propriedades mecânicas e tolerâncias dimensionais (SCHAEFFER, 2006).

No forjamento a durabilidade de uma ferramenta e o fluxo do material na zona de deformação são influenciados por uma série de fatores como, por exemplo, a tensão de escoamento, a velocidade de deformação, a deformação, o atrito entre material e ferramenta e sua geometria (SCHAEFFER, 2006).

## **2.2 Forjamento da liga ABNT4140**

As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da sua estrutura cristalina e do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados. O diagrama de fases apresentado na Figura 2 é o alicerce sobre o qual todo o tratamento do aço é baseado. Este diagrama define a composição das regiões de temperatura em que as várias fases em aço estão estáveis, assim como os limites de equilíbrio entre os campos de fase (KRAUSS, 1994).

A Figura 2 mostra o diagrama ferro carbono até 6,7% de carbono, embora os aços sejam considerados apenas na região até 2,11% de carbono. Regiões com valor de carbono acima de 2,11% compreendem os ferros fundidos. Nos aços, há uma importante região denominada campo austenítico onde, independentemente da porcentagem de carbono do aço, a microestrutura é composta da fase austenita -  $\gamma$ , apresentando uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Esta microestrutura, uma vez resfriada, pode se transformar em outras, as quais, dependendo da velocidade de resfriamento poderão alterar diversas propriedades mecânicas (CALLISTER, 2008).



**Figura 2 – Diagrama de equilíbrio ferro carbonado (CALLISTER, 2008)**

Aumentando-se a velocidade de resfriamento, os microconstituintes resultantes adquirem feições diferentes que afetam propriedades dos aços. Há uma velocidade de resfriamento, denominada velocidade crítica, na qual os constituintes normais não são formados e o único microconstituente resultante da transformação da austenita é a martensita, que possui uma estrutura totalmente diferente dos outros constituintes, e consequentemente, propriedades também diferentes. Portanto, o diagrama de equilíbrio é limitado, pois alguns dos tratamentos térmicos são especificadamente intencionados à produção de estruturas fora do equilíbrio, as quais não podem ser previstas neste diagrama (SILVA, 2012).

### 2.3 Aço ABNT 4140

De uma forma geral, os materiais utilizados na fabricação de peças forjadas são aços de baixa e média liga, pode-se citar os aços baixa liga da família 41XX. Os aços desta família são ligados ao Cromo (~1%) e ao Molibdênio (~0,2%) atingindo alta resistência através de tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Os principais aços desta família são ABNT 4130, 4140 e 4145, sendo o segundo muito empregado na produção de peças automotivas (LIMA, 2006).

O aço ABNT 4140 também é definido como AISI 4140, SAE 4140, DIN 1.7225, ASTM 4140, JIS G 4105-79 Tipo SCM 440, BS 970: Part 2: 1988 Tipo 708M40 e suas principais propriedades mecânicas são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Propriedades Mecânicas Típicas do Aço AISI 4140 (ASM INTERNATIONAL, 1990).**

<b>Temperatura de Revenimento</b>	<b>Tensão de Escoamento (<math>\sigma_e</math>)</b>	<b>Tensão Máxima (<math>\sigma_r</math>)</b>	<b>Alongamento (<math>\delta</math>)</b>	<b>Redução de Área (<math>\delta_A</math>)</b>	<b>Dureza HB</b>	<b>Energia de Impacto J</b>
°C	MPa	MPa	%	%	HB	J
205	1740	1965	11,0	42	578	15
315	1570	1720	11,5	46	495	9
425	1340	1450	15,0	50	429	28
540	1050	1150	17,5	55	341	65
650	790	900	21,0	61	277	112

Revenimento por no mínimo ½ à 2 horas à temperaturas entre 175°C e 230°C para alta tensão de resistência ou entre 385°C e 705°C para tensão de escoamento abaixo de 1380MPa; resfriamento em ar ou água.

Os aços da família 41XX são amplamente utilizados na indústria, não somente em equipamentos de baixo custo, mas também em equipamentos de alta responsabilidade que requerem tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa, podendo alcançar um limite de resistência à tração de até 1650 MPa, que pode ser obtido através de tratamentos térmicos convencionais (SILVA, 2012). Este aço tem grande aplicação na construção mecânica e automotiva em componentes que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, como virabrequins, bielas, braços, juntas, engrenagens, eixos e componentes para equipamentos de produção e perfuração de petróleo (VILLARES METALS, 2004).

Os principais aços da família são AISI 4130, 4140 e 4145, sendo os dois últimos os mais aplicados na indústria metal-mecânica (ASM INTERNATIONAL, 1990). O aço AISI 4140 pode assumir os teores de carbono entre 0,3% e 0,5%. Este aço, também chamado de aço-cromo-molibdênio é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento, podendo ser usado em temperaturas relativamente altas de até 480°C, pois acima disso sua resistência diminui rapidamente com o aumento da temperatura. O aço AISI 4140 possui características tais como alta temperabilidade, má soldabilidade e usinabilidade razoável; além disso, apresenta boa resistência à torção e à fadiga e a dureza na condição temperada varia de 54 a 59 HRC. (ROCHA, TAVARES, *et al.*, 2004).

A Tabela 2 mostra a composição química nominal para o aço AISI 4140 onde é mostrado o percentual de cromo e molibdênio.

**Tabela 2 – Composição Química Nominal do Aço AISI 4140 (ASM INTERNATIONAL, 1990)**

<b>Composição Nominal (%)</b>				
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
0,38 ~ 0,43	0,75 ~ 1,00	0,20 ~ 0,35	0,8 ~ 1,10	0,15 ~ 0,25

#### **2.4 Atrito na ferramenta**

O atrito interfacial peça-matriz durante o forjamento a quente interfere diretamente na vida das matrizes, qualidade do produto e capacidade dos equipamentos empregados no processo. Para amenizar os efeitos do atrito são adicionadas finas películas de lubrificantes, os quais apresentam baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz visando reduzir as tensões que se opõe ao escoamento do material (MARTINS e SCHAEFFER, 2009).

De acordo com Bueno (BUENO, MARTINS, *et al.*, 2011), nos processos de conformação de metais aplica-se uma pressão nas matrizes que é transmitida para o material que encontra-se alojado entre elas. Realizando tal deformação se obtém um movimento relativo entre o ferramental e a geratriz, é nesta interface que se observa o atrito. Podem-se verificar três tipos básicos de lubrificação que regem a condição de atrito em conformação mecânica para metais, são elas: Condição a seco (sem lubrificante); condição hidrodinâmica (camada espessa de lubrificante na interface); lubrificação de contorno (lubrificação intermediária entre as anteriores) (KOLLER, SCHAEFFER e OLIVEIRA, 2004).

No caso de forjamento o atrito é indesejado, pois influencia o acabamento superficial das peças, diminui a vida das ferramentas e aumenta as exigências do processo em termos de potência. Segundo Boesch (BÖESCH JÚNIOR, MARTINS e SCHAEFFER, 2011), é difícil medir o atrito, apesar de existirem muitos testes para este fim. Além disso, poucos testes são adequados para aplicações de forjamento a quente.

Conforme Boesch (BÖESCH JÚNIOR, MARTINS e SCHAEFFER, 2011), para obter uma descrição matemática de atrito interfacial que ocorre no processo de conformação, são aplicadas as seguintes leis e teorias sobre o atrito:

1. Lei de Amonton e Coulomb

$$\tau = \mu p \quad \mu > 0 \quad \text{Equação 1}$$

onde  $\tau$  representa a tensão de cisalhamento,  $\mu$  representa o coeficiente de atrito e  $p$  representa tensão normal de contato entre as superfícies.

2. Lei do atrito constante, onde  $m$  representa o fator de atrito ou fator de proporcionalidade e varia de 0 (condições de atrito nulo) a 1 (condições de atrito máximo geralmente com ocorrência de adesão do material na ferramenta,  $k$  corresponde à tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro do material.

$$\tau = mk, \quad 0 < m \leq 1 \quad \text{Equação 2}$$

3. Teorias de adesão, que levam em consideração a rugosidade real de contato das superfícies

No primeiro modelo, o atrito é proporcional à pressão normal  $p$ , e a proporcionalidade medida é expressa através do coeficiente de atrito  $\mu$ . O atrito tem importância apenas em áreas de pequena pressão normal. O segundo modelo de atrito assume a tensão de cisalhamento constante de atrito de contato superficial, proporcional ao coeficiente de atrito  $m$  que, na realidade, é o caso da existência de grandes pressões normais. Tem sido apontado, em muitos artigos que tratam de atrito, que ambas as leis não têm o significado geral (BÖESCH JÚNIOR, MARTINS e SCHAEFFER, 2011).

O coeficiente de atrito e o desgaste em processos de conformação dependem basicamente de três parâmetros: materiais envolvidos, topografia dos corpos e condições de trabalho (FERREIRA, 2006).

Conforme Bueno (BUENO, MARTINS, *et al.*, 2011), entre os inúmeros métodos de ensaio para a determinação do atrito entre superfícies pode-se citar o ensaio do anel descrito por Kunogi (RUDKINS, HARTLEY, *et al.*, 1996) e o ensaio do tubo cônico proposto por Kopp e Phillip (KOPP e PHILLIP, 1992).

## 2.5 *Lubrificante*

Para uma boa lubrificação durante o processo, os lubrificantes, de maneira geral, devem apresentar características especiais que ajudam na melhora e evolução do processo, pois para obter uma melhor qualidade da superfície de peça forjada deve-se pensar em diminuir o atrito e por consequência o desgaste do ferramental. Por isso faz-se necessário a avaliação dos lubrificantes pela quantificação do atrito, avaliando se o mesmo é adequado a um material e às temperaturas do processo ao qual o material será submetido (MARTINS e SCHAEFFER, 2009).

A característica mais importante da lubrificação na conformação de metais é a possibilidade de associá-la a um dado processo em função dos diferentes regimes de lubrificação. Em cada regime, diferentes fatores físico-químicos a controlam. Distintos regimes podem ocorrer como resultado de pequenas mudanças nas propriedades do lubrificante e do material de trabalho, velocidade, temperatura, geometria ou rugosidade superficial. Além disso, diversos regimes podem coexistir em diferentes localizações na interface peça-ferramenta ou se sucederem em certa região na medida em que o processo ocorre (WILSON, 1979).

Segundo Geier (GEIER, 2007), há três regimes básicos de lubrificação aplicados aos processos de conformação:

- Lubrificação Hidrodinâmica – Através de utilização de um fluido viscoso, uma película é formada entre a ferramenta e a geratriz de modo a eliminar totalmente o contato entre ambas;
- Lubrificação de Fronteira – Regime de lubrificação em que há regiões onde existe o contato da ferramenta com a geratriz e outras zonas protegidas por uma camada de espessura molecular de lubrificante;
- Lubrificação Através de Película Sólida – Separação completa das superfícies através da presença de uma película sólida.

Os três tipos básicos de regimes de lubrificação regem as condições de atrito na conformação de metais, em cada regime diferentes fatores físico-químicos controlam a lubrificação. Pequenas mudanças nas propriedades do lubrificante e do material de

trabalho, além da velocidade do processo, temperatura, geometria e rugosidade superficial podem resultar em regimes diferentes de lubrificação (GEIER, 2007).

O regime de lubrificação através de película sólida é caracterizado pela separação completa das duas superfícies através de uma película sólida com baixa resistência aos esforços de corte decorrentes do movimento relativo entre as duas superfícies. Os principais lubrificantes correlacionados a este mecanismo de lubrificação são as massas a base de grafite ou de bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) e certos tipos de materiais poliméricos, dos quais se destacam o Teflon<sup>®</sup> e o polietileno (GEIER, 2007).

## ***2.6 Temperatura***

Nos processos de conformação mecânica, o atrito e a deformação plástica contribuem para a geração de calor. A maior parte da energia mecânica envolvida é transformada em calor. As temperaturas desenvolvidas no processo influenciam as condições de lubrificação, a vida da ferramenta e as propriedades do produto final, e, mais significativamente, determinam a velocidade máxima de deformação, a qual pode ser usada para produzir bons componentes sem danificar as ferramentas. Em virtude disso, é importante analisar e escolher a temperatura ideal para o forjamento da peça, pois ela influencia de forma significativa a produtividade do processo (ALTAN, OH e GEGEL, 1999).

Segundo os principais fabricantes do aço SAE4140, sua temperatura de forjamento é 925°C e 1220°C.

## ***2.7 Geometria da Geratriz***

Uma operação de forjamento em matriz fechada deve garantir o preenchimento completo das cavidades das matrizes, sem que, por deficiências no escoamento do material, apareçam defeitos na peça forjada. Nestas condições, é sempre muito pouco provável que uma peça de geometria complexa possa ser fabricada numa única operação de forjamento a partir de uma matéria-prima em forma de barra. Estes casos exigem, quase sempre, a realização de operações intermediárias, durante as quais a geometria e as

dimensões do componente vão sendo progressivamente aproximadas à forma final desejada (MARTINS e RODRIGUES, 2005).

Caparolli (CAPAROLLI, GILENO e BUTTONS, 1998) salienta que a escolha da geometria adequada da geratriz não é uma tarefa fácil. Ela é uma das etapas que mais dificuldades apresenta na especificação de um processo industrial de forjamento a quente. Isso se deve porque, no decorrer da operação de forjamento em matriz fechada, o material deve distribuir-se no interior das matrizes de modo a satisfazer os seguintes requisitos:

- 1- Garantir o escoamento do material sem que ocorram defeitos internos e sobreposições;
- 2- Assegurar o preenchimento completo das cavidades das matrizes;
- 3- Minimizar as perdas de material para rebarba;
- 4- Diminuir o desgaste da matriz de acabamento, reduzindo ou evitando o movimento relativo do material nas interfaces de contato com a matriz;
- 5- Assegurar as propriedades metalúrgicas e as características mecânicas especificadas para a peça final.

## ***2.8 Projeto de Experimentos (DOE)***

Projeto de Experimentos (DOE) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas para reduzir o número de experiências, a fim de encontrar o efeito dos parâmetros que afetam a uma resposta em um processo, visando assim para uma redução em custos e tempo (ASLAN, 2007).

Técnicas de DOE são usadas em muitos campos da ciência e engenharia para lidar com questões relacionadas com a otimização de parâmetros. Basicamente, assegura a obtenção do máximo de informações relevantes através de uma avaliação de desempenho executando o menor número possível de experimentos (ERICKSON, 2008).

O Projeto de Experimentos, DOE, foi desenvolvido na década de 1920 pelo Sir R. A. Fisher<sup>2</sup>, na Rothamsted Agricultural Field Research Station, em Londres, Reino Unido (ROWLANDS e ANTONY, 2003). Muitas pesquisas e desenvolvimento do Projeto de Experimentos (DOE) foram realizados, principalmente, na indústria química, depois de

---

<sup>2</sup> Sir Ronald Aylmer Fisher, FRS (Londres, 17 de fevereiro de 1890 — Adelaide, 29 de julho de 1962) foi um estatístico, biólogo evolutivo e geneticista inglês. Foi descrito por Anders Hald como "um gênio que criou praticamente sozinho as fundações para a moderna ciência estatística" e Richard Dawkins, que o descreveu como "o maior dos sucessores de Darwin".

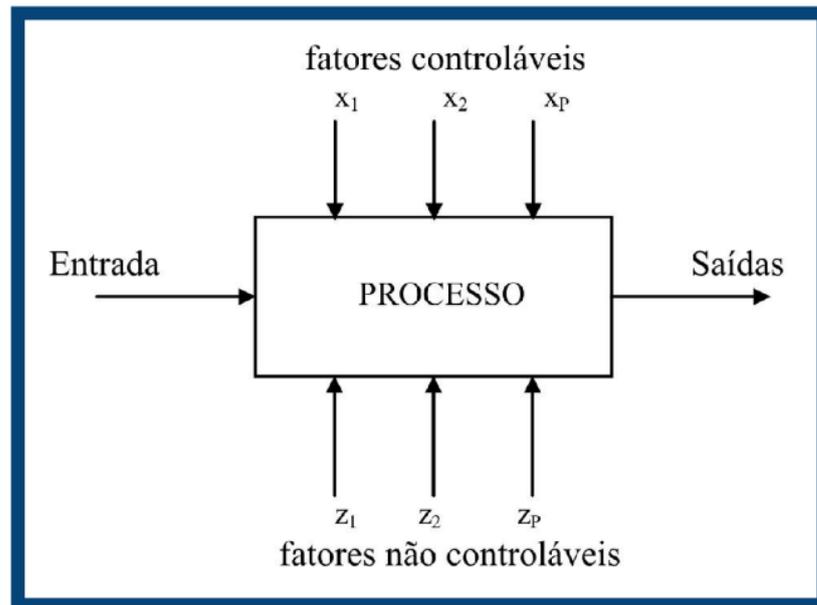
Fisher ter introduzido a técnica e demonstrado o seu uso na agricultura (ROWLANDS e ANTONY, 2003). Fisher introduziu os princípios estatísticos dentro do planejamento de experimentos, incluindo o conceito de planejamento fatorial e a análise da variância. Embora tenha se iniciado em 1930, essa metodologia tornou-se mais conhecida por volta de 1951, através do estudo sobre superfície de resposta, desenvolvido por Box e Wilson (MONTGOMERY, 2005).

O Projeto de Experimentos tem o objetivo de validar o relacionamento entre os parâmetros do processo e suas variáveis de resposta correspondentes, e, portanto, para identificar os parâmetros críticos que têm uma significativa contribuição para influenciar as funções de resposta. Dentro deste contexto, o método de concepção experimental de DOE é uma metodologia viável que não só oferece a grande quantidade de informação com o número mínimo de ensaios, mas também estabelece relações funcionais entre as variáveis de entrada e de saída (GHANI, HASAN e CHOUDHURY, 2004).

Um experimento é um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações (WERKEMA, 1996).

Quando se torna importante investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por dois ou mais fatores de controle e, cada um deles com dois ou mais níveis de regulagens, MONTGOMERY (2005) recomenda o uso de técnicas clássicas de planejamento, como por exemplo: técnica de planejamento fatorial completo, fatorial fracionado ou experimentos com pontos centrais.

O processo, ou sistema, pode ser representado pelo modelo mostrado na Figura 3. É possível visualizar, o processo como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas ou outros recursos que transformam algumas entradas em uma saída que tem uma ou mais variáveis-respostas observadas. Algumas das variáveis de processo são controláveis, sendo outras não-controláveis (MONTGOMERY, 2005).



**Figura 3 – Modelo geral de um processo ou sistema. Adaptado de (MONTGOMERY, 2005)**

Os objetivos do experimento para processos podem incluir:

1. Determinação de quais variáveis  $x$  mais influenciam a resposta  $y$  (MONTGOMERY, 2005).
2. Determinação de intervalos de valores para os itens de verificação associados aos fatores controláveis  $x$ 's, de modo a obter cada item de controle centrado no valor nominal e com uma variabilidade mínima em torno desse valor.
3. Determinação de intervalos de valores para os itens de verificação associados aos fatores controláveis  $x$ 's, as quais minimizam as ações dos fatores não-controláveis  $z$ 's sobre os itens de controle do processo (MONTGOMERY, 2005).

As seguintes diretrizes para a utilização da metodologia de projeto de experimentos são propostas por MONTGOMERY (2005):

- Definição do problema ou objeto de estudo;
- Escolha dos fatores e seus níveis. Devem ser selecionados os fatores que devem variar, os intervalos sobre os quais esses fatores variarão e os níveis específicos nos quais cada ensaio será executado. Quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é geralmente melhor manter baixo o número de níveis de fatores.

- Seleção da variável-resposta. Na seleção da variável-resposta deve-se ter certeza de que aquela variável realmente fornece informação sobre o processo.
- Planejamento do experimento. A escolha do tipo de planejamento envolve consideração sobre o tamanho da amostra (número de replicações), seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais e se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas.
- Realização do experimento. Deve-se assegurar que tudo esteja sendo feito conforme o planejamento.
- Análise de dados. Se o experimento foi planejado corretamente e realizado conforme o planejado, então os métodos estatísticos exigidos para a análise não serão complexos.
- Finalizando o procedimento. Devem-se elaborar as conclusões e recomendações.

Comportamentos não lineares de parâmetros de processos podem ser determinados se mais de dois níveis em determinado fator forem utilizados (SYRCOS, 2003).

### 2.8.1 Conceitos gerais de experimentação

Alguns conceitos e termos fundamentais para a aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos são mostrados a seguir (MONTGOMERY, 2005) (WERKEMA, 1996).

**Variáveis de resposta:** são as variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Nos experimentos, podem existir uma ou mais variáveis de resposta ( $y$ ) que são importantes de se avaliar.

**Fatores de Controle:** estes são os fatores alterados deliberadamente no experimento. O objetivo principal de introduzir estímulos nos fatores de controle é avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso poder determinar os principais fatores do processo. Nos experimentos, os fatores podem ser representados por números arábicos (1, 2, 3...) ou por letras (A, B, C...).

**Fatores de Ruído:** são os fatores, conhecidos ou não, que influenciam nas variáveis de resposta do experimento. Cuidados especiais devem ser tomados na hora de realizar os testes com esses fatores, pois, é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores de controle, fiquem misturados com os efeitos provocados pelos fatores de ruído.

**Níveis dos fatores:** são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. No caso de experimentos com dois níveis de fatores, os níveis são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1).

### 2.8.2 Condução dos Experimentos

Estabelecer o planejamento dos testes antes de iniciar qualquer experimentação é importante. MONTGOMERY (2005) e WERKEMA (1996) destacam que o processo seja cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com os planos, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados.

**Parâmetros do experimento:** esta fase envolve a coleta de informações técnicas do produto ou processo de fabricação, onde devem ser listados todos os fatores de controle, fatores de ruído, os níveis de ajustagem e as variáveis de resposta. Nessa fase, segundo MONTGOMERY (2005), as informações técnicas podem resultar de uma combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo.

**Fatores de controle e das variáveis de resposta:** nesta fase devem-se selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), as faixas de variação dos níveis desses fatores e as respostas do experimento (variáveis dependentes), assim como, definir o método de medição dos fatores de controle para se avaliar as respostas do experimento definidas nas fases anteriores.

**Realização do experimento:** nesta etapa é importante que o processo seja executado conforme planejado. Outro aspecto importante que deve ser considerado durante a realização dos experimentos, é o equilíbrio dos recursos de experimentação disponíveis (MONTGOMERY, 2005).

**Análise de dados:** nesta etapa podem ser utilizados softwares estatísticos (MINITAB, EXCEL, STATISTICA), que ajudam a usar as técnicas de planejamento e análise de experimentos e os gráficos lineares (MONTGOMERY, 2005).

Os conceitos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento, para descrever o comportamento das variáveis de controle, a relação entre elas e para estimar os efeitos produzidos nas respostas observadas. A análise estatística permite tomar decisões quanto a aceitar ou rejeitar as hipóteses ( $H_0$ ) e ( $H_1$ ) formuladas na primeira etapa dos experimentos.

**Interpretação dos resultados:** Nesta etapa devem-se extrair as conclusões práticas dos resultados. Uma prática comum nesta fase é descrever os resultados através de gráficos e diagramas.

É importante ressaltar que não é a intenção deste trabalho, abordar todas as técnicas que existem na literatura. Outras formas de planejar e analisar experimentos industriais são descritas por MONTGOMERY (2005) e WERKEMA (1996).

### **2.8.3 Técnicas de planejamento e análise de experimentos**

Os experimentos devem ser planejados em uma matriz experimental. O objetivo dessa atividade é garantir que as informações obtidas sejam confiáveis e que os recursos (equipamentos, pessoas, materiais e informações) disponíveis para experimentação sejam bem utilizados (MONTGOMERY, 2005 e WERKEMA, 1996).

#### **2.8.3.1 Planejamento Fatorial**

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 escolhida.

Para o entendimento desta técnica considera-se um experimento com dois fatores (A e B) onde cada um desses parâmetros serão testados com  $a$  níveis para o fator A e  $b$  níveis para o fator B. Assim, nesse experimento existem  $ab$  combinações de teste. A matriz de planejamento para o experimento fatorial de dois fatores de controle, nos níveis  $a$  e  $b$ , é

representada na Tabela 3. Essa organização também representa o caso geral do experimento fatorial de dois fatores, para uma resposta ( $y_{ijk}$ ) observada quando o fator A está no  $i$ -ésimo nível ( $i = 1, 2, \dots, a$ ). É importante ressaltar que as  $abn$  observações do experimento devem ser realizadas aleatoriamente (MONTGOMERY, 2005).

**Tabela 3 – Experimento Fatorial de Dois Fatores (MONTGOMERY, 2005)**

		Fator B			
		1	2	...	$b$
Fator A	Níveis				
	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	:	:	:		:
$a$	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$	...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$	

Segundo MONTGOMERY (2005) e DEVOR et al. (1992) com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se:

- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator A;
- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator B;
- a interação dos fatores (coluna $\times$ linha) altera significativamente a resposta.

Os autores também definem que o modelo estatístico do planejamento fatorial é dado pela equação (3).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Equação 3}$$

onde,

$\mu$  é a média dos resultados

$\tau_i$  é o efeito principal do fator A,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator B,

$(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação dos fatores A e B;

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental

Um dos métodos que pode ser utilizado para determinar os coeficientes da equação (1) é a Análise de Variância (ANOVA), que também pode ser utilizada para verificar se esses efeitos são significativos nas repostas.

No presente trabalho, não serão abordados os testes executados em três níveis ou mais, entretanto no planejamento de experimentos fatoriais é comum encontrar experimentos planejados com as técnicas fatoriais três ou mais níveis.

### 2.8.3.2 Planejamento fatorial $2^k$

Um experimento fatorial com  $k$  fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado de experimento fatorial  $2^k$ . O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental para determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação (WERKEMA, 1996).

Para demonstrar esta técnica considere-se um experimento com três fatores ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ), cada um desses parâmetros foi testado com dois níveis (-1, +1). Esse exemplo é apresentado por vários autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos (DEVOR, CHANG e SUTHERLAND, 1992).

Assim, a matriz de planejamento para o experimento fatorial  $2^3$  é representada pela Tabela 4. A resposta de cada ensaio é descrita pela coluna Resposta ( $y_i$ ). É importante ressaltar que a ordem de realização do teste é definida aleatoriamente.

**Tabela 4 - Matriz de Planejamento Para Experimento Fatorial  $2^3$  (DEVOR, CHANG e SUTHERLAND (1992))**

N Teste	Fatores de controle			Ordem do Teste	Resposta ( $y_i$ )
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		
1	-1	-1	-1	6	$y_1$
2	+1	-1	-1	8	$y_2$
3	-1	+1	-1	1	$y_3$
4	+1	+1	-1	2	$y_4$
5	-1	-1	+1	5	$y_5$
6	+1	-1	+1	3	$y_6$
7	-1	+1	+1	4	$y_7$
8	+1	+1	+1	7	$y_8$

O procedimento que pode ser utilizado para construir a matriz genérica do experimento fatorial  $2^k$  é descrito por DEVOR, CHANG e SUTHERLAND (1992).

Na matriz de planejamento as colunas representam o conjunto de fatores investigados ( $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_k$ ), e as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações dos fatores (níveis codificados -1 (mínimo) e +1 (máximo)).

1. Para  $x_1$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^0 = 1$ .
2. Para  $x_2$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^1 = 2$ .
3. Para  $x_3$ , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, ....., ou seja, o sinal dessa coluna alterna em grupos de  $2^2 = 4$ .
4. Para  $x_4$ , o sinal alterna em grupos de oito ( $2^3 = 8$ ).
5. O procedimento será igual para  $x_5, x_6, \dots, x_k$ . Para  $x_k$ , o sinal alterna em grupos de  $2^{(k-1)}$ , ou seja,  $2^{(k-1)}$  vezes (-1), seguido de  $2^{(k-1)}$  vezes (+1).

Segundo MONTGOMERY (2005), o modelo estatístico do experimento fatorial  $2^3$  é dado pela equação (4).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Equação 4}$$

sendo que,

$\mu$  é a média dos resultados

$\tau_i$  é o efeito principal do fator  $x_1$ ,

$\beta_j$  é o efeito principal do fator  $x_2$ ,

$\gamma_k$  é o efeito principal do  $x_3$ ,

$(\tau\beta_{ij})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ ,

$(\tau\gamma_{ik})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_3$ ,

$(\beta\gamma_{jk})$  é o efeito de interação entre os fatores  $x_2$  e  $x_3$ ,

$(\tau\beta\gamma_{ijk})$  é o efeito de interação dos fatores  $x_1, x_2$  e  $x_3$ ,

$\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental

Os efeitos principais correspondem à mudança da resposta média quando o nível de um fator é alterado de (-1) para (+1), mantendo os outros fatores constantes. O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna  $y_i$  pelos valores  $\pm 1$  associados a coluna  $x_i$  da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar. Em seguida, os valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados, conforme é ilustrado pela equação (5).

$$E_i = \sum y_i * x_i / (N/2) \quad \text{Equação 5}$$

sendo que  $E_i$  será o efeito estimado,  $N$  é o número total de observações,  $\sum y_i * x_i$  é a soma dos resultados ( $y_i$ ) do experimento multiplicados pela coluna  $x_i$ .

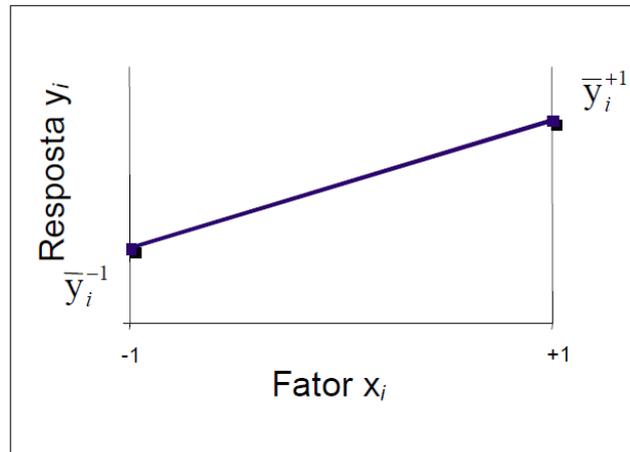
Para determinar o efeito de interação, primeiramente devem ser construídas as colunas das interações da matriz de planejamento. Essas colunas são formadas por meio da multiplicação das colunas dos efeitos principais. Por exemplo, para estimar o efeito de interação  $E_{12}$ , serão multiplicadas as colunas dos fatores  $x_1$  e  $x_2$ . Em seguida, os valores  $\pm 1$  associados à coluna  $x_1 x_2$  da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interação, conforme descrito anteriormente pela equação (5).

Nesta etapa dos experimentos alguns autores comentam que embora seja simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil definir qual é realmente o fator de controle que produz uma diferença significativa nas respostas e na maioria das vezes necessita-se usar os gráficos lineares que representam os efeitos principais e de interação (DEVOR, CHANG e SUTHERLAND, 1992) (MONTGOMERY, 2005). Nessa fase do procedimento experimental podem ser utilizados diferentes softwares para construir os gráficos (planilha EXCEL, STATISTICA, MINITAB).

Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interação é necessário definir duas propriedades, conforme segue (DEVOR, CHANG e SUTHERLAND, 1992).

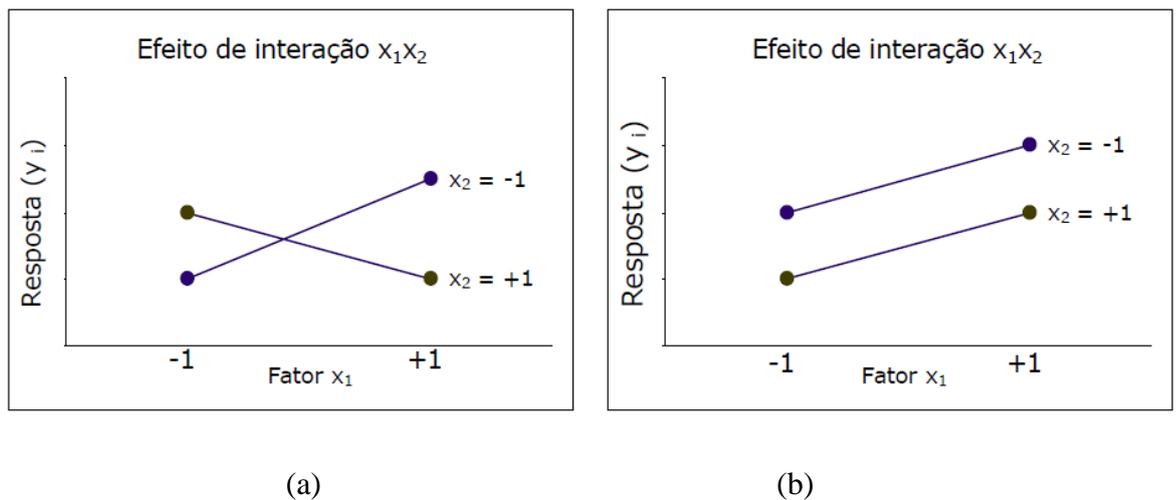
- O sinal ( $\pm$ ) indica a direção do efeito, isto é, se a resposta aumenta ou decresce com a variação do nível de (-1) para (+1);
- A magnitude indica a intensidade do efeito.

A forma gráfica do efeito principal ( $E_i$ ) é representado pela Figura 4. Esse gráfico linear ilustra a variação média das respostas em função da mudança no nível (-1, +1) de um fator ( $x_i$ ), mantendo os outros fatores constantes.



**Figura 4 – Gráfico de Efeitos Principais (Planejamento Fatorial  $2^k$ )**

Os gráficos dos efeitos de interação descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores. Por exemplo, a Figura 5 (a) ilustra que o efeito provocado pela mudança de nível do fator  $x_1$  na resposta depende do nível do fator  $x_2$ , portanto, existe interação entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$ . A Figura 5 (b) demonstra que o efeito provocado pela mudança do nível do fator  $x_1$  na resposta é independente do nível do fator  $x_2$ , portanto não existe interação entre esses fatores.



**Figura 5 – Gráfico dos Efeitos de Interação**

Uma das principais vantagens da técnica fatorial  $2^k$  é que através da análise dos experimentos pode-se indicar as principais tendências e determinar uma direção promissora para as experimentações subsequentes (MONTGOMERY, 2005).

Algumas das limitações da técnica de fatorial  $2^k$  são apresentadas a seguir:

- com esse tipo de técnica de planejamento de experimento não é possível obter informações dos fatores em níveis intermediários;
- em alguns experimentos não é possível realizar replicas, porque na maioria das vezes os custos de experimentação são elevados, com isso os erros experimentais não podem ser estimados;
- não é suficiente avaliar os efeitos significativos apenas sob o ponto de vista estatístico, mas torna-se necessário avaliá-los também em termos práticos;
- torna-se inviável utilizar a técnica quando existe um número grande de fatores;
- ao utilizar essa técnica existe o risco de construir e planejar experimentos super dimensionados, uma vez que, são considerados vários fatores para realizar os testes.

### **2.8.3.3 Análise de variância do experimento fatorial $2^k$**

As técnicas estatísticas de experimentos são utilizadas, principalmente, para analisar, interpretar e apresentar as informações de experimentos planejados. Ainda, são ferramentas que ajudam a melhorar o desempenho de produtos e processos de fabricação (BOWER, 1992). O princípio básico das técnicas é usar os conceitos matemáticos de estatística e as informações obtidas dos experimentos realizados com os produtos ou os processos de fabricação. Com os dados analisados matematicamente e com os testes planejados corretamente é possível rejeitar ou aceitar as hipóteses formuladas para o experimento.

DEVOR, CHANG e SUTHERLAND (1992) e MONTGOMERY (2005) propõem uma metodologia ou uma série de passos que podem ser utilizados para conduzir o teste de

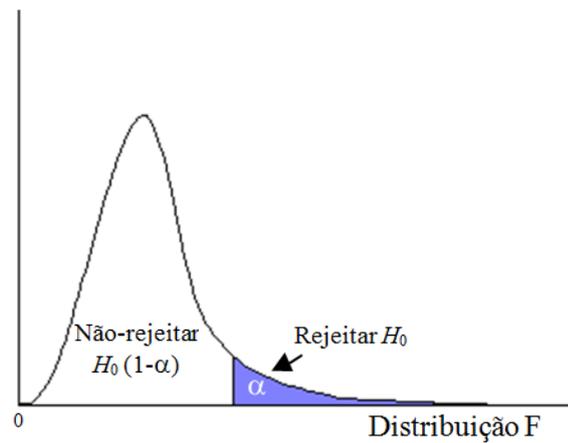
hipótese dos experimentos. Alguns conceitos e pontos importantes desse procedimento são abordados a seguir:

**Formulação das hipóteses:** ao realizar um experimento deve-se partir de duas hipóteses sobre determinado(s) parâmetro(s). A primeira é a hipótese nula ( $H_0$ ). Essa hipótese parte do princípio que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a hipótese testada no experimento. A segunda é a hipótese alternativa ( $H_1$ ) e parte do princípio que será verdadeira caso a hipótese nula seja considerada falsa.

**Determinar o valor crítico da estatística de teste:** ao desenvolver as hipóteses dos experimentos é necessário que seja calculada uma estatística específica, com base em um determinado resultado da amostra. Tais valores podem ser determinados com o auxílio de softwares estatísticos.

**Riscos na tomada de decisão por meio da metodologia do teste de hipótese:** ao utilizar uma estatística para se concluir sobre o resultado de experimentos industriais podem ser cometidos dois tipos de erros: O primeiro erro, tipo I, ocorre se a hipótese nula for rejeita quando ela é verdadeira e o segundo erro, tipo II, ocorre quando a hipótese nula não é rejeitada sendo falsa. No entanto, ao realizar os experimentos pode-se estimar alguns parâmetros que reduzem a probabilidade de errar nas decisões ou chegar a uma conclusão incorreta sobre os fatores que influenciam o sistema investigado, conforme segue (LEVINE, BERENSON e STEPHAN, 1998):

- Nível de significância. A probabilidade de se cometer o erro de rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) quando ela é verdadeira é identificada como o nível de significância ( $\alpha$ ) do teste estatístico. Geralmente, pode-se controlar a probabilidade do erro decidindo o nível de risco  $\alpha$  que estão dispostos a tolerar, em termos de rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira. Com isso, os valores críticos que dividem as regiões de rejeição e não-rejeição podem ser determinados, conforme apresentado pela Figura 6, para a estatística F.



**Figura 6 – Regiões de rejeição e não-rejeição para uma distribuição F. (LEVINE, BERENSON e STEPHAN, 1998)**

- O coeficiente de confiança. O complemento da probabilidade de um erro tipo I é denominado de coeficiente de confiança, que é identificado como  $(1 - \alpha)$ . Quando esse termo é multiplicado por 100% passa a identificar o nível de confiança do experimento.

A análise de variância é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos. O objetivo dessa técnica é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos (principais e de interação) significativos nas respostas de um sistema.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Equipamentos

##### 3.1.1 Prensa

Os forjamentos a quente foram executados com o uso de uma prensa hidráulica da marca FKL com capacidade carga de 6,7MN e velocidade de prensagem de aproximadamente 7,7mm/s. A prensa utilizada nos ensaios é mostrada na Figura 7.

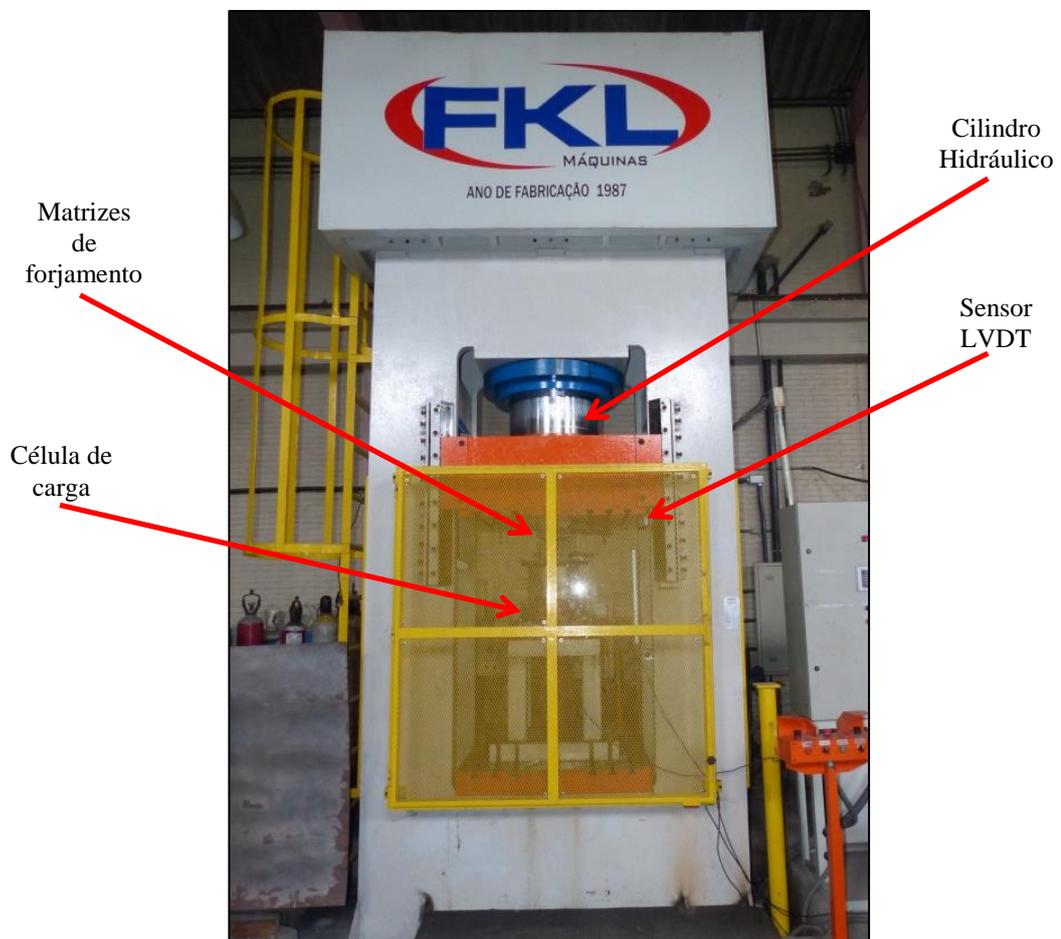


Figura 7 – Prensa FKL com capacidade de 6,7MN.

##### 3.1.2 Forno de Aquecimento

Para o processo de aquecimento das geratrizes foi utilizado um forno resistivo fabricado pela empresa Sanchis com temperatura máxima de trabalho de 1250°C.

O monitoramento da temperatura interna do forno foi realizado utilizando indicação de temperatura do painel do forno. O forno utilizado nos experimentos é mostrado na Figura 8.



**Figura 8 – Forno Sanchis utilizado nos experimentos**

### ***3.2 Matrizes de Forjamento***

Para a realização dos ensaios foi utilizado um conjunto de matrizes para o forjamento didático de uma biela. Embora o conjunto de matrizes já tenha sido utilizado em vários trabalhos, ainda apresentava boa condição de utilização.

As matrizes foram confeccionadas no material AISI H13 que é uma liga de cromo-molibidênio-vanádio cuja grande dispersão de carbeto devido ao percentual de vanádio (1%) confere a matriz boa resistência ao desgaste, ductilidade, resistência ao impacto e fadiga térmica.

Para a preparação da prensa para o forjamento, o alinhamento entre as matrizes foi observado para que não influenciasse nos resultados obtidos. Dois pinos guias atuavam entre as matrizes para eliminar a possibilidade de movimentos relativos entre elas, minimizando a ocorrência de deslocamentos durante o processo de conformação e assim evitando a geração de defeitos geométricos na peça.

A Figura 9 mostra esquematicamente as matrizes utilizadas no trabalho modeladas em software 3D com uma geratriz cilíndrica posicionada entre a matriz inferior e superior.

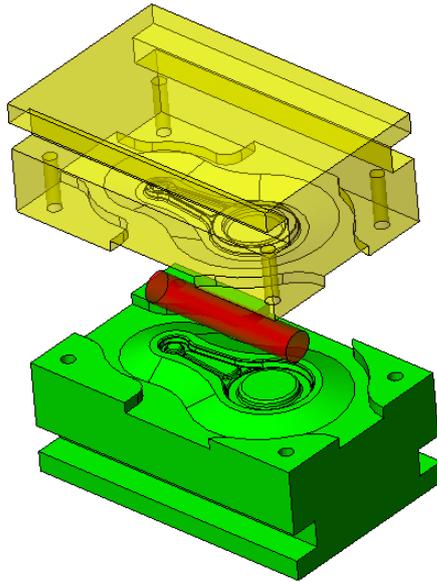


Figura 9 – Modelo das Matrizes utilizadas.

O conjunto de matrizes gera uma peça a cada ciclo. As dimensões de referência da biela formada entre as matrizes são mostradas na Figura 10.

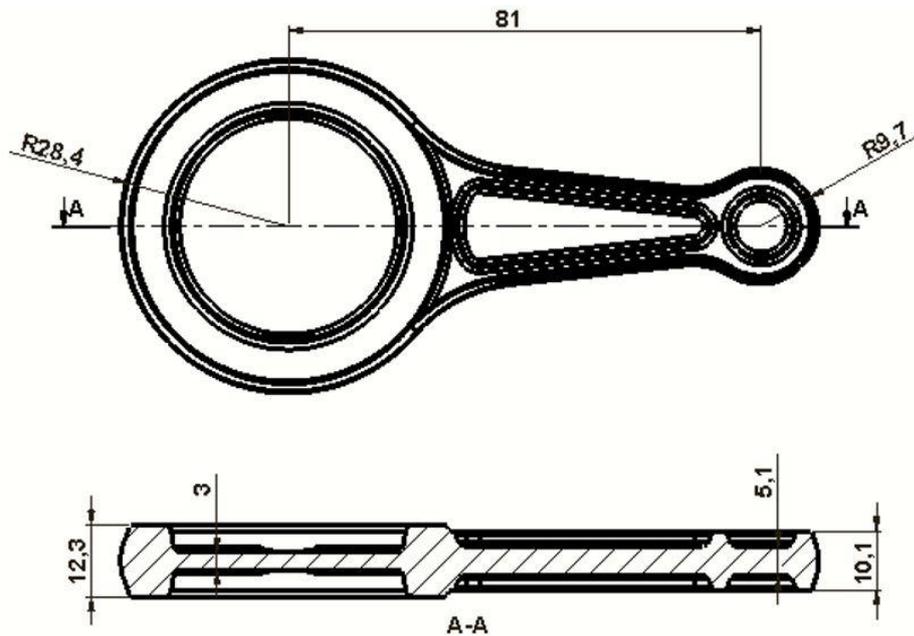


Figura 10 – Dimensões básicas em mm da biela forjada

### 3.3 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi possível com a utilização da instrumentação disponível na prensa sendo um sensor LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear) fabricado pela

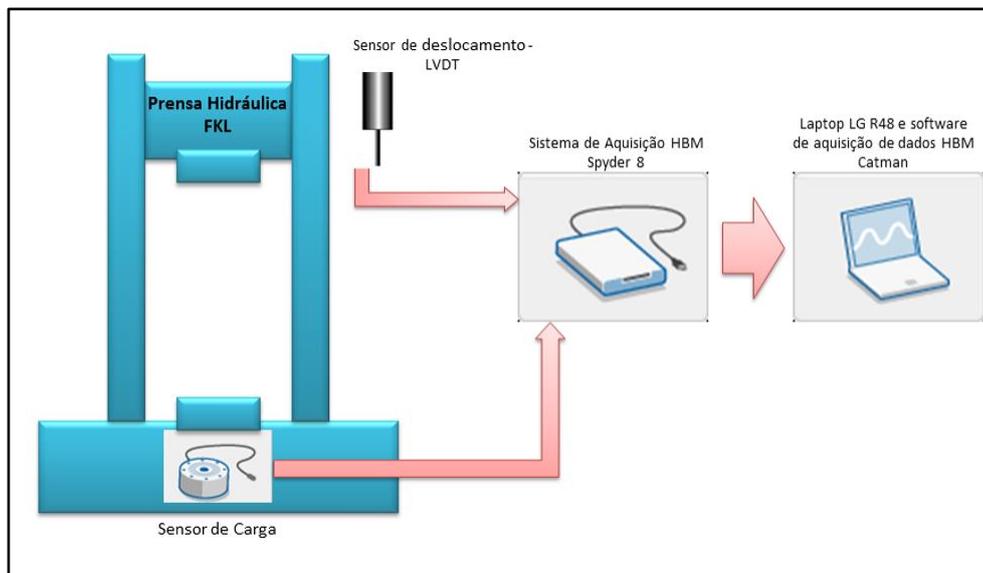
empresa Mitutoyo para o monitoramento do deslocamento do pistão hidráulico e uma célula de carga de ponte completa, confeccionada internamente pelo próprio LdTM, montado junto à matriz inferior para a aquisição dos sinais relacionados com a força de prensagem.

Os sinais elétricos dos sensores são decodificados pelo equipamento HBM Spyder 8<sup>®</sup>, transferidos para o computador portátil LG R48 e tratados pelo programa HBM Catman<sup>®</sup> instalado conforme mostrado na Figura 11. Este equipamento é capaz de ler e processar, simultaneamente, diversos tipos de sinais, possibilitando assim, a aquisição em lote dos dados para a determinação da máxima força de prensagem.



**Figura 11 – Equipamentos para aquisição de dados: a) HBM Spyder 8 b) Computador LG R48**

A Figura 12 ilustra de maneira simplificada a montagem e relação entre os equipamentos utilizados na aquisição dos dados de força e deslocamento.



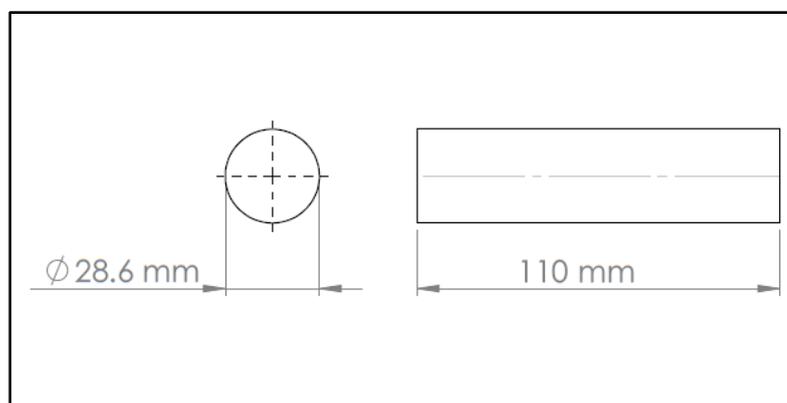
**Figura 12 – Esquema do sistema de aquisição de força e deslocamento**

### 3.4 *Materia prima e geratriz de forjamento*

Por ser um material comumente utilizado em processos de forjamento a quente e de fácil aquisição, a matéria prima utilizada para a construção das geratrizes para o experimento foi o aço ABNT 4140 fornecido na forma de barras trefilada no diâmetro de 28,6mm (1.1/8").

Primeiramente a barra foi seccionada em oito seções de  $110\text{mm}_{\pm 0,10}$  de comprimento utilizando uma serra polycorte refrigerada, conforme mostrado na Figura 13. As barras cortadas foram divididas em dois grupos de quatro amostras cada. O primeiro grupo manteve seu diâmetro original inalterado,  $28,6\text{mm}_{+0,00/-0,13}$  (1.1/8"), sendo identificadas de 1 a 4. O segundo grupo do lote de barras seccionadas teve seu diâmetro rebaixado em torno mecânico até atingir o valor de  $25,4\text{mm}_{\pm 0,10}$  (1") a fim de gerar o grupo de geratrizes com o diâmetro menor considerado neste estudo, sendo numeradas de 5 a 8. Nenhuma das amostras teve seu comprimento de  $110\text{mm}_{\pm 0,10}$  alterado. Esta dimensão foi mantida, não sendo considerado um fator analisado neste trabalho.

O acabamento superficial das geratrizes não foi considerado como parâmetro controlado neste estudo. Sua influência colabora na incerteza da resposta do DOE.



**Figura 13 – Barra de aço ABNT 4140 seccionada**

### 3.5 *Lubrificantes*

Os lubrificantes utilizados no experimento foram o Grafite em Pó da marca Vonder com granulometria 100 e o lubrificante Lubrodal AT CR6 (TB-200) fabricado pela empresa Fuchs do Brasil S/A.

### 3.6 Sequência de aquecimento e forjamento

Nos ensaios nos quais foi utilizado o lubrificante Lubrodal AT CR6, este foi aplicado manualmente nas superfícies do ferramental superior e inferior com um pincel momentos antes do processo de conformação a quente e repetido para cada ensaio realizado.

Após alcançar a temperatura determinada para o ensaio no interior do forno resistivo as geratrizes que utilizaram grafite como lubrificante eram retiradas do forno, cobertas com grafite, tinham o excesso de lubrificante removido e eram imediatamente transferidas para a prensa onde a geratriz era posicionada sobre a face da matriz inferior. Adicionalmente grafite era aplicado com um pincel nas superfícies das matrizes previamente a cada ensaio.

Consecutivamente e em ordem aleatória, exceto pelo agrupamento por temperatura os ensaios foram realizados em dois grupos, conforme Tabela 5. Visando manter uma estabilidade na temperatura do forno, primeiramente foi realizado o forjamento das geratrizes em temperatura de 1100°C, denominado Grupo A e posteriormente o forjamento das geratrizes em temperatura de 1200°C, denominado Grupo B.

A temperatura ambiente foi tomada apenas como informação e não foi considerada como fator no DOE proposto.

**Tabela 5 – Identificação dos grupos separados por temperatura de forjamento**

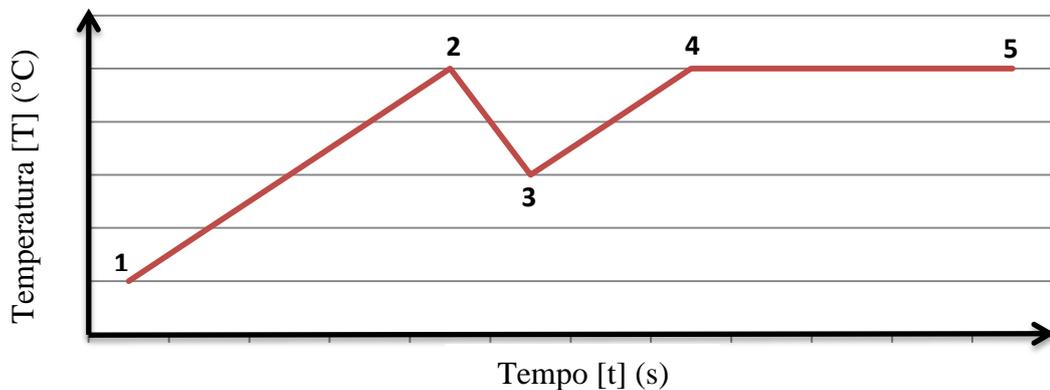
Grupo	Ordem dos Ensaios	# Geratriz	Fator A – Temperatura de Forjamento [T <sub>F</sub> ](°C)	Fator B – Lubrificante	Fator C - Diâmetro Geratriz [d <sub>G</sub> ](mm)	Temp. Amb [T <sub>A</sub> ](°C)
A	1	1	1100	Grafite	28,6	12
A	2	3	1100	Lubrodal AT CR6	28,6	12
A	3	7	1100	Grafite	25,4	12
A	4	5	1100	Lubrodal AT CR6	25,4	12
B	5	2	1200	Grafite	28,6	13
B	6	6	1200	Grafite	25,4	13
B	7	4	1200	Lubrodal AT CR6	28,6	13
B	8	8	1200	Lubrodal AT CR6	25,4	13

Para a execução dos ensaios foi definido que as geratrizes não deveriam permanecer menos que 10 minutos no interior do forno visando garantir um tempo mínimo para assegurar o aquecimento integral da geratriz e não somente da sua superfície. Após

atingir as temperaturas de 1100°C ou 1200°C, de acordo com o ensaio a ser executado, as geratrizes foram mantidas no forno resistivo por um período entre 15 e 18 minutos.

Após o forno resistivo vazio atingir a temperatura determinada para cada grupo de ensaio, 1100°C para as amostras do Grupo A e 1200°C para amostras do Grupo B, de acordo com o planejamento do Projeto de Experimentos (DOE) as peças referentes aos dois primeiros ensaios foram introduzidas. Durante este processo há uma queda de temperatura interna do forno devido à abertura e fechamento da porta então foi definido aguardar a recuperação da temperatura do forno até o nível desejado para que se iniciasse a contagem do tempo das geratrizes em forno.

O ciclo de aquecimento do forno é mostrado qualitativamente na Figura 14.



**Figura 14 – Gráfico do comportamento da temperatura do forno durante o processo de aquecimento das amostras.**

Onde os pontos assinalados na Figura 14 representam os seguintes eventos:

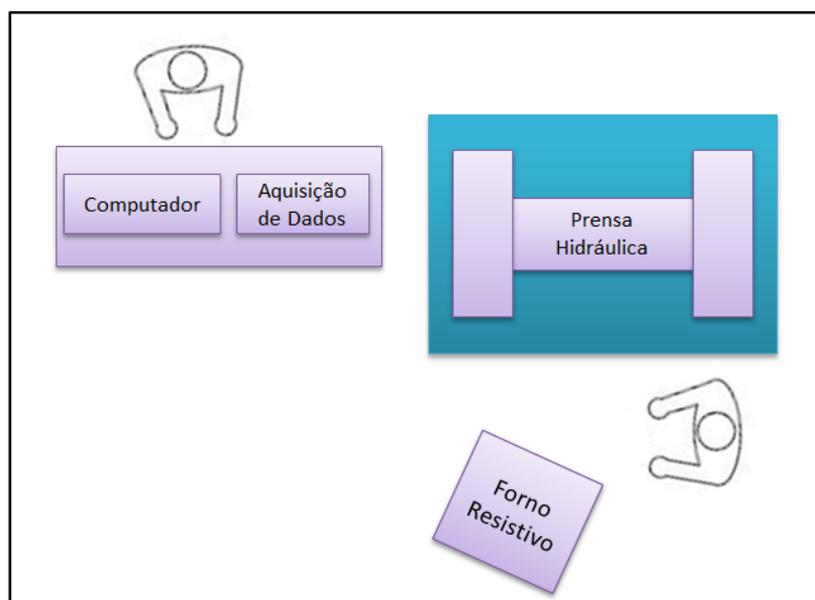
1. Início do aquecimento do forno vazio;
2. Ao atingir a temperatura determinada para o ensaio a porta é aberta para a introdução das amostras;
3. As amostras são introduzidas no forno e a porta é fechada;
4. Após alcançar a temperatura correta, esta temperatura é mantida constante e se inicia o monitoramento do tempo até a retirada da amostra do forno;
5. O forno é aberto e a amostra é removida do forno e transferida imediatamente para a prensa;

Na prensa hidráulica foram montadas as matrizes correspondentes à peça desejada e alinhadas aproximando as matrizes superior e inferior ainda não totalmente fixadas. Depois de alinhadas as matrizes foram fixadas à máquina através de grampos de fixação.

Após a fixação as matrizes foram pré-aquecidas utilizando um bloco de aço aquecido no forno resistivo por pelo menos 20 minutos. Depois do período de aquecimento, o bloco era transferido do forno resistivo até a prensa onde era preso entre as matrizes. Este procedimento foi capaz de elevar a temperatura superficial das matrizes até cerca de 80°C visando evitar danos às matrizes durante o processo de conformação.

Todos os ensaios foram realizados em temperaturas ambiente entre 12°C e 13°C.

A fim de reduzir o tempo de transporte das matrizes entre a saída do forno e o processo de conformação na prensa, o forno resistivo foi posicionado próximo à prensa. A Figura 15 mostra a disposição espacial aproximada dos equipamentos.



**Figura 15 – Disposição dos equipamentos para os ensaios**

Com os equipamentos montados e prontos para os ensaios foi realizada uma linearização dos sensores de medição envolvidos. Durante a execução destes, os dados de carga e deslocamento na prensa hidráulica eram colhidos simultaneamente pelo operador através do sistema de aquisição de dados montado ao lado do equipamento.

Para cada um dos testes, usando uma tenaz conforme mostrado na Figura 16, as geratrizes foram removidas do forno e posicionadas sobre a parte inferior da matriz onde seu alinhamento foi cuidadosamente observado.



**Figura 16 – Geratriz sendo posicionada sobre a matriz inferior**

Após a realização de cada ensaio, a peça forjada era removida da prensa e a matriz era limpa com um pincel, verificada quanto sua integridade e quanto a sua condição para o próximo teste.

As peças forjadas foram identificadas, fotografadas e analisadas quanto à presença de defeitos.

Os dados de força e deslocamento foram recolhidos para processamento posterior onde foi utilizada para esta investigação e apresentação dos resultados a versão de teste do software Minitab<sup>®</sup> 17.

### ***3.7 Método de Análise DOE***

No seu estudo utilizando DOE, Walter (WALTERS, WU, *et al.*, 2017) considerou fatores como temperaturas de matriz e geratriz, posição do extrator, diâmetro da geratriz entre outras variáveis.

Para a determinação dos fatores que mais influenciam o processo de forjamento a quente neste estudo, foi utilizada a técnica de DOE baseado nas principais etapas

preconizados por Colleman (COLEMAN e MONTEGOMERY, 1993) para o Projeto de Experimentos:

- Caracterização do problema
- Escolha dos fatores de influência e níveis
- Seleção das variáveis de resposta
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento
- Condução do experimento
- Análise dos dados
- Conclusões e recomendações

Tendo em vista que se tratava de uma investigação sobre fatores que mais influenciavam uma variável resposta e não exatamente motivado por um problema, o presente estudo não considerou a etapa "Caracterização do Problema". As demais etapas foram seguidas para o desenvolvimento do trabalho.

Seguindo a metodologia do Projeto de Experimentos (DOE), para a análise da influência de fatores controláveis nos valores de carga máxima de prensagem do processo de conformação a quente foram selecionados fatores relacionados com o atrito entre a geratriz e a superfície das matrizes, temperaturas de conformação e geometria da geratriz. Posteriormente foram elencados os níveis de cada um dos fatores selecionados.

Os níveis para as temperaturas de forjamento envolvidos na análise foram 1100°C e 1200°C. A temperatura inferior, 1100°C, está próxima ao limite recomendado para forjamento a quente para o aço AISI 4140. Já a temperatura superior, 1200°C, foi definida por ser a temperatura limite de trabalho para o forno utilizado nos experimentos.

Os lubrificantes eleitos para o trabalho foram o Lubrodal AT CR6, fabricado pela empresa Fuchs do Brasil SA e o Grafite em pó fabricado pela empresa Vonder. Ambos os lubrificantes foram escolhidos para o experimento pela facilidade de obtenção e sua grande utilização em processos de forjamento a quente.

O fator relacionado com a geometria da geratriz foi o seu diâmetro. Para este experimento foram considerados os diâmetros da geratriz de 28,6mm e 25,4mm correspondendo respectivamente a 1 1/8" e 1".

Os diâmetros das geratrizes elencadas como níveis do fator geometria são dimensões comerciais bastante comuns no mercado e coerentes com as dimensões da figura das matrizes de forjamento.

Para a determinação do diâmetro da menor geratriz capaz de preencher a cavidade das matrizes, foi calculada maior área da secção perpendicular à peça, acrescentado um percentual de 5% de rebarba resultando em 491mm<sup>3</sup>. Para que houvesse um preenchimento adequado da cavidade o menor diâmetro de geratrizes avaliadas neste trabalho foi de 25,4mm resultando em uma área transversal de 507mm<sup>3</sup>.

A Tabela 6 mostra os fatores (A, B e C) e cada um dos seus níveis (1 e 2).

**Tabela 6 – Fatores e níveis selecionados para o estudo**

Fatores	Níveis	
	Nível 1	Nível 2
A) Temperatura [T] (°C)	1100	1200
B) Lubrificante	Grafite	Lubrodal AT CR
C) Diâmetro da Geratriz [d <sub>G</sub> ] (mm)	25,4	28,6

Como variável de saída para a análise de DOE foi tomada a máxima força de prensagem exigida na prensa para a conclusão do processo em cada ensaio.

O modelo de planejamento utilizado foi o experimento fatorial completo<sup>3</sup>, onde o arranjo das diferentes condições de teste possíveis gera a necessidade da execução de 8 ensaios dentro do Projeto de Experimentos (DOE). A quantidade de ensaios necessários para cobrir todas as condições e quando todos os fatores têm a mesma quantidade de níveis é dada pela equação (6).

$$N = C^k \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $N$  é a quantidade total de ensaios requeridos,  $k$  é o número de fatores selecionados para o experimento e  $C$  é o número de níveis de cada fator.

<sup>3</sup> Um Experimento Fatorial Completo inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento.

Para este estudo foi aplicado o Projeto de Experimentos (DOE) sem replicação, ou seja, cada condição de ensaio que representa uma determinada combinação de fatores foi realizada apenas uma vez sem repetição.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A sequência de ensaios resultou em amostras conformadas a quente que foram identificadas, fotografadas e analisadas visualmente. Cada uma das peças teve o número de ensaio correspondente gravado na face e todas as peças foram fotografadas para registro.



**Figura 17 – Biela forjada - Amostra #1 (ensaio #1)**

A amostra #1, mostrada na Figura 17, produzida a partir de uma geratriz de 28,6mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1100°C e lubrificante grafite, resultou em uma peça com bom preenchimento da cavidade e poucas falhas. Apenas na face em contato com a matriz inferior, na região do diâmetro maior, a amostra apresentou uma pequena falha de preenchimento. A amostra também mostrou baixa oxidação superficial.



**Figura 18 – Biela forjada - Amostra #2 (ensaio #5)**

A amostra #2, produzida a partir de uma geratriz de 28,6mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1200°C e lubrificante grafite, resultou em uma peça com razoável preenchimento da cavidade e algumas falhas conforme mostrado na Figura 18. Na face em contato com a matriz inferior, na região do diâmetro maior, a amostra apresentou falha de

preenchimento em duas regiões distintas. Na face superior também pode ser vista uma região com falta de preenchimento junto ao diâmetro maior da peça. De maneira distribuída pela peça foi observada uma escamação superficial, principalmente junto às regiões com menos material. A amostra apresentou regular oxidação superficial.



**Figura 19 – Biela Forjada - Amostra #3 (ensaio #2)**

Produzida a partir de uma geratriz de 28,6mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1100°C utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6, a amostra #3, resultou em uma peça com razoável preenchimento da cavidade e algumas falhas (Figura 19). Na face em contato com a matriz inferior, na região do diâmetro maior, a amostra apresentou falha de preenchimento em duas regiões distintas. Na face superior também pode ser vista uma região com falta de preenchimento junto ao diâmetro maior da peça. De maneira distribuída pela peça foi observada uma escamação superficial, principalmente junto às regiões com menos material. A amostra apresentou regular oxidação superficial. Devido ao deslocamento longitudinal da geratriz com relação à matriz, na extremidade da peça, no diâmetro menor, uma falta de preenchimento foi identificada em ambas as faces da amostra.



**Figura 20 – Biela Forjada - Amostra #4 (ensaio #7)**

A peça produzida a partir de uma geratriz de 28,6mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1200°C utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6, mostrada na Figura 20, a amostra #4, resultou em uma das piores amostras obtidas. A peça apresentou significativas faltas de preenchimento em ambas às faces, junto ao diâmetro maior. Na face superior, junto ao diâmetro menor da peça, houve um preenchimento completo da cavidade, embora na mesma região na face inferior tenha havido uma falta de preenchimento significativa. A peça apresentou uma significativa escamação superficial, principalmente na face inferior e assim como oxidação moderada em toda a peça, principalmente na região da rebarba.



**Figura 21 – Biela Forjada - Amostra #5 (ensaio #4)**

A amostra #5, mostrada na Figura 21, produzida a partir de uma geratriz de 25,4mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1100°C e utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6, originou uma peça com uma reduzida rebarba na região do diâmetro maior. Nesta região, havia na peça significativa falta de preenchimento em ambas as faces. A peça apresentou reduzida escamação superficial e baixa oxidação em toda a peça.



**Figura 22 – Biela Forjada - Amostra #6 (ensaio #6)**

A amostra #6, gerada a partir de uma geratriz de 25,4mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1200°C e utilizando lubrificante grafite e mostrada na Figura 22, originou

em uma peça com preenchimento completo na face inferior embora algumas falhas possam ser observadas na face superior. Na região do diâmetro maior, é verificada uma reduzida rebarba. Com relação à escamação superficial, também há uma grande diferença entre as faces. Novamente a face inferior apresenta uma condição muito melhor que a face superior. De maneira geral é observada reduzida oxidação na amostra.



**Figura 23 – Biela Forjada - Amostra #7 (ensaio #3)**

Produzida a partir de uma geratriz de 25,4mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1100°C utilizando lubrificante grafite, a amostra #7, mostrada na Figura 23, resultou em uma peça com pequena rebarba na região do diâmetro maior. Faltas de preenchimento foram identificadas em ambas as faces da peça junto ao diâmetro maior, entretanto o aspecto geral da peça foi considerado bom e com muito baixo nível de oxidação. Uma discreta escamação superficial apenas é observada na face inferior da amostra.



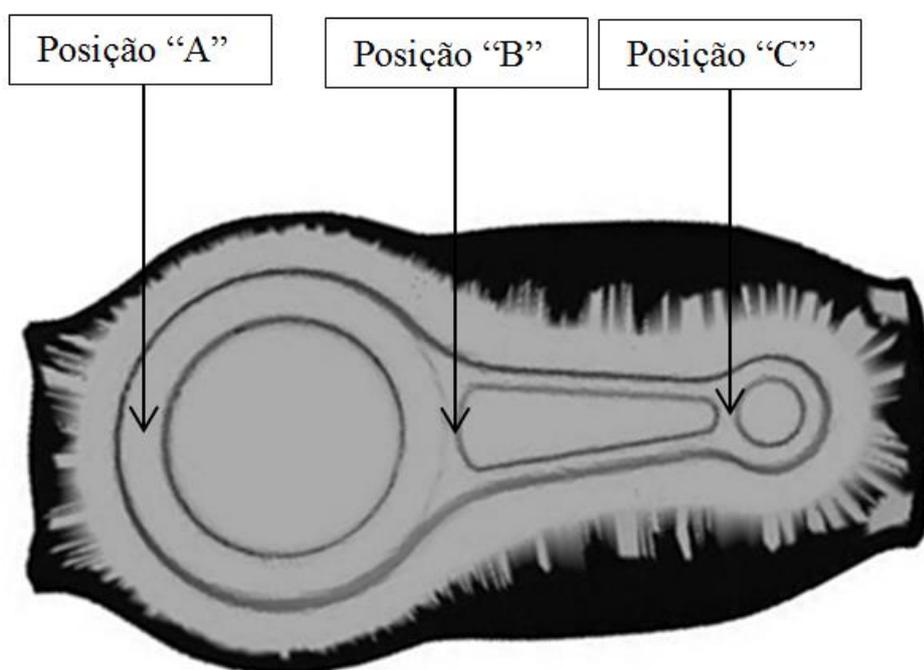
**Figura 24 – Biela Forjada - Amostra #8 (ensaio #8)**

Produzida a partir de uma geratriz de 25,4mm de diâmetro, forjada na temperatura de 1200°C utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6, a amostra #8, resultou em uma das amostras com maior nível de defeitos conforme mostra a Figura 24. A peça apresentou falta de preenchimento em ambas às faces, junto ao diâmetro maior bem como um deslocamento da rebarba. A amostra apresentou uma significativa escamação superficial,

principalmente na face inferior. Por toda a peça foi observada uma oxidação moderada com maior intensidade na região da rebarba.

Embora a peça não tenha uma geometria tão complexa, em praticamente todas as amostras foi observada falta de preenchimento da cavidade em algum ponto. Esta realidade vai ao encontro do que refere Martins (MARTINS e RODRIGUES, 2005) sobre ser muito pouco provável que uma peça de geometria complexa possa ser fabricada numa única operação de forjamento a partir de uma matéria-prima em forma de barra.

Adicionalmente dimensões das peças geradas foram tomadas para análises complementares. Foram medidos alguns elementos de cada peça de acordo com o diagrama mostrado na Figura 25.



**Figura 25 – Posição das medições realizadas.**

As dimensões observadas após as amostras alcançarem a temperatura ambiente são mostradas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Medições complementares das peças geradas.**

# Geratriz	Fator A Temperatura [T](°C)	Fator B Lubrificante	Fator C Diâmetro da Geratriz [D] (mm)	Espessura da Peça Forjada [h](mm)		
				Posição A	Posição B	Posição C
1	1100	Grafite	28,6	14,93	12,50	11,98
2	1200	Grafite	28,6	14,01	11,71	11,42
3	1100	Lubrodal AT CR6	28,6	14,56	12,26	11,48
4	1200	Lubrodal AT CR6	28,6	14,35	12,03	11,84
5	1100	Lubrodal AT CR6	25,4	14,27	11,92	11,72
6	1200	Grafite	25,4	13,98	11,62	11,27
7	1100	Grafite	25,4	14,40	12,02	11,92
8	1200	Lubrodal AT CR6	25,4	14,37	12,00	11,74

Não estando no escopo do trabalho, as dimensões tomadas servem como registro sobre a forma final das peças obtidas após o término dos ensaios.

Ao avaliar a aquisição dos pares de pontos Deslocamento/Força de Prensagem foi possível determinar a força máxima de forjamento alcançada no final do deslocamento.

A Tabela 8 mostra os dados relativos às máximas cargas de prensagem medidas para cada ensaio.

**Tabela 8 – Máxima carga de prensagem para cada ensaio.**

# Geratriz	Fator A - Temperatura [T <sub>F</sub> ] (°C)	Fator B - Lubrificante	Fator C - Diâmetro [d <sub>G</sub> ] (mm)	Máxima Força de Prensagem [F] (kN)
1	1100	Grafite	28,6	6233
2	1200	GRAFITE	28,6	5735
3	1100	Lubrodal AT CR6	28,6	5139
4	1200	Lubrodal AT CR6	28,6	5214
5	1100	Lubrodal AT CR6	25,4	5162
6	1200	Grafite	25,4	5166
7	1100	Grafite	25,4	5728
8	1200	Lubrodal AT CR6	25,4	5003

A Tabela 8 mostra valores de carga máxima de prensagem desde 5003,0kN para o ensaio executado com a temperatura de 1200°C, geratriz de 25,4mm de diâmetro e lubrificante Lubrodal AT CR6 até 6232,5kN para o ensaio realizado com a temperatura de 1100°C, geratriz de 28,6mm de diâmetro e lubrificante Grafite.

A Tabela 9 aponta a combinação de níveis que demanda a menor força de prensagem onde se tem o nível mais alto da Temperatura de Forjamento (1200°C) associado com o Lubrificante Lubrodal AT CR e o Diâmetro da Geratriz de 25,4mm.

**Tabela 9 – Combinação de níveis geradores da menor força de prensagem**

<b>Fator</b>	<b>Nível</b>
A) Temperatura [T] (°C)	1200
B) Lubrificante	Lubrodal AT CR
C) Diâmetro da Geratriz [d <sub>G</sub> ] (mm)	25,4

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Segundo Aslan (ASLAN, 2007) o Projeto de Experimentos (DOE) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas para reduzir o número de experiências, a fim de encontrar o efeito dos parâmetros que afetam uma resposta em um processo, visando assim uma redução em custos e tempo.

Este conceito vem ao encontro de Schaeffer (SCHAEFFER, 2004) que menciona que em meios acadêmicos, medidas de otimização são estudadas com o propósito de reduzir custos nos processos de fabricação mecânica nas indústrias.

Estas afirmações e a constatação da pouca aplicação do método DOE na área de conformação mecânica motivou a realização deste trabalho, pois cada vez mais utilizado na indústria brasileira, o Projeto de Experimentos é uma ferramenta poderosa para a melhoria da qualidade e produtividade sendo uma importante metodologia para verificar o funcionamento de sistemas e otimizar processos produtivos.

A aplicação de uma metodologia de Projeto de Experimentos (DOE) pressupõe um conhecimento mínimo dos processos envolvidos visando evitar uma excessiva quantidade de ensaios devido à grande quantidade de fatores e níveis em análise e, segundo Ghani et al (GHANI, HASAN e CHOUDHURY, 2004), oferece a máxima quantidade de informação com o número mínimo de ensaios, mas também estabelece relações funcionais entre as variáveis de entrada e saída.

De acordo com Bueno et al (BUENO, MARTINS, *et al.*, 2011), entender o efeito das variáveis envolvidas no processo de forjamento é importante para o sucesso e o avanço tecnológico necessário da indústria do forjado.

O critério para a seleção dos fatores do Projeto de Experimentos (DOE) foi a potencial influência na variável resposta, facilidade de obtenção de níveis distintos e semelhança com as condições reais de trabalho em um processo de forjamento.

Um parâmetro primário em um processo de forjamento é a escolha da temperatura de forjamento, desde que dentro da faixa de temperatura recomendada para o material e controlável em ambiente de produção.

A temperatura de 1100°C foi selecionada considerando a experiência prévia com o equipamento e ferramental disponíveis, onde temperaturas menores associadas a outras

condições de processo ensaiadas poderiam exceder a capacidade da prensa. Já a temperatura de 1200°C foi selecionada para o estudo, pois é bastante próxima do limite máximo da temperatura de conformação a quente para o material. Esta temperatura ainda guarda significativa distância da temperatura de 1100°C sendo assim considerada relevante para este trabalho.

Outro fator controlável em um processo de forjamento é o lubrificante utilizado. Este fator foi considerado na análise por sua fácil alteração no ambiente de produção podendo impactar na qualidade da peça, força de prensagem e desgaste das matrizes conforme Martins et al (MARTINS e SCHAEFFER, 2009). O fator relacionado com o coeficiente de atrito foi ensaiado em dois níveis, onde foram aplicados diferentes lubrificantes e métodos de lubrificação na interface geratriz/ferramenta.

O lubrificante Lubrodal AT CR6 foi escolhido, pois de acordo com o fabricante, é recomendado para o forjamento a quente de peças de aço-carbono. O Grafite em pó, por ser o lubrificante mais comumente utilizado em forjamentos simples tanto por seu baixo custo quanto por sua disponibilidade, foi também eleito para o presente estudo.

O terceiro fator escolhido para a realização do Projeto de Experimentos (DOE) foi o diâmetro da geratriz. A geometria de uma geratriz pode ser alterada visando economia de material ou para melhorar a distribuição do material na cavidade. Algumas possibilidades de geometrias passam desde uma simples seleção do diâmetro da barra que dará origem à geratriz até a conformação de uma pré-forma complexa desenvolvida através de métodos computacionais.

O diâmetro de 28,6mm (1 1/8") foi utilizado por ser uma das dimensão comerciais do material selecionado para a execução deste trabalho. O diâmetro de 25,4mm (1") foi selecionado por se tratar de um diâmetro comercial para barras de aço e por poder ser obtido a partir da barra de diâmetro de 28,6mm para os experimentos através de operação em torno mecânico.

A separação das amostras em dois grupos de acordo com a temperatura de forjamento evitou um excesso de variações na temperatura no forno que causariam um aumento do tempo de preparação de cada ensaio bem como um desperdício de energia elétrica para cada reaquecimento do forno.

Como os ensaios foram realizados em temperatura ambiente entre 12 e 13°C, esta pequena variação de temperatura pode ser desconsiderada para as análises, pois é de ordem muito menor que as temperaturas de processamento da conformação para o ensaio.

A proximidade entre o forno e a prensa garantiu um tempo entre a retirada das geratrizes do forno e o início da conformação sempre menor que 30 segundos, minimizando assim a perda de calor durante o transporte. A disposição dos equipamentos, mostrada na Figura 15, apresentada anteriormente, favoreceu a movimentação imediata de cada uma das amostras retiradas do forno diretamente para a posição de forjamento sobre a face superior da matriz inferior. Minimizar a perda de calor durante este processo significa reduzir as variáveis não controladas do experimento.

Devido aos diferentes tempos dispensados com o processo de aquecimento das amostras, preparação da prensa e equipamentos de aquisição de dados houve algumas amostras que permaneceram um tempo maior no forno. Este tempo em forno foi uma variável não controlada como fator para o trabalho e sua influência nos resultados ajuda a compor o percentual de incerteza da resposta do experimento. Ou seja, o intervalo de confiança obtido pelo experimento é diretamente afetado pelas variáveis não controladas.

O procedimento de pré-aquecimento das matrizes foi capaz de elevar sua temperatura superficial até cerca de 80°C minimizando assim os riscos de danos à ferramenta.

Através da análise dos pontos de máxima força para cada ensaio realizado verificou-se que há variações significativas entre as forças máximas demandadas para a conclusão de cada um dos ensaios de forjamento a quente indo desde 5003kN até 6233kN.

Avaliando as Forças Máximas de Prensagem resultantes mostradas na Tabela 8 não é simples determinar os fatores mais influentes para a variável resposta ou segregar grupos de ensaios por quaisquer fatores analisados sem o apoio de uma metodologia adequada.

Esta tarefa torna-se inviável à medida que se aumenta o número de fatores ou de níveis do experimento onde, para um estudo fatorial completo, conforme descrito por Werkema (WERKEMA, 1996), a quantidade total de ensaios será a quantidade de níveis avaliados elevado à quantidade de fatores selecionados. Ou seja, para um experimento fatorial completo  $2^k$  a quantidade de ensaios necessários dobra a cada fator adicionado no estudo. Os resultados mostrados na Tabela 8 fornecem condição para posterior

processamento e determinação do fator mais influente através do Projeto de Experimentos (DOE).

O Projeto de Experimentos (DOE) encontra aplicação direta na tentativa de explicitar quais dos parâmetros controlados e propositadamente variados em cada um dos ensaios, tem maior influência na força de prensagem.

A utilização desta metodologia na definição dos parâmetros mais adequados para determinado processo vai ao encontro a Fereshteh-Saniee (FERESHTEH-SANIEE e JAAFARI, 2002) que afirma que tanto métodos matemáticos como numéricos têm como propósito reduzir o custo dos experimentos.

O conhecimento da influência de parâmetros de processo na variável de saída é muito importante, pois pode ser motivo para a decisão de seleção de um equipamento com maior capacidade para o mesmo fim ou mesmo a decisão de abandonar um projeto.

O processamento dos dados de resposta do Projeto de Experimentos (DOE) gerou os diagramas mostrados na Figura 26 e na Figura 27 que ilustram o comportamento e a influência de cada um dos parâmetros de processo analisados na variável resposta.

O diagrama de Efeitos Principais para Força de Prensagem, mostrado na Figura 26, detalha o comportamento da variável de saída, Máxima Força de Prensagem, com relação à variação dos fatores controlados no ensaio. Este diagrama está em consonância com os resultados esperados em termos de influência negativa ou positiva de cada fator na força de prensagem com relação aos parâmetros temperatura e diâmetro da geratriz.

Na Figura 26, analisando apenas a coluna referente à temperatura pode-se interpretar que a força de prensagem média para os ensaios realizados em temperatura de 1100°C é superior à carga média tomada quando a temperatura dos ensaios foi de 1200°C. Ou seja, é um resultado razoável, pois é esperado que temperaturas de forjamento mais elevadas demandassem forças de prensagem menores desde que mantidas as demais condições e vice versa.

Da mesma maneira, com relação ao diâmetro da geratriz, é esperado que geratrizes com menor volume necessitassem de menor força de prensagem durante o processo de forjamento caso os demais parâmetros mantenham-se inalterados. O diagrama da Figura 26 mostra que, para ensaios utilizando geratrizes com diâmetro de 25,4mm (1") a força de

prensagem média foi menor que a força de prensagem média para ensaios cujas geratrizes possuíam diâmetros de 28,6mm (1 1/8").

Com relação à temperatura de forjamento ainda é possível observar que, para ambos os fatores, a variação entre as forças de prensagem são da mesma ordem.

A coluna referente ao lubrificante utilizado mostra uma expressiva diferença entre as forças de prensagens necessárias para o forjamento dependendo do lubrificante aplicado. Nos ensaios onde o Grafite era usado como lubrificante, a força média de prensagem foi significativamente mais elevada quando comparada com a força de prensagem média necessária para os ensaios onde foi aplicado o lubrificante Lubrodal AT CR6.

Ainda é possível observar que a variação da força de prensagem provocada pela alteração do lubrificante aplicado nos ensaios é a maior dentre os três fatores estudados.

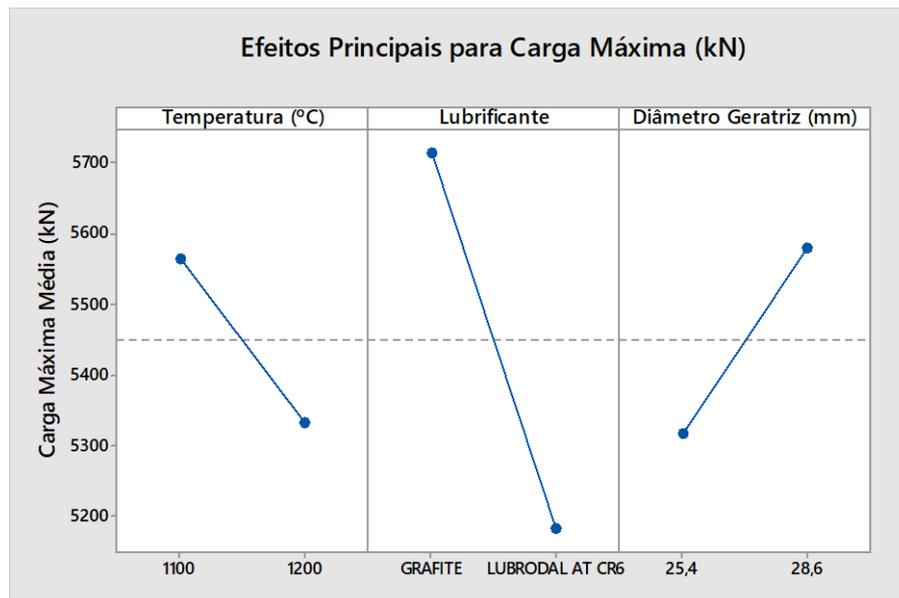


Figura 26 – Diagrama de Efeitos Principais na Força de Prensagem

O gráfico da interação entre os parâmetros mostrado na Figura 27, demonstra o comportamento da carga máxima de prensagem para cada fator com relação aos demais fatores e também identifica a interação entre os fatores. Partindo do princípio que linhas paralelas significam parâmetros sem interação, observa-se que os fatores diâmetro e temperatura são bastante independentes entre si. Já o fator lubrificante apresenta maior nível de dependência com os demais fatores. Este comportamento é observado mais fortemente com o lubrificante grafite quando comparado com o lubrificante Lubrodal AT CR6.

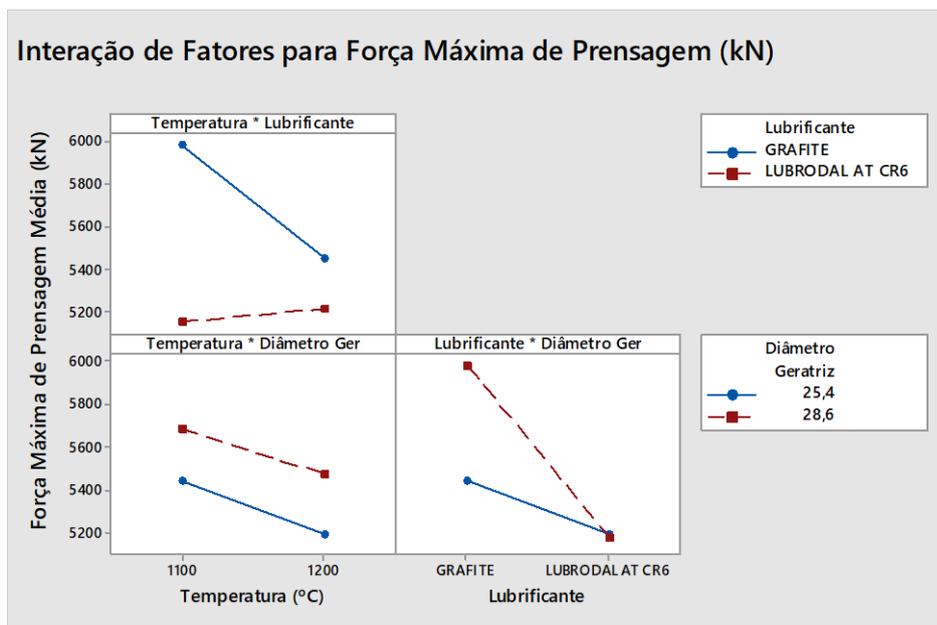


Figura 27 – Diagrama de interação de fatores

O Diagrama de Pareto para os efeitos mostra a influência de cada fator na variável resposta e também a influência combinada entre os fatores analisados.

A Figura 28 mostra a maior influência do Fator B, Lubrificante, na variável resposta, força de prensagem. Embora possa ser apontado como principal fator através da análise do gráfico, não é possível aceitar esta hipótese com 95% de certeza devido à comparação com o valor referência para  $\alpha=0,05$ .

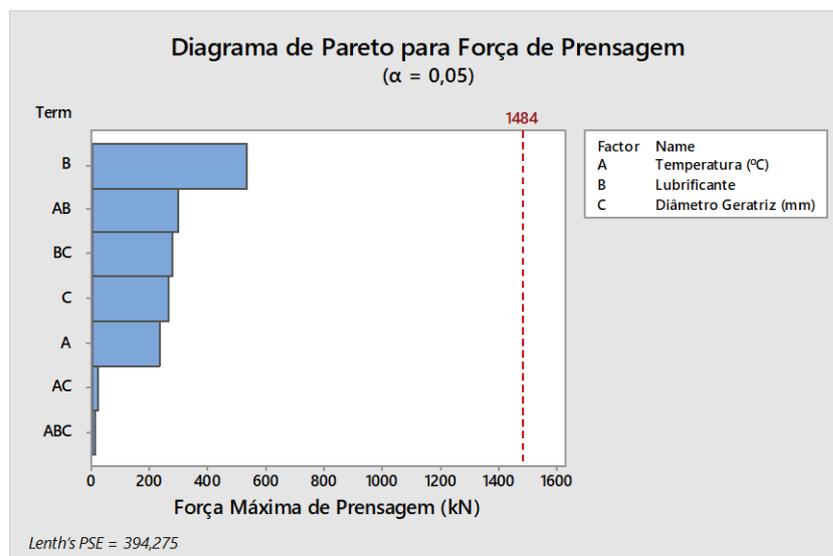


Figura 28 – Diagrama de Pareto para efeitos ( $\alpha=0,05$ )

A análise da Figura 29 mostra o Diagrama de Pareto para Efeitos com  $\alpha=0,3$ . Esta representação gráfica permite a conclusão de que, com pelo menos 70% de certeza, pode-

se aceitar a hipótese que o fator lubrificante (Fator B) é o fator que possui a maior influência no valor resultante da carga de prensagem reforçando as conclusões de Böesch (BÖESCH JÚNIOR, MARTINS e SCHAEFFER, 2011) citando que o atrito é indesejado, e aumenta as exigências do processo em termos de potência.

O fato do lubrificante ser apontado como o fator que mais tem influência na variável resposta do experimento também está alinhado com os resultados encontrados por Walters (WALTERS, WU, *et al.*, 2017) no seu estudo utilizando DOE que indicou o atrito entre a peça e a matriz como fator dominante no processo de forjamento estudado.

O nível de incerteza apresentado nos resultados indica a influência dos parâmetros não controlados no experimento, bem como o grande número de processos manuais envolvidos nos ensaios, tais como a transferência manual da geratriz do forno à prensa, o posicionamento da geratriz na matriz e o processo de aplicação dos lubrificantes. A soma destes fatores não controlados e as incertezas de medição dos equipamentos interferem de forma significativa no intervalo de confiança da resposta do Projeto de Experimentos.

O diagrama exibido na Figura 29 mostra ainda que há interação relevante entre os demais fatores analisados, principalmente fatores A e B e fatores B e C. Esta interação entre fatores se mostrou ainda mais significativa que os Fatores A e C analisados isoladamente. Mesmo com a interação significativa entre os fatores, nenhuma destas interações ou combinação de fatores supera a influência exercida pelo lubrificante nos ensaios realizados.

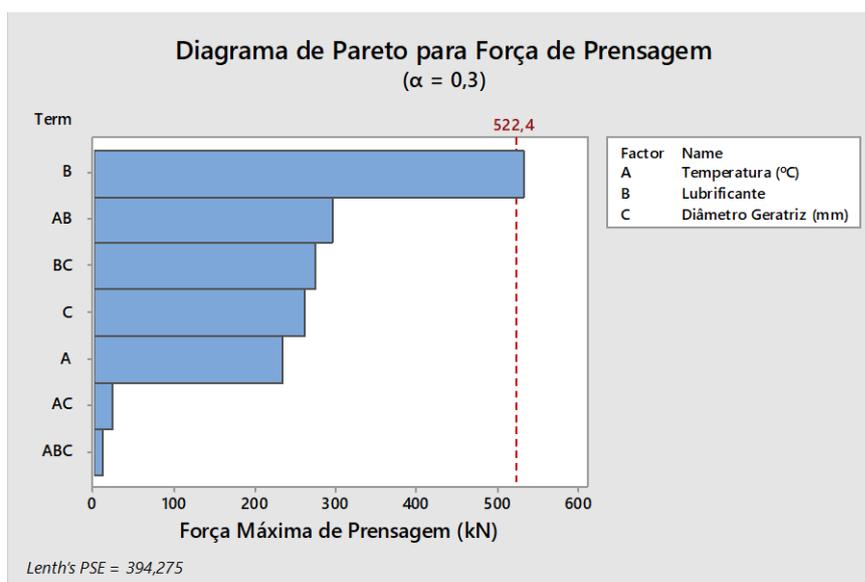
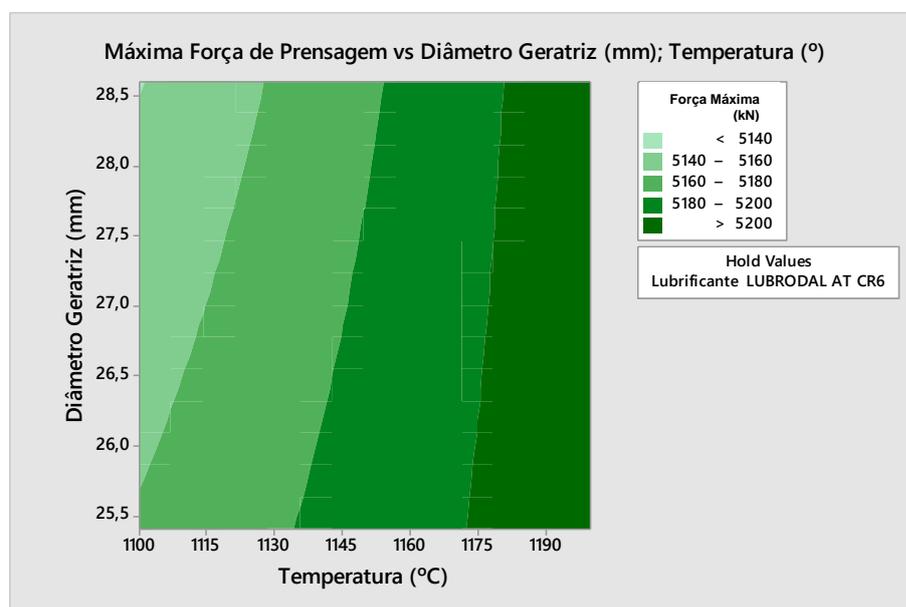


Figura 29 – Diagrama de Pareto para efeitos ( $\alpha=0,3$ )

Finalmente, sendo o lubrificante o fator que mais influencia na força de prensagem e baseado nos resultados obtidos, é possível afirmar que dentre os lubrificantes selecionados para o trabalho, o lubrificante Lubrodal AT CR6 é o que menos provoca o aumento na força de prensagem.

Através Gráfico de Contorno mostrado na Figura 30, e considerando a utilização do lubrificante Lubrodal AT CR6, é possível prever a faixa de Força Máxima de Forjamento esperada para cada combinação de temperaturas entre 1100°C e 1200°C e diâmetros da geratriz entre 25,4mm e 28,6mm avaliados neste trabalho.



**Figura 30 – Gráfico de contorno para variável resposta utilizando lubrificante Lubrodal AT CR6**

A utilização desta forma gráfica é bastante interessante, pois pode permitir a previsão da força de prensagem resultante através do controle ou seleção do nível de cada fator estudado ou ainda contribuir na escolha do equipamento mais adequado para determinada condição.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência individual e cumulativa do diâmetro da geratriz, da temperatura de forjamento e do tipo de lubrificante utilizado na força de prensagem máxima necessária em um processo de forjamento a quente na força de prensagem necessária para o forjamento. Para tanto, foi utilizado o material ABNT 4140.

As principais dificuldades enfrentadas foram a escassa literatura a respeito de Projetos de Experimentos (DOE) aplicados a processos de forjamento a quente e a manutenção das mesmas condições de teste variando apenas os fatores controláveis de interesse neste estudo. Ou seja, os parâmetros como tempo das geratrizes no forno, tempo de deslocamento das geratrizes do forno à prensa, o controle dos processos manuais de lubrificação das matrizes e posicionamento da geratriz para o forjamento foram as maiores preocupações neste trabalho.

Os resultados do experimento mostraram uma maior influência do fator lubrificante na força de prensagem resultante para os forjamentos. A influência do lubrificante foi maior, mesmos quando comparada com quaisquer outras combinações de fatores controlados no presente estudo. Dentre os dois lubrificantes testados, o Lubrodal AT CR6 fabricado pela Fuchs do Brasil SA foi o que apresentou o melhor resultado contribuindo mais fortemente para a redução da força de prensagem.

Finalmente, após a realização deste estudo pode-se concluir que, em comparação dos demais fatores presentes neste trabalho, o fator lubrificante é o mais importante quando se objetiva o controle da força de prensagem sobrepondo-se significativamente aos demais fatores analisados.

É possível afirmar ainda que o Projeto de Experimentos (DOE), assim como ocorre em diversas outras áreas do conhecimento, pode ser perfeitamente considerado para estudos ou mesmo em ambiente industrial para processos de forjamento. Neste caso representaria uma alternativa bastante viável aos softwares de simulação para a solução de problemas com baixo nível de complexidade.

Enfim este trabalho pode indicar o Projeto de Experimentos DOE como um caminho pouco explorado na área de Conformação Mecânica para a otimização de processos e identificação de seus fatores protagonistas ou ainda apresentar uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de outros trabalhos científicos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de Metais; Fundamentos e Aplicações**. Tradução de Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos: EESC-USP, 1999. 350 p.

ASLAN, N. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a **Fuel**, n. 86, p. 69–76, 2007.

ASM HANDBOOK. **Forming and forging**. 1. ed. Ohio: ASM International, v. 14, 1993.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys**. 10ª. ed. Ohio: Materials Park, v. 2, 1990.

BÖESCH JÚNIOR, P. R.; MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão. **Revista Thema**, v. 8, p. 1-11, 2011.

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

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids**. Oxford: At the Clarendon Press, 1950.

BOWER, J. A. Statistic for food science V: comparison of many groups (part A). **Nutrition & Food Science**, v. 2, n. Mar./Abr., p. 78-84, Mar./Abr. 1992.

BUENO, A. F. et al. **Comportamento do Coeficiente de Atrito no Aço AISI 4140 em Teste de Compressão do Anel com Diferentes Lubrificantes**. 66º Congresso ABM. São Paulo: [s.n.]. 2011.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAPAROLLI, A.; GILENO, L. A.; BUTTONS, S. T. Expert system for hot forging design. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80, p. 131-135, 1998.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v. 35, p. 1-12, 1993.

DEVOR, R. E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J. W. **Statistical quality design and control - Contemporary concepts and methods**. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1992.

ERICKSON, L. **Design of Experiments: Principles and Applications**. Umeå: MKS Umetrics AB, 2008.

FERESHTEH-SANIEE, F.; JAAFARI, M. Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 334-340, 2002.

FERREIRA, R. A. S. **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2006. 20-80 p.

- FISHER, R. A. **The Design of Experiments**. 6. ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1935.
- GEIER, M. **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel**. Ufrgs. Porto Alegre, p. 82. 2007.
- GHANI, J. A.; HASAN, H. H.; CHOUDHURY, I. A. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. **J. Mater. Process. Technol.**, n. 145, 2004. 84–92.
- HAWKYARD, J. B.; JOHNSON, W. An Analysis of the Changes in Geometry of a Shorthollow Cylinder During Axial Compression. **Int. J. Mech. Sci. Pergamon Press**, 9, 1967. 16418/3-182.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 171 p.
- KOLLER, L. A.; SCHAEFFER, L.; OLIVEIRA, R. A. Evaluation of Two Commercially Available Lubricants by Means of Ring Test to AA6061 F Aluminum Alloys. **Materials Research**, 6, n. 4, 2004. 591-597.
- KOPP, R.; PHILLIP, F. Physical Parameters and Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Hot Forming Process. **Steel Research**, v. 63 n. 9, p. 392-398, 1992.
- KRAUSS, G. **Steels Heat Treatment and Processing Principles**. Ohio: ASM International Metals Park, 1994.
- LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística teoria e aplicações**. Tradução de Teresa Cristina Padilha de Souza e Sergio da Costa Cortes. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1998.
- LIMA, F. B. **Microestrutura e Tenacidade de Aços Baixa Liga Tipo 41XX – Uma Abordagem Quantitativa**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. 188 p. Tese (Mestrado em ciências em engenharia metalúrgica e materiais) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- MARTINS, P.; RODRIGUES, J. **Tecnologia da deformação Plástica**. Lisboa: Escolar Editora, v. II, 2005.
- MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço. **Revista Corte e Conformação de Metais**, p. 44 - 63, 2009.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6ª. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- MÜLLER, A. **Introdução histórica aos Processos de Forjaria e Cutelaria e Estudo de casos do RGSUL**. Anais da 14º Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre: [s.n.]. 2010. p. 13-50.
- PHILIPS, T. V.; MCCAFFREY, T. J. **Ultrahigh-strength steels**. In: ASM HANDBOOK Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Ohio: ASM International, v. 1, 1993. 1123 p.

- ROCHA, M. A. et al. **Análise das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 com Estrutura Bifásica**. UFF- Universidade Federal Fluminense. Niterói - RJ. 2004. PGMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia.
- ROWLANDS, H.; ANTONY, F. Application of design of experiments to a spot welding process. **Assembly Automation**, v. 23, p. 273-279, 2003.
- RUDKINS, N. T. et al. Friction Modelling and Experimental Observations in Hot Ring Compression Tests. **Journal of Materials Processing Technology**, 60 n. 1/4, Junho 1996. 349-353.
- SCHAEFFER, L. **Forjamento**. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre, 2001.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica 2ª Edição**. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre, 2004.
- SCHAEFFER, L. Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada. **Ferramental**, v. 9, p. 19-28, 2006.
- SCHAEFFER, L.; MARTINS, V. Comparação Entre Lubrificantes Pela Verificação do Atrito em Alumínio e Aço. **Revista Corte e Conformação de Metais**, p. 44-63, Março 2009.
- SCHEY, A. **Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear**. 2ª. ed. Ohio: ASM International, 1984.
- SILVA, S. E. **Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico**. UNFE. Campo dos Goytacazes. 2012.
- SYRCOS, G. P. Die casting optimization using Taguchi methods. **J. Mater. Process. Technol.**, n. 135, 2003. 68–74.
- VAZQUEZ, V.; ALTAN, T. Die design for flashless forging of complex parts. **Journal of Materials Processing Technology**, Columbus, n. 98, p. 81 - 89, 2000.
- VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, P. Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method. **Jornal of Material Science and Tecnology**, v. 180, p. 161–166, 2006.
- VILLARES METALS. **Catálogo Técnico: Composição Química de Aços Villares**. [S.l.]. 2004.
- WALTERS, J. et al. **DOE and Simulation - An Industrial Case**. New Developments in Forging Technology. Stuttgart: Universität Stuttgart. 2017. p. 31-37.
- WERKEMA, M. C. C. **Planejamento e análise de experimentos como identificar, avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, E.E.UFMG, 1996.
- WILSON, R. D. Friction and Lubrification in bulk metal-forming processes. **Journal of Applied Metal Working**, v. I, p. 7-19, 1979.

YOSHIMURA, H. . & Y. H. Precision forging of aluminium and steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, p. p. 196-204, 2000.

## **8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Algumas sugestões para trabalhos futuros:

- I. Aplicação do Projeto de Experimentos a processos de estampagem e conformação a frio;
- II. Realização de trabalho semelhante com mais fatores envolvidos e focado em um problema real da indústria;
- III. Otimização de geometria da matriz utilizando Projeto de Experimentos;