

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME MAZZAROLO BENETTI

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA FABRICAÇÃO DE HASTES
ROSQUEADAS PARA VÁLVULAS DE ESFERA ATRAVÉS DE CONFORMAÇÃO
A FRIO**

**CAXIAS DO SUL
2022**

GUILHERME MAZZAROLO BENETTI

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA FABRICAÇÃO DE HASTES
ROSQUEADAS PARA VÁLVULAS DE ESFERA ATRAVÉS DE CONFORMAÇÃO
A FRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, no Campus Universitário de Caxias do Sul, da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Me. Vagner Grison.

**CAXIAS DO SUL
2022**

GUILHERME MAZZAROLO BENETTI

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA FABRICAÇÃO DE HASTES
ROSQUEADAS PARA VÁLVULAS DE ESFERA ATRAVÉS DE CONFORMAÇÃO
A FRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, no Campus Universitário de Caxias do Sul, da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Me. Wagner Grison
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre F. Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O setor de produção de válvulas representa um mercado em expansão na economia brasileira, sendo as aplicações, entre elas, uso industrial, exploração de petróleo e gás, residencial, e no geral, transmissão e armazenamento de fluidos. O mercado requer, na atual produção industrial de válvulas, constantes aperfeiçoamentos e redução nos custos produtivos, a fim de tornar a fabricante mais competitiva. Neste contexto, será abordada a fabricação da haste rosqueada, item que faz a ligação da esfera com a alavanca nas válvulas de esfera. O item, que tradicionalmente é fabricado através do processo de usinagem, pode ser fabricado através da conformação a frio, e se faz necessária uma avaliação de viabilidade técnica, a fim de verificar se a peça conformada atende os requisitos críticos geométricos, mecânicos, funcionais e de acabamento, da mesma forma que a peça usinada. Assim, foram abordados conceitos relacionados a construção, testagem e funcionamento da válvula de esfera, ao processo de conformação a frio (forjamento a frio e fabricação de roscas) e processos de usinagem necessários na fabricação da haste. Para realização do projeto dos estágios de conformação, foi executado o ensaio de tração, visando obter as características do material para correto dimensionamento dos esforços e deformações, e para posterior seleção do maquinário capaz de realizar o forjamento do componente. Após a realização dos cálculos, obteve-se a necessidade de 3 estágios de conformação, sendo a força total de forjamento encontrada de 50 t. Em seguida, realizou-se o comparativo entre as hastes rosqueadas obtidas através de torneamento e conformação, quanto a aspectos geométricos, resistência mecânica e acabamento superficial. A peça conformada apresentou dimensões dentro dos limites solicitados, porém a dimensão da flange do componente que não fica enclausurada nas ferramentas de conformação durante a prensagem apresentou um coeficiente de variação passando da casa de 0,50%, enquanto as outras dimensões do componente conformado, por estarem enclausuradas, mostraram coeficiente de variação pouco maior que 0,30%. Por fim, a haste rosqueada obtida por forjamento a frio apresentou bom funcionamento nos testes e aplicação na válvula, apresentando-se ser um componente apropriado de utilização e venda no mercado.

Palavras-chave: Haste Rosqueada, Válvulas de Esfera, Conformação a Frio.

ABSTRACT

The valve production sector represents an expanding market in the Brazilian economy, with applications, among them, industrial use, oil and gas exploration, residential, and in general, fluid transmission and storage. The market requires, in the current industrial situation, constant improvements and costs reduction in production, in order to make the manufacturer more competitive. In this context, will be addressed the manufacture of the threaded rod fabrication, an item that connects the sphere with the lever in the ball valves. The item, which is traditionally manufactured through the machining process, can be manufactured through cold forming, and an assessment of technical feasibility is necessary, in order to verify that the cold formed part meets the critical geometric, mechanical, functional and finishing in the same way as the machined part. This way, were addressed concepts related to the construction, testing and operation of the ball valve, the cold forming process (cold forging and thread manufacturing) and machining processes that are necessary in the manufacture of the stem. For the project of the forming stages, the traction test was executed, aiming to obtain the characteristics of the material, to do the correct sizing of the forces and deformations. After the calculations, it was obtained the need of 3 stages of forming, and the total forging force found around 50 t. In sequence, was done the comparative between the cold forged and machined stems, in geometric, mechanical resistance and surface finishing aspects. The forged stem showed dimensions in the established limits, however, the dimension of the flange that is not enclosed in the forming tools during pressing showed a coefficient of variation exceeding 0.50%, while the other dimensions of the formed component, as they were enclosed, showed a coefficient of variation slightly greater than 0.30%. In the end, the stem obtained by the cold forging showed a proper functioning in the tests and valve application, presenting an appropriate component for utilization and market commercialization.

Key words: Threaded Rod, Ball Valves, Cold Forming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Válvula de esfera em vista explodida, mostrando haste rosqueada	11
Figura 2 - Projeto básico de uma válvula de esfera conforme a ISO 17292	15
Figura 3 - Montagem de haste a prova de expulsão	16
Figura 4 - Definição do processo de Recalque.....	19
Figura 5 - Porção de material sujeito a flambagem	20
Figura 6 - Estágios de Recalque de um fixador.....	20
Figura 7 - Curva de Engenharia	21
Figura 8 - Comparativo das Curvas Verdadeira e de Engenharia	23
Figura 9 - Comparativo entre rosca usinada (a) e conformada (b).....	25
Figura 10 - Roscamento com ferramenta de encosto	25
Figura 11 - Roscamento por gravação única.....	26
Figura 12 - Laminação por cilindro e segmento de rosqueamento.....	27
Figura 13 - Brocha para usinagem de superfície externa.....	28
Figura 14 - Haste Rosqueada 3/8" Usinada	29
Figura 15 - Fluxograma de tarefas	31
Figura 16 - Rolo de arame acondicionado em estocador	32
Figura 17 - Corpo de prova montado em máquina de ensaio de tração	33
Figura 18 - Corpos de prova após o ensaio de tração	33
Figura 19 - Gráfico tensão versus deformação de real	36
Figura 20 - Gráfico Tensão versus Deformação real média	37
Figura 21 - Haste Rosqueada 3/8" Conformada a frio.....	38
Figura 22 - Comparativo entre seções de volumes equivalentes	39
Figura 23 - Estágios representados em geometrias cilíndricas	40
Figura 24 - Estágios de conformação.....	43
Figura 25 - Prensa JBP-13B5S	44
Figura 26 - Laminadora JTR12.....	45
Figura 27 - Conjunto de Matrizes (C e D) e Punções (A e B) para forjamento a frio .	46
Figura 28 - Ferramenta de encosto lisa.....	47
Figura 29 - Ferramenta de encosto para rosca 3/8 UNF	47
Figura 30 - Estágios de conformação - fabricação do produto	49
Figura 31 - Haste rosqueada conformada finalizada após brochamento	49
Figura 32 - Hastes usinadas A e C, hastes conformadas B e D.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volumes de acordo com as seções do produto	40
Tabela 2 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 1 para 2	41
Tabela 3 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 2 para 3	41
Tabela 4 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 3 para 4	41
Tabela 5 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 4 para 5	42
Tabela 6 - Dimensões principais encontradas na medição	48

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito [-]
K_f	Tensão de escoamento [MPa]
C	Constante do material [MPa]
n	Índice de encruabilidade [-]
φ	Deformação verdadeira [-]
L	Comprimento instantâneo do corpo de prova [mm]
L_0	Comprimento inicial do corpo de prova [mm]
ε	Deformação de engenharia [-]
F_p	Força de recalque [N]
A_{1p}	Área de contato no final da prensagem [mm ²]
K_{f1}	Tensão de escoamento no final da prensagem [MPa]
d_1	Diâmetro no final da prensagem [mm]
h_1	Altura após a prensagem [mm]
s	Relação de recalque [-]
φ_h	Deformação na direção da altura [-]
h_0	Comprimento da geratriz [mm]
h_1	Altura após a prensagem [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CARACTERÍSTICAS DA VÁLVULA DE ESFERA, HASTE ROSQUEADA E SEUS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	14
2.1.1	Válvula de Esfera e Haste Rosqueada	14
2.1.2	Materiais de construção para haste rosqueada.....	16
2.2	PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO.....	18
2.2.1	Operação de Conformação – Prensagem e Recalque de fixadores.....	18
2.2.2	Operação de Laminação – Roscamento.....	24
2.3	USINAGEM - BROCHAMENTO.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	OBJETO DE ESTUDO	29
3.2	ETAPAS DE TRABALHO E METODOLOGIA	30
3.2.1	Fluxograma das atividades.....	30
3.2.2	Material e determinação das propriedades mecânicas.....	31
3.2.3	Determinação dos estágios de recalque e cálculos analíticos.....	34
3.2.4	Seleção de equipamento e fabricação das matrizes	34
3.2.5	Testes e comparativos	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	CURVA DE ESCOAMENTO E PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	36
4.2	ESTÁGIOS DE RECALQUE E CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	38
4.3	ESCOLHA DE MAQUINÁRIO E FABRICAÇÃO DE MATRIZES	43
4.3.1	Seleção do Maquinário.....	43
4.3.2	Fabricação das Matrizes e Ferramentas necessárias	45

4.4	TESTES E COMPARATIVOS.....	48
5	CONCLUSÃO.....	51
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	52
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	APÊNDICE A - DESENHO DA HASTE ROSQUEADA 3/8” USINADA.....	55
	APÊNDICE B - CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	56
	APÊNDICE C - DESENHO HASTE ROSQUEADA 3/8” FORJADA A FRIO.....	57
	APÊNDICE D - DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS REFERENTES AOS ESTÁGIOS DE CONFORMAÇÃO.....	58
	APÊNDICE E - DESENHO DA SEQUÊNCIA DE ESTÁGIOS DE PRODUÇÃO.....	62
	APÊNDICE F - RELATÓRIO DIMENSIONAL DE MEDIÇÃO DE AMOSTRAS.....	63
	ANEXO A - VALORES DE COEFICIENTES DE ATRITO PARA DIFERENTES PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO.....	64
	ANEXO B - TABELA DIÂMETROS PRIMITIVOS BÁSICOS	65
	ANEXO C - RELATÓRIO ENSAIO DE TRAÇÃO	66
	ANEXO D - CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA.....	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a utilização de válvulas de esfera se dá em inúmeras aplicações, como processamento de gases e líquidos, uso industrial, residencial, transmissão e armazenamento de fluidos, entre outras. Este produto tem por finalidade permitir ou obstruir a passagem do líquido ou gás (abre/fecha), tem vida útil superior a 25 anos em geral, e consegue fazer a retenção do fluido com segurança, sem vazamentos. É de operação e manutenção simples, e pode suportar pressões até 1000 bar em casos específicos. É resultado da montagem de uma série de componentes, que devem ser fabricados com precisão dimensional, e que atendam as especificidades técnicas que a válvula requer, em termos de estanqueidade e resistência à fadiga.

Porém, o mercado de fornecimento de válvulas de esfera, devido a sua grande área de aplicação, está em constante crescimento e tem ótimas oportunidades de negócios. A alta demanda pela utilização de válvulas torna o mercado competitivo, e a concorrência faz com que as empresas procurem alternativas em processos que atinjam a mesma qualidade técnica, porém, reduzindo os custos de produção.

Isso acarreta em uma busca constante de aprimoramento de processos produtivos, redução na perda de matérias-primas e tempos de produção. Assim, atingir níveis cada vez maiores de qualidade e produtividade é o grande desafio da engenharia.

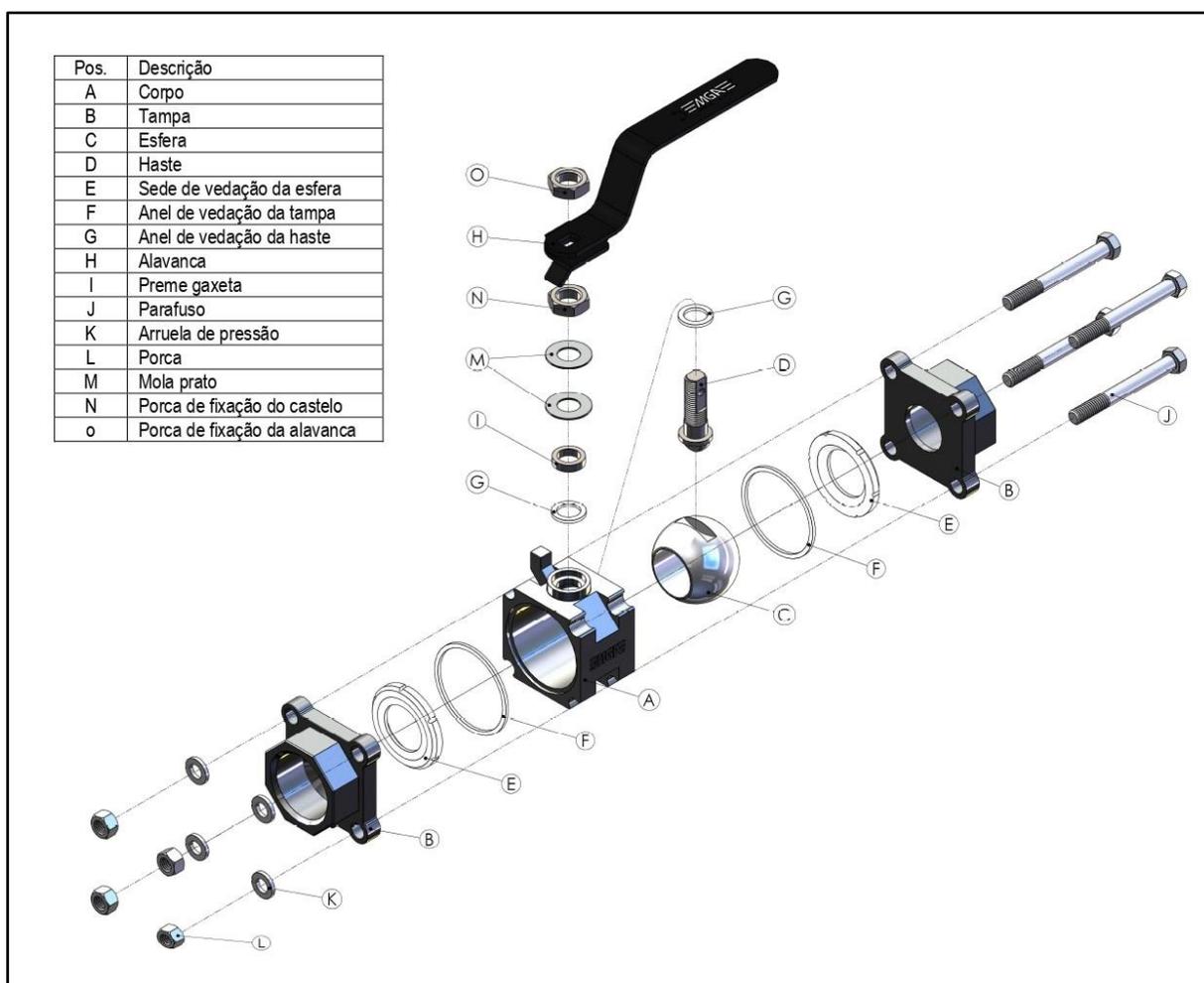
Dentre os componentes que compõem a válvula de esfera, um destes é a haste rosqueada (Item D - Figura 1), peça que faz a ligação da esfera com a alavanca de acionamento da válvula. A haste rosqueada é tradicionalmente fabricada em aço inoxidável 304, atualmente produzida através do processo de usinagem.

Na indústria de manufatura, o processo de usinagem é reconhecidamente um dos mais desenvolvidos e precisos tecnologicamente. Entretanto, é um processo que tem por conceito a remoção de material de um bloco sólido, a fim de obter a peça final. Logo, é um processo que tem ciclos de produção que permitem, em média, um máximo de fabricação de 300 peças/hora, o que ocasiona a perda de material por cavaco, conseqüentemente, gerando sucata.

Em contrapartida, existe o processo de conformação a frio, ou forjamento a frio. A conformação é realizada em prensas horizontais, que processam arames em determinadas bitolas de materiais especificados. Prensas excêntricas tradicionais trabalham na vertical, cujo martelo realiza movimentos de subida e descida,

processando a chapa/tira de metal perpendicularmente ao seu sentido de entrada na máquina. Por outro lado, prensas para conformação a frio de fixadores e hastes, operam na horizontal em função do sentido da moldagem do material. O arame (material de seção circular, que pode ser especificado no diâmetro e liga necessários, de acordo com a peça a ser produzida; fornecido em um rolo contínuo), que também entra na máquina horizontalmente, é prensado em seu sentido axial. De tal modo, o martelo da prensa trabalha horizontalmente em função do sentido de conformação do arame.

Figura 1 - Válvula de esfera em vista explodida, mostrando haste rosqueada



Fonte: Catálogo MGA (2015).

A conformação a frio permite a produção de peças em série (5 a 15 mil peças hora), com acabamento superficial e tolerâncias dimensionais próximas das peças

usinadas, sem geração de cavacos ou retalhos. Isso se deve ao fato que todo o material que entra na máquina, é moldado no produto final.

Assim, é necessária uma análise da haste rosqueada obtida através do processo de conformação a frio, verificando-se os seus requisitos funcionais e geométricos, se têm capacidade de atender a montagem da válvula da mesma maneira que a haste fabricada através de usinagem.

O trabalho está sendo desenvolvido na Metalúrgica Vabene LTDA. Empresa veranense, que atua no ramo de fabricação de fixadores especiais, atendendo diversos setores da indústria, direta ou indiretamente, como por exemplo: rodoviário, moveleiro, agrícola, eletroeletrônico, hospitalar e alimentício, em todo território nacional.

1.1 TEMA

O presente trabalho aborda a avaliação das características da haste obtida pelo processo de conformação, comparativamente à haste obtida pelo processo de usinagem, a fim de verificar se o componente atende os requisitos funcionais da montagem e operação de uma válvula de esfera. Portanto, há uma abrangência de assuntos de processos de fabricação, metrologia e resistência dos materiais.

1.2 JUSTIFICATIVA

As hastes rosqueadas são produzidas tradicionalmente através do processo de usinagem, devido a sua alta precisão dimensional e acabamento. Porém, com o objetivo de produzir maior quantidade de peças em menos tempo, sem perdas de matéria-prima, visando a constante redução de custos e possibilitando uma melhor competitividade das fabricantes de válvulas de esfera, uma alternativa é a utilização do processo de conformação a frio. Porém, pretende-se avaliar as características das hastes rosqueadas fabricadas através deste último processo, a fim de verificar se o componente atende as especificações técnicas de uma válvula de esfera.

Hastes rosqueadas, além de serem um dos itens que complementam o leque de fixadores que a Metalúrgica Vabene fabrica, representam a possibilidade de um aumento significativo nas vendas. Uma vez que o mercado de válvulas está em ascensão, o item pode representar 15% do faturamento total da empresa.

Portanto, pretende-se analisar as características das hastes rosqueadas através do processo de conformação a frio, em substituição ao processo de usinagem.

Visa obter componentes de precisão dimensional e resistência mecânica, que atendam aos requisitos que a montagem de uma válvula de esfera exige para seu funcionamento. Ao mesmo tempo, possibilitem um incremento nas vendas da empresa, e uma redução de custos na composição de valores do produto final ao fabricante de válvulas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica para produção de hastes rosqueadas para válvulas de esfera através do processo de conformação a frio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) realizar a caracterização da peça usinada quanto aos seus pontos críticos geométricos, de acabamento e de material;
- b) projetar e executar a fabricação da haste rosqueada de acordo com as limitações e possibilidades do processo de conformação a frio;
- c) comparar as hastes fabricadas através do processo de conformação a frio com as peças fabricadas através de usinagem, nos quesitos geométricos, acabamento superficial e aplicação na montagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica do trabalho de conclusão de curso. Primeiramente são abordados aspectos relacionados a válvula de esfera e características necessárias na haste rosçada. Na sequência, conceitos a respeito dos processos de conformação a frio e usinagem, que prestaram suporte para sua implementação no capítulo 3.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA VÁLVULA DE ESFERA, HASTE ROSQUEADA E SEUS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.1.1 Válvula de Esfera e Haste Rosqueada

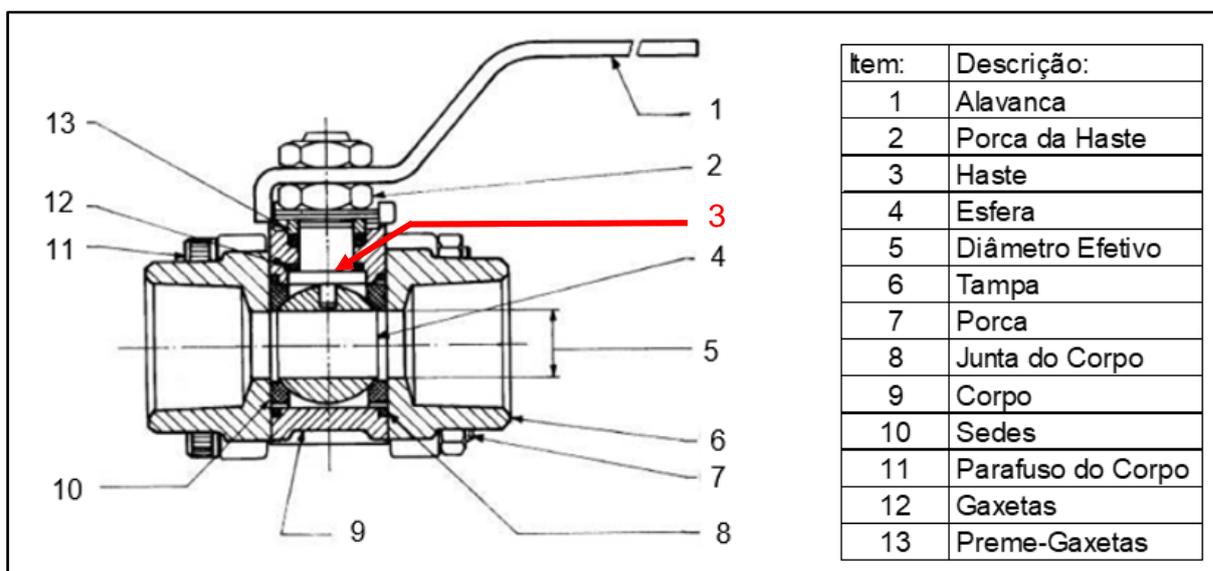
De acordo com Telles (2015), como definição,

Válvulas de esfera são basicamente de funcionamento *on-off*, na qual uma esfera é utilizada como obturador com um orifício passante. Este descreve um movimento rotacional de 0° a 90° em relação ao sentido do escoamento do fluido na tubulação ou recipiente para abrir e fechar. Na posição aberta, o furo da passagem da esfera fica totalmente alinhado com a tubulação, permitindo a vazão do fluido. Na posição fechada, o orifício da esfera fica perpendicular ao sentido de escoamento do fluxo, efetuando o bloqueio da passagem do fluido.

A norma ISO 17292 (2015) é responsável pela normatização da construção de válvulas de esfera, e constitui uma válvula pelos seus respectivos componentes básicos na Figura 2.

Válvulas de esfera monobloco, de construção simples, são indicadas para utilização em fluidos como água, óleo ou gases. É constituída de um corpo (monobloco) com fechamento por tampa rosçada (MGA, 2021).

Figura 2 - Projeto básico de uma válvula de esfera conforme a ISO 17292



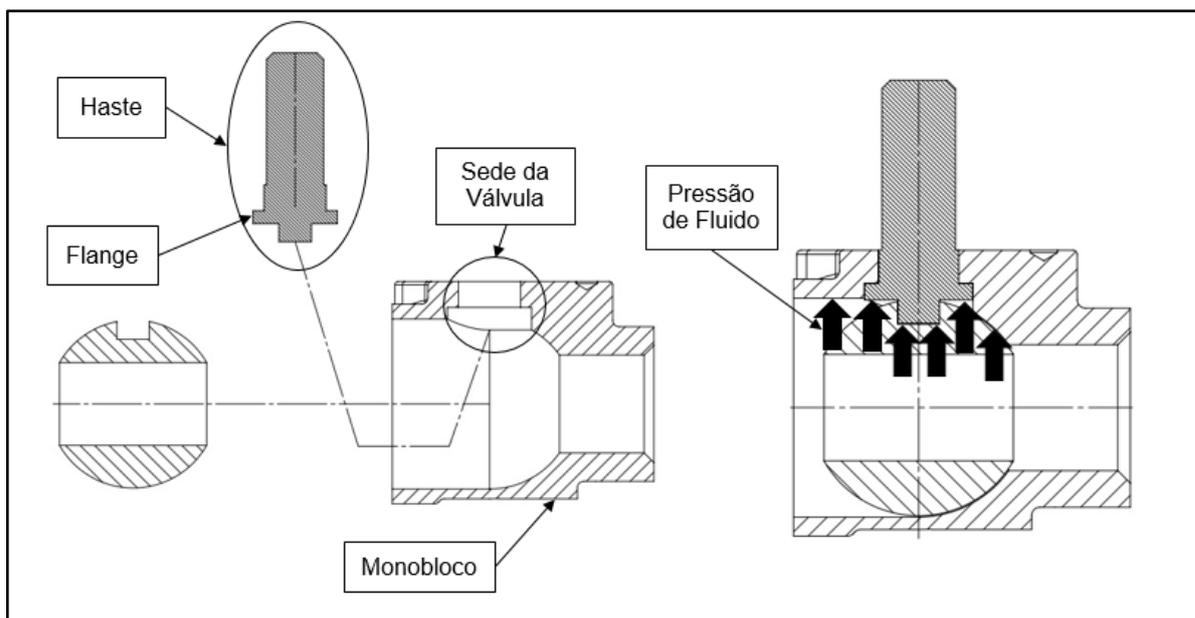
Fonte: Adaptado de Norma ISO 17292 (2015).

A norma ISO 17292 (2015, p. 11) também define características necessárias a haste rosqueada. Para o bom funcionamento da válvula, a mesma deve respeitar requisitos geométricos e construtivos.

A válvula deve ser projetada de tal modo que a haste rosqueada esteja fixada não apenas pelo dispositivo de retenção da vedação. Ou seja, durante a aplicação da válvula, sob pressão de fluido, o projeto da válvula e projeto do conjunto haste rosqueada-esfera, devem garantir que a haste rosqueada não seja expulsa do bloco com a desmontagem de algum componente externo.

Desse modo, a solução encontrada pelos fabricantes é a inclusão de um flange na porção final da haste rosqueada. É feita a montagem da haste por dentro do bloco da válvula, e em seguida inserida a esfera. Assim, a haste rosqueada fica enclausurada no interior do corpo da válvula, não sendo possível a sua expulsão caso seja necessária a desmontagem de algum outro componente externo. A Figura 3 ilustra a montagem da válvula, bem como a posição da haste já disposta em seu local de aplicação.

Figura 3 - Montagem de haste a prova de expulsão



Fonte: o Autor (2021).

A conexão feita entre a haste rosqueada e a esfera, e a porção da haste que fica embutida dentro do corpo da válvula, devem ser projetadas para que suportem um excesso de pelo menos 10% da resistência à torção na temperatura máxima nominal de trabalho da válvula.

Do mesmo modo, a haste rosqueada e a conexão feita entre a haste rosqueada e a esfera devem ser projetadas de tal modo a impedir qualquer deformação permanente ou falha de qualquer parte. Essa falha não pode ocorrer ao ser aplicada uma força na alavanca de operação direta ou por atuador eletromecânico, que seja igual ou superior a 20 Nm, ou o dobro do torque especificado pelo fabricante. O torque apontado pelo fabricante deve ser determinado através de testes em água limpa, ar seco ou nitrogênio, em um diferencial de pressão igual à classificação de pressão diferencial máxima de serviço da válvula.

2.1.2 Materiais de construção para haste rosqueada

A norma ISO 17292 (2015) não estabelece nenhuma restrição quanto ao tipo de material que pode ser empregado na fabricação das hastes rosqueadas. Porém, tradicionalmente são adotados os materiais pelos fabricantes: aços inoxidáveis, aços ao carbono, bronzes ou ligas de latão. Devido a sua maior resistência mecânica e

propriedades antioxidantes, os aços inoxidáveis são largamente aplicados na constituição das hastas rosqueadas.

Schaeffer (2006) faz uma abordagem a respeito dos coeficientes de atrito de cada material no processo de conformação. O coeficiente é determinante para que se encontre a força de recalque na seção 2.2.1.

De acordo com McGuire (2008), atualmente existem três tipos de aços inoxidáveis mais utilizados no mercado: Ferríticos, Martensíticos e Austeníticos. O autor cita que os aços inoxidáveis ferríticos são os mais simples, com sua composição química básica em ferro e cromo. É um aço inoxidável com ductilidade maior em relação aos outros dois tipos, e resistência mecânica menor. O aço inoxidável martensítico tem composição química próxima do ferrítico, porém com níveis de carbono mais elevados em sua estrutura. Esse fato permite que os aços inoxidáveis martensíticos aceitem bem tratamento térmico, que concede maior dureza ao metal.

Por outro lado, os aços Austeníticos são os mais facilmente encontrados no mercado, principalmente pela sua alta resistência à corrosão e não magnetismo. Sua composição química tem entre cerca de 16 e 25% de cromo, responsável pela característica anticorrosiva do material. Devido a essa característica, é amplamente utilizado em aplicações de transporte de fluidos, como nos setores petroquímico e alimentício, que necessitam de alta estabilidade da superfície do metal (MCGUIRE, 2008).

O atrito acontece na existência de um movimento relativo entre a ferramenta de conformação e o material a ser deformado. A presença do atrito no processo de deformação leva a um consumo de energia, que deve ser definido através de um coeficiente μ . Este coeficiente é definido pela Lei de Atrito de Coulomb, e sua determinação é feita através do teste de anel (SCHAEFFER, 2006). Estes valores são fatores determinantes para a força de prensagem (seção 2.2.1), e são tabelados de acordo com cada material/metalo, e disponíveis para consulta no Anexo A.

Aços inoxidáveis austeníticos (304L ou 316L), apresentam a constante C e índice de encruabilidade n com valores de 1250 MPa e 0,4, respectivamente. Estas duas constantes são fundamentais para determinação das propriedades do material na seção 2.2.1 (DESU; KRISHNAMURTHY; BALU; GUPTA; SINGH, 2016).

2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2001), o forjamento é um processo básico no qual o produto é conformado por forças de compressão, forças aplicadas na peça através de uma ou um conjunto de matrizes e ferramentas. Permite a produção de peças discretas, as quais o fluxo de metal em sua deformação e a estrutura de grão do material podem ser controlados.

O forjamento pode ser feito a quente ou a frio (com ou sem aquecimento da peça). O forjamento a frio requer forças de compressão maiores em função da maior resistência do material da peça na temperatura ambiente. Do mesmo modo, o material do produto deve possuir ductilidade suficiente à mesma temperatura para sofrer a deformação necessária sem fissuras. Forjados a frio possuem alta precisão dimensional e bom acabamento superficial, conseguindo apresentar tolerâncias de $\pm 0,05$ mm, em diâmetros, por exemplo, e rugosidades médias na casa de $R_a = 1,60$ μm . Por outro lado, o forjamento a quente requer menos esforços, mas a precisão dimensional e o acabamento superficial das peças são inferiores (KALPAKJIAN; SCHMID, 2001)

2.2.1 Operação de Conformação – Prensagem e Recalque de fixadores

Segundo Kalpakjian e Schmid (2001), a conformação através de prensagem e recalque para fixadores é um processo altamente produtivo, realizado em máquinas conformadoras automatizadas, com taxas produtivas na ordem de centenas de peças por minuto.

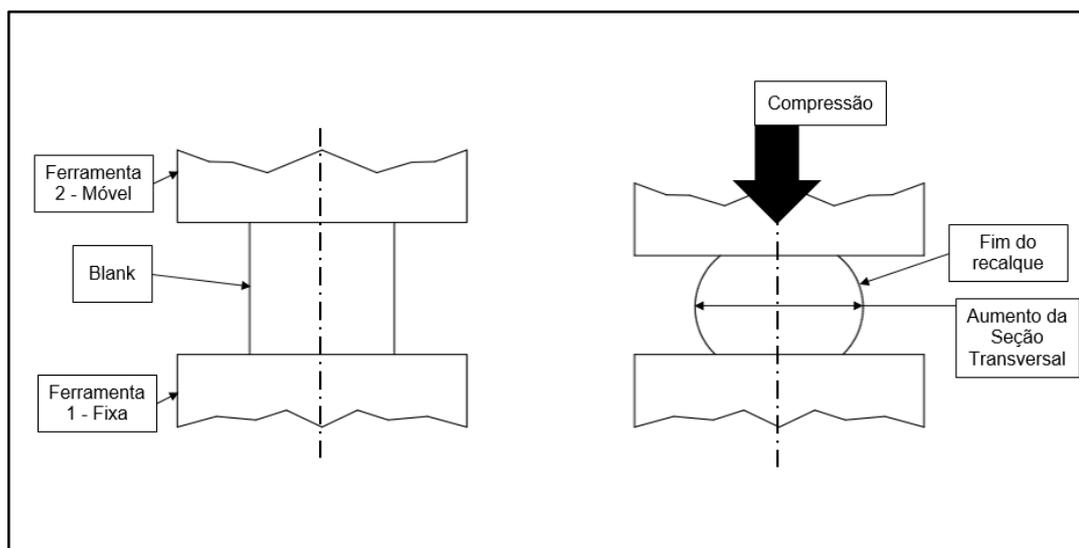
Suski (2015) cita que as prensas horizontais fazem o processamento da matéria prima partindo de fio-máquina ou arame, para produção dos componentes, e completa que

nas operações de múltiplos estágios a área da seção transversal é progressivamente reduzida a fim de distribuir os esforços mecânicos nas ferramentas e na prensa. Atualmente estes equipamentos podem ter até sete estágios e utilizam-se das mais modernas técnicas de servo-acionamento e de acionamento direto, assim como o emprego de novos materiais, corte fino, alimentação linear do arame, revestimentos funcionais e métodos de processamento que resultam em soluções completamente inéditas, proporcionando grandes vantagens para o setor industrial.

De acordo com Suski (2015), o desenvolvimento de uma peça passa pelo cálculo do volume total de material a ser utilizado para fabricar o componente. O autor também cita que os diversos estágios intermediários devem possuir o mesmo volume do corte (*blank* ou geratriz) até o produto final, pois o componente finalizado não possui alterações significativas de volume.

Por definição, a operação de recalque consiste na compressão direta do *blank*/geratriz entre um par de ferramentas de face plana ou côncava, com o objetivo de aumentar a seção transversal da peça (SUSKI, 2015). O recalque pode ser utilizado em estágios intermediários, dependendo das dimensões e geometrias que se deseja atingir. A Figura 4 mostra a definição do processo de recalque.

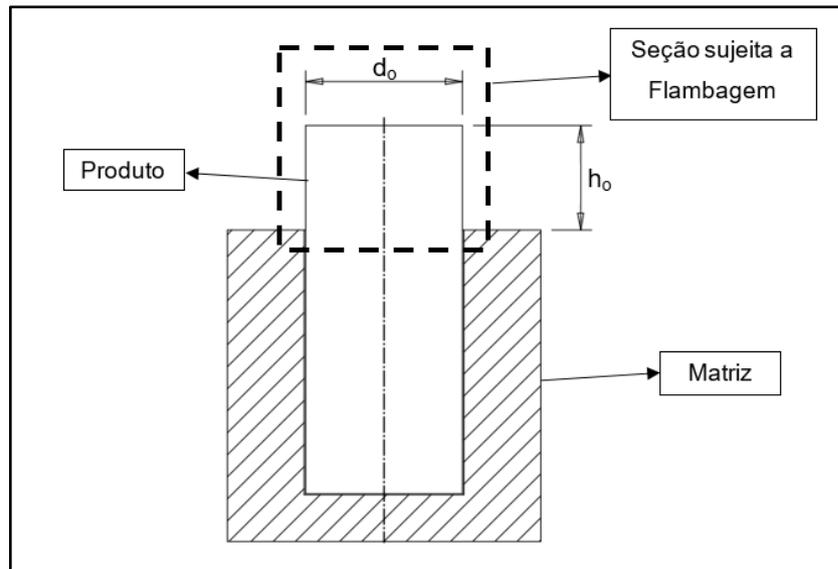
Figura 4 - Definição do processo de Recalque



Fonte: adaptado de Suski (2015).

Suski (2015) propõe que antes de ser feito cálculo do processo de recalque, deve ser observado o quociente obtido entre o comprimento livre (h_0) da parte que sofrerá o recalque com a dimensão do diâmetro da geratriz (d_0). Esse quociente chama-se relação de recalque (s). O comprimento livre que fica fora do alojamento da matriz, caso dimensionado incorretamente, pode sofrer flambagem ao invés de sofrer o recalque. Assim, a relação de recalque (s) não deve ultrapassar o valor de 2,50, a fim de evitar este fenômeno. A porção de material que está sujeita a flambagem, está representada na Figura 5.

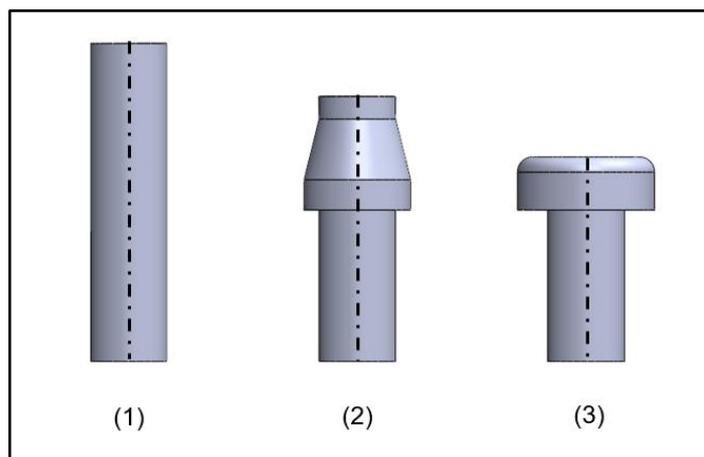
Figura 5 - Porção de material sujeito a flambagem



Fonte: adaptado de Suski (2015).

A Figura 6 ilustra um exemplo com os respectivos estágios de recalque necessários para fabricação de um modelo de fixador. É mostrado o corte do arame/geratriz (1), recalque de pré-forma (2) e recalque final na geometria desejada (3). Os estágios intermediários são necessários com o objetivo de respeitar a relação de recalque.

Figura 6 - Estágios de Recalque de um fixador



Fonte: adaptado de Kalpakjian e Schmid (2001).

De acordo com Schaeffer (2006), para determinação das forças de recalque, é necessário o conhecimento prévio da curva de escoamento do material a ser utilizado. As curvas são obtidas através de ensaios mecânicos (ensaio de tração e

compressão), e podem ser descritas através de equações matemáticas. A Equação 1 expressa a tensão de escoamento conforme a deformação verdadeira (Equação de Hollomon).

$$K_f = C \cdot \varphi^n \quad (1)$$

Sendo:

K_f , a tensão de escoamento [MPa];

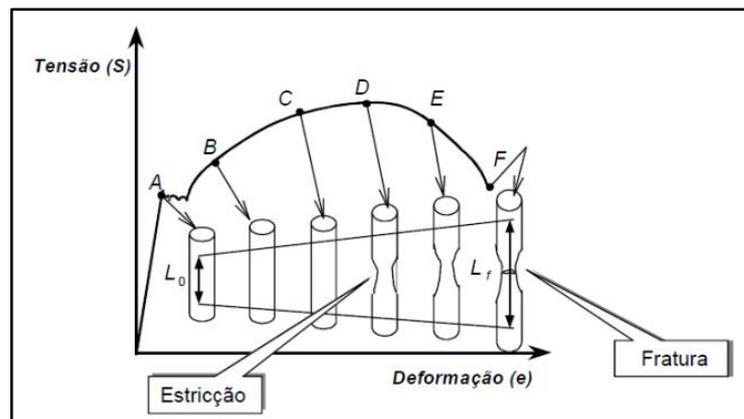
C , a constante do material [MPa];

n , o índice de encruabilidade [-];

φ , a deformação verdadeira [-].

No ensaio de tração, o corpo de prova é tracionado por uma força axial, que cresce até ocorrer o rompimento da peça teste. A máquina faz o registro, em espaços curtos de tempo, da força e comprimento do corpo de prova, que podem ser transformadas em tensão e deformação, de dois tipos: tensão *versus* deformação de engenharia (convencional) e tensão *versus* deformação verdadeira (real ou de escoamento). A Equação 1 faz referência a curva de tensão *versus* deformação real. Porém, ensaios de tração permitem a obtenção de curvas de tensão *versus* deformação convencionais, ou de engenharia (SOUZA, 2013). O autor também cita que no caso da curva de engenharia, a tensão convencional é obtida pelo quociente da força aplicada pela área do corpo de prova, e a deformação de engenharia (ϵ), obtida pelo quociente do alongamento pelo comprimento inicial da amostra. A curva de engenharia é demonstrada na Figura 7.

Figura 7 - Curva de Engenharia



Fonte: adaptado de Souza (2013).

De outro modo, Souza (2013) cita que para a obtenção da curva de tensão *versus* deformação real, a tensão é calculada pelo quociente da carga aplicada em cada instante pela área da amostra no mesmo instante, e a deformação real, é baseada na mudança do comprimento em relação ao comprimento-base de medida instantâneo.

Souza (2013) propõe a Equação 2 para que seja possível a obtenção da deformação real.

$$\varphi = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (2)$$

Sendo:

φ , a deformação verdadeira [-];

L , o comprimento instantâneo do corpo de prova [mm];

L_0 , o comprimento inicial do corpo de prova [mm].

A Equação 3 é sugerida pelo autor para obter a relação entre a deformação convencional e verdadeira.

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

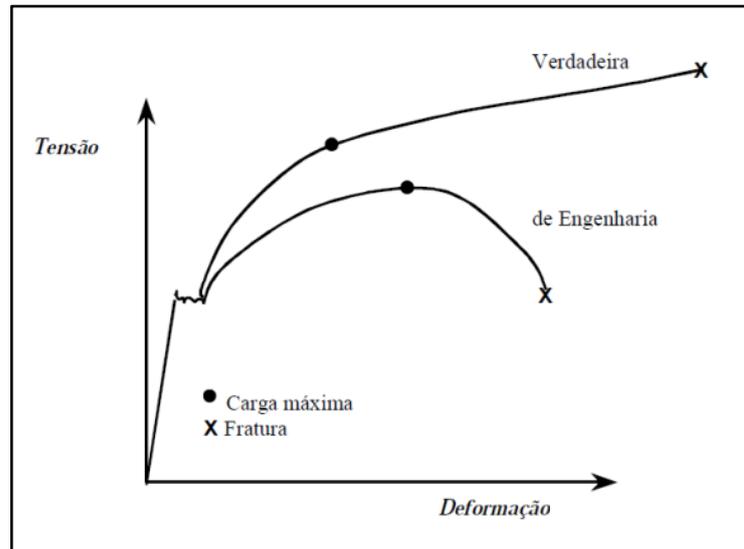
Sendo:

φ , a deformação verdadeira [-];

ε , a deformação de engenharia [-].

A curva de escoamento caracteriza-se por apresentar tensões superiores à curva de engenharia, em função da área da seção transversal reduzir conforme a força de tração é aplicada (SOUZA, 2013). A Figura 8 apresenta um comparativo entre a curva de engenharia e a curva verdadeira.

Figura 8 - Comparativo das Curvas Verdadeira e de Engenharia



Fonte: adaptado de Souza (2013).

Para encontrar a força de recalque em cada um dos estágios, Schaeffer (2006) sugere a Equação 4.

$$F_p = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) \quad (4)$$

Sendo:

F_p , a força de recalque [N];

A_{1p} , a área de contato no final da prensagem [mm²];

K_{f1} , a tensão de escoamento no final da prensagem [MPa];

μ , o coeficiente de atrito [-];

d_1 , o diâmetro no final da prensagem [mm];

h_1 , a altura após a prensagem [mm].

As Equações 5 e 6 permitem encontrar o comprimento da geratriz e a deformação verdadeira, pois Schaeffer (2006) menciona também serem fatores determinantes para que se dimensione corretamente as forças de recalque.

$$\varphi_h = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \quad (5)$$

$$h_o = h_1 \cdot e^{\varphi_h} \quad (6)$$

Sendo:

φ_h , a deformação na direção da altura [-];

h_o , o comprimento da geratriz [mm];

h_1 , a altura após a prensagem [mm].

2.2.2 Operação de Laminação – Roscamento

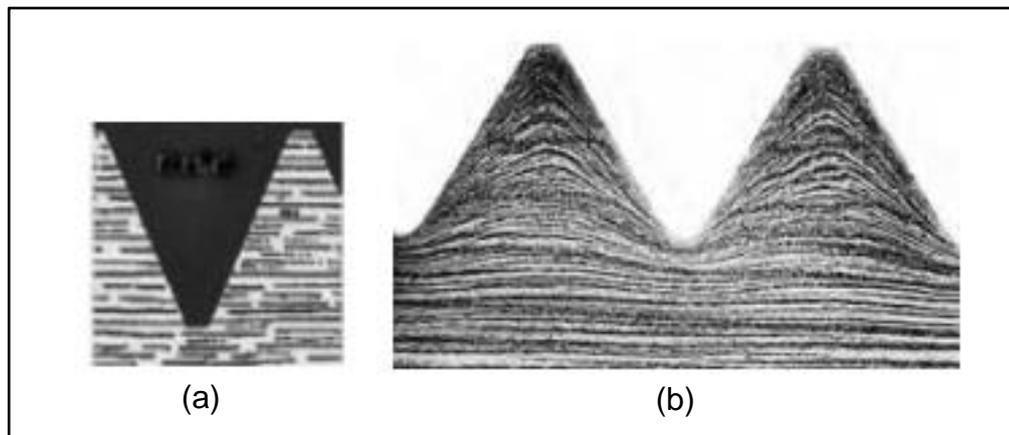
Uma rosca é constituída de um perfil com determinada forma geométrica, que é rotado em hélice em passo uniforme, e faz com que o parafuso avance ou recue, ao ser rotacionado, conforme definido por Norton (2013).

A rosca pode ser obtida através dos processos de conformação a frio (laminação) ou usinagem, tendo a laminação, vantagens sobre o processo de usinagem. De acordo com Ciuccio et. al (2011),

isso significa que a laminação a frio é um processo de transformação que não produz cavacos, formando roscas mais resistentes e com um acabamento superficial de melhor qualidade, além de tornar a limpeza quase desnecessária e não gerar os custos de remoção de cavacos longos, próprios da operação convencional com machos de corte, cujos cavacos muitas vezes se alojam na haste da ferramenta e impõem riscos ao trabalho.

Segundo Sađlam e Kuş (2011), a laminação acarreta em um excelente acabamento superficial, com rugosidade média na casa de $R_a = 0,80 \mu\text{m}$, suavizações do flanco da rosca (que mantém um fluxo contínuo dos grãos metálicos) e um encruamento em sua superfície, aumentando a dureza em torno de 40%. A Figura 9 exemplifica a continuidade das fibras do metal.

Figura 9 - Comparativo entre rosca usinada (a) e conformada (b)

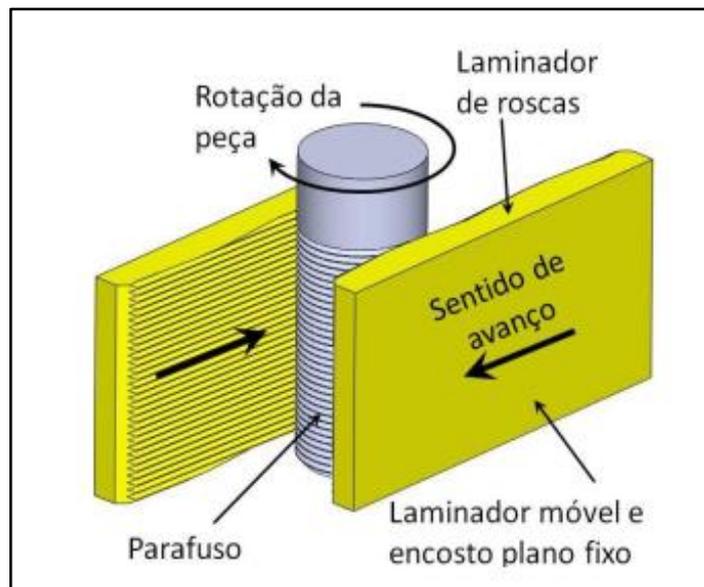


Fonte: Sađlam e Kuş (2011)

Carvalho (2011) mostra três modelos de processo para que seja feita a laminação de rosca:

a) Roscamento externo através de laminação com ferramenta de encosto: Neste processo mostrado na Figura 10, são empregadas duas placas, com o perfil de rosca projetado em suas faces. Uma dessas placas é mantida fixa, enquanto a outra realiza um movimento linear e paralelo. Na medida em que a peça é rotada entre as placas, a rosca vai sendo conformada no corpo do item.

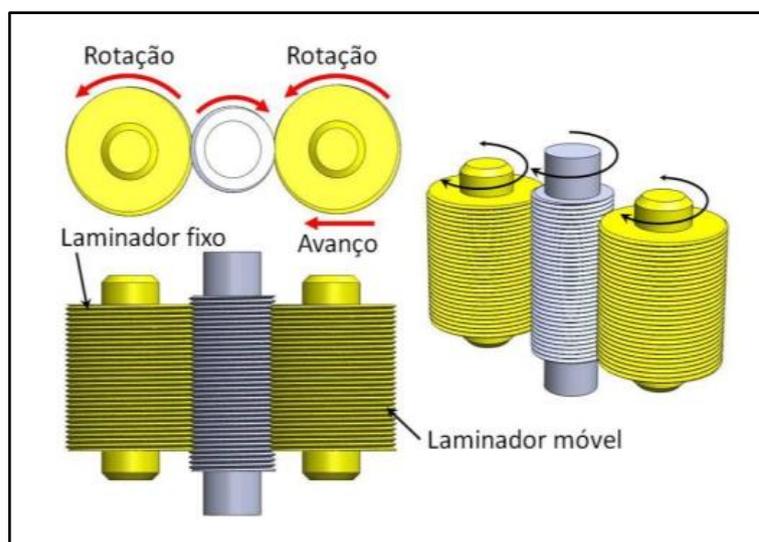
Figura 10 - Roscamento com ferramenta de encosto



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

b) Laminação por gravação única: Dois cilindros com a projeção dos filetes de rosca são utilizados nesse caso, e eles giram no mesmo sentido e velocidade de rotação. A peça é posicionada entre os dois, fixada pelas pontas ou por uma régua. Um dos cilindros laminadores fica fixo por um mancal, e o outro pode se mover radialmente para se adequar ao tamanho da peça a ser trabalhada. A Figura 11 demonstra o processo.

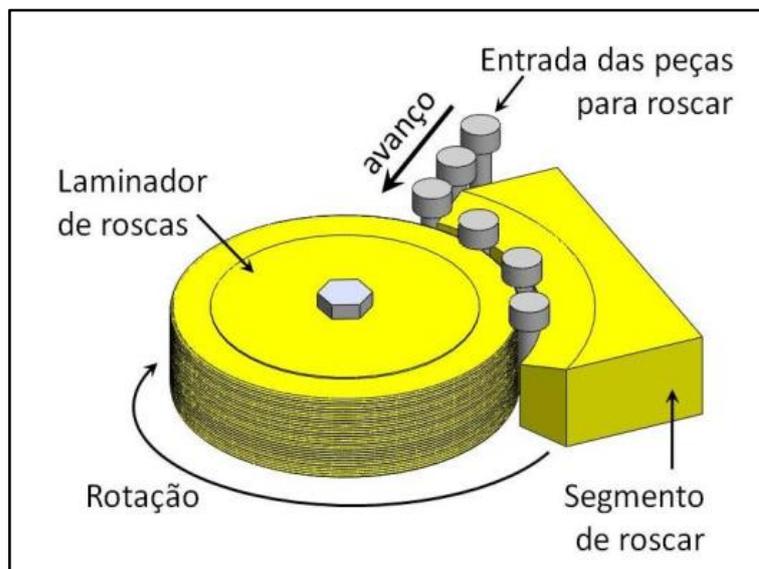
Figura 11 - Roscamento por gravação única



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

c) Laminação da rosca através de cilindro e ferramenta segmento de roscamento: A laminação de roscas com cilindro e segmento de rosqueamento é composta por uma ferramenta laminadora (cilindro laminador) e um segmento de rosca fixo. O produto é posicionado entre as duas peças, e conforme o cilindro gira, o produto é rotacionado, conformando a rosca em sua superfície. O processo é indicado na Figura 12, e é recomendado para produção de lotes grandes de peças, devido a sua alta produtividade.

Figura 12 - Laminação por cilindro e segmento de rosqueamento



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Norton (2013) também cita que as roscas seguem padrões normatizados, sendo os dois principais sistemas de rosca: Unified National Standard (UNS), utilizado tradicionalmente em países como Canadá, Inglaterra e Estados Unidos, podendo ser utilizado com dois passos de rosca, fina (UNF) e grossa (UNC); e também o sistema ISO, utilizado na Europa. Desse modo, o Anexo B traz uma tabela com informações a respeito desses padrões de rosca, relacionando os diâmetros primitivos necessários (mínimos e máximos) para que as peças fabricadas através do processo de laminação atendam aos requisitos normativos.

2.3 USINAGEM - BROCHAMENTO

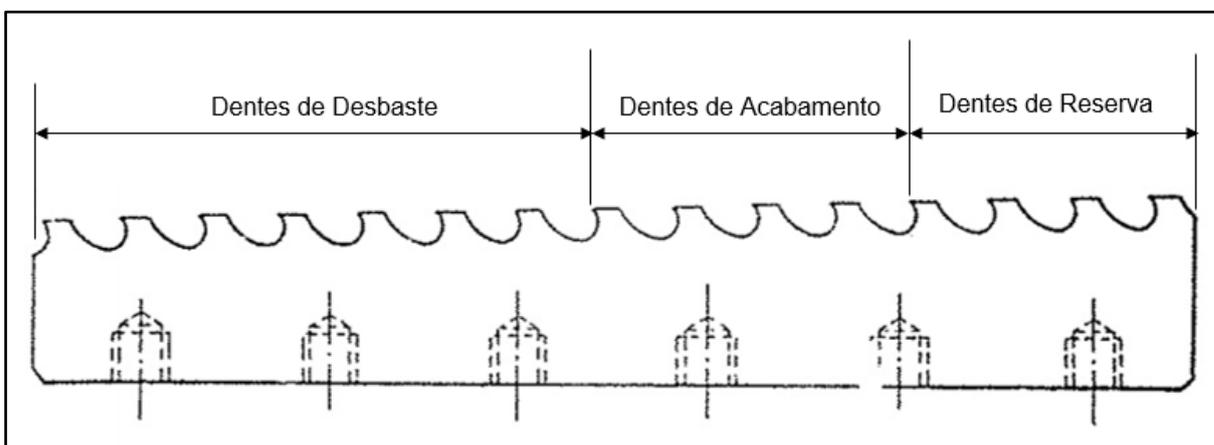
De acordo com Stemmer (1995), o brochamento é um processo de usinagem que consiste de um movimento linear para realizar o corte do metal, através da utilização de uma ferramenta de múltiplos dentes, posicionados em série, com altura crescente. A ferramenta é chamada de brocha, e pode ser forçada ou puxada (tração ou compressão) por dentro de um furo ou superfície (brochamento interno ou externo). Cada dente tem formas geométricas diferentes, se aproximando progressivamente da forma final desejada.

O processo de brochamento possui vantagens como: economia, manutenção de tolerâncias estreitas e acabamento superficial com ausência de rebarbas, podendo

dispensar processo posterior de retífica, além da versatilidade na produção de variadas formas geométricas internas (por exemplo, chavetas, ranhuras, estriados) e externas, vida longa da ferramenta de usinagem e agilidade na produção de múltiplas peças (STEMMER, 1995).

Stemmer (1995) também ressalta que o brochamento é um processo peculiar, devido a sua capacidade de realizar o desbaste, pré-acabamento, acabamento e por vezes até alisamento, em um único passe da ferramenta, proporcionando alta produtividade. A Figura 13 representa um exemplo de ferramenta de brochar, utilizada para usinagens externas/de superfície.

Figura 13 - Brocha para usinagem de superfície externa



Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

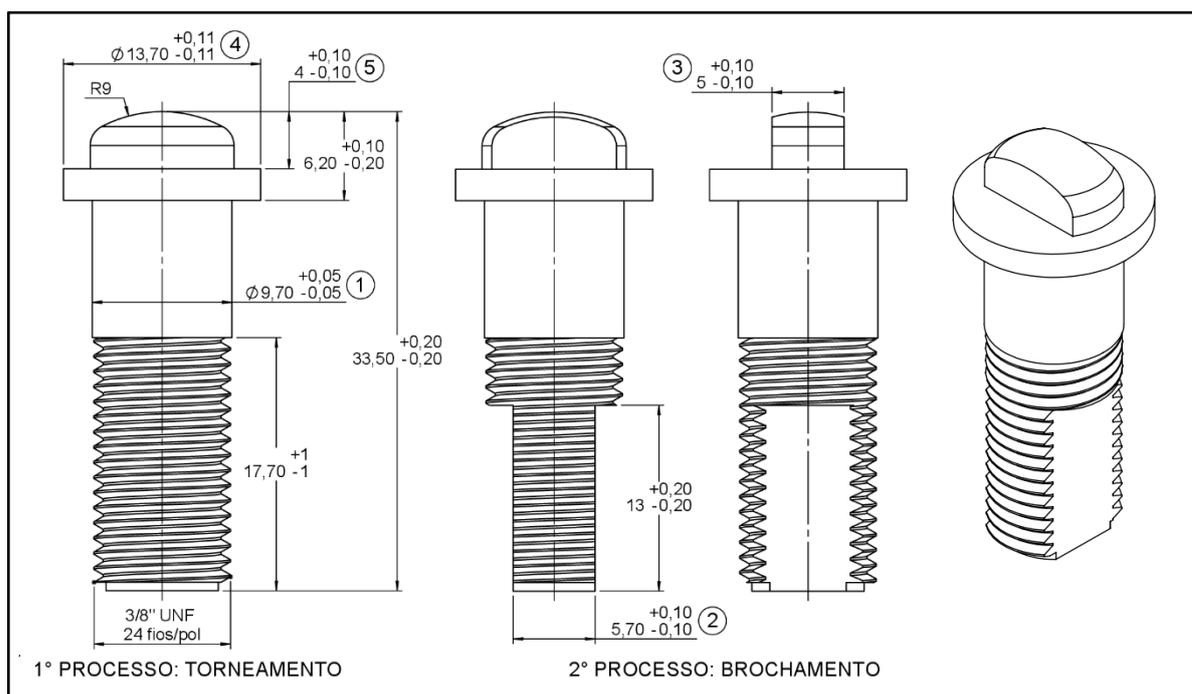
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados aspectos relevantes a respeito dos métodos e materiais utilizados para desenvolvimento do componente em estudo. Em um primeiro momento, são apresentadas características da haste fabricada atualmente através de usinagem, especificações técnicas, condições de contorno e as normas e requisitos para ensaios/testes a serem atendidos. Por fim, são especificadas e detalhadas as etapas e atividades para desenvolvimento do trabalho e obtenção do resultado, que é a peça fabricada através do processo de conformação a frio.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

As hastes rosqueadas tem o objetivo de fazer a ligação entre a alavanca de acionamento e a esfera, que faz a retenção do fluxo. A haste em estudo tem dimensões e geometrias para atender a montagem de válvulas tamanho nominal 10 (conforme norma ISO 17292 – 2015), que atende bitolas de canos com dimensão 3/8". A haste rosqueada 3/8", produzida no processo de usinagem, tem suas dimensões e geometrias apresentadas na Figura 14.

Figura 14 - Haste Rosqueada 3/8" Usinada



Fonte: O autor (2021).

A haste rosqueada fabricada através do processo de usinagem traz alguns pontos críticos que devem ser levados em consideração na sua fabricação, para que atendam aos requisitos necessários para operação correta da válvula. O desenho completo da haste rosqueada encontra-se no Apêndice A.

- a) as dimensões principais indicadas nos pontos críticos de código 1 a 5 na Figura 14 devem ser respeitadas no projeto da haste rosqueada fabricada por conformação a frio;
- b) a peça conformada a frio não pode apresentar rebarbas residuais na cabeça e na rosca após o processo de brochamento, que possam gerar retrabalhos ou necessidade de processos de produção posteriores;
- c) a matéria prima para a fabricação da peça forjada a frio deve ser aço inox 304 (devido a sua capacidade anticorrosiva), não podendo ser substituído em função do processo de fabricação.

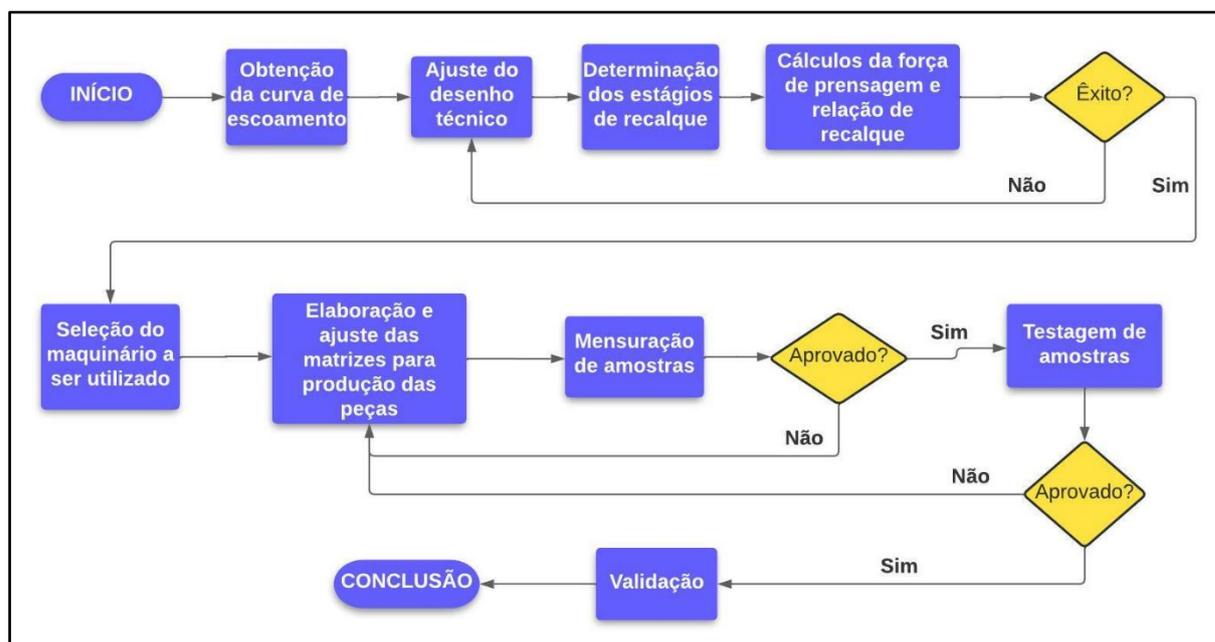
3.2 ETAPAS DE TRABALHO E METODOLOGIA

Nesta seção são abordadas etapas preliminares realizadas para a obtenção dos dados para elaboração do projeto da haste rosqueada. Também é apresentado um fluxograma com o objetivo de melhorar a compreensão da interligação das atividades.

3.2.1 Fluxograma das atividades

A Figura 15 mostra a ordenação das etapas que foram desenvolvidas para resolução do problema em questão. Na sequência, as atividades são apresentadas de forma mais detalhada, com o objetivo de maior esclarecimento.

Figura 15 - Fluxograma de tarefas



Fonte: O autor (2021).

3.2.2 Material e determinação das propriedades mecânicas

A curva de escoamento do material foi necessária para determinação das tensões e forças de prensagem, conforme mostrado na seção 2.2.1. Desse modo, para a obtenção da curva, foi realizado o teste de tração do material Inox 304L a ser conformado.

O Inox 304L utilizado na fabricação das hastes é fornecido em rolos de seção circular contínua, no diâmetro de $\varnothing 8,60$, fabricado através do processo de trefilação. A Figura 16 mostra o material recebido do fornecedor externo. O aço inox 304L é um material próprio para ser utilizado em processos de conformação, e possui limite de ruptura a tração em 580 MPa. No Anexo D é apresentado o certificado de matéria prima encaminhado pelo fornecedor.

O ensaio obedeceu a norma NBR ISO 6892-2:2018, que, além de determinar as características do teste, apresenta a dimensão padrão necessária para os corpos de prova. Foram fabricados cinco corpos de prova no total, com o dimensional mostrado no Apêndice B, a partir de amostra obtida com fornecedor externo. Um deles foi sacrificado para avaliação do comportamento na máquina de ensaios, e os outros quatro foram avaliados e utilizados na mensuração e coleta de dados.

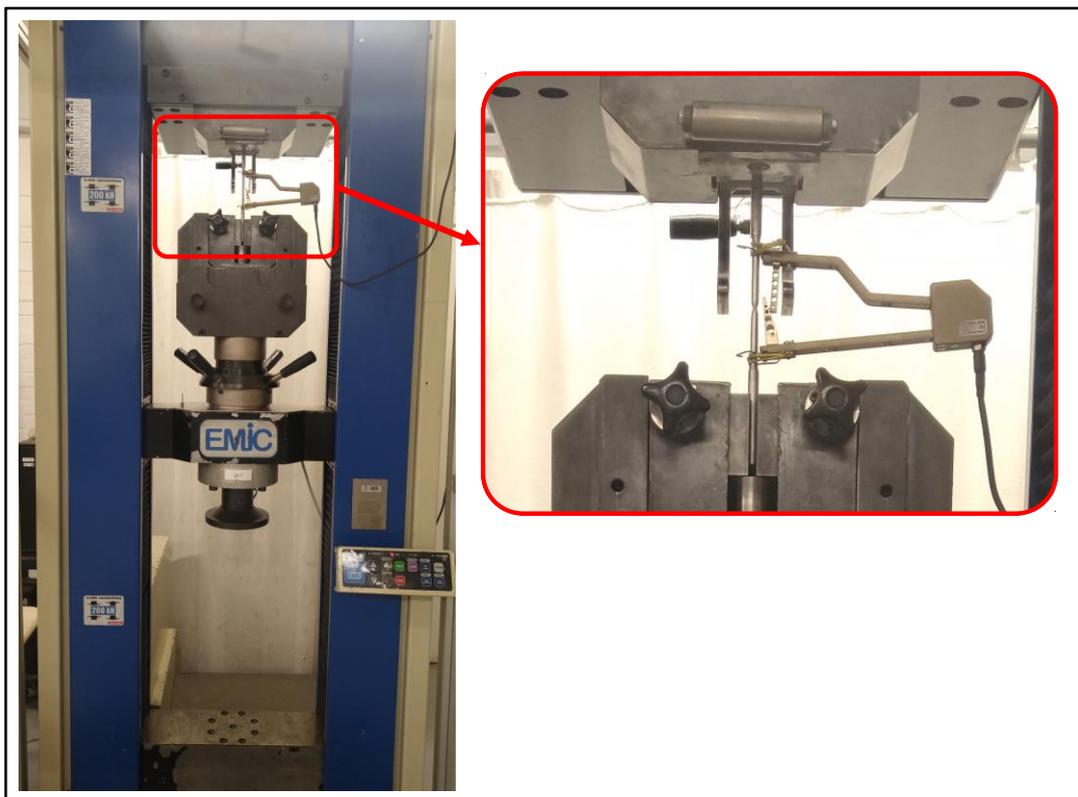
Figura 16 - Rolo de arame acondicionado em estocador



Fonte: O autor (2021).

O teste de tração foi feito em equipamento localizado no laboratório da UCS (Campus SEDE), de marca EMIC, modelo DL20000 e capacidade de 200 kN. Também foi utilizado um extensômetro para fazer a medição do alongamento do corpo de prova durante o teste. A Figura 17 mostra o corpo de prova montado na máquina de tração, e a Figura 18, os corpos de prova após a testagem, evidenciando o empescoçamento sofrido pelo material.

Figura 17 - Corpo de prova montado em máquina de ensaio de tração



Fonte: O autor (2022).

Figura 18 - Corpos de prova após o ensaio de tração



Fonte: O autor (2022).

Os dados de força *versus* alongamento foram registrados pelo equipamento, gerando seus respectivos pontos. Dessa forma, com o auxílio do *Software* Microsoft Excel®, foi possível obter os gráficos de tensão-deformação, mostrando resultados de tensão de engenharia e tensão real. Também foram obtidas a constante do material

C, e o índice de encruabilidade n , com auxílio da Equação 1. As constantes foram obtidas através da inclusão de uma linha de tendência do tipo potência, valendo-se das deformações verdadeiras de 0,10 a 0,35 mm/mm e também do procedimento adotado por Souza (2013) no capítulo 2.2.1.

3.2.3 Determinação dos estágios de recalque e cálculos analíticos

De posse dos dados obtidos na curva de escoamento, respeitando as Equações 4, 5 e 6, a relação de recalque, e o diâmetro primitivo necessário para laminação da rosca (Anexo A), foi possível realizar os cálculos analíticos para se determinar as forças de estampagem e também determinar os estágios de recalque no processo de forjamento a frio. Desse modo, com auxílio do *Software SolidWorks*, foram esmiuçadas as dimensões e geometrias de cada um dos estágios, necessárias para produção do componente.

Partindo-se das dimensões da peça pronta, foram sendo determinados os diâmetros e alturas de cada parte do componente em cada um dos estágios, respeitando a lei do volume constante. Prosseguiu-se dessa forma até chegar ao comprimento total do blank.

Foram feitos ajustes no desenho da peça em função dos raios de concordância e detalhes inerentes ao processo de conformação a frio, para que o material pudesse escoar com mais facilidade pelas cavidades das ferramentas.

3.2.4 Seleção de equipamento e fabricação das matrizes

Determinadas as forças de prensagem e a quantidade de estágios necessária, foi feita a seleção do equipamento e maquinário que comporte e tenha capacidade para fabricação dessa peça.

De acordo com a máquina selecionada, também foi fabricado o conjunto de ferramentas e matrizes para produção da haste, pois cada máquina tem características de ferramental diferentes. Após a finalização do desenvolvimento das matrizes, foram produzidas as peças, e feitos alguns ajustes necessários.

Para produção da haste foram necessários dois equipamentos, um deles para a fabricação da peça forjada a frio (processo de recalque), e outro que realizou o processo de laminação da rosca.

Por fim, o componente foi usinado através do brochamento, para finalizar o seu processo produtivo.

3.2.5 Testes e comparativos

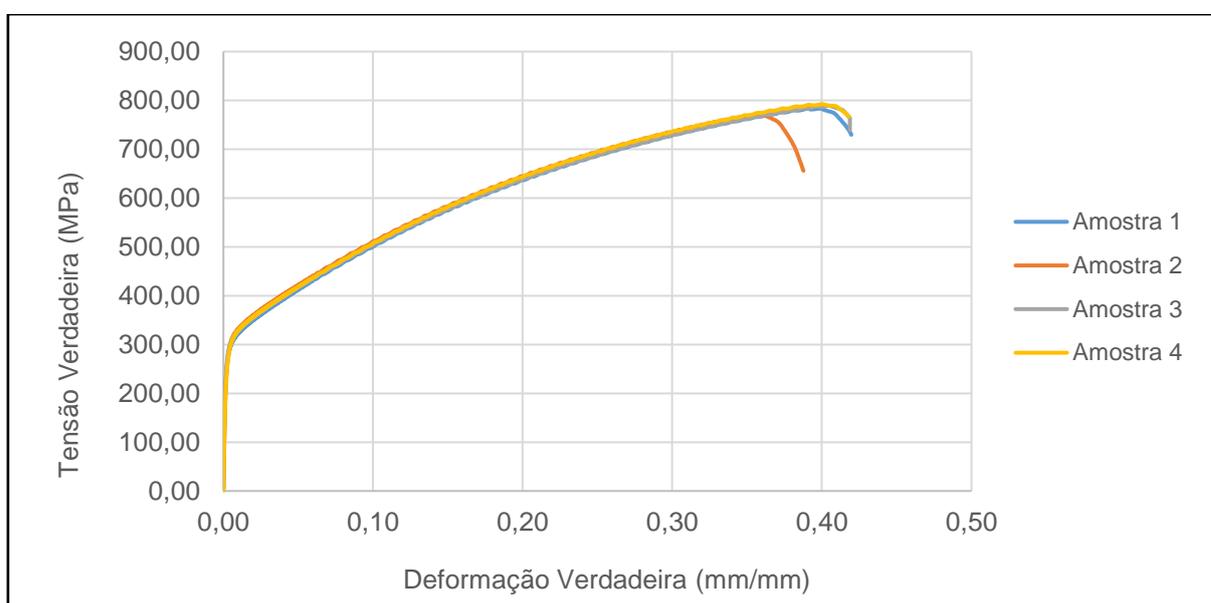
De posse da haste rosqueada finalizada, foi possível realizar os testes comparativos entre haste usinada e forjada. Neste momento foi realizado o comparativo da peça conformada com a torneada em aspectos de acabamento (rebarbas e rugosidade), tolerâncias dimensionais e aspectos de montagem da válvula.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CURVA DE ESCOAMENTO E PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de tração realizado em corpos de prova confeccionados em Aço Inox 304 permitiu a obtenção de pontos, os quais foram compilados em um gráfico tensão *versus* deformação, ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico tensão *versus* deformação de real



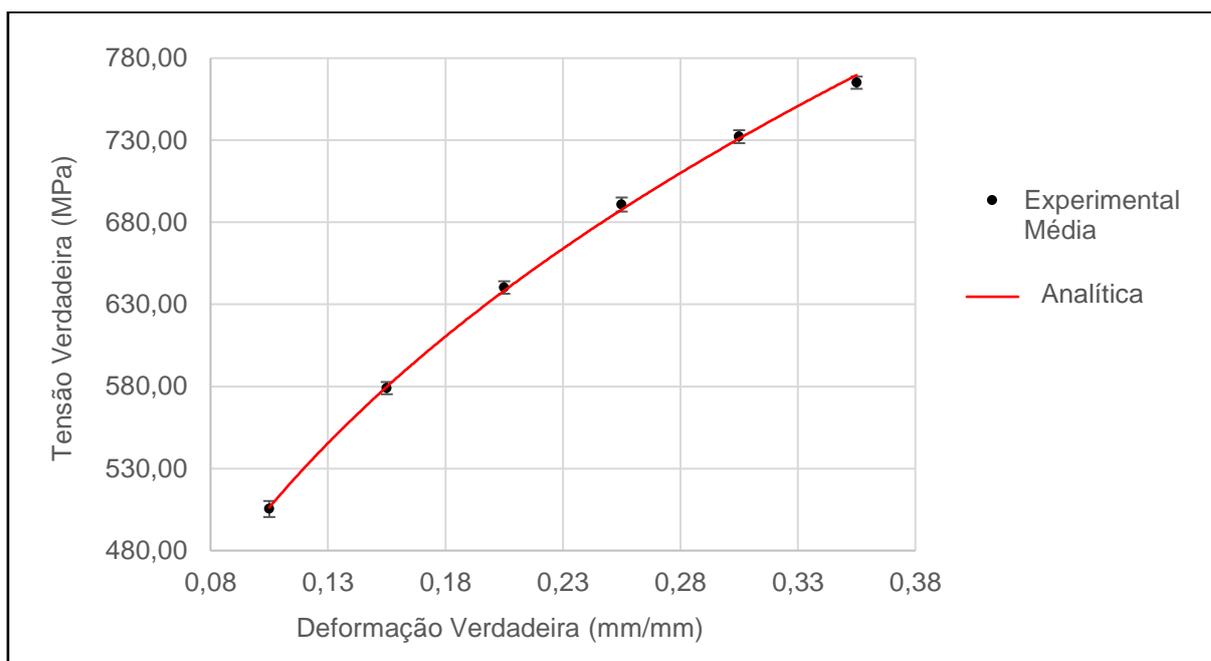
Fonte: O autor (2022).

O laudo completo referente ao ensaio de tração está disponível no Anexo C. Nele, constam informações sobre as tensões de escoamento e máxima, comprimentos e diâmetros iniciais e finais, bem como o módulo de elasticidade. O material apresentou limite de ruptura a tração médio de engenharia de 614 MPa, valor próximo dos 580 MPa informados pelo fabricante no certificado de matéria prima (Anexo D).

Partindo-se dessas curvas, foi possível obter o gráfico tensão *versus* deformação real do material. Esta curva leva em consideração a redução da área e empescoçamento do corpo de prova durante o ensaio de tração, resultando em tensões superiores. Conforme o item 3.2.2, para construção do gráfico foram utilizadas as deformações verdadeiras de 0,10 a 0,35 mm/mm.

De acordo com a Figura 19, as curvas tiveram comportamento parecido, sobrepondo-se no gráfico. Em função de terem similaridade suficiente, podem ser tratadas matematicamente a partir de uma curva média. Assim, a curva tensão *versus* deformação real média do material está apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico Tensão *versus* Deformação real média



Fonte: O autor (2022).

A interpretação do último gráfico permite a obtenção da curva de escoamento conforme a Equação 1. Com auxílio da inclusão da linha de tendência do tipo potência, foi possível extrair as constantes da equação: constante do material C , e o índice de encruabilidade n , para chegar na Equação de Hollomon correspondente ao comportamento da matéria prima selecionada.

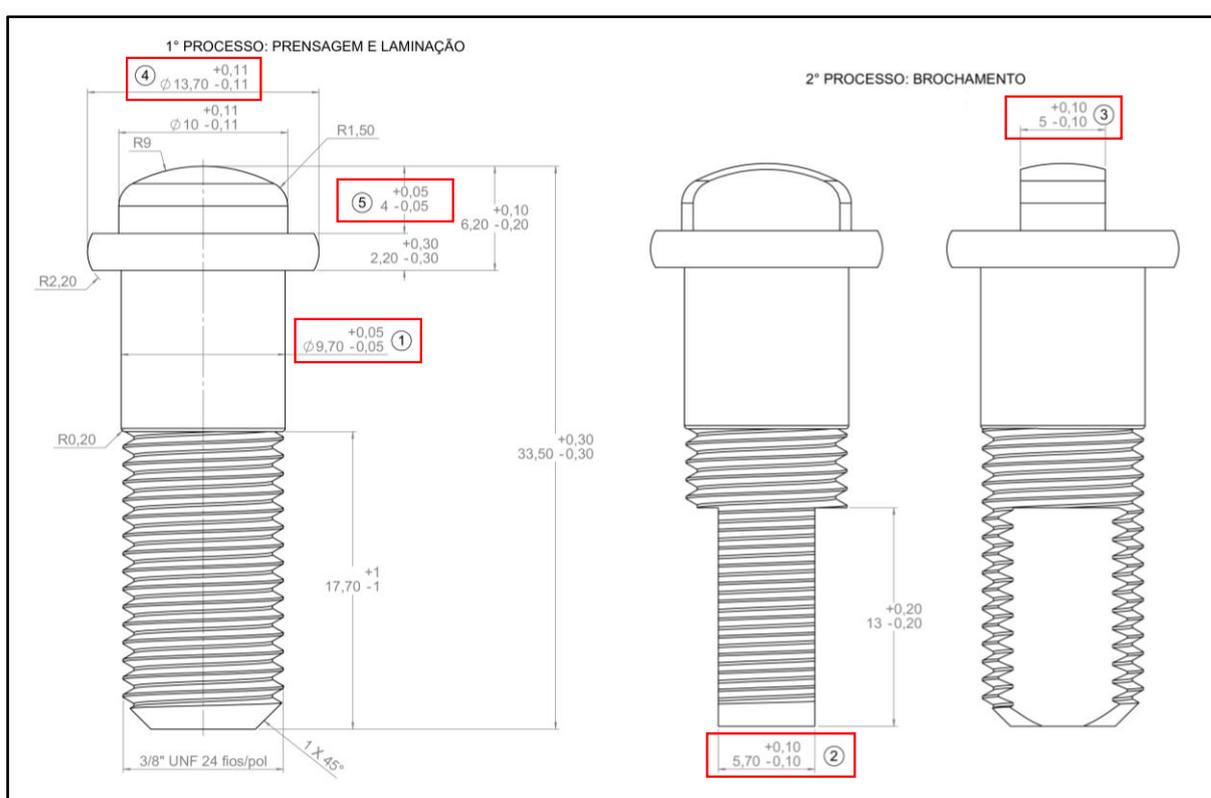
$$K_f = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} \quad (7)$$

Os desvios padrão apresentados na Figura 20 são da casa de 5 MPa. Eles representam um coeficiente de variação de 1%, o que mostra que o material tem comportamento bastante estável. Além disso, os valores das constantes C e n apresentam-se próximos dos valores de 1250 MPa e 0,4, respectivamente, encontrados na literatura, na seção 2.1.2.

4.2 ESTÁGIOS DE RECALQUE E CÁLCULOS ANALÍTICOS

Inicialmente, para realizar a fabricação do componente através de conformação a frio, foram realizadas algumas adequações nos quesitos dimensionais e geométricos do produto. Conforme consta na Figura 21, foram inclusos alguns raios de concordância, e também chanfro guia na ponta. Também foram indicadas as medidas principais do controle dimensional.

Figura 21 - Haste Rosqueada 3/8" Conformada a frio



Fonte: O autor (2022).

O desenho completo da haste produzida através de conformação a frio encontra-se no Apêndice C.

Para o desenvolvimento dos cálculos de prensagem e laminação, a peça foi dividida em cinco cilindros, com volumes equivalentes a peça finalizada (antes do brochamento), conforme a Figura 22, a fim de possibilitar os cálculos conforme Equações 4, 5 e 6, e relação de recalque. Partiu-se das dimensões da peça pronta após a prensagem e laminação. Foi utilizado como base a sequência em seis estágios

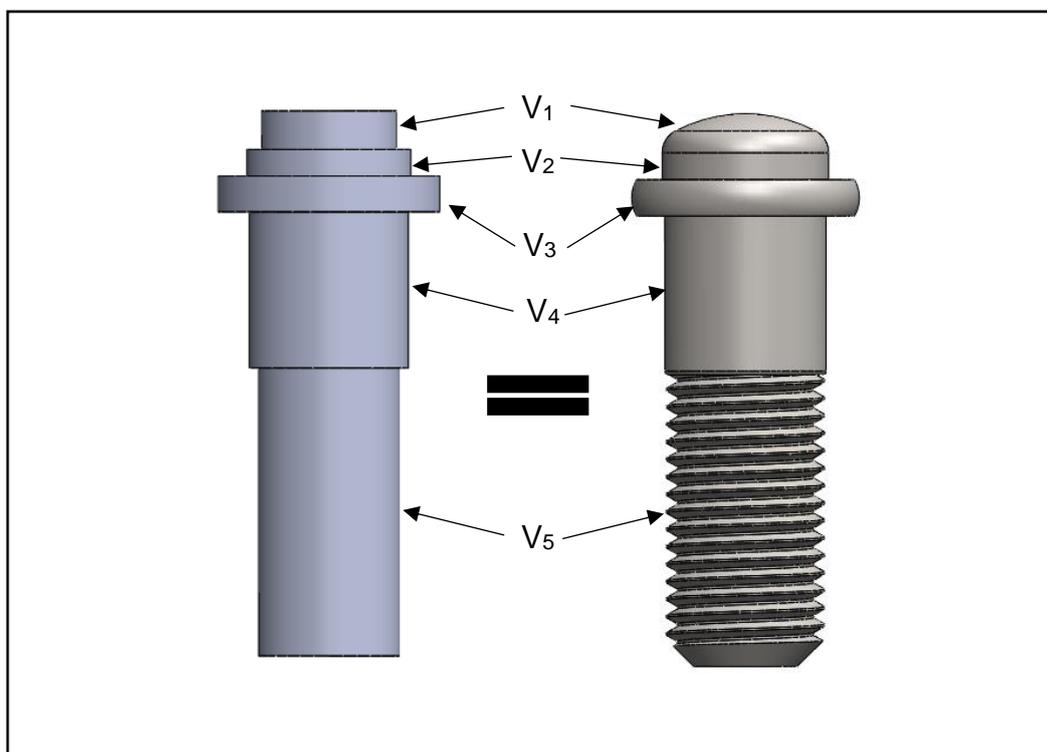
de produção, sendo três deles obtidos na prensa, dois, com a utilização de laminadora, e o último, com o uso da brochadeira, conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1- Operações e estágios de produção

Estágio	Máquina	Operação
1º	Prensa	Corte
2º	Prensa	Pré forma
3º	Prensa	Conformação final
4º	Laminadora	Ajuste Ø Corpo
5º	Laminadora	Roscamento
6º	Brochadeira	Usinagem encaixes

Fonte: O autor (2022).

Figura 22 - Comparativo entre seções de volumes equivalentes



Fonte: O autor (2022).

Para chegar no ordenamento de processos apresentado, partiu-se do quinto estágio, o último envolvendo conformação, o qual apresenta as dimensões do produto final. Foram determinados os volumes de cada uma das etapas de laminação e prensagem, segundo a lei do volume constante, prosseguindo-se do quinto, até o primeiro estágio, que é o corte do *blank*.

Foram encontrados os volumes da cabeça da haste (V_1 e V_2), flange (V_3), corpo liso (V_4) e corpo roscado (V_5), listados na Tabela 1.

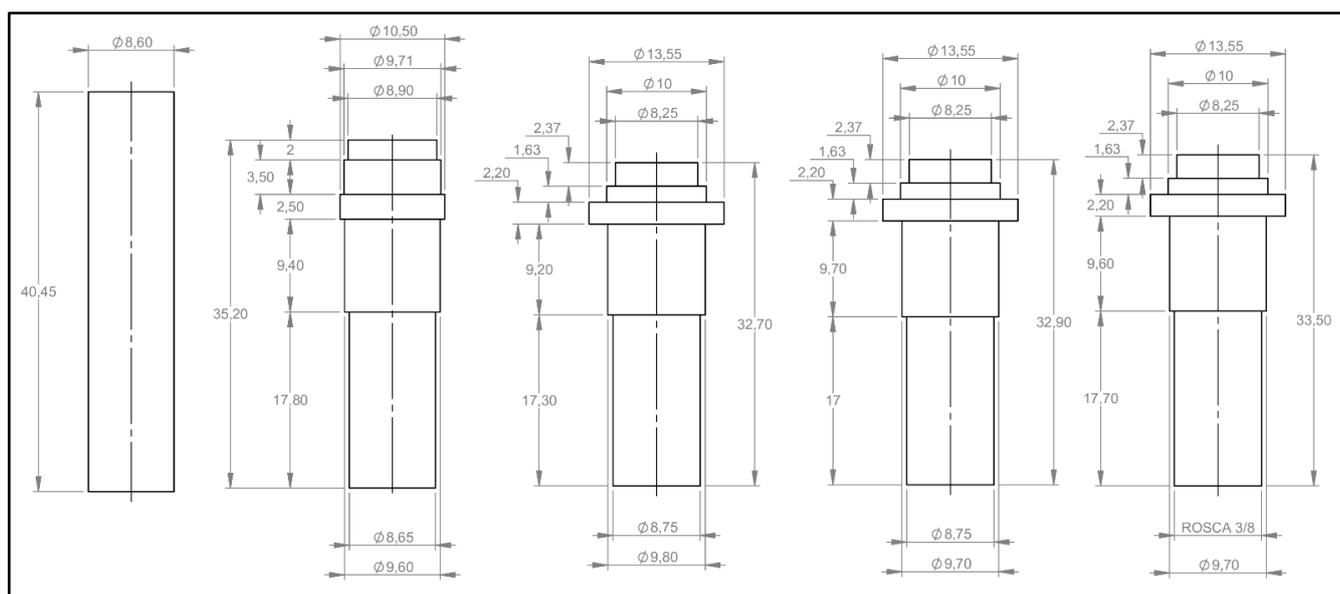
Tabela 1 - Volumes de acordo com as seções do produto

Seção	Volume (mm ³)
V_1	126,69
V_2	128,02
V_3	317,24
V_4	709,42
V_5	1030,55
V_{total}	2.311,92

Fonte: O autor (2022).

Na sequência, a partir do cálculo do volume e determinação das seções do produto, estipulou-se as geometrias de volume constante para cada um dos estágios, encontrando-se as deformações ocorridas na passagem de um estágio ao seguinte, com auxílio da Equação 5. Com as deformações obtidas, foi possível calcular, de acordo com as Equações 1 e 4, as tensões e forças de conformação na passagem destes mesmos estágios. Conforme indicado por Schaeffer (2006) no Anexo A, o coeficiente de atrito μ utilizado nos cálculos, foi de 0,075, adotado por ser um processo de forjamento a frio com grandes deformações. Assim, os estágios estipulados têm o dimensionamento especificado na Figura 23.

Figura 23 - Estágios representados em geometrias cilíndricas



Fonte: O autor (2022).

As deformações, tensões e forças de recalque calculadas são apresentadas nas Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 2 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 1 para 2

Seção	Deformação φ	Tensão Kf (MPa)	Força prensagem Fp (kN)
V ₁	0,0686	446,3	30,85
V ₂	0,2428	681,1	53,93
V ₃	0,3992	804,6	76,95
V ₄	0,2196	658,6	48,87
V ₅	0,0116	246,4	14,65

Fonte: O autor (2022).

Na passagem dos estágios 1 a 2, a força total necessária para a conformação do produto é de 225,26 kN, equivalente a aproximadamente 22,97 t.

Tabela 3 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 2 para 3

Seção	Deformação φ	Tensão Kf (MPa)	Força prensagem Fp (kN)
V ₁	0,1697	604,2	35,11
V ₂	0,7642	999,2	90,51
V ₃	0,1278	549,6	91,46
V ₄	0,0215	302,9	23,44
V ₅	0,0285	332,7	20,26

Fonte: O autor (2022).

Na passagem dos estágios 2 a 3, a força total necessária para a conformação do produto é de 260,78 kN, equivalente a aproximadamente 26,59 t.

As operações dos estágios de 1 a 2, e 2 a 3 ocorrem simultaneamente na mesma operação de prensa. Dessa forma, a força total de recalque necessária para obtenção do estágio 3 é de aproximadamente 50 t.

Tabela 4 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 3 para 4

Seção	Deformação φ	Tensão Kf (MPa)	Força prensagem Fp (kN)
V ₄	0,0529	409,3	31,00
V ₅	0,0175	282,7	17,22

Fonte: O autor (2022).

Na passagem dos estágios 3 a 4, a força total necessária para a conformação do produto é de 48,22 kN, equivalente a aproximadamente 4,92 t.

Tabela 5 - Deformações, tensões e forças de prensagem estágios 4 para 5

Seção	Deformação φ	Tensão Kf (MPa)	Força prensagem Fp (kN)
V ₄	0,0529	409,3	32,39
V ₅	0,0175	282,7	17,05

Fonte: O autor (2022).

Na passagem dos estágios 4 a 5, a força total necessária para a conformação do produto é de 49,44 kN, equivalente a aproximadamente 5,04 t.

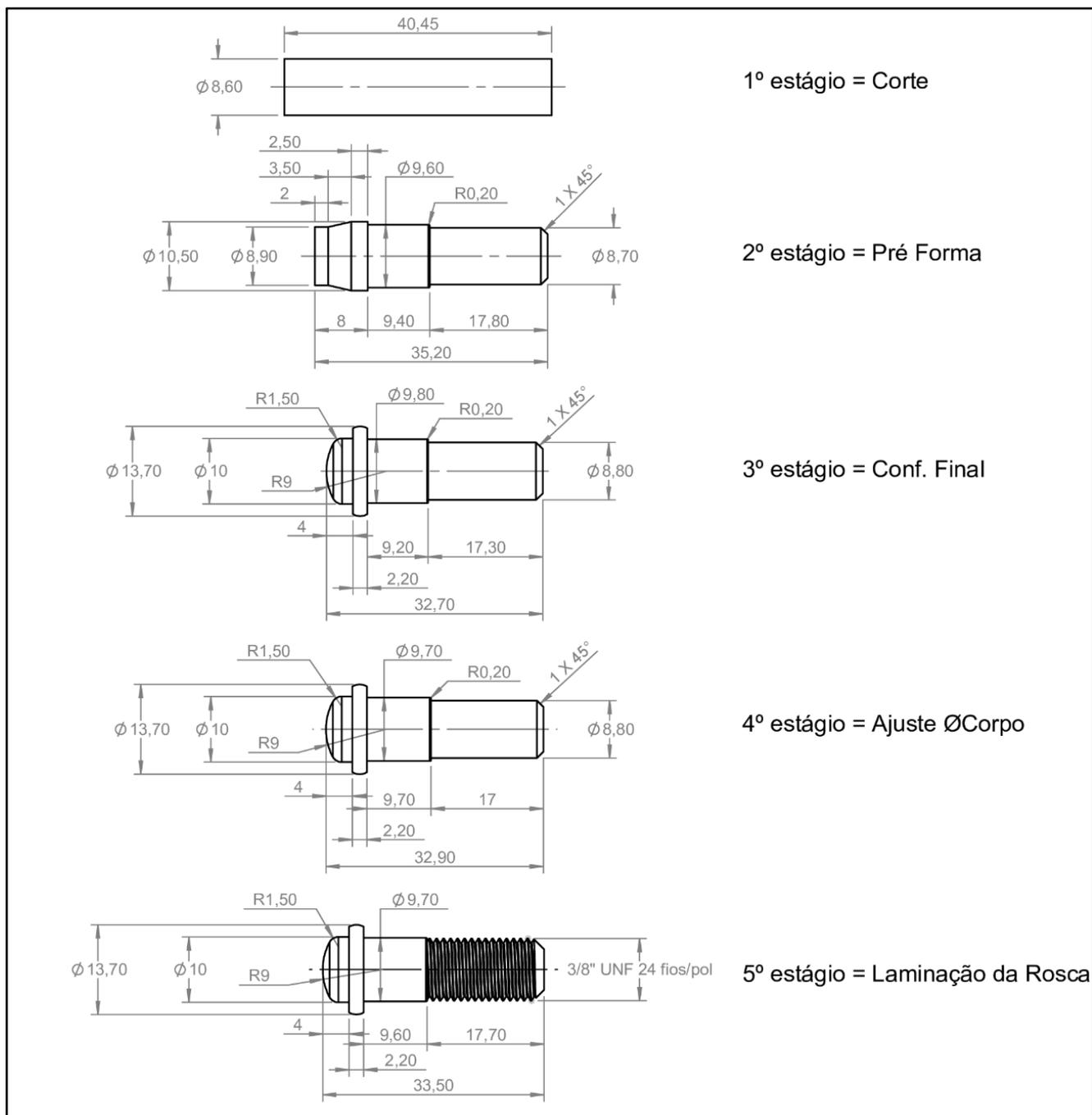
As Tabela 4 e Tabela 5 apresentam apenas os resultados dos volumes 4 e 5 em função de representarem os volumes de corpo da haste. Nos processos de laminação, os volumes 1, 2 e 3, que representam a cabeça da haste, não sofrem deformação. Assim sendo, não há a necessidade de indica-los.

O desenvolvimento completo dos cálculos pode ser encontrado no Apêndice D, onde encontram-se todas as equações desenvolvidas e valores encontrados.

Após a determinação das dimensões e alturas dos estágios de produção do produto, foi possível fazer os devidos ajustes geométricos inerentes ao processo de conformação a frio em cada um dos estágios. A Figura 24 apresenta as geometrias finais determinadas para confecção do ferramental e matrizes de produção.

No Apêndice E é apresentada de forma detalhada toda sequência de estágios de produção. É importante ressaltar que a relação de recalque foi respeitada entre os estágios 1 e 2, situação mais crítica na fabricação do produto. Sendo $h_0 = 13,25$ mm e $d_0 = 8,60$ mm, a relação de recalque obtida é de 1,54. Ou seja, por ser inferior a 2,50, não ocorrerá a flambagem do material.

Figura 24 - Estágios de conformação



Fonte: O autor (2022).

4.3 ESCOLHA DE MAQUINÁRIO E FABRICAÇÃO DE MATRIZES

4.3.1 Seleção do Maquinário

Para a seleção do maquinário para fabricação do produto, partiu-se pelo quesito da força necessária para a realização das operações.

Na prensagem, a força encontrada foi de 50 t. Dessa forma, dentre os equipamentos disponíveis na empresa, foi selecionada uma prensa conformadora com a capacidade de 110 t de forjamento. A máquina pode realizar conformações em até 5 estágios, com diâmetros mínimos de 8,00 mm até máximos de 16,00 mm, com corte de blank em até 100,00 mm. Sua marca é *Jern Yao*, modelo JBP-13B5S, conforme mostrado na Figura 25. Esta prensa horizontal tem capacidade de produção regulável, pois a rotação do motor pode ser ajustada, sendo possível a produção de 1.000 até 7.000 peças/hora. No forjamento, foi possível obter uma taxa de produção de 2500 peças/hora.

Figura 25 - Prensa JBP-13B5S



Fonte: O autor (2022).

Para realizar os dois processos de laminação, foi escolhida uma laminadora com ferramentas de encosto. A máquina foi regulada em dois momentos diferentes, para realizar antes o faceamento, e após, a laminação da rosca. Ela tem capacidade de realizar a laminação de peças de 6,00 a 12,00 mm de diâmetro, com comprimento máximo de 200 mm. Sua marca é *Jern Yao*, modelo JTR12, mostrada na Figura 26. Da mesma forma que a prensa, esse modelo de laminadora também possui

regulagem em sua velocidade. Sua produtividade pode ser ajustada entre 2.000 e 8.000 peças/hora. Na laminação, foi possível obter uma taxa de produção de 3000 peças/hora.

Figura 26 - Laminadora JTR12



Fonte: O autor (2022).

O processo de brochamento foi realizado em empresa terceirizada, em função da não disponibilidade de maquinário na Metalúrgica Vabene.

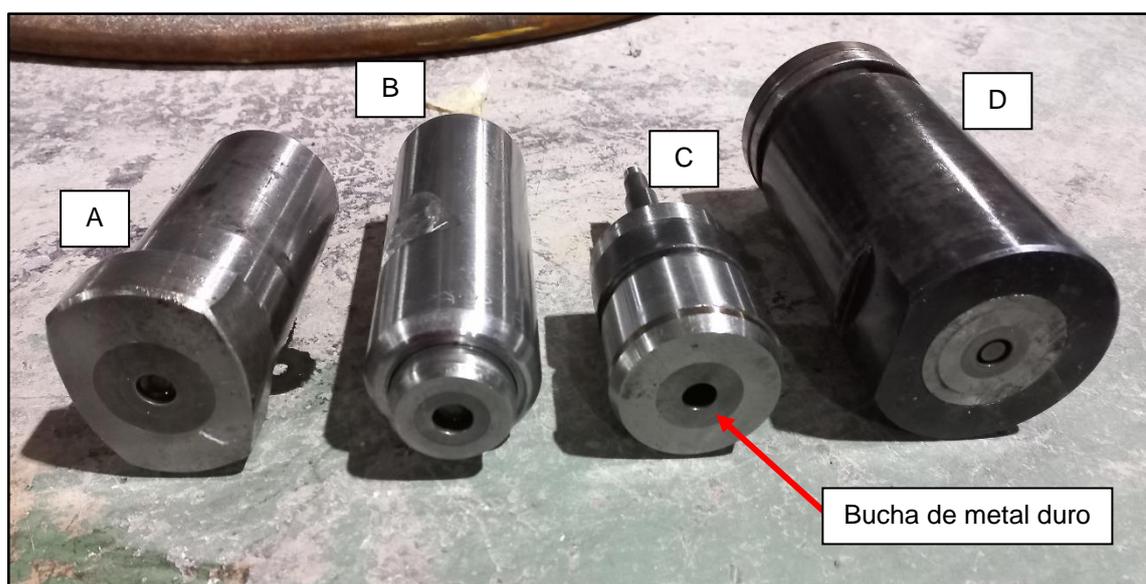
4.3.2 Fabricação das Matrizes e Ferramentas necessárias

Após a seleção do equipamento, foi desenvolvido o conjunto de ferramentas para a produção do componente. Na prensa, foi necessário o desenvolvimento de dois conjuntos de matrizes, e no processo de laminação, foram utilizados dois conjuntos de ferramentas de encosto.

Para aplicação na prensa, em cada estágio são utilizados uma matriz e um punção. As matrizes utilizadas seguem um dimensionamento pré-estabelecido pelo

fabricante. Elas são constituídas por uma bucha de metal duro (Carbeto de Tungstênio) usinada internamente, formando a cavidade com a geometria do produto a ser estampado; e uma capa, fabricada em aço ferramenta (H13 ou VC131) tratado termicamente. Os punções seguem o mesmo princípio construtivo que as matrizes, porém a cavidade do punção tem a geometria do lado oposto ao produto conformado. Após a usinagem, tratamento térmico e acabamento, o conjunto de ferramentas já finalizado e ajustado é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Conjunto de Matrizes (C e D) e Punções (A e B) para forjamento a frio



Fonte: O autor (2022).

O item D é a matriz completa, montada internamente na capa, que é presa no cabeçote de matrizes da máquina. Já o item C é a matriz sem a capa, para representação em seus subconjuntos.

O punção B e a matriz C formam o conjunto que realiza a conformação dos estágios 1 para 2. Já o punção A e a matriz D formam o conjunto que executa o forjamento a frio dos estágios 2 para 3.

As ferramentas de encosto utilizadas nos dois processos de laminação foram fabricadas em aço ferramenta (VF800) com tratamento térmico. O primeiro conjunto utilizado é constituído apenas de duas placas lisas, pois realiza apenas o ajuste no diâmetro do corpo liso da haste. O segundo conjunto, que faz o processo de conformação da rosca, foi adquirido de um fornecedor externo, em função da complexidade de fabricação. A ferramenta de encosto lisa é apresentada montada em

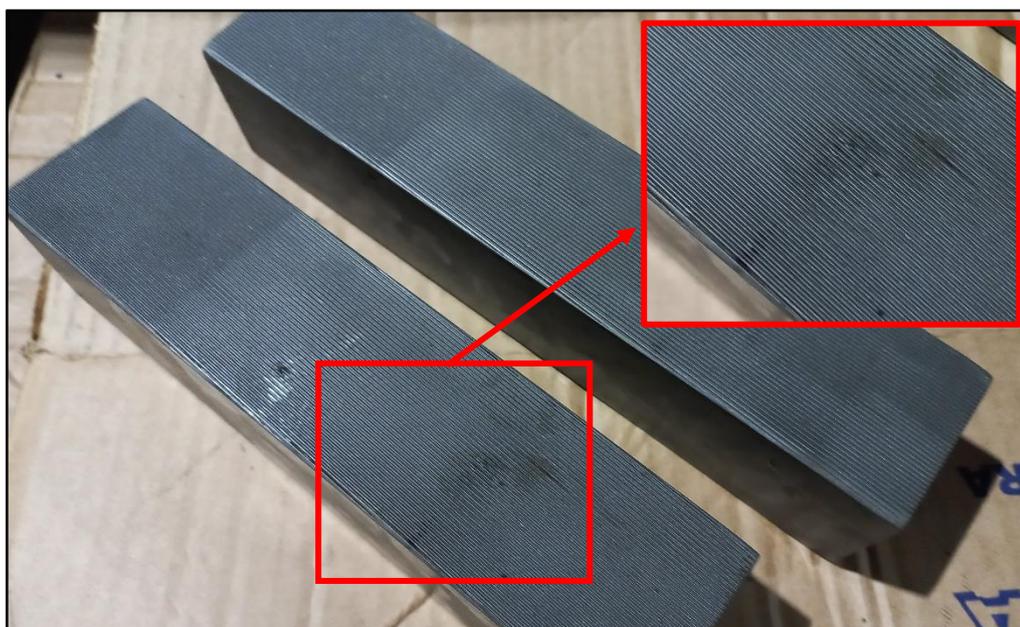
máquina, destacada em vermelho, na Figura 28. Já o conjunto para conformação da rosca, é exibido na Figura 29, posicionado de forma a ser possível a visualização dos filetes de rosca.

Figura 28 - Ferramenta de encosto lisa



Fonte: O autor (2022).

Figura 29 - Ferramenta de encosto para rosca 3/8 UNF



Fonte: O autor (2022).

4.4 TESTES E COMPARATIVOS

Finalizada a fabricação do ferramental para o forjamento, iniciou-se o processo de produção das hastes e fabricação das amostras. Na sequência, foram realizados os dois processos de laminação, e em seguida, o brochamento, obtendo-se o componente final. As cinco dimensões principais obtidas por medição, pontuadas nos balões numerados de 1 a 5 na Figura 21, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões principais encontradas na medição

Dimensão:	Medida nominal (mm):	Média encontrada (mm):	Desvio padrão (mm):	Coefficiente de variação:
1	Ø9,70	Ø9,68	0,008	0,08%
2	5,70	5,73	0,041	0,72%
3	5,00	5,07	0,033	0,65%
4	Ø13,70	Ø13,68	0,074	0,54%
5	4,00	4,03	0,013	0,31%

Fonte: O autor (2022).

A medição foi realizada com paquímetro, de duas casas decimais de precisão, nos comprimentos e alturas, e micrômetro, de precisão de duas casas decimais, nos diâmetros. O relatório dimensional é exibido no Apêndice F, apresentando a média e desvio padrão de todas as dimensões do componente. Os ajustes foram realizados nas dimensões das matrizes, em função do cumprimento das tolerâncias do componente.

Os desvios padrão apresentados na medição das dimensões principais do componente mostram que as maiores variações se encontram em alturas ou dimensões que não se encontravam enclausuradas na cavidade da matriz ou punção. Por exemplo, o diâmetro de Ø13,70 mm, devido ao fato de estar localizado na fresta entre matriz e punção ao final da prensagem, em função da variação no comprimento de corte do blank pela máquina, faz com que o material excedente ou faltante se aloje na flange da peça, causando variação nesta medida, pois o diâmetro não é suportado por uma cavidade na matriz ou punção.

Os estágios de recalque e conformação do componente obtidos após os devidos ajustes no ferramental estão demonstrados na Figura 30, e a Figura 31 apresenta a peça já finalizada, após o brochamento.

Figura 30 - Estágios de conformação - fabricação do produto



Fonte: O autor (2022).

Figura 31 - Haste rosqueada conformada finalizada após brochamento



Fonte: O autor (2022).

Em seguida, foram avaliados aspectos visuais de acabamento, como rebarbas e textura das superfícies. A Figura 32 apresenta o componente usinado posicionado ao lado do conformado a frio. É possível constatar que a peça usinada apresenta aspecto mais brilhante, com cantos vivos bem definidos. Já a peça forjada a frio, tem superfícies mais opacas, com raios de concordância onde existem cantos vivos na haste usinada.

Figura 32 - Hastes usinadas A e C, hastes conformadas B e D



Fonte: O autor (2022).

Por fim, foi realizada a montagem na válvula com a haste usinada, e realizados testes de estanqueidade e operação (abertura e fechamento). Posteriormente, a válvula foi desmontada, e feita a remontagem com o componente forjado a frio. Realizados os mesmos testes de estanqueidade e operação com esta última, que apresentou bom funcionamento, da mesma forma que a primeira, sem vazamentos.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade técnica para realizar a produção das hastes rosqueadas para válvulas de esfera através do processo de conformação a frio, em substituição ao processo de usinagem. Dessa forma, visando a obtenção do componente por meio de um processo de fabricação que permite a redução de custos.

Para tal, primeiramente foram caracterizados os aspectos do componente usinado, sendo possível o entendimento da aplicação da haste rosqueada, bem como suas necessidades no quesito material.

Na sequência, foi realizado o projeto da haste rosqueada conformada a frio, sendo feito o dimensionamento matemático das deformações e tensões no processo de determinação das medidas do componente, conforme as restrições do processo de conformação. Na prensagem, foi obtida uma força necessária para conformação de 50 t, e na laminação, na casa das 5 t.

Durante a realização e análise dos resultados do teste de tração do aço inox 304L, foi possível notar que o material tem comportamento bastante estável entre as amostras, apresentando desvio padrão máximo de 5 MPa. É uma variação que representa um coeficiente de variação na casa de 1%.

Em seguida, foi realizada a confecção das matrizes e execução da fabricação da haste rosqueada conformada a frio, sendo seguida da avaliação das características do componente conformado, comparando-se este à peça usinada, em testes e provas, mostrando-se um componente confiável e possível de utilização.

Notou-se que o processo de forjamento a frio é um processo de fabricação que apresenta pouca variação dimensional, assemelhando-se ao processo de usinagem, neste quesito. Com relação a dimensões do componente não enclausuradas nas ferramentas de conformação, observou-se que estes apresentam variação maior em função do volume de material excedente ou faltante no corte do blank. Ao preencher as cavidades do molde, caso exista volume de material excedente ao necessário para produção da haste, este excesso é direcionado nas partes da peça não enclausuradas, ocasionando variação nesta dimensão. Esse fato é mostrado na medição do diâmetro da flange da peça, que apresentou um coeficiente de variação passando da casa de 0,50%, enquanto as outras dimensões do componente

conformado, por estarem enclausuradas nas ferramentas de conformação, tem coeficiente pouco maior que 0,30%.

Além disso, textura observada no comparativo entre os componentes permitiu concluir que a conformação permite acabamento superficial próximo ao obtido em usinagem, principalmente em superfícies que ficam em contato com as cavidades das matrizes.

Também foi possível observar que se consegue refinar o cálculo dos esforços e deformações de um estágio de conformação para o seguinte, se o componente for dividido em cilindros de menor altura, mas em maior quantidade. Dessa forma é obtido um modelo geométrico mais próximo do componente que será fabricado. Porém exige maior empenho matemático.

Portanto, conclui-se que a haste rosqueada conformada a frio atende as especificações técnicas de aplicação nas válvulas de esfera, permitindo maior competitividade das fabricantes de válvulas no mercado nacional, atendendo os objetivos do trabalho.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como abordagem para sequência deste trabalho, poderia ser desenvolvido um estudo nos esforços para deformação causados nas cavidades das matrizes de conformação. Dessa forma, realizando-se a análise desses esforços, será possível encontrar possíveis pontos de fragilidade, permitindo o dimensionamento das etapas de prensagem de forma diferente, visando a longevidade das matrizes. Assim, contribuindo para o aumento da produtividade dos lotes e reduzindo a recorrência de quebras e manutenções, e conseqüentemente, seu custo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUENO, K. **Desenvolvimento do SAE 1312 modificado ao nióbio para parafusos classe 8.8 conformados a frio**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.

CARVALHO, A. O. **Análise da dinâmica do processo de roscamento por conformação na liga de magnésio AM60**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei. 2011.

CIUCCIO, R. C. et al. Aplicação do processo de conformação mecânica laminação a frio em parafusos de fixação de próteses dentárias. **Innov Implant J, Biomater Esthet**, São Paulo, v. 6, n. 3, p 33-37, 2011.

DESU, Raghuram Karthik; KRISHNAMURTHY, Hansoge Nitin; BALU, Aditya; GUPTA, Amit Kumar; SINGH, Swadesh Kumar. Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures. **Journal Of Materials Research And Technology**. Elsevier, p. 13-20. mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785415000605>. Acesso em: 18 maio 2022.

KALPAKJIAN, S. & SCHMID, S. R. – **Manufacturing Engineering and Technology** –Ed.Prentice Hall 4ed. EUA, 2001.

MCGUIRE, M. **Stainless Steels for desing Engineers**. Ohio: ASM International, 2008.

METALÚRGICA GOLDEN ARTS. VEM - VÁLVULA ESFERA MONOBLOCO 1000 WOG, 2021. Produtos. Disponível em: <<https://www.mga.com.br/produtos/1000-wog>>. Acesso em: 29 de set. de 2021.

NORTON, R. L.; **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SAGLAM, H.; KUŞ, R.; 2011, "**Performance of Internal Thread Rolling Head and The Mechanical Properties of Rolled Thread**". 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.

SCHAEFFER, L.; **Conformação mecânica**. 2ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L.; **Forjamento: Introdução ao processo**. 2ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.

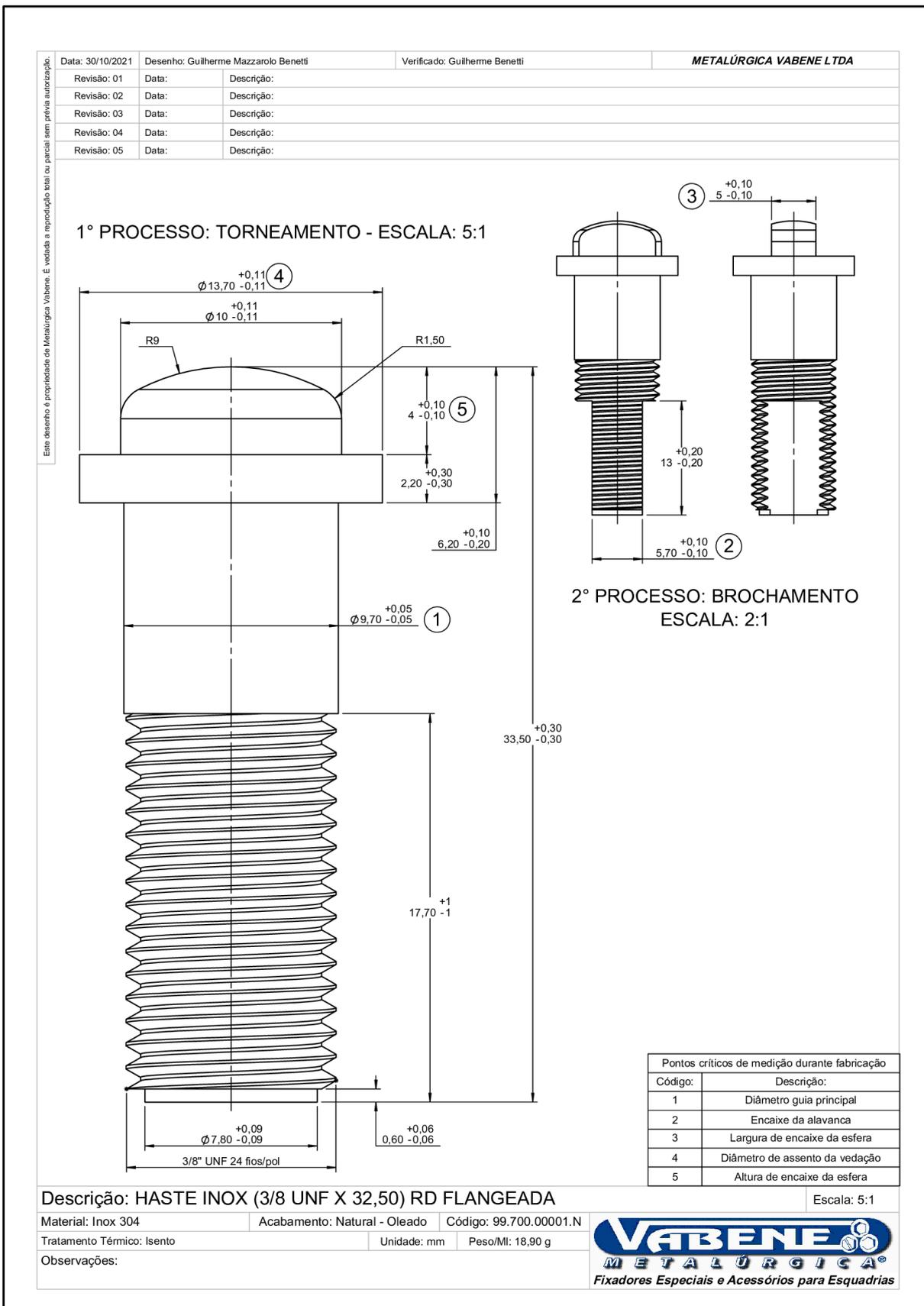
SOUZA, J. F.; **Estudo para diminuição do grau de redução por passe na laminação a frio de um fio de aço baixo carbono**. Trabalho de diplomação, Escola

de Engenharia, Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

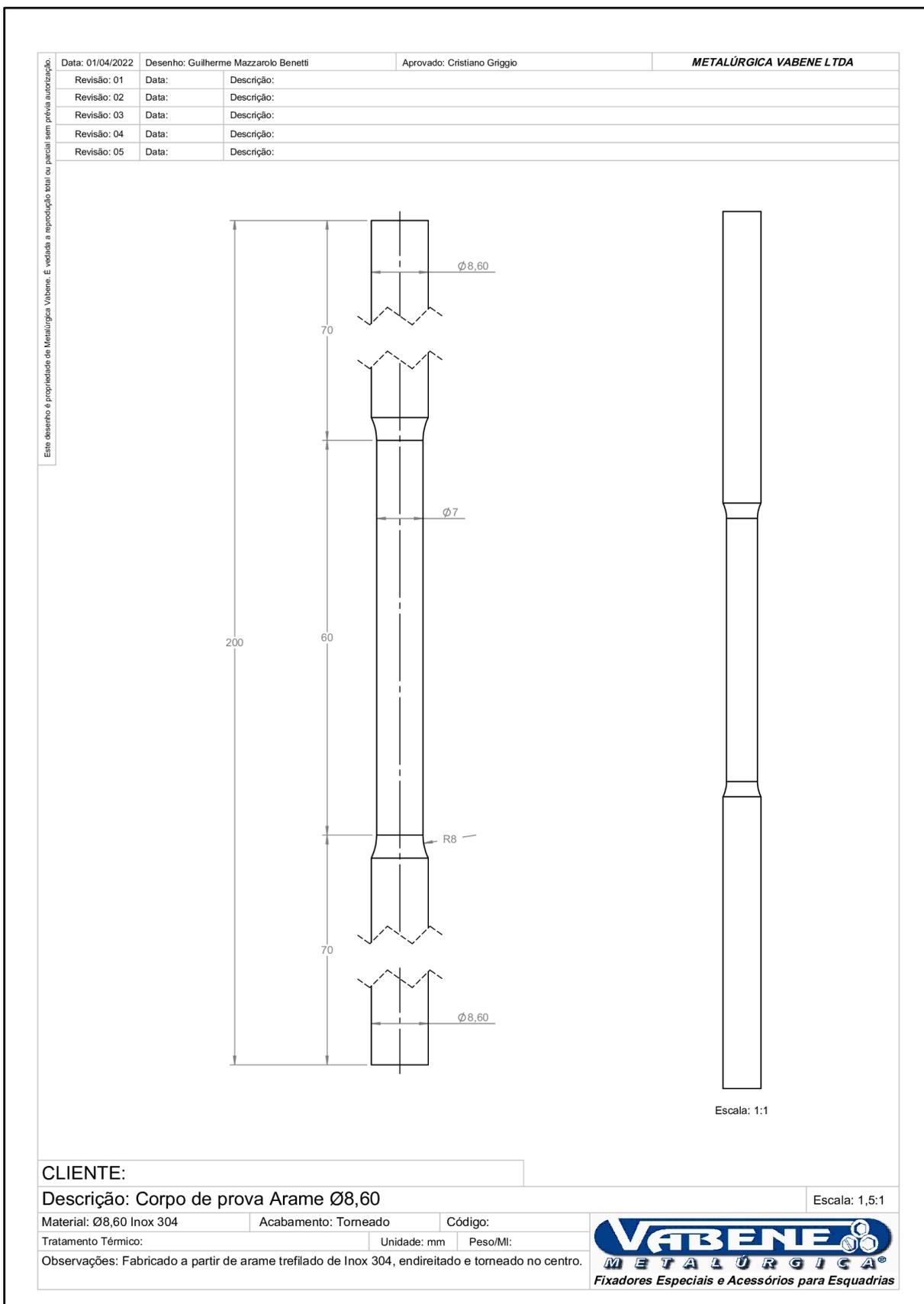
STEMMER C. E. **Ferramentas de corte II**: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 2ed. Florianópolis, SC. UFSC, 1995.

TELLES, D. **Projeto e Validação de Válvula Industrial do tipo Esfera para baixa Emissão Fugitiva**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 92. 2015.

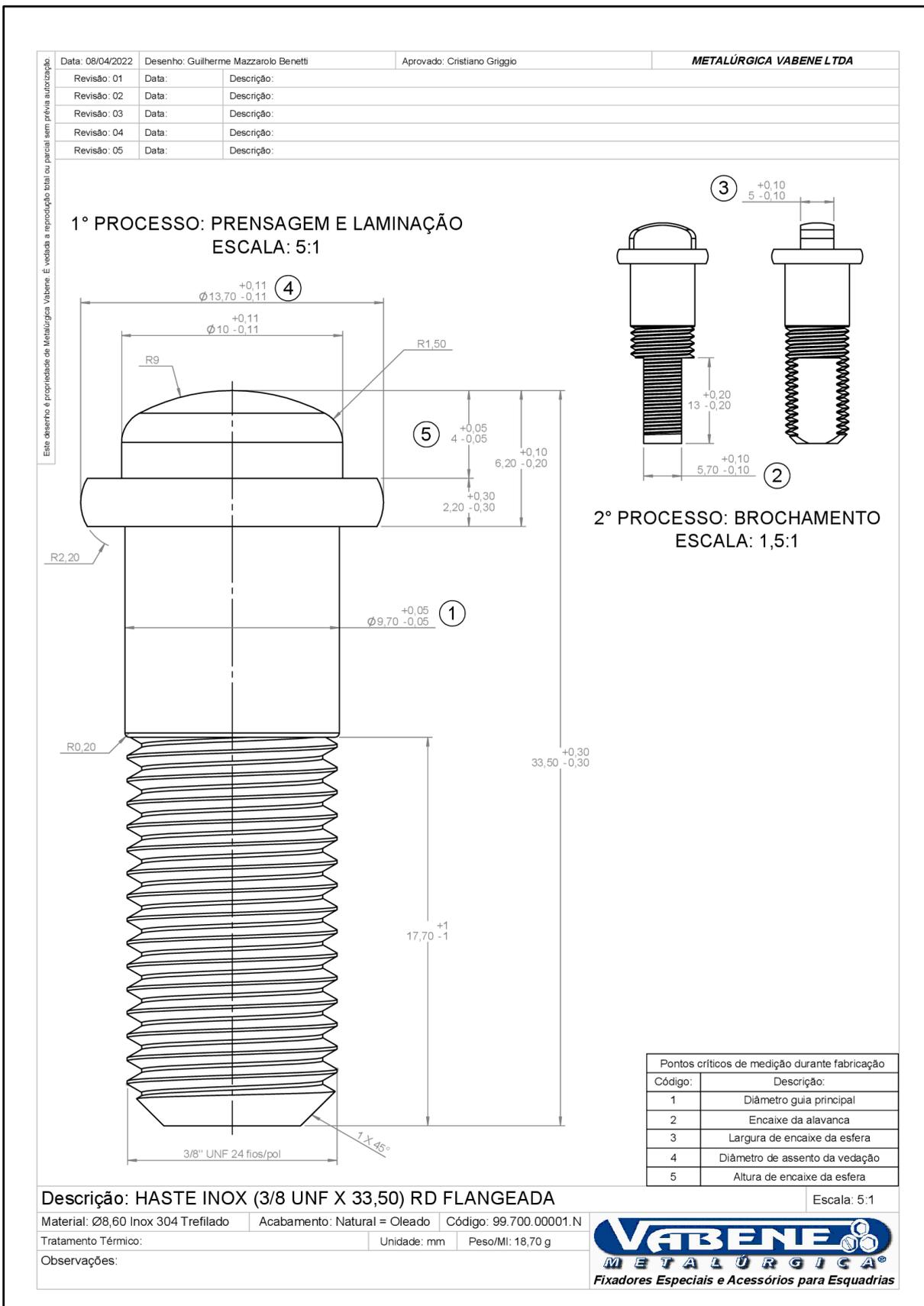
APÊNDICE A - DESENHO DA HASTE ROSQUEADA 3/8" USINADA



APÊNDICE B - CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



APÊNDICE C - DESENHO HASTE ROSQUEADA 3/8" FORJADA A FRIO



APÊNDICE D - DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS REFERENTES AOS ESTÁGIOS DE CONFORMAÇÃO

Cálculos referentes a deformação do estágio 1 ao 2:

Para V₁:

$$\varphi_{h1 \rightarrow 1,2} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{2,00}{2,14}\right) = 0,0686$$

$$K_{f1 \rightarrow 1,2} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0686^{0,3343} = 446,26 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p1 \rightarrow 1,2} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 62,10 \cdot 446,26 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,90}{2,00}\right) \\ &= 30850,43 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₂:

$$\varphi_{h2 \rightarrow 1,2} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{3,50}{4,46}\right) = 0,2428$$

$$K_{f2 \rightarrow 1,2} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,2428^{0,3343} = 681,06 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p2 \rightarrow 1,2} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 74,05 \cdot 681,06 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{9,71}{3,50}\right) \\ &= 53931,74 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₃:

$$\varphi_{h3 \rightarrow 1,2} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{2,50}{3,73}\right) = 0,3992$$

$$K_{f3 \rightarrow 1,2} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,3992^{0,3343} = 804,26 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p3 \rightarrow 1,2} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 86,59 \cdot 804,26 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{10,50}{2,50}\right) \\ &= 76954,66 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₄:

$$\varphi_{h4 \rightarrow 1,2} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{9,40}{11,71}\right) = 0,2196$$

$$K_{f4 \rightarrow 1,2} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,2196^{0,3343} = 658,61 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p4 \rightarrow 1,2} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 72,36 \cdot 658,61 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{9,60}{9,40}\right) \\ &= 48870,43 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₅:

$$\varphi_{h5 \rightarrow 1,2} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{17,80}{18,01}\right) = 0,0116$$

$$K_{f5 \rightarrow 1,2} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0116^{0,3343} = 246,40 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p5 \rightarrow 1,2} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 58,77 \cdot 311,77 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,65}{17,80}\right) \\ &= 14655,58 \text{ N} \end{aligned}$$

Somatório forças de conformação do estágio 1 ao 2: 225262,80 N.

Cálculos referentes a deformação do estágio 2 ao 3:

Para V₁:

$$\varphi_{h1 \rightarrow 2,3} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{2,37}{2,00}\right) = 0,1697$$

$$K_{f1 \rightarrow 2,3} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,1697^{0,3343} = 604,25 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p1 \rightarrow 2,3} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 53,46 \cdot 604,25 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,25}{2,37}\right) \\ &= 35111,75 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₂:

$$\varphi_{h2 \rightarrow 2,3} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{1,67}{3,50}\right) = 0,7642$$

$$K_{f2 \rightarrow 2,3} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,7642^{0,3343} = 999,20 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p2 \rightarrow 2,3} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 78,54 \cdot 999,20 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{10,00}{1,63}\right) \\ &= 90513,42 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₃:

$$\varphi_{h3 \rightarrow 2,3} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{2,20}{2,50}\right) = 0,1278$$

$$K_{f3 \rightarrow 2,3} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,1278^{0,3343} = 549,61 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} F_{p3 \rightarrow 2,3} &= A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 144,20 \cdot 549,61 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{13,55}{2,20}\right) \\ &= 91456,23 \text{ N} \end{aligned}$$

Para V₄:

$$\varphi_{h_{4 \rightarrow 2,3}} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{9,20}{9,40}\right) = 0,0215$$

$$K_{f_{4 \rightarrow 2,3}} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0215^{0,3343} = 302,88 \text{ MPa}$$

$$F_{p_{4 \rightarrow 2,3}} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 75,43 \cdot 302,88 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{9,60}{9,20}\right) \\ = 23442,3 \text{ N}$$

Para V₅:

$$\varphi_{h_{5 \rightarrow 2,3}} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{17,30}{17,80}\right) = 0,0285$$

$$K_{f_{5 \rightarrow 2,3}} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0285^{0,3343} = 332,75 \text{ MPa}$$

$$F_{p_{5 \rightarrow 2,3}} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 60,13 \cdot 332,75 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,75}{17,30}\right) \\ = 20261,63 \text{ N}$$

Somatório forças de conformação do estágio 2 ao 3: 260785,30 N.

Desse modo, a força total necessária no processo de prensagem é de 486048,18 N, aproximadamente 50,00 toneladas força, pois os processos 1 a 2 e 2 a 3 acontecem simultaneamente.

Cálculos referentes a deformação do estágio 3 ao 4:

Para V₄:

$$\varphi_{h_{4 \rightarrow 3,4}} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{9,70}{9,20}\right) = 0,0529$$

$$K_{f_{4 \rightarrow 3,4}} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0529^{0,3343} = 409,27 \text{ MPa}$$

$$F_{p_{4 \rightarrow 3,4}} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 73,90 \cdot 409,27 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{9,70}{9,70}\right) \\ = 31000,49 \text{ N}$$

Para V₅:

$$\varphi_{h_{5 \rightarrow 3,4}} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{17,00}{17,30}\right) = 0,0175$$

$$K_{f_{5 \rightarrow 3,4}} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0175^{0,3343} = 282,68 \text{ MPa}$$

$$F_{p5 \rightarrow 3,4} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 60,13 \cdot 282,68 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,75}{17,00}\right) \\ = 17216,59 \text{ N}$$

Somatório forças de conformação do estágio 3 ao 4: 48217,08 N, aproximadamente 4,92 toneladas força.

Cálculos referentes a deformação do estágio 4 ao 5:

Para V₄:

$$\varphi_{h4 \rightarrow 4,5} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{9,20}{9,70}\right) = 0,0529 \\ K_{f4 \rightarrow 4,5} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0529^{0,3343} = 409,27 \text{ MPa} \\ F_{p4 \rightarrow 4,5} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 77,11 \cdot 409,27 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{9,70}{9,20}\right) \\ = 32391,20 \text{ N}$$

Para V₅:

$$\varphi_{h5 \rightarrow 4,5} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{17,30}{17,00}\right) = 0,0175 \\ K_{f5 \rightarrow 4,5} = 1093,2 \cdot \varphi^{0,3343} = 1093,2 \cdot 0,0175^{0,3343} = 282,68 \text{ MPa} \\ F_{p5 \rightarrow 4,5} = A_{1p} \cdot K_{f1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1}\right) = 59,57 \cdot 282,68 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,075 \cdot \frac{8,75}{17,30}\right) \\ = 17051,81 \text{ N}$$

Somatório forças de conformação do estágio 4 ao 5: 49443,30 N, aproximadamente 5,04 toneladas força.

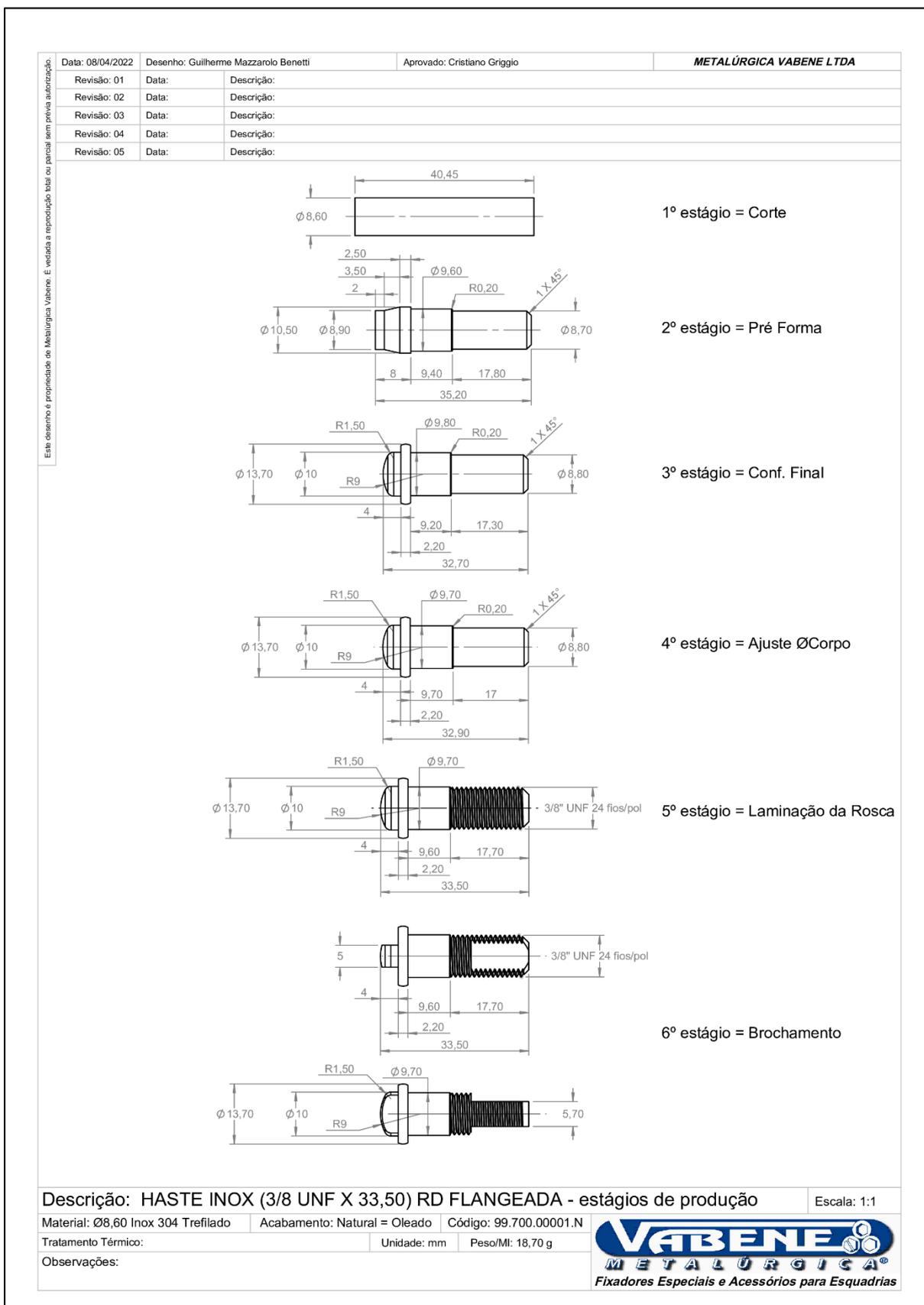
Relação de Recalque crítica (estágios 1 a 2):

$$s_{1,2} = \frac{h_0}{d_0} = \frac{13,25}{8,60} = 1,54$$

h_0 foi obtida através do comprimento do blank (40,45 mm), reduzido do somatório dos comprimentos dos corpos da haste do 2º estágio que ficam alojados na matriz (9,40 + 17,80 mm).

$$h_0 = 40,45 - (9,40 + 17,80) = 13,25 \text{ mm}$$

APÊNDICE E - DESENHO DA SEQUÊNCIA DE ESTÁGIOS DE PRODUÇÃO



APÊNDICE F - RELATÓRIO DIMENSIONAL DE MEDIÇÃO DE AMOSTRAS

METALÚRGICA VABENE LTDA							
RELATÓRIO DIMENSIONAL DE AMOSTRAS							
Medida Nominal:	Medidas encontradas:				Média:	Desvio padrão:	Coef. de variação:
	Amostra 1:	Amostra 2:	Amostra 3:	Amostra 4:			
Ø9,70	9,68	9,69	9,67	9,68	9,680	0,008	0,08%
5,70	5,68	5,73	5,78	5,74	5,733	0,041	0,72%
5,00	5,05	5,03	5,10	5,09	5,068	0,033	0,65%
Ø13,70	13,63	13,66	13,79	13,64	13,680	0,074	0,54%
4,00	4,03	4,01	4,04	4,03	4,028	0,013	0,31%
Ø10,00	9,98	9,97	9,98	9,98	9,978	0,005	0,05%
6,20	6,24	6,18	6,23	6,20	6,213	0,028	0,44%
17,70	17,52	17,79	17,62	17,73	17,665	0,120	0,68%
13,00	12,95	13,14	12,88	13,05	13,005	0,114	0,88%
2,20	2,21	2,17	2,19	2,17	2,185	0,019	0,88%
Rosca 3/8 (9,52)	9,50	9,53	9,48	9,50	9,503	0,021	0,22%
Data:			27/05/2022				

	<p>Todas as dimensões em mm.</p>
--	----------------------------------

Fonte: o Autor (2022).

**ANEXO A - VALORES DE COEFICIENTES DE ATRITO PARA DIFERENTES
PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO**

Processo de conformação	Deformações	Coeficientes de atrito				
		Aço	Aço Inox.	Titânio e ligas de Ti	Cobre e ligas de Cu	Alumínio e ligas de Al
Laminação a frio	-	0,03 - 0,07	0,07-0,1	0,1	0,03 - 0,07	0,03
Extrusão a frio	Pequenas	0,1	0,1	0,05	0,1	0,05
	Grandes	0,05	0,05	-	0,05	-
Forjamento a frio	Pequenas	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
	Grandes	0,05	0,05 - 0,1	-	-	-
Trefilação	Pequenas	0,1	0,1	0,05	0,1	0,03
	Grandes	0,05	0,05	-	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1
Trefilação de barras	-	0,1	0,1	0,05	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1
Trefilação de tubos	-	0,05 - 0,1	0,05	-	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1
Estampagem profunda	Pequenas	0,05	0,1	0,07	0,1	0,05
	Grandes	0,05 - 0,1	-	-	0,05 - 0,07	-
Laminação a quente	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Extrusão	-	0,02 - 0,2	0,02	0,02	0,02 - 0,2	0,02 - 0,2
Forjamento a quente	-	0,2	0,2	0,05 - 0,1	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2

Fonte: adaptado de Schaeffer (2004).

ANEXO B - TABELA DIÂMETROS PRIMITIVOS BÁSICOS

Rosca Métrica ISO DIN 13						Rosca UNC Classe 2A					Rosca UNF Classe 2A						
Medida Nominal	Ø Externo		Passo (mm)	Ø primitivo		Medida Nominal	Ø Externo		Passo = Fios/pol.	Ø primitivo		Medida Nominal	Ø Externo		Passo = Fios/pol.	Ø primitivo	
	Mín (mm)	Máx (mm)		Mín (mm)	Máx (mm)		Mín (mm)	Máx (mm)		Mín (mm)	Máx (mm)		Mín (mm)	Máx (mm)		Mín (mm)	Máx (mm)
M 1,60	1,496	1,581	0,350	1,300	1,340	Nr 1	1,732	1,830	64,000	1,520	1,560	Nr 0	1,419	1,500	80,000	1,240	1,280
M 1,80	1,696	1,781	0,350	1,500	1,540	Nr 2	2,057	2,160	56,000	1,810	1,860	Nr 1	1,743	1,830	72,000	1,530	1,580
M 2,00	1,836	1,981	0,400	1,660	1,710	Nr 3	2,317	2,500	48,000	2,080	2,130	Nr 2	2,002	2,160	64,000	1,830	1,880
M 2,20	2,080	2,180	0,450	1,820	1,870	Nr 4	2,700	2,830	40,000	2,340	2,390	Nr 3	2,385	2,500	56,000	2,130	2,180
M 2,50	2,380	2,480	0,450	2,120	2,170	Nr 5	3,033	3,160	40,000	2,670	2,720	Nr 4	2,716	2,830	48,000	2,410	2,460
M 3,00	2,874	2,980	0,500	2,590	2,640	Nr 6	3,366	3,490	32,000	2,900	2,950	Nr 5	3,048	3,160	44,000	2,700	2,750
M 3,50	3,354	3,479	0,600	3,010	3,070	Nr 8	4,020	4,170	32,000	3,550	3,610	Nr 6	3,365	3,490	40,000	3,000	3,050
M 4,00	3,838	3,973	0,700	3,440	3,500	Nr 10	4,637	4,800	24,000	4,020	4,080	Nr 8	4,028	4,170	36,000	3,600	3,660
M 4,50	4,338	4,478	0,750	3,910	3,970	Nr 12	5,280	5,450	24,000	4,670	4,740	Nr 10	4,650	4,800	32,000	4,200	4,260
M 5,00	4,826	4,976	0,800	4,370	4,430	1/4	6,129	6,320	20,000	5,390	5,460	Nr 12	5,286	5,450	28,000	4,770	4,840
M 6,00	5,794	5,974	1,000	5,220	5,280	5/16	7,672	7,910	18,000	6,890	6,960	1/4	6,130	6,320	28,000	5,630	5,710
M 7,00	6,794	6,974	1,000	6,220	6,280	3/8	9,255	9,500	16,000	8,340	8,420	5/16	7,706	7,910	24,000	7,120	7,200
M 8,00	7,760	7,972	1,250	7,050	7,120	7/16	10,776	11,070	14,000	9,780	9,860	3/8	9,247	9,500	24,000	8,690	8,770
M 10,00	9,732	9,968	1,500	8,880	8,950	1/2	12,360	12,660	13,000	11,270	11,350	7/16	10,808	11,070	20,000	10,150	10,230
M 12,00	11,701	11,966	1,750	10,700	10,780	9/16	13,934	14,250	12,000	12,730	12,830	1/2	12,380	12,660	20,000	11,710	11,790
M 14,00	13,682	13,962	2,000	12,530	12,610	5/8	15,522	15,840	11,000	14,190	14,290	9/16	13,964	14,250	18,000	13,210	13,290
M 16,00	15,682	15,962	2,000	14,530	14,610	3/4	18,667	19,000	10,000	17,180	17,290	5/8	15,562	15,840	18,000	14,760	14,860
M 18,00	17,623	17,958	2,500	16,190	16,280							3/4	18,655	19,010	16,000	17,790	17,900
M 20,00	19,623	19,958	2,500	18,190	18,280												
M 22,00	21,623	21,958	2,500	20,190	20,280												
M 24,00	23,577	23,952	3,000	21,840	21,950												



Fonte: Metalúrgica Vabene (2021).

ANEXO C - RELATÓRIO ENSAIO DE TRAÇÃO

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos

REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

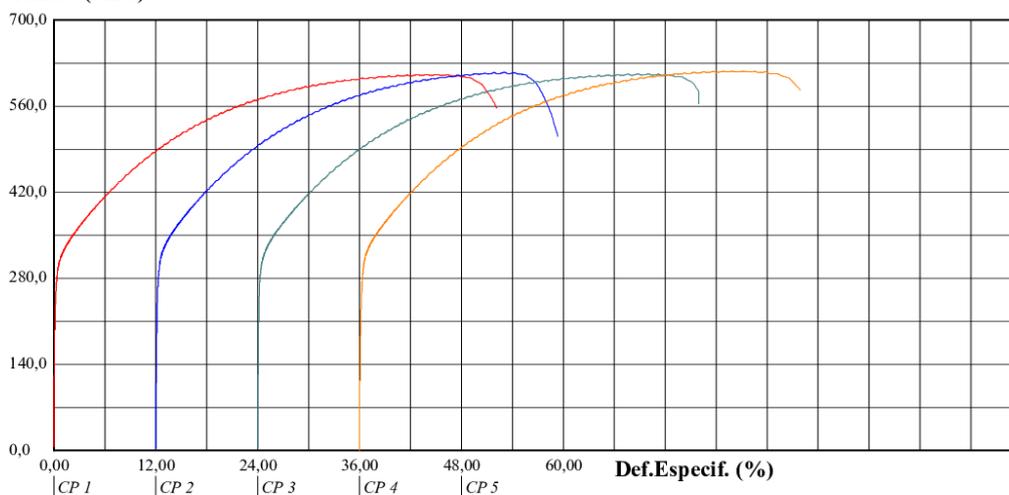
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **08/04/2022** Hora: **09:34:42** Trabalho n° **3596**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **E20T_TRAÇÃO CILINDRICO (com extensômetro)**
 Ident. Amostra: > Cliente: **TCC - ENG. MECANICA** Temp.(°C): **20,5** - Ident. n°: **01** S.S.: **#00600804** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Ident.	Diâmetro (mm)	Comp. Inicial (mm)	Tensão Escoam. (MPa)	Tensão Max. (MPa)	Compr. Final (mm)	ØFinal (mm)	Mod. Elástico (MPa)
CP 1	1	6,95	50	274,9	612,2	77,00	3,27	195976
CP 2	2	6,90	50	287,0	615,4	75,10	3,28	175016
CP 3	3	6,93	50	288,0	612,7	77,90	3,25	193898
CP 4	4	6,92	50	278,3	617,8	78,50	3,29	184144

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : **0,200 %**

Tensão (MPa)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 01 corpo de prova de aço inoxidável (com formato cilíndrico), de arametretilado com diâmetro de cerca de 10 mm.

ANEXO D - CERTIFICADO DE MATÉRIA PRIMA

 Certificado de Qualidade											Certificado de Qualidade Nº 041063				
Superfine Steel Aços Inoxidáveis											Filial: SUPERFINE STEEL ACOS INOXIDAVEIS LTDA				
Cliente(Razão Social) METALURGICA VABENE LTDA EPP											Num. Ped. Cliente E MAIL				
Nota Fiscal Nº 026285			Data 21/01/22			01546 - THIARA PALMIERI									
Ped./Ano/Seq.	Material	Bitola (mm)	Toler.	RT(Min/Max) (N/mm²)	Acabamento	Acond.	Peso (kg)	Peça							
004921/21 /009	ARAME DE ACO INOX LIGA 304L	8,600mm	- 0,040 + 0,040	580	FO - PELICULA LUBRIFICANTE	ROLO	1.700,000								
Encontrado	ARAME DE ACO INOX LIGA 304L	8,584mm	-0,016mm	575	FO - PELICULA LUBRIFICANTE	ROLO	1.756,498	8,00							
Outras Informações															
OF/Ano: 000337 / 22					Part Number:				Corrida: 08241						
Composição Química															
Elementos (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Pb	Fe	Zn	Outros			
												Mo	Cu	Al	Ti
Encontrado	0,026	0,340	1,590	0,030	0,010	18,160	8,700	0,036				0,610	0,620		
Obs:															
<ul style="list-style-type: none"> - Certificamos que o material foi produzido conforme as suas normas de especificações, satisfazendo o requerido; - O processo de fabricação de nossos produtos seguem os requisitos conforme sistema de qualidade ISO 9001:2015; - Este certificado é emitido eletronicamente e é validado sem assinatura; - Reclamações técnicas serão aceitas no máximo até 90 dias da data de fornecimento. Devoluções somente serão aceitas após consulta e autorização do departamento técnico. 															
SANTA BARBARA D OESTE, 21 de janeiro de 2022 ROBERTO A. DE ALMEIDA,227 - DISTRITO INDUSTRIAL I - SANTA BARBARA D OESTE - SP - Brasil - Fone: (0019)3455-0113															
											Rev. C 09/08/2018				