

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ CAMPUS CURITIBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS**

DOUGLAS PRODOCIMO

**PROJETO E PROVA-DE-CONCEITO DO SUB-SISTEMA DE ALTA PRESSÃO DE
UM EQUIPAMENTO DE TESTES DE CORROSÃO SOB PRESSÃO PARA
ENSAIOS DE AMOSTRAS METÁLICAS RECOBERTAS**

CURITIBA

2013

DOUGLAS PRODOCIMO

**PROJETO E PROVA-DE-CONCEITO DO SUB-SISTEMA DE ALTA PRESSÃO DE
UM EQUIPAMENTO DE TESTES DE CORROSÃO SOB PRESSÃO PARA
ENSAIOS DE AMOSTRAS METÁLICAS RECOBERTAS**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Antonio
Mendes

CURITIBA

2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Admir Prodocimo e Rosimei Franco Prodocimo pelo apoio durante todo o curso do mestrado, agradeço a Fabiana R. F. Arnone pelo apoio durante a maior parte dos dias em que fiquei desenvolvendo e escrevendo o conteúdo da dissertação, agradeço ao Thiago Greboge amigo que ajudou a tomar iniciativa para fazer o curso de mestrado, agradeço ao Prof. Dr. Luciano A. Mendes meu orientador pela paciência e ótimo método de orientação, agradeço ao Prof. Dr. Ricardo D. Torres por possibilitar e coordenar os projetos de mestrado relativos ao tema do trabalho e agradeço a FINEP dispor o projeto global da onde foi elaborado o subprojeto que esta dissertação aborda.

RESUMO

A diminuição progressiva da quantidade de poços de petróleo de fácil exploração tem levado as companhias petrolíferas a desenvolver tecnologias para explorar poços cada vez mais profundos, a exemplo dos poços da camada pré-sal na costa brasileira. O conhecimento dos efeitos do meio físico-químico encontrado em poços ultra profundos sobre os materiais usados nos equipamentos de exploração de petróleo é fundamental para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que suportem a engenharia de sistemas utilizados na exploração da principal fonte de energia empregada pela humanidade. Este trabalho descreve o projeto e desenvolvimento de um equipamento de ensaios de laboratório com a finalidade de replicar as condições de alta pressão, temperatura e corrosão encontradas em poços ultra-profundos, atendendo a um amplo conjunto de requisitos e especificações relacionados com atributos tais como uso, função, segurança e manutenção. Entre as substâncias presentes no poços, destacam-se o CO_2 e o H_2S , sendo que este último torna mandatória a adoção de medidas de segurança específicas. O equipamento teve o seu projeto e desenvolvimento orientado pelas prescrições da norma VDI-2221, valendo-se ainda de ferramentas da área da engenharia de produtos e sistemas, com o objetivo de minimizar erros de projeto por planejamento deficiente. Um protótipo do sub-sistema de alta pressão foi fabricado e ensaiado em bancada, tendo os testes demonstrado que a solução implementada tem a capacidade de sustentar pressões da ordem de 115 MPa, compatíveis com uma coluna d'água da ordem de 11 km, por período superior à 9 horas, na câmara de teste. Ainda, são detalhadas soluções para manter a câmara de teste na temperatura desejada e diluir reagentes químicos cujos produtos são substâncias químicas que reproduzem a capacidade corrosiva encontrada nos poços de petróleo. A sistematização do processo de projeto contribuiu para que se alcançasse um resultado compatível com os requisitos e especificações propostos inicialmente.

Pré-sal; Desenvolvimento de produto; VDI-2221; TRIZ.

ABSTRACT

As easy-to-explore oil wells become rarer, the oil companies are forced to develop technologies to explore ever deeper wells, as is the case of the offshore wells in the Brazilian pre-salt layer. Understanding the physical and chemical effects caused by substances found in ultra-deep wells on materials and equipment is critical, for the exploration of the main energy source used by mankind. This dissertation depicts the development of a laboratory test equipment designed to replicate the conditions of high pressure, temperature and corrosion found in ultra-deep wells, attending a wide range of requirements and specifications related with attributes such as use, function, safety and maintenance. Among the substances present in the wells, CO₂ and H₂S are the most relevant for their potential effects on equipment, and the H₂S makes it mandatory to adopt specific security measures. The equipment had its design and development guided by the VDI-2221 model and aided by design tools from the area of product and systems engineering, to minimize possible design errors due to poor planning. A prototype of the high-pressure sub-system was fabricated and tested, and results show that the implemented solution is capable to sustain, in a very stable manner, pressures about 115 MPa consistent with a water column of about 11 km, for a period of nine hours. Furthermore, solutions to maintain the test chamber at the desired temperature and to dilute reagents whose products are chemicals that replicate the capacity found in corrosive oil wells were indicated. The systematic design process helped to reach a result which is consistent with the requirements and specifications originally proposed.

Pre-salt; Product development; VDI-2221; TRIZ.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Duto de gás, rompimento por corrosão	12
Figura 2 - Vazamento de petróleo por corrosão em tubulação subterrânea ...	13
Figura 3 - Perfil energético da reação.....	23
Figura 4 - Abordagem de desenvolvimento em engenharia de precisão (VDI- 2221)	29
Figura 5 - Desenvolvimento de uma estrutura de funções.....	32
Figura 6 - Aplicação generalizada do diagrama de Mudge.....	33
Figura 7 - Exemplo de aplicação da FMEA.	34
Figura 8 - Triz, metodologia para busca de soluções.	35
Figura 9 - Matriz Morfológica - representação esquemática.....	36
Figura 10 - Abordagem no desenvolvimento deste trabalho.	39
Figura 11 - Desenvolvimento da casa da qualidade	45
Figura 12 - Árvore de funções do sistema	47
Figura 13 - Estrutura de funções do sistema.....	48
Figura 14 - Primeiro princípio de solução	50
Figura 15 - Segundo princípio de solução	52
Figura 16 - Terceiro princípio de solução	53
Figura 17 - Quarto princípio de solução	54
Figura 18 - Matriz morfológica.	55
Figura 19 - Destaque dos elementos da quarta solução	57
Figura 20 - Conceito final da célula de alta pressão	60
Figura 21 - Conceito para a célula de alta pressão.	61
Figura 22 - Módulos realizáveis	62
Figura 23 - Funcionamento do <i>parback</i>	65
Figura 24 - Diagrama de fluxos e conexões.	66
Figura 25 - Diagrama conjunto do sistema elétrico.	68
Figura 26 - Relação entre sensores, atuadores e interface de aquisição.	69
Figura 27 - Circuito da interface de conversão de sinais elétricos de saída. ...	70
Figura 28- Diagrama de ações do usuário e eventos.	72
Figura 29 - Diagrama de maquina de estados finitos.	73
Figura 30 - Leiaute geral (parte 1).....	75

Figura 31 - Leiaute geral (parte 2).....	76
Figura 32 – Célula de alta pressão.	78
Figura 33 – Câmara.....	79
Figura 34 - Sistema amplificador.....	80
Figura 35 - Diagrama elétrico.....	81
Figura 36 - Leiaute de disposição dos componentes no quadro elétrico.	82
Figura 37 - Tela para seleção de parâmetros.	83
Figura 38 - Tela para confirmação de procedimento.	83
Figura 39 - Tela de acompanhamento de teste.	84
Figura 40 - Montagem do sistema de testes.	85
Figura 41 – Montagem para testes do protótipo do cilindro amplificador	86
Figura 42 - Interface de condicionamento de sinais.....	86
Figura 43 - Montagem do sistema de testes junto ao protótipo funcional.	88
Figura 44 - Teste de pressão #1.....	91
Figura 45 - Teste de pressão #2.....	91
Figura 46 - Teste de pressão #3.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Seleção de alternativa através do método de Pugh (exemplo).....	37
Tabela 2 - Transformação dos dados originais em requisitos de cliente	41
Tabela 3 - Aplicação do método do cenário	43
Tabela 4 - Valoração por diagrama de Mudge	44
Tabela 5 - Aplicação do Método de Pugh (adaptado).....	56
Tabela 6 - Aplicação do FMEA para o quarto princípio de solução.....	58
Tabela 7 - Aplicação do método TRIZ	59
Tabela 8 - Características dos sensores e atuadores.....	68
Tabela 9 - Condições de transição da máquina de estados.....	74
Tabela 10- Requisitos de projeto supridos	90
Tabela 11 - Resultado dos testes	92

SUMÁRIO

1	PROBLEMA DE PROJETO E JUSTIFICATIVA.....	11
1.1	INTRODUÇÃO	11
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Geral.....	17
1.3.2	Específicos	17
1.4	ESTRUTURA DESTE TRABALHO.....	17
2	ASPECTOS SOBRE A METODOLOGIA DESTE TRABALHO.....	19
2.1	METODOLOGIA CIENTÍFICA	19
2.1.1	Estudo de Caso	19
2.2	ABORDAGEM PARA O DESENVOLVIMENTO DESTE TRABALHO	20
3	ASPECTOS DE CORROSÃO E DEGRADAÇÃO NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO – TRABALHO COM H₂S.....	21
3.1	FORMAÇÃO DO H ₂ S	21
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE CORROSÃO	21
3.2.1	H ₂ S na corrosão	23
3.2.2	CO ₂ na corrosão	24
3.2.3	Fragilização por hidrogênio	25
3.2.4	Ensaio de laboratório envolvendo H ₂ S.....	25
3.2.5	Testes de fragilização por H ₂ /CO ₂ /H ₂ S e revestimentos em aços duplex e superduplex.....	26
4	FERRAMENTAS DE PROJETO E A DIRETRIZ VDI-2221	28
4.1	DIRETRIZ VDI-2221:1986-11 – ABORDAGEM PARA ENGENHARIA DE PRECISÃO.....	28
4.2	FERRAMENTAS AUXILIARES EM PROJETO DE PRODUTO.....	31
4.2.1	QFD – desdobramento da função da qualidade	31
4.2.2	O Método da Análise Funcional	31
4.2.3	Atributos de importância - Diagrama de Mudge.....	32
4.2.4	Atribuição de princípios de solução às funções parciais	33
4.2.5	FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas.....	33
4.2.6	TRIZ – Teoria da Solução Inventiva de Problemas	34
4.2.7	Síntese de conceitos alternativos para o projeto - Matriz Morfológica.....	36
4.2.8	Seleção de alternativas viáveis para o projeto – Método de Pugh.....	36
5	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	38

5.1	PRIMEIRA ETAPA – ESCLARECER E DEFINIR AS TAREFAS	40
5.1.1	Definição de requisitos de cliente e de projeto	40
5.2	DETERMINAR FUNÇÕES E SUAS ESTRUTURAS	46
5.3	PESQUISA POR PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO E SÍNTESE DE ALTERNATIVAS CONCEITUAIS	49
5.3.1	Primeiro princípio de solução	49
5.3.2	Segundo princípio de solução	51
5.3.3	Terceiro princípio de solução	52
5.3.4	Quarto princípio de solução	53
5.3.5	APLICAÇÃO DA MATRIZ MORFOLÓGICA	54
5.3.6	Aplicação do FMEA e do TRIZ ao princípio de solução selecionado para o núcleo do sistema	56
5.4	DIVISÃO EM MÓDULOS REALIZÁVEIS	61
5.5	DESENVOLVIMENTO DOS LEIAUTES PRINCIPAIS	62
5.5.1	Camada eletromecânica	62
5.5.2	Camada elétrica	67
5.5.3	Camada de software	71
5.6	LEIAUTE GERAL	74
5.6.1	Camada eletromecânica	74
5.6.2	Camada elétrica	81
5.6.3	Camada de software	82
5.7	DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO	84
6	PROVA DE CONCEITO DO SUBSISTEMA DE OBTENÇÃO DE ALTA PRESSÃO - RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
6.1	DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO ADOTADO PARA O EXPERIMENTO ..	85
6.2	TESTES	89
6.3	INTEGRAÇÃO GERAL DO SISTEMA	89
6.4	RESULTADOS DOS TESTES DE FUNCIONAMENTO	90
7	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
7.1	CONCLUSÃO	93
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXO 01 – VEDAÇÕES PARA ALTA PRESSÃO.....	101
	ANEXO 02 – DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO (DETALHAMENTOS)	103

1 PROBLEMA DE PROJETO E JUSTIFICATIVA

1.1 INTRODUÇÃO

Por volta de 1900, com o invento do motor a combustão e posteriormente com o invento do automóvel, o petróleo teve sua posição alavancada na indústria e, após a primeira guerra teve sua posição consolidada na economia mundial (MAUGERI, 2006).

Hoje, o petróleo tem ampla utilização em produtos para saúde, plásticos, lubrificantes e principalmente na área de energia. Esta proximidade do petróleo com nosso cotidiano está relacionada com o grande avanço tecnológico do último século.

O petróleo viabilizou um avanço na qualidade de vida, mas também se tornou motivo de conflitos entre nações. Atualmente, a humanidade vive em um patamar tecnológico que seria praticamente impossível sem seu uso, com destaque para o seu grande uso nos veículos e meios de transporte em geral.

De acordo com BP (2012), o petróleo é a principal matriz energética do mundo, e nos últimos 10 anos tem havido um consumo crescente, o que obriga a um aumento na produção, e conseqüentemente a exploração de novos locais para extração.

Atualmente, o Brasil está em uma fase do seu desenvolvimento em que a demanda de petróleo para consumo interno cresce juntamente com suas indústrias. Outras nações, mais desenvolvidas, também já atravessaram uma transição semelhante.

Visando suprir a demanda nacional por petróleo e derivados, a Petrobras vem melhorando ao longo dos anos sua capacidade tecnológica, e em 2005 bateu o recorde brasileiro de profundidade em perfuração de poços. Posteriormente, em 2007, anunciou a descoberta de petróleo em um poço pioneiro (poço Tupi) da baía de Santos, na profundidade da chamada camada geológica do pré-sal. Os poços da camada pré-sal são classificados como poços ultraprofundos (PETROBRAS, 2012). Alguns poços situados em profundidades superiores a 6500 metros, com uma lâmina de água de mais de 2000 metros, implicam em características singulares de temperatura e pressão ANEP (2012). Além destas, há a presença de CO₂ e H₂S, também é uma característica dos poços da camada pré-sal (PENNERGY, 2012) que de acordo com BABOIAN (2010) são os principais agentes de corrosão quando

misturados a água.

A corrosão das paredes de tubos de petróleo faz com que os mesmos percam a resistência mecânica, e em casos mais críticos levem à falha dos mesmos, causando furos ou rompimentos das paredes. Falhas consequentes da corrosão são responsáveis por grandes danos à natureza, à vida e mesmo às finanças de empresas de petróleo. Os principais sistemas afetados são os dutos de transporte (HEIDERSBACH e HEIDERSBACH, 2011). A Figura 1 mostra danos físicos causados pela ruptura de um duto de gás corroído internamente.

Vazamentos de petróleo têm grande impacto ambiental, por longos períodos, que causam desequilíbrios na fauna e, eventualmente, até mesmo a sua extinção, devido à contaminação por hidrocarbonetos, como mostra a Figura 2 (HEIDERSBACH e HEIDERSBACH, 2011).

Figura 1 - Duto de gás, rompimento por corrosão

Novo México, em 2000



Fonte: HEIDERSBACH (2011)

Figura 2 - Vazamento de petróleo por corrosão em tubulação subterrânea



Fonte: HEIDERSBACH (2011)

Ainda, segundo (HEIDERSBACH e HEIDERSBACH, 2011), para evitar falhas por corrosão, geralmente são aplicados inibidores, que podem ser camadas de proteção, tratamentos térmicos, escolhas de materiais resistentes, entre outros. Os ambientes corrosivos frequentemente encontrados em poços de petróleo implicam desafios importantes de engenharia. Na camada pré-sal, os efeitos da corrosão sob temperatura e pressão tornam estes desafios ainda maiores.

Para prolongar a vida dos componentes e ferramentas, a PETROBRÁS (2012) vem demandando desenvolvimento de novas tecnologias de revestimentos e de materiais resistentes à corrosão. No entanto, o ambiente dos poços de petróleo tem uma química muito complexa, geralmente difícil de ser simulada por modelos teóricos, tornando necessária a realização de testes empíricos em meios corrosivos (BABOIAN, 2010).

Além de dispendiosos, os testes de corrosão em campo são caros, por se tratarem de ambientes severos e de difícil acesso ao homem. A opção por testes de laboratório em condições normais de temperatura e pressão não é suficiente para estimar as reais condições de serviço encontradas em pressões e temperaturas elevadas. Em seu trabalho, BABOIAN (2010) explica que os testes de corrosão devem ser realizados em condições as mais próximas possíveis da realidade, evitando assim erros que coloquem em dúvida a confiabilidade dos testes.

A recriação em laboratório da maneira mais próxima possível, das condições

de corrosão presentes nesses ambientes demanda o desenvolvimento de equipamentos especiais.

A engenharia de equipamentos com requisitos e especificações especiais requer o uso de conhecimentos relacionados com inovação, engenharia de produtos e sistemas técnicos, e metodologia de projeto.

Um amplo conjunto de ferramentas e abordagens para o desenvolvimento de produtos e sistemas pode ser aplicado na engenharia, assim como nos mais variados ramos da indústria desde aqueles voltados para produtos ao consumidor, que exigem maior ênfase em *design*, até os que atendem aos casos de clientes de sistemas industriais, que demandam projetos especiais. Para o emprego eficiente de ferramentas de projeto de produto, se faz necessário conhecer bem o contexto, as necessidades e os requisitos, porém um certo grau de incerteza é inevitável em qualquer atividade de projeto. Desta maneira, é possível escolher as ferramentas com base em seus objetivos. Autores como PAHL e BEITZ *et al.* (2005), e BACK, OGLIARI, *et al.*, (2008) têm seus trabalhos voltados para o projeto na engenharia.

O ambiente dos poços de petróleo é complexo e apresenta grande variabilidade, o que gera um grande desafio para a reprodução de suas condições para fins de testes de corrosão, pois sua química não é controlada e é determinada pela natureza, resultando em uma ampla gama de variações de fases e composições químicas. Além disto, os poços de petróleo podem sofrer alterações em suas características durante sua vida produtiva que não podem ser previstos no plano de exploração.

O potencial corrosivo da composição química do petróleo relaciona-se, primariamente, com a fase aquosa. Para que o ambiente seja corrosivo, o meio aquoso precisa possuir algumas características básicas.

As substâncias dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, hidrocarbonetos, compostos orgânicos e sais dissolvidos são os principais constituintes do petróleo extraído dos poços. Os gases ácidos, como CO₂ e H₂S, são os principais componentes que influenciam no processo de corrosão.

O termo “*sweet*” (‘doce’, em sentido figurado na língua inglesa) é aplicado ao petróleo livre de H₂S. Neste caso, toma-se como base a pressão parcial do CO₂ para caracterizar a agressividade da corrosão (BABOIAN, 2010).

Já os ambientes classificados como “*sour*” (‘ácido’ ou ‘azedo’, em inglês figurado), além do CO₂, possuem sulfeto de hidrogênio. A concentração de H₂S

necessária para determinar se um ambiente é ácido não é bem definida, porém de acordo com a norma NACE MR0175 (2003), com uma pressão parcial maior que 345 Pa já se considera o uso de metais resistentes a H₂S.

O termo ácido também pode ser atribuído a soluções que contenham uma concentração de H₂S suficiente para formar as primeiras camadas de sulfetos de ferro como subprodutos da corrosão. As concentrações para a formação dos sulfetos não são exatamente conhecidas, mas testes indicam que concentrações acima de 50ppm na fase aquosa já seriam suficientes para a formação de sulfetos (BABOIAN, 2010).

Os ácidos de cadeia carbônica também fazem parte da fase aquosa do fluxo extraído dos poços de petróleo. Ácidos como o fórmico, o acético e o propílico são encontrados nos poços de petróleo e gás com frequência. Particularmente, o ácido acético é o mais abundante, constituindo uma porção que varia de 50 a 90% entre os ácidos orgânicos (ZHANG e CHENG, 2009).

Os parâmetros físicos, temperatura e pressão, encontrados em poços de petróleo e gás, também podem variar bastante. Em poços de baixa pressão geralmente se encontram pressões na faixa de 60 bar (6 MPa) a 80 bar (8 MPa); porém, em poços de alta pressão, a pressão pode alcançar níveis da ordem de 1500 bar (150 MPa), e as temperaturas podem variar de 50 °C a 150 °C. Mudanças na temperatura e pressão ocorrem conforme o fluxo sobe através da tubulação, acarretando mudanças nas proporções das fases do petróleo (BABOIAN, 2010).

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme a exploração do petróleo avança para locais cada vez mais difíceis de serem atingidos, faz-se necessário a criação de novas tecnologias para dar continuidade à extração em poços profundos.

Os poços da camada pré-sal são considerados ultra-profundos, com profundidades que variam entre 5 e 7 mil metros, e apresentam novos desafios à indústria do petróleo. O ambiente dos poços da camada pré-sal é caracterizado por altas pressões, temperaturas acima de 150°C e por uma fase corrosiva que vem juntamente com o petróleo.

As condições do ambiente da camada pré-sal implicam, portanto, na criação de novas tecnologias, que antes de poderem ser empregadas devem ser

desenvolvidas e validadas. A integração de tecnologias modernas das diferentes áreas da engenharia já permite sintetizar soluções para contornar a impraticabilidade de se realizar teste de campo *in situ*. Esta integração, entretanto, requer esforços de engenharia específicos, é o caso no presente projeto.

Sob um ponto de vista mais amplo, o fomento a projetos de pesquisas e desenvolvimento de soluções de interesse da indústria nacional de petróleo e gás passou a ser objeto de políticas públicas de financiamento de projetos junto às instituições brasileiras capacitadas para se envolver nesse processo. Um exemplo de iniciativa nessa linha é projeto a “Rede Revespetro” (REDE REVESPETRO, 2009), que contempla uma cooperação multi-institucional para o desenvolvimento e validação de tecnologias, tais como: processamento superficial de materiais; testes de corrosão e fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$; tratamentos de superfície em ferramentas para processamento dos aços duplex e superduplex.

Logo, a justificativa para este projeto é a síntese de um sistema que permita estudar o comportamento de determinados materiais sob as condições supracitadas, com vistas ao desenvolvimento de novos materiais para emprego na indústria de petróleo e gás, particularmente nos segmentos de fabricantes de equipamentos e sistemas para operação nos ambientes dos poços da camada pré-sal.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o projeto de uma solução para um equipamento capaz de reproduzir, do modo mais próximo possível, as condições encontradas nos poços da camada pré-sal, para fins de realização em laboratório de testes de corrosão e fragilização em amostras metálicas.

1.3.2 Específicos

- Projetar, usando a diretriz VDI-2221 e ferramentas clássicas de projeto de produto aplicáveis, um sistema para reprodução das condições de corrosão e fragilização de poços de petróleo a ser usado em testes de laboratório;
- Construir e qualificar o desempenho de um protótipo, para fins de prova-de-conceito, do subsistema de alta pressão do referido sistema.

1.4 ESTRUTURA DESTE TRABALHO

Os capítulos do trabalho estão organizados conforme segue:

- Capítulo 2 – ASPECTOS SOBRE A METODOLOGIA: Dividido em dois subcapítulos, sendo o primeiro uma discussão sobre metodologia científica em projetos aplicados, e o segundo sobre a abordagem utilizada para o desenvolvimento do projeto;
- Capítulo 3 - ASPECTOS DE CORROSÃO E DEGRADAÇÃO NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO – TRABALHO COM H₂S: Com a finalidade de embasar em aspectos técnico-científicos diversos requisitos do projeto, são revisados a formação do H₂S e o problema de corrosão e fragilização, bem como se detalham os riscos envolvidos no trabalho com ácido sulfídrico (H₂S);
- Capítulo 4 - FERRAMENTAS DE PROJETO: A norma VDI-2221 é revisada de maneira detalhada e em um segundo subcapítulo são explanadas as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do projeto;

em uma segunda;

- Capítulo 5 – DESENVOLVIMENTO DO PROJETO: Neste capítulo, detalha-se a aplicação das ferramentas de projeto de produto com base na norma VDI-2221. Os subcapítulos seguem a mesma estrutura sugerida pela norma.
- Capítulo 6 – PROVA DE CONCEITO DO SUBSISTEMA DE OBTENÇÃO DE ALTA PRESSÃO : Apresenta-se uma implementação (protótipo funcional) do conceito utilizado para obter alta pressão e seus resultados respectivamente;
- Capítulo 7 – CONCLUSÃO: Conclusões e considerações finais são apresentadas, com comentários sobre o atendimento às especificações e sobre a utilização das ferramentas de projeto de produto no projeto.

2 ASPECTOS SOBRE A METODOLOGIA DESTE TRABALHO

Neste capítulo, faz-se uma breve justificativa da metodologia científica selecionada, formato 'Estudo de Caso', para o presente projeto.

2.1 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Toda pesquisa de valor científico deve ser avaliada por sua qualidade formal no que diz respeito aos meios utilizados para produção do trabalho, especificamente com relação aos métodos para coleta e interpretação dos dados.

Uma pesquisa, busca de respostas para responder ou solucionar um problema através de um grupo de ações sistematicamente executadas e documentadas, pode ser formalizada para se tornar um trabalho de valor científico (SILVA e MENEZES, 2001; MIGUEL, 2007).

2.1.1 Estudo de Caso

Como o objetivo deste trabalho é gerar um conjunto de soluções para permitir a criação de um produto com características especiais, foi selecionado o "Estudo de Caso", que tem por característica esclarecer "porque" e "como" decisões são tomadas dentro de um contexto, qual seja a identificação e a realização de ações necessárias para a solução do problema de projeto posto. O estudo de caso é adotado como o esclarecimento de uma decisão ou conjunto de decisões: com qual motivo foi tomada, como foram implementadas e que resultados geraram.

No estudo de caso é necessário realizar um aprofundamento dos conhecimentos, assim permitindo o delineamento de sugestões de solução para um problema com base em soluções para problemas similares (MIGUEL, 2007).

YIN (2005) define o estudo de caso como uma investigação empírica que investiga um fenômeno dentro do contexto da vida real quando seus limites e os limites de contexto não são claros.

Na investigação do estudo de caso, a situação encontrada geralmente terá muitas variáveis de interesse e poucos pontos de dados. Seu resultado irá basear-se em evidências em que os dados convergirão.

2.2 ABORDAGEM PARA O DESENVOLVIMENTO DESTE TRABALHO

Este trabalho é caracterizado como um estudo de caso de um projeto multidisciplinar de desenvolvimento tecnológico, que engloba o desenvolvimento de subsistemas das camadas física (mecânica), de hardware e de software.

Realizou-se uma breve revisão para contextualizar o problema da corrosão. Dados da química e física dos poços de petróleo são apresentados para a caracterização do problema e como base de referência na proposição de certos princípios de solução.

Para melhor estruturar o desenvolvimento do projeto, este trabalho foi conduzido com base na metodologia de desenvolvimento de produtos e sistemas proposta na norma VDI-2221 (1987). Contribuições pertinentes advindas de fases correlatas dos modelos de PAHL, BEITZ, *et al.* (2005), Back et al (2008) e ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.* (2006) são oportunamente e pontualmente adotadas. Da mesma forma, em cada etapa da diretriz VDI-2221, ferramentas específicas de projeto de produto propostas por outros autores, tais como o modelo de QFD, o Método do Cenário, o Diagrama de Mudge, a técnica de elaboração da Análise Funcional, o método de Matriz Morfológica, o Método de Pugh, o método TRIZ e o Método FMEA, foram utilizados.

3 ASPECTOS DE CORROSÃO E DEGRADAÇÃO NA EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO – TRABALHO COM H₂S

Neste capítulo será feita uma revisão sobre os conceitos necessários para definir uma parte importante do conjunto de requisitos para o projeto, referentes ao comportamento da corrosão no ambiente de extração do petróleo.

Também neste capítulo foi feito um levantamento dos dados necessários para a caracterização física dos poços de extração de petróleo em termos de pressão, temperatura e química própria.

3.1 FORMAÇÃO DO H₂S

O ácido sulfídrico pode tanto surgir de meio biótico quanto abiótico. O acúmulo de H₂S pode ter origem biótica, “*bacterial sulfate reduction*” (BSR) ou origem abiótica, via “*thermochemical sulfate reduction*” (TSR) e “*thermal decomposition of sulfides*” (TDS) em óleo ou querogênio (na parcela insolúvel da matéria orgânica no petróleo).

A BSR geralmente acontece em temperaturas abaixo de 100°C, e a TSR e TDS geralmente acontecem em temperaturas acima de 100°C. A formação de H₂S de origem biótica em poços de petróleo é pouco usual, pois entre as condições necessárias para que as bactérias sobrevivam estão uma temperatura entre 2 e 35°C.

Ainda, é observado que no meio biótico também ocorre a formação do CO₂ como produto do metabolismo bacteriano (CODY, HUTCHEON e KROUSE, 1999). Desta forma, a origem natural do H₂S nos poços é predominantemente abiótica, salvo em casos aonde há suspeita que o H₂S tenha origem biótica promovida pela injeção de água salgada nos poços (ZHU, ZHANG, *et al.*, 2012).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE CORROSÃO

A corrosão é um ataque destrutivo a um metal através de reações químicas ou eletroquímicas, usualmente relacionada com seu ambiente. A deterioração física, desgaste por abrasão ou erosão não são considerados corrosão, e sim formas de desgaste erosivo (REVIE e UHLIG, 1907).

A corrosão pode ser comparada, didaticamente e com uma analogia, a um

curso d'água que sempre flui para um local mais baixo. De certa forma, a corrosão é um fenômeno químico que naturalmente busca resultar em um estado de menor energia da matéria. Toma-se como exemplo o ferro, que tem um potencial relativamente alto de energia: em estruturas de aço o ferro, ao se combinar com o oxigênio e a água, sofre o processo de oxidação (DAVIS, 2000), progredindo para um estado de menor energia.

Como ambiente, admite-se tudo a que o material é exposto. Os principais fatores que descrevem o ambiente são: físico (líquido, sólido e gasoso); químico (composição e concentrações dos componentes constituintes); e por fim a temperatura e a pressão.

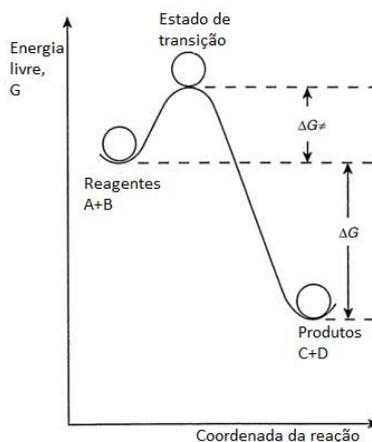
A corrosão de metais segue basicamente dois mecanismos: eletrolítica e não eletrolítica. A corrosão eletrolítica faz parte do tipo mais comum, a exemplo das estruturas metálicas que estão em ambiente úmido ou imersas em água. Gases e sais dissolvidos na água formam os mais variados tipos de íons, que por sua vez reagem com os íons de ferro liberados na água, causando um desequilíbrio. Como não há um equilíbrio consequente da reação, a parte sólida do ferro continua fornecendo íons para a solução, causando a corrosão. Uma parte dos íons retorna, e essa troca de íons cessa quando a solução entra em equilíbrio (GROYSMAN, 2010).

O oxigênio também pode ser considerado um fator de regulação do processo de corrosão. Dependendo da sua concentração, ele pode acelerar ou retardar o processo corrosivo através do processo de despolarização, de forma que sem o oxigênio o processo de corrosão é muito mais lento (ROBERGE, 1999).

Outro aspecto importante é a termodinâmica que deve ser considerada em situações de corrosão, pois determina se uma reação pode ser favorecida ou não (KELLY, SCULLY, *et al.*, 2003).

Considerando-se dois reagentes A e B que formam os produtos C e D, como ilustrado na Figura 3, a energia ΔG resultante da reação é negativa. Para satisfazer essa reação, os reagentes têm que passar pela barreira energética ΔG^\ddagger antes de formarem os produtos C e D, com menor estado de energia (SASTRI, 2011).

Figura 3 - Perfil energético da reação



ADAPTADO DE: (SASTRI, 2011)

Além dos aspectos citados, o processo de corrosão pode ser influenciado pelo mesmo princípio que faz uma célula galvânica funcionar, desde que:

- O sistema esteja em um mesmo eletrólito;
- Haja diferença de potencial entre eletrodos;
- Os eletrodos estejam ligados eletricamente.

No processo de corrosão galvânica, a corrosão é acentuada no metal menos resistente a corrosão, enquanto o material mais resistente à corrosão tem sua taxa de corrosão diminuída. A intensidade da força que rege a corrosão galvânica é influenciada por alguns fatores, como diferença de potencial entre os metais ou ligas; a natureza do ambiente; a polarização dos metais ou ligas; e as formas geométricas (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1987).

3.2.1 H₂S na corrosão

Em muitos casos onde a concentração de sulfeto de hidrogênio é importante, como em poços de petróleo, o aço pode sofrer fragilização por hidrogênio, principalmente em estruturas sob tensões.

De acordo com a reação (1), H₂S se dissocia na água formando um ácido fraco.



Os átomos de hidrogênio ionizados podem se difundir no metal, causando a

fragilização (BARDAL, 2004).

Quando livres na solução, os íons HS^- reagem com o $Fe(OH)_2$ para formar o FeS , como exemplificado na reação (2) (SHERAR, POWER, *et al.*, 2010).



De outra forma, uma reação anódica também ocorre segundo reações químicas (3) a (6).



3.2.2 CO₂ na corrosão

O CO₂ na sua forma gasosa não é corrosivo, apresentando-se como inibidor de corrosão em certos casos (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1987).

Mas, de maneira análoga ao H₂S, o CO₂ também se dissolve na água formando o ácido carbônico. Por sua vez o ácido carbônico se dissocia em uma ou mais reações formando diferentes tipos de íons (GUOAN, MINXU, *et al.*, 2004; NESIC, 2007; HAN, CAREY e ZHANG, 2011)

Segundo (PALMER, 1983) a dissolução seguida da ionização do CO₂ gera íons de carboneto $CO_{3(aq)}^{2-}$ e íons de hidrogênio $H_{(aq)}^+$.

Os íons de carbonato posteriormente reagem com os íons de ferro presentes na água, formando carbonato de ferro, como pode ser descrito pela reação (7).



A taxa de corrosão por CO₂ está relacionada diretamente com a pressão parcial do gás. Como o aumento da pressão parcial determina uma maior dissolução

do gás, aumenta também o número de íons de carbonato na solução (GUIMARÃES, 2006).

O potencial de corrosão em função da pressão de CO₂ é generalizado através da seguinte Equação 1.

$$P_{CO_2} = N_{CO_2} \times P_T$$

Equação 1

Onde:

P_{CO_2} : pressão parcial do CO₂

N_{CO_2} : fração molar do CO₂

P_T : pressão total

Além da pressão, segundo (PALMER, 1983) o aumento da temperatura influencia fortemente na solubilização do CO₂ em meio aquoso, diminuindo sua concentração.

3.2.3 Fragilização por hidrogênio

A fragilização por hidrogênio é outro mecanismo que contribui para a degradação de peças metálicas na extração de petróleo em presença de H₂S (ASM INTERNATIONAL, 1994). Esta fragilização também ocorre na presença de hidrogênio em altas pressões (ASM INTERNATIONAL, 2000). Este último processo consiste na dissolução do hidrogênio nas camadas internas do metal; quando acumulado em inclusões ou interface das matrizes do metal, o hidrogênio se precipita em forma de hidrogênio gasoso, e o acúmulo produz uma pressão que pode ocasionar pequenas fissuras no metal (ASM INTERNATIONAL, 2000).

3.2.4 Ensaios de laboratório envolvendo H₂S

De acordo com HUGHES, *et al* (2009) sulfeto de hidrogênio (H₂S) é mais tóxico do que o cianeto, sendo considerado muito perigoso mesmo em baixas concentrações. Já é perceptível a perda olfato em exposições por longos períodos em concentrações menores que 50 ppm. Concentrações maiores de 100 ppm

ocasionam a perda do olfato com exposições variando de 2 a 10 minutos. Em concentrações de 500 ppm, a exposição por períodos de 30 minutos, pode ser fatal.

Considerando-se o alto grau de toxicidade do sulfeto de hidrogênio, geralmente são adotadas medidas para contornar o uso direto do gás. Em seu trabalho, XIAOLIANG, HOUYI *et al.* (1999) usaram nas soluções de corrosão o sulfeto de sódio (Na_2S) como liberador de sulfeto de hidrogênio (H_2S). O sulfeto de sódio combinado com um ácido forte reage formando sulfeto de hidrogênio; no caso, o ácido usado foi ácido clorídrico (HCl).

Também em outro trabalho, PETER, SUDIPTA *et al.* (2011) adicionaram uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) ao sulfeto de ferro (FeS) para a geração do sulfeto de hidrogênio (H_2S).

HUGHES, *et al.* (2009) ainda cita o uso do tiocetamida (C_2H_5NS). Esta molécula, em contato com a água, se decompõe e libera ácido sulfídrico (H_2S). Porém, este composto, além de cancerígeno também é tóxico.

Outros trabalhos citam que o sulfeto de alumínio (Al_2S_3), ao entrar em contato com a água, se decompõe liberando ácido sulfídrico (H_2S) e hidróxido de alumínio (BEHRENS, NIHAL JOHNNY, 2007) e (PERRY, 2011).

3.2.5 Testes de fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$ e revestimentos em aços duplex e superduplex

No escopo do projeto REDE REVESPETRO (2009), os aços duplex e superduplex nitrocementados e revestidos com o sistema AlCrN/CrN devem ser submetidos a avaliação por fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$. Para realização desta avaliação, serão retirados dois grupos de amostras provenientes de tubos e flanges utilizados na extração de petróleo. Estas amostras, que receberão tratamentos de engenharia de superfície, serão produzidas no formato de cilindros com as dimensões D8mm x H4mm, assim definidas para possibilitar as análises posteriores de dureza, difratometria de raios X e eventualmente outras, conforme o tipo de estudo a ser feito.

O primeiro grupo passará pelo processo de fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$ e será degaseificado. O segundo grupo será submetido a um processamento de superfície, utilizando o processo de nitrocementação PI3 (*Plasma Immersion Ion Implantation*) com parâmetros controlados, para então também ser submetido à

fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$, e na sequência se também degaseificado.

Posteriormente, os dois grupos serão caracterizados quanto suas propriedades mecânicas e tribológicas, para determinar sob quais parâmetros do processamento via PI3 obteve-se o melhor resultado quanto à resistência a fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$.

Em uma segunda etapa, as amostras com maior resistência à fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$ serão revestidas com os sistemas AlCrN e CrN, e novamente submetidas ao mesmo processo de fragilização para determinar qual sistema e espessura de revestimento oferece a melhor resistência à fragilização por $H_2/CO_2/H_2S$.

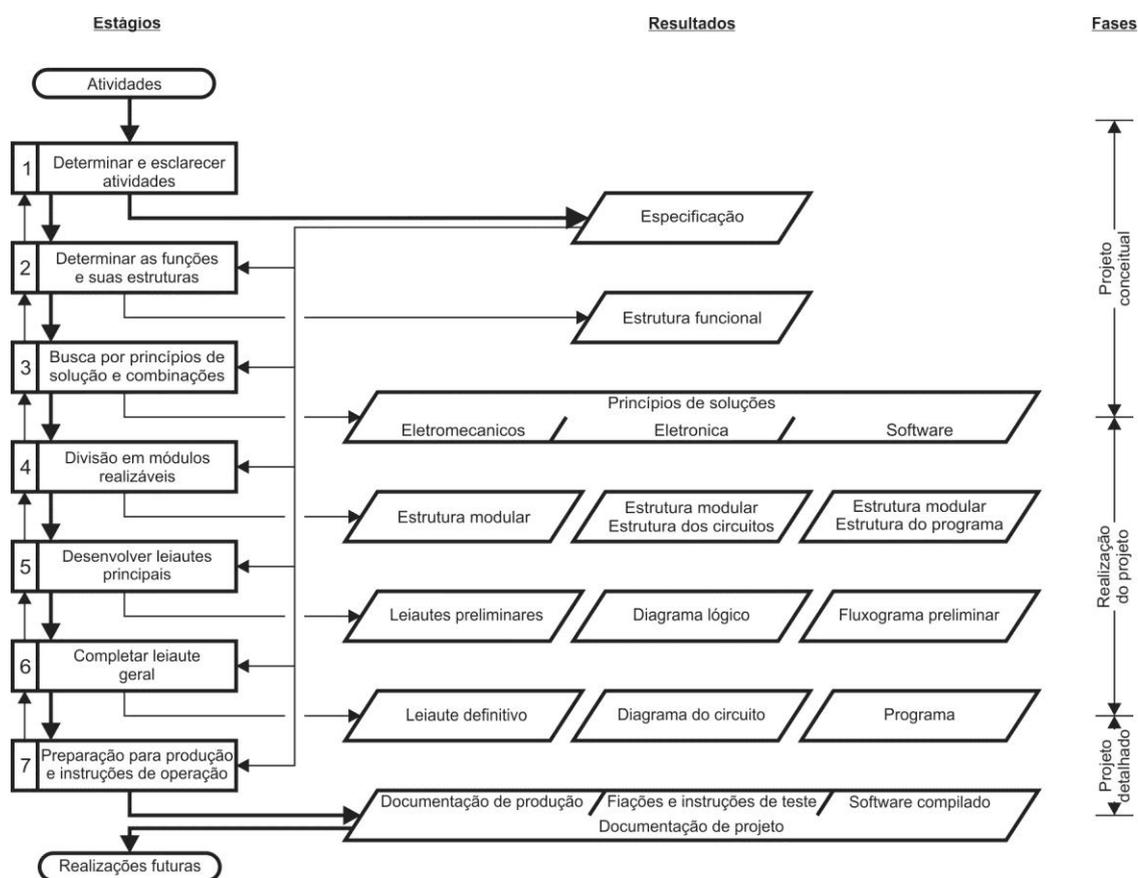
4 FERRAMENTAS DE PROJETO E A DIRETRIZ VDI-2221

Este capítulo aborda uma revisão sobre ferramentas de projeto de produto, bem como sobre a diretriz VDI-2221, tendo em vista sua aplicação neste trabalho.

4.1 DIRETRIZ VDI-2221:1986-11 – ABORDAGEM PARA ENGENHARIA DE PRECISÃO

A Associação Alemã de Engenheiros (*Verein Deutscher Ingenieure - VDI*) é um órgão normativo daquele país para questões de engenharia. Um modelo de referência para o processo de projeto na engenharia encontra-se na norma, ou diretriz, VDI-2221. Esta diretriz apresenta uma divisão do processo de projeto em sete estágios, e tem um caráter preferencialmente voltado para o projeto de sistemas mecânicos. Uma derivação deste modelo, designada ‘para engenharia de precisão’, melhor se adequa ao desenvolvimento de um sistema multidisciplinar (como é o caso no presente projeto), desmembrando os estágios de 3 a 7 em três camadas: eletromecânica, elétrica e software, resultando no modelo da Figura 12 (VDI SOCIETY FOR PRODUCT DEVELOPMENT, DESIGN AND MARKETING, 1987).

Figura 4 - Abordagem de desenvolvimento em engenharia de precisão (VDI-2221)



FONTE: VDI SOCIETY FOR PRODUCT DEVELOPMENT, DESIGN AND MARKETING (1987)

A aplicação das etapas 1 a 7 é feita da seguinte forma:

- 1) **Determinar e esclarecer atividades**: Compreende o levantamento de informações com o cliente sobre a função geral do sistema com o fim de se obter uma lista de especificações na forma de requisitos de cliente que serão convertidos em requisitos de projeto.
- 2) **Determinar e funções e suas estruturas**: Consiste em subdividir a função global do sistema em funções menores para que supram os requisitos de cliente e de projeto.
- 3) **Busca por princípios de soluções e combinações**: As subfunções da segunda etapa são analisadas para se obter princípios de solução para satisfazê-las, nesta etapa é feita a busca por soluções comerciais e também há iteração para se gerar novas soluções para as três camadas do sistema (hardware, software e mecânica). Como mais de uma solução pode ser encontrada para cada subfunção há a possibilidade de selecionar combinações compatíveis

entre si para gerar diferentes conceitos para a solução global.

- 4) Divisão em módulos realizáveis: Nesta etapa são agrupadas subfunções que podem ter princípios de solução agrupados em componentes que permitem aplicar varias soluções em um conjunto definido de montagem.
- 5) Desenvolver leiautes principais: Se Faz um agrupamento geral dos componentes do sistema ainda sem compromisso com as medidas.
- 6) Completar leiaute geral: Nesta etapa cada componente é detalhado e montado com o sistema global já compromissado com medidas e posicionamentos.
- 7) Preparação para produção e instruções de operação: Nesta etapa são determinados os meios de produção e também é feita a documentação geral de operação do equipamento, tanto para o usuário como para a equipe de montagem e manutenção.

Uma descrição detalhada das prescrições da VDI-2221, tanto no seu modelo geral quanto no indicado para engenharia de sistemas de precisão, pode ser encontrada na referência já citada VDI-2221 (1987).

4.2 FERRAMENTAS AUXILIARES EM PROJETO DE PRODUTO

4.2.1 QFD – desdobramento da função da qualidade

Quality Function Deployment (QFD) é uma ferramenta aplicável no planejamento do projeto. Caracterizado por uma abordagem sistemática com foco no cliente, usa um conjunto de relações entre as vontades de cliente e as características do produto.

Segundo CHENG e MELO FILHO (2007), o QFD tem como foco garantir a qualidade de um produto, ordenando as informações relacionadas à qualidade, além de traduzir e transmitir as necessidades para se atingir um produto que atenda às necessidades do cliente especificamente (com o uso da casa da qualidade).

De modo geral o QFD auxilia na percepção de funções, requisitos e exigências técnicas que são críticos para o desenvolvimento do projeto (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2005).

O QFD também é usado de diferentes formas, dependendo dos autores; no entanto, as diferenças estão relacionadas ao tipo de abordagem que cada um segue. Por exemplo, PAHL, BEITZ, *et al.* (2005) tem um foco técnico que abrange melhor o projeto na engenharia. BAXTER (2011) tem como foco o design, já ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.* (2006) o fazem na gestão de projeto.

4.2.2 O Método da Análise Funcional

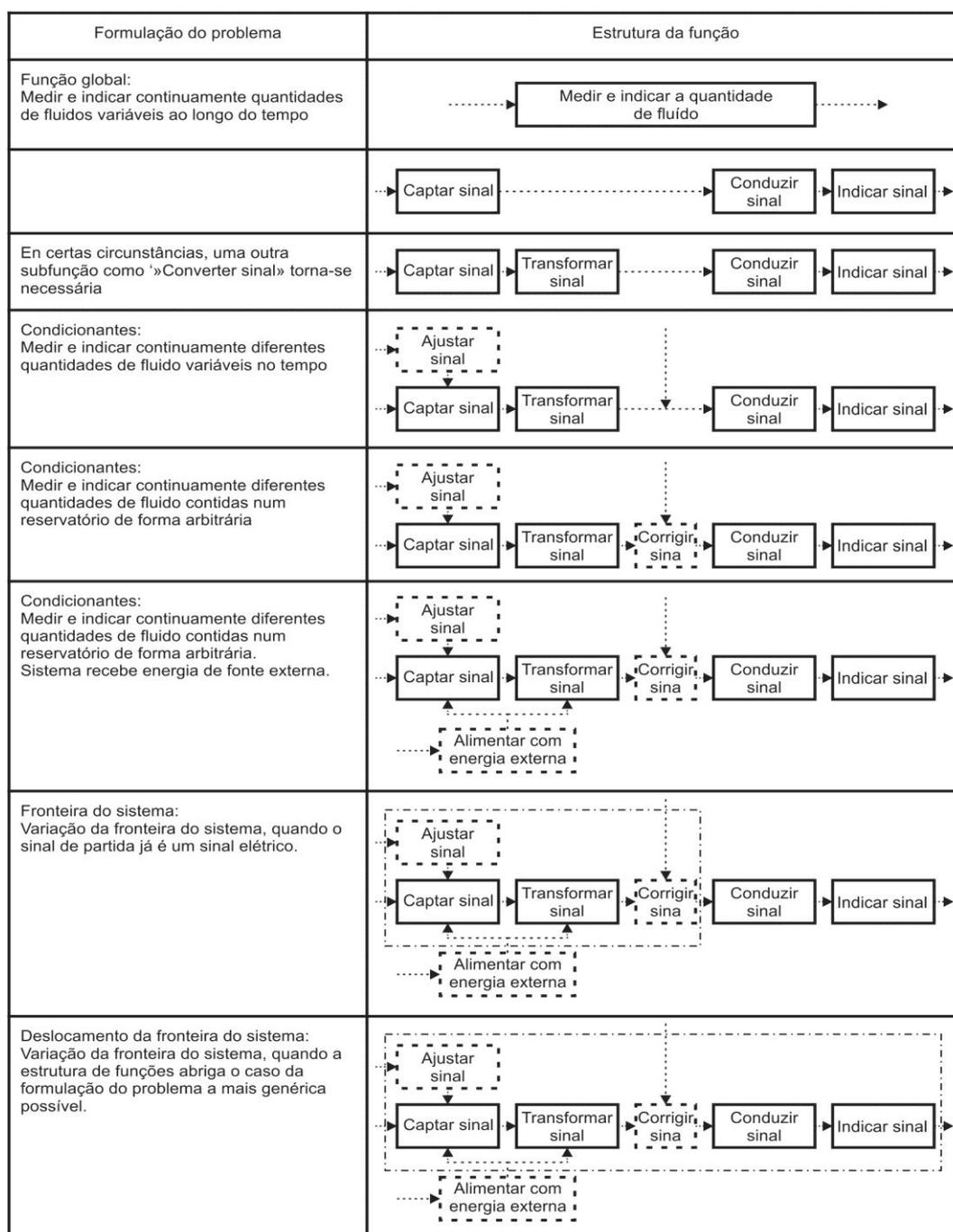
A decomposição da função global do sistema em sub-funções, ou funções parciais, permite desmembrar um problema complexo em vários menores, mais simples de serem resolvidos. A combinação das soluções para as sub-funções, então, é usada para se produzir uma solução global. A função global de um sistema indica a relação de transformação que ocorre entre o que entra e o que sai nos limites da fronteira do sistema.

Na abordagem de sistemas técnicos, as entidades que “fluem” através da estrutura funcional do sistema são: energia, material e informação, tal como exemplificado na Figura 5 (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2005). Uma segunda abordagem usada para a realização análise funcional consiste de uma hierarquia de funções, simplesmente.

A subdivisão da função global do sistema em subfunções é feita até o ponto

em que se possam associar princípios de solução às subfunções.

Figura 5 - Desenvolvimento de uma estrutura de funções



FONTE: (PAHL, BEITZ, *et al.*, 2005)

4.2.3 Atributos de importância - Diagrama de Mudge

Na aplicação da 'Casa da Qualidade' do modelo QFD é preciso atribuir valores de importância para os requisitos.

Uma atribuição satisfatória não deveria ser aquela tomada arbitrariamente;

devido ao grande número de variáveis, a atribuição da importância pode ser facilmente influenciada pela opinião pessoal do desenvolvedor. Para evitar este tipo de influência, ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.* (2006) sugerem o uso do Diagrama de Mudje (ver Figura 6). Nesse método, os itens são comparados dois a dois, e o processo se repete para todas as combinações possíveis dos itens comparados. Ao fazer a comparação, duas perguntas são feitas “Qual item é mais importante?” e “Quanto o item é mais importante?”. Então, atribui-se um valor, uma escala de 0 a 3, sendo 0 para importâncias iguais e 3 para maior importância; posteriormente, em uma coluna do lado direito do diagrama, são relacionadas as somas obtidas por linha, que correspondem às importâncias dos respectivos itens.

Figura 6 - Aplicação generalizada do diagrama de Mudje.

Item	B	C	Soma
A	A+1	C+2	1
B		B+3	3
C			2

FONTE: O AUTOR

4.2.4 Atribuição de princípios de solução às funções parciais

A cada função ou sub-função apontada na etapa do desenvolvimento da estrutura funcional, são atribuídos um ou mais princípios de solução. Entende-se por princípio de solução o portador do efeito físico que possibilita a execução da função. O portador pode ser atribuído a uma solução ou combinação de soluções (ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.*, 2006). Em seu trabalho, estes autores associam a busca por princípios de solução a outras ferramentas, como o TRIZ e a Matriz Morfológica.

4.2.5 FMEA – Análise de modos e efeitos de falhas

A FMEA, criada pela NASA em 1960 com o intuito de gerar maior confiabilidade nos projetos aeroespaciais, é uma técnica analítica utilizada para identificar e documentar potenciais falhas, o que permite eliminar ou reduzir suas ocorrências.

A aplicação do FMEA consiste em identificar deficiências no projeto pelo modo como ocorrem, qual é o fenômeno físico que ocasiona cada falha, seu(s) efeito(s) (as consequências da ocorrência do modo de falha) e suas possíveis causas (VASCONCELOS e ROMEIRO FILHO, 2011).

Para auxiliar no processo da análise de falha, são utilizados índices para determinar seus riscos conhecidos por (O G D R), que significam, respectivamente: ocorrência, relativa à probabilidade de ocorrência da falha; gravidade, relativa à consequência da falha; detecção, relativa à probabilidade de a falha se detectada; e número de prioridade do risco. Para os três primeiros índices são atribuídos valores de 1 a 10, e o último índice é calculado como multiplicação dos três primeiros (VASCONCELOS e ROMEIRO FILHO, 2011).

De maneira simplificada a ferramenta é aplicada de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de aplicação da FMEA.

FALHAS POSSÍVEIS			ÍNDICES				
MODO	EFEITO(S)	CAUSA(S)	CONTROLES	O	G	D	R
<i>Quebra</i>	<i>Viseira se desprende do capacete (exposição a riscos)</i>	<i>Solicitação de força em excesso</i>	<i>nenhum</i>	2	5	10	100
		<i>Fragilidade do material</i>	<i>ensaio em baixas temperaturas</i>	1	8	10	80
		<i>Dimensionamento incorreto</i>	<i>Análise por elementos finitos</i>	1	10	10	100

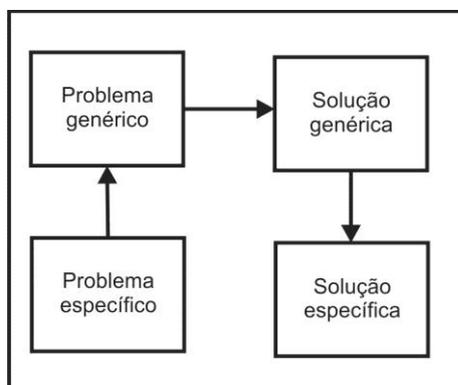
ADAPTADO DE: (VASCONCELOS e ROMEIRO FILHO, 2011)

4.2.6 TRIZ – Teoria da Solução Inventiva de Problemas

TRIZ, sigla das palavras russas que em português significam “*Teoria da Solução Inventiva de Problemas*”, é um método de solução de problemas baseado na lógica e informação, sem intuição, que acelera as habilidades de projeto de uma equipe. O método permite repetitividade, confiabilidade e previsibilidade dentro de sua estrutura algorítmica (BARRY, DOMB e SLOCUM, 2012).

A metodologia TRIZ foi desenvolvida entre os anos de 1946 e 1985 por Altshuller e sua equipe da antiga URSS (União das Republicas Socialistas Soviéticas). Altshuller partiu da teoria de que existem princípios universais de criatividade na criação de inovações e tecnologia avançada. A prática do TRIZ consiste basicamente em aprender os padrões de solução de problemas (padrões técnicos e métodos), e aplicar os padrões TRIZ para situações específicas que confrontam o desenvolvedor. Na Figura 8 é demonstrado o processo de aplicação (BARRY, DOMB e SLOCUM, 2012).

Figura 8 - Triz, metodologia para busca de soluções.



ADAPTADO DE: BARRY, DOMB e SLOCUM (2012)

O quadro 'Problema específico' equivale ao problema que se deseja solucionar; de acordo com o método TRIZ, ele deve ser reescrito em um formato genérico, cuja solução conste do banco de soluções genéricas, conforme o terceiro quadro. Por fim, essa solução é refinada para que satisfaça ao problema específico.

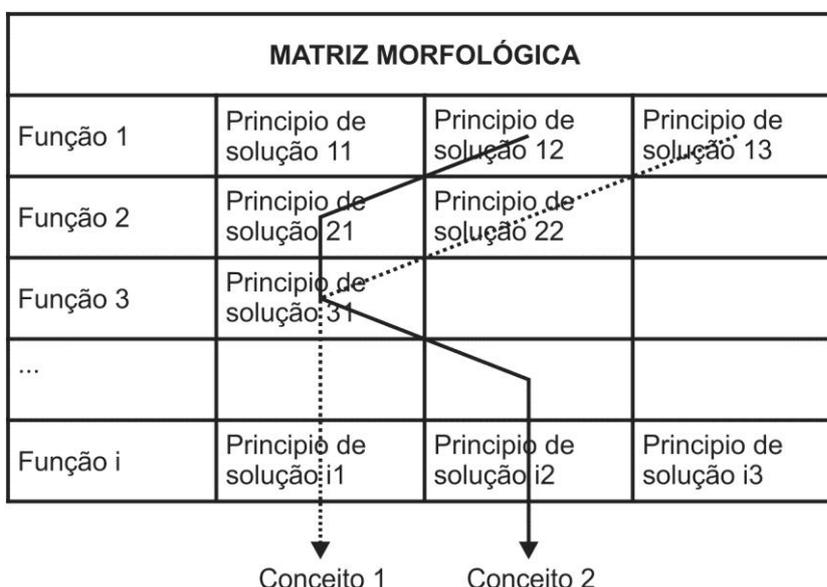
O formato genérico mencionado acima corresponde à forma com que os problemas são descritos no modelo TRIZ, na forma de contradições. As contradições acontecem quando a melhoria de uma característica ou parâmetro dentro de um sistema impacta negativamente em outra característica ou parâmetro. Quando isto ocorre, normalmente é empregada uma solução de compromisso, mas de acordo com o modelo TRIZ este tipo de solução não é considerada criativa (LÓPEZ, ALMENIDA e ARAUJO-MOREIRA, 2005).

Do trabalho de Altshuller, que estudou milhares de patentes da URSS, resultaram quarenta princípios criativos, que correspondem às 'Soluções genéricas' para 'Problemas genéricos' expressos na forma de contradições. A lista completa dos quarenta princípios pode ser encontrada no livro (ALTSHULLER, 2002).

4.2.7 Síntese de conceitos alternativos para o projeto - Matriz Morfológica

Com o mapeamento das alternativas de princípios de solução aplicáveis para cada função que compõe o sistema, o próximo passo é compor alternativas conceituais para o produto / sistema como um todo combinando as anteriores. A escolha combinada dos princípios de solução permite que vários conceitos sejam gerados para cada produto. Para melhor se visualizar este processo, faz-se uso da ferramenta 'Matriz Morfológica', conforme a Figura 9.

Figura 9 - Matriz Morfológica - representação esquemática



ADAPTADO DE: ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.* (2006)

4.2.8 Seleção de alternativas viáveis para o projeto – Método de Pugh

Depois de elaborada a matriz morfológica, é necessária fazer a seleção da melhor concepção alternativa para o projeto. Uma ferramenta para a esta seleção é o Método de Pugh.

A comparação das combinações de princípios de solução (alternativas) é feita através de um sistema simples de pontuação conforme mostra a Tabela 1 (BACK, OGLIARI, *et al.*, 2008).

A comparação é feita em relação a um conceito de referência. A somatória dos pontos indica, ao final, a melhor alternativa para o projeto.

Tabela 1 - Seleção de alternativa através do método de Pugh (exemplo).

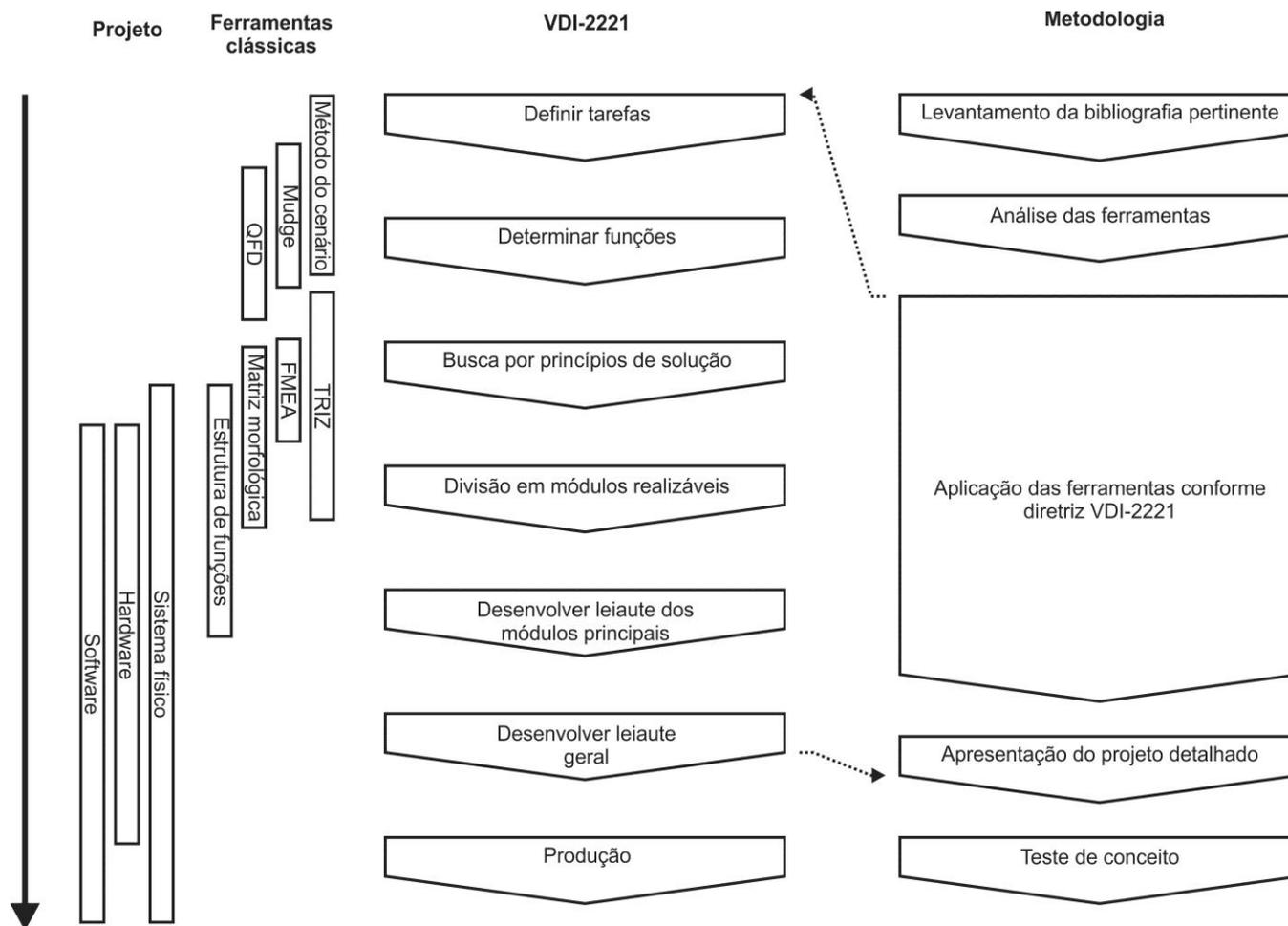
N°	Critérios generalizados adotados	Concepções alternativas					
		Sol. REF.	Sol. AB	Sol. DB	Sol. XY	Sol. JK	Sol. LM
1	Desempenho de função	0	+	+	-	-	0
2	Viabilidade econômica	0	0	-	+	-	0
3	Fácil uso	0	+	0	+	-	0
4	Alta confiabilidade	0	-	-	0	0	+
5	Fácil manutenção	0	-	-	0	0	+
6	Boa aparência	0	+	0	+	0	+
7	Segurança	0	0	0	+	-	+
8	Fácil transporte	0	0	-	+	+	0
9	Fácil armazenagem	0	+	+	0	-	0
10	Reciclagem	0	0	-	+	0	+
Soma de (+)		0(0)	4(+)	2(+)	6(+)	1(+)	5(+)
Soma de (-)		0(-)	2(-)	5(-)	1(-)	5(-)	0(-)
Soma de (0)		10(0)	4(0)	3(0)	3(0)	4(0)	5(0)
Resultado final (+) - (-)		0(+)	2(+)	3(-)	5(+)	4(-)	5(+)

FONTE: BACK, OGLIARI, *et al.* (2008)

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Os passos indicados pela norma VDI-2221, e com o auxílio das ferramentas de apoio de projeto de produto, foram realizados de forma sistemática (ver Figura 10) e estão descritos nos sub-capítulos que seguem. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, o processo de desenvolvimento de um novo sistema / produto requer, frequentemente, a realização de iterações; neste trabalho são apresentados os resultados finais da aplicação do modelo da norma VDI-2221, tendo-se omitido a maioria das iterações, para que o documento final não ficasse sobrecarregado. Alegadamente, uma das vantagens advindas do uso de um modelo de metodologia de projeto é justamente o de se minimizar o número de iterações, como consequência de uma sistematização superior àquela que se percebe em projetos de caráter predominantemente 'intuitivo'.

Figura 10 - Abordagem no desenvolvimento deste trabalho.



FONTE: O AUTOR

5.1 PRIMEIRA ETAPA – ESCLARECER E DEFINIR AS TAREFAS

As ferramentas ‘Casa da Qualidade’ (CQ), do método QFD, e ‘Diagrama de Mudge’ foram utilizadas para auxiliar na definição de uma lista de especificações de projeto, utilizada como referência ao longo do processo de desenvolvimento. Para a montagem da matriz CQ, foram levantados os requisitos de cliente (qualitativos) e de projeto (quantificáveis). As especificações de projeto correspondem aos requisitos de projeto acompanhados de valores-meta.

5.1.1 Definição de requisitos de cliente e de projeto

O ‘cliente’ definido para este projeto foi o Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PUCPR, que necessita de um equipamento especializado para realizar ensaios de corrosão, sob temperatura e alta pressão, de materiais com revestimentos superficiais projetados para aplicações de engenharia de petróleo, em particular as relacionadas com a camada pré-sal. Das reuniões com o ‘cliente’ resultou uma lista de ‘requisitos de cliente’, na forma de informações qualitativas.

Os testes serão feitos em amostras metálicas de dimensões pré-definidas e em ambiente controlado e supervisionado, através de um sistema automatizado de programação, monitoramento, controle e registro de dados de testes, dotado de uma interface gráfica.

Também foi definido que o teste poderá ser conduzido por um técnico de nível médio. O equipamento deveria ser de fácil utilização e com poucos pontos de manutenção.

Quanto à segurança, devem receber atenção aspectos como: presença de H₂S; pontos passíveis de erros humanos; falhas no sistema de automação; falha da câmara de alta pressão.

Os dados originais levantados das entrevistas foram convertidos em informações objetivas, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Transformação dos dados originais em requisitos de cliente

Dados originais	Primeira iteração
Câmara para reproduzir as condições dos poços da camada pré-sal	Gerar atmosfera hiperbárica
	Evitar processo de corrosão galvânica na câmara
	Espaço suficiente para alojar amostra Teste sob temperatura
Usar “apertando um botão” (<i>turn-key</i>)	Facilidade de uso
	Facilidade de manutenção
	Processo automatizado
	Registrar dados Preparar a mistura
Ser seguro	Manter níveis seguros de emissão de H ₂ S ao ambiente
	Proteger usuário das substâncias usadas no teste
	Redundância
	Exaustão confinada de gases
	Intertravamentos Não apresentar riscos ao usuário

FONTE: O AUTOR

No tratamento dos dados da Tabela 2, foi aplicado o método do cenário (Tabela 3), com o objetivo de se definir uma lista de requisitos de projeto a partir da lista de requisitos de cliente. Após esta operação, os requisitos de cliente e de projeto foram usados no preenchimento da CQ, conforme a Figura 11.

Eventuais conflitos entre os requisitos de projeto foram analisados no ‘telhado’ da CQ. As relações de co-favorecimento ou conflito entre estes requisitos foram indicadas com símbolos, dentro das seguintes possibilidades: fortemente positiva; positiva; negativa; ou fortemente negativa. Para requisitos de projeto que não têm relação entre si, os campos foram deixados em branco.

Os valores de importância atribuídos para os requisitos de cliente na CQ foram tomados da aplicação do Diagrama de Mudge, conforme a Tabela 4. Para facilitar a visualização do grau de importância relativo entre os itens, foi adaptado o sistema de pontuação conforme a Equação 2 (com valores arredondados), que normaliza os valores de importância em uma escala de 1 a 5, com valores crescentes (do menos importante para o mais importante, respectivamente).

$$V = \frac{S_i}{S_m} 4 + 1$$

Equação 2

Onde:

V : corresponde ao valor de importância.

S_i : corresponde a somatória do item correspondente a linha.

S_m : corresponde a maior somatória entre os itens.

Tabela 3 - Aplicação do método do cenário

	Req. Cliente	Cena	Req. de Projeto	Valores meta
Função	Gerar alta pressão	A mistura deve ser comprimida	Pressão total máxima	15-20 kPSI (103-138 MPa)
	Registrar dados	Os dados de pressão e temperatura devem ser gravados em arquivos	Incerteza da medição de pressão Intervalo de aquisição	1 % 0,5s
	Preparar mistura	Dissolver o gás no líquido	Volume de solução	volume máx. 300ml
	Espaço para suficiente para alojar a amostra	Container deve ter espaço para alojar a amostra cilíndrica D8mm x H4mm	Altura da câmara Diâmetro da câmara	>15mm <50mm 20mm
	Teste sob temperatura	Câmara deve ser dotada de sistema de aquecimento	Temperatura câmara	20-200°C
	Evitar processo de corrosão galvânica na câmara	Evitar contato elétrico entre a amostra e as partes metálicas da câmara	Espessura do Revestimento interno	0,2mm
Segurança	Não apresentar risco ao usuário	Rompimento explosivo do compartimento hiperbárico	Segurança (espaço para expansão) da proteção mecânica	1000x o vol. do liquido
	Intertravamentos	Evitar que ações sejam tomadas fora de sequência	Intertravamentos (por software e/ou físicos)	100%
	Redundância	Garantir execução de etapas mesmo com falhas	Redundância (diferentes meios de proteção)	2X
	Manter níveis seguros de emissão H ₂ S ao ambiente	Emissão de H ₂ S deve estar dentro das normas	Filtro de carvão ativo	Concetração <10ppm
			Tolerância de alarmes	2% dos valores de controle
	Exaustão confinada de gases	Renovar o ar circundante do sistema	Tempo de exaustão completa	5s
	Uso	Facilidade de uso	O usuário não deve realizar ops. complexas para fechar a câmara	# ações de operação do sistema (físico e soft) Tempo de setup
Processo automatizado			Entradas e saídas controladas por software	Automatizar operações
Facilidade de manutenção		Troca rápida de componentes	Válvulas operadas remotamente # de componentes padrão	>80% >50%

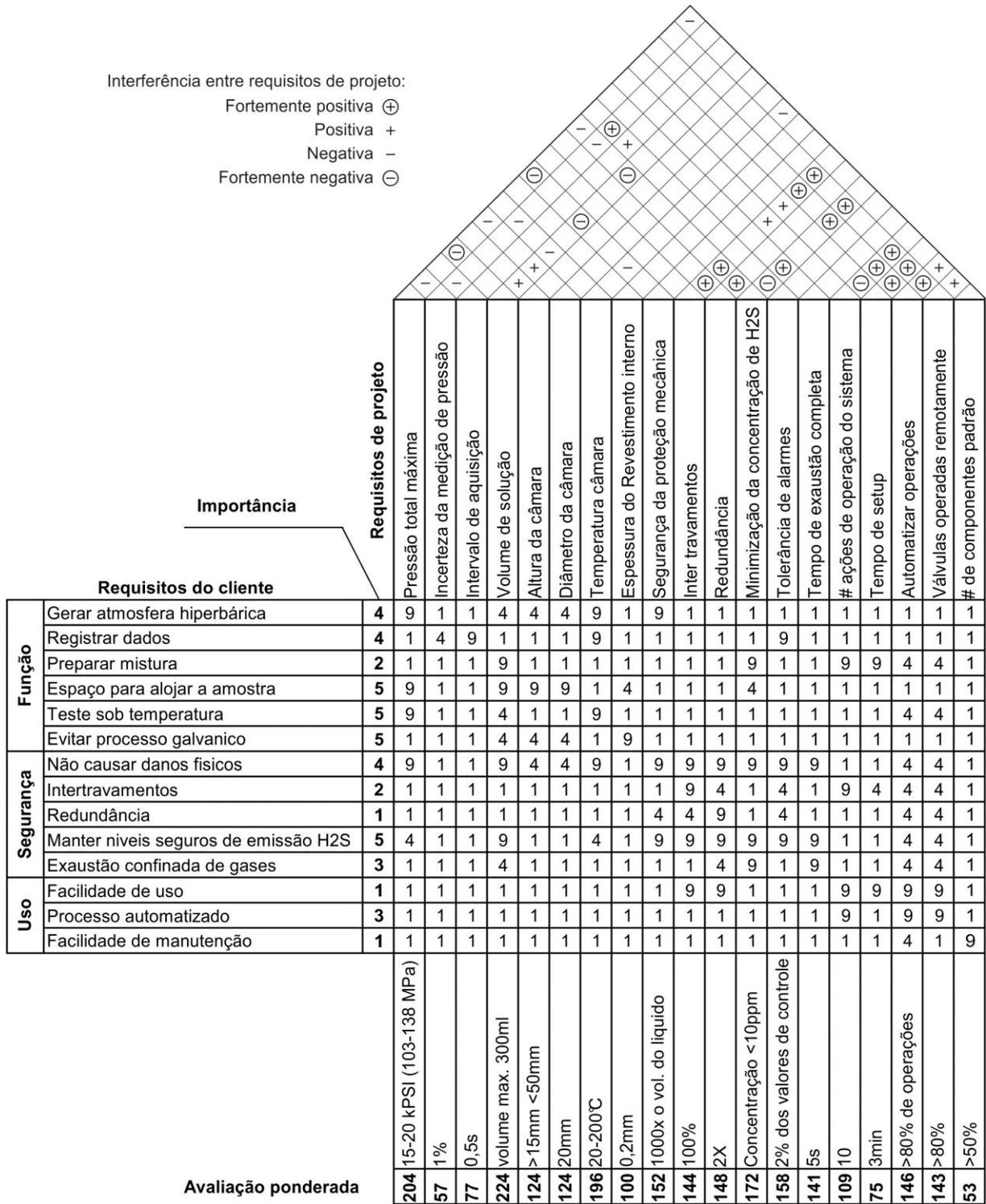
FONTE: O AUTOR

Tabela 4 - Valoração por diagrama de Mudge

		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	TOT.	VALOR
Gerar alta pressão	A	A3	A1	0	0	A1	G2	A3	A3	J2	K1	A3	A3	A3	20	4
Registrar dados	B		B3	D3	E2	F1	G3	B2	B2	J3	K2	B3	B3	B3	16	4
Preparar mistura	C			D3	E3	F3	0	C2	C3	0	K1	0	0	C2	7	2
Espaço para alojar a amostra	D				E3	D1	0	D3	D3	J2	D2	D3	D3	D3	24	5
Teste sob temperatura	E					F2	G3	E3	E3	J3	E1	E3	E1	E3	22	5
Evitar processo galvânico	F						G1	F3	F3	J1	K2	F3	F3	F3	21	5
Não causar danos físicos	G							0	0	0	0	G3	G3	G3	18	4
Intertravamentos	H								H3	0	K1	H3	M2	H2	8	2
Redundância	I									J1	0	I3	M3	I2	2	1
Manter níveis seguros de emissão H ₂ S	J										0	J3	J3	J3	21	5
Exaustão confinada de gases	K											K3	K2	K2	14	3
Facilidade de uso	L												M3	0	0	1
Processo automatizado	M													M2	10	3
Facilidade de manutenção	N														0	1

FONTE: O AUTOR

Figura 11 - Desenvolvimento da casa da qualidade



FONTE: O AUTOR

A avaliação ponderada obtida com a CQ fornece um indicativo para priorizar o investimento dos recursos do projeto (escores mais altos denotam maior importância).

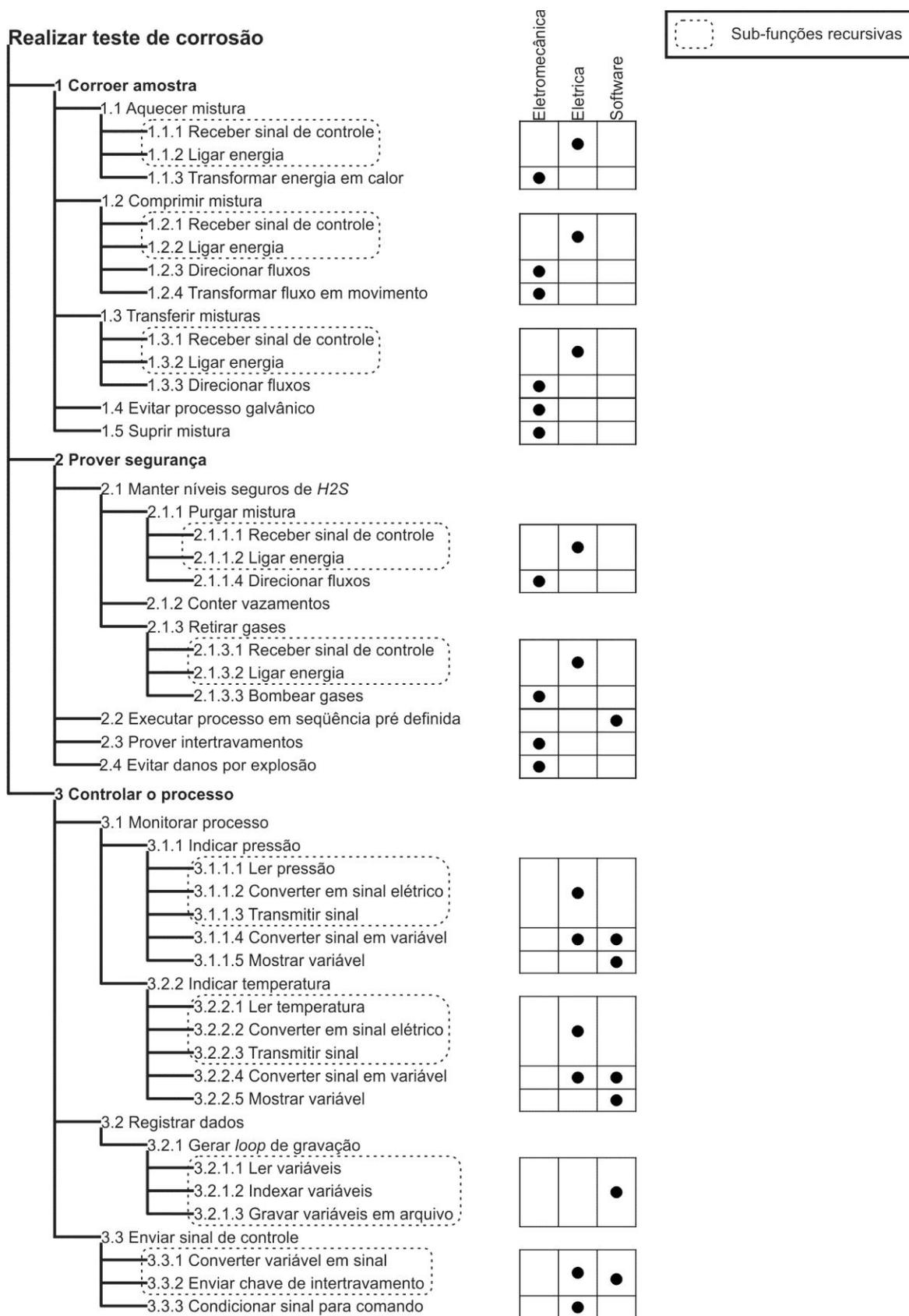
5.2 DETERMINAR FUNÇÕES E SUAS ESTRUTURAS

O método de Análise Funcional foi aplicado com os dois formatos descrito no subcapítulo 4.2.2.

No primeiro, foi elaborada uma árvore de funções', mostrada na Figura 12. A árvore de funções neste formato permite o agrupamento por afinidade mais facilmente, e facilita a associação das sub-funções às camadas eletromecânica, de hardware e de software.

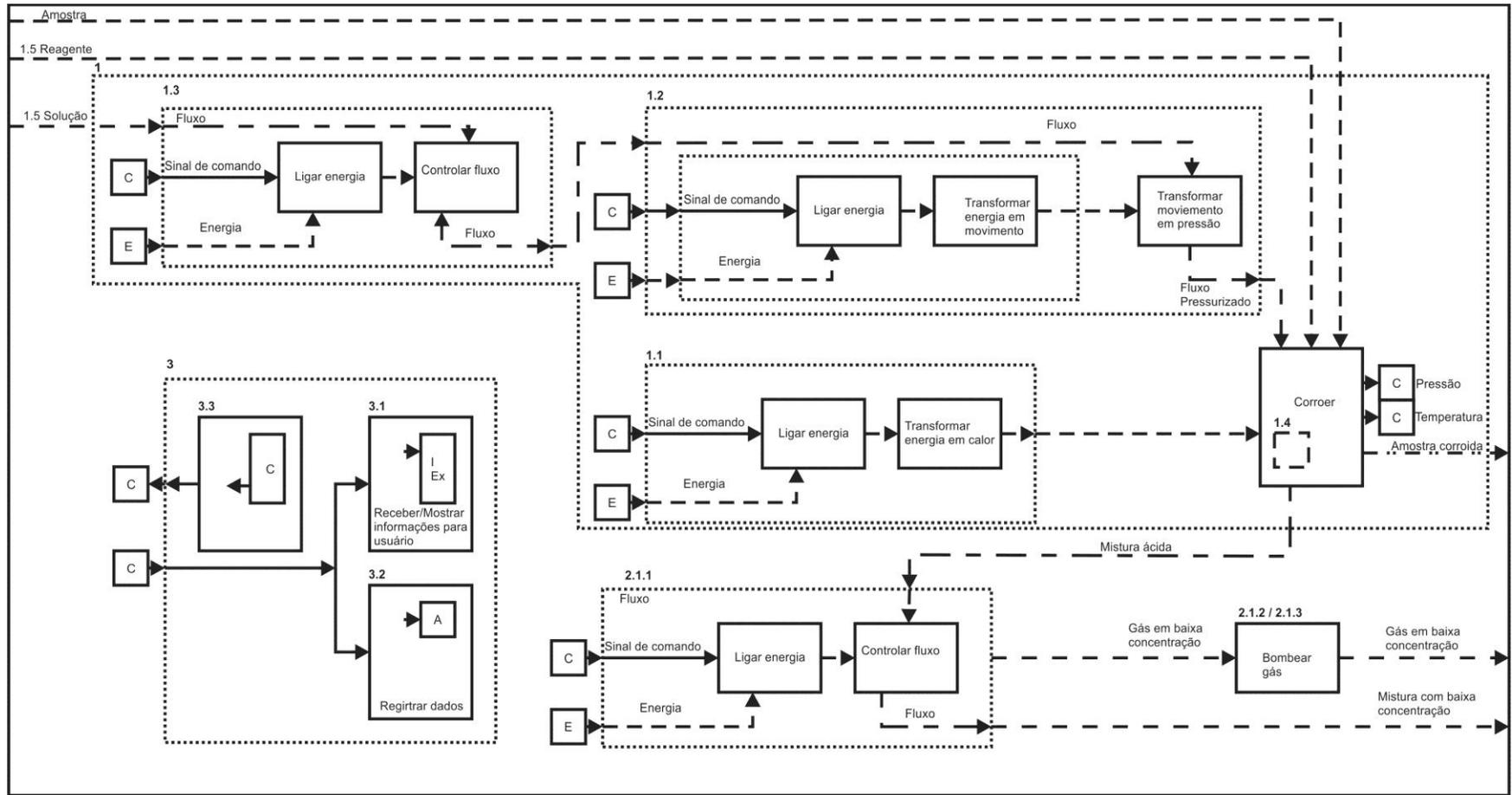
A estrutura funcional, na forma de fluxograma de sistema técnico, com os fluxos de energia, material e informação indicados, pode ser vista na Figura 13. Esta versão da estrutura funcional foi elaborada a partir das funções presentes na estrutura em árvore, mas não mostra os mesmos subníveis, evitando-se aumentar muito a complexidade do diagrama.

Figura 12 - Árvore de funções do sistema



FONTE: O AUTOR

Figura 13 - Estrutura de funções do sistema



C	Sinal de controle
E	Energia
A	Dados em arquivo
I Ex	Dados externos

FONTE: O AUTOR

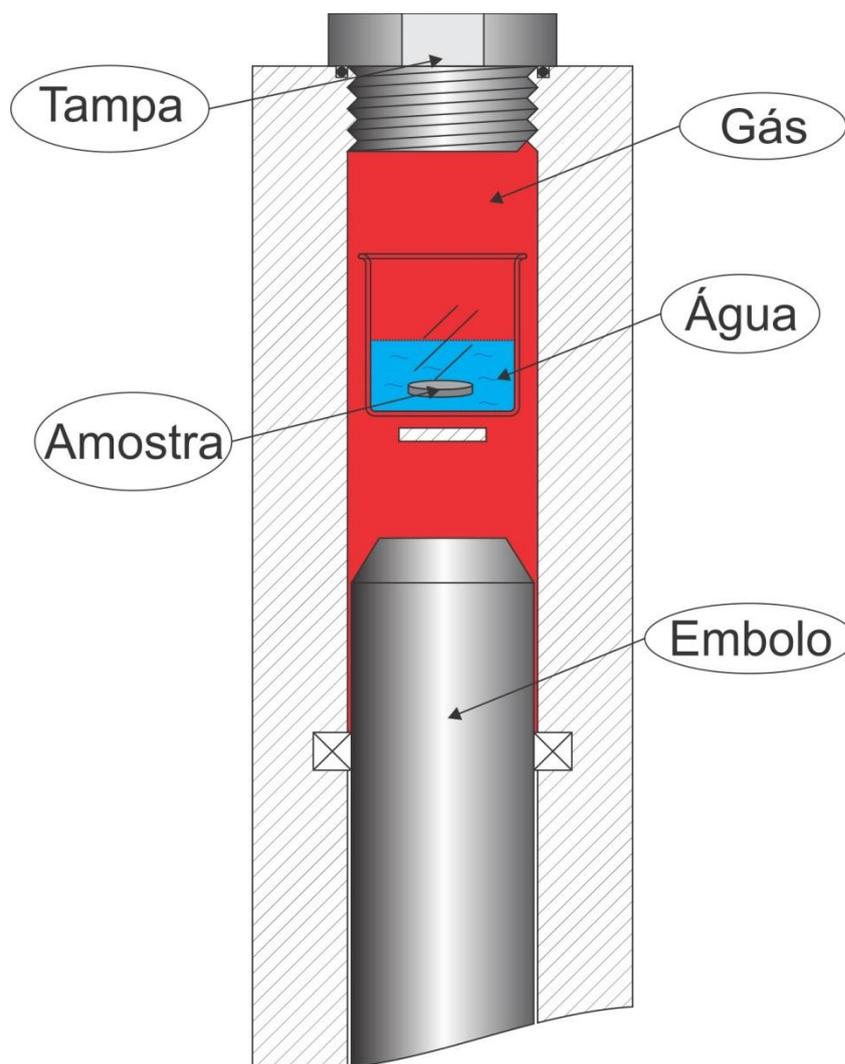
5.3 PESQUISA POR PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO E SÍNTESE DE ALTERNATIVAS CONCEITUAIS

O sub-sistema que compreende o 'núcleo' do equipamento, ou seja, a câmara de corrosão e o subsistema de pressurização correspondentes à sub-função 1 na árvore, demanda um esforço de engenharia diferenciado. Para este sub-sistema, foram analisadas quatro diferentes possibilidades, detalhadas a seguir.

5.3.1 Primeiro princípio de solução

Como primeiro princípio de solução, foi idealizada uma câmara preenchida com os gases necessários, onde a amostra é contida em um recipiente e imersa no líquido de teste; então, em uma segunda ação, um sistema de embolo comprime os gases de trabalho, para que sejam forçados a se dissolver no líquido, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Primeiro princípio de solução



FONTE: O AUTOR

Ao examinar esta solução usando de cálculos básicos (leis dos gases), conforme a Equação 3 e a Equação 4, tem-se prontamente que a razão de compressão para se atingir a pressão de 138 MPa é da ordem de 1360:1. Para atingir tal razão o volume da câmara deverá ser reduzido na taxa de 1360:1, que fará com que o êmbolo tenha dimensões pronunciadas (no comprimento ou na largura), resultando num equipamento volumoso e pesado para se alcançar a resistência mecânica necessária.

$$\frac{P_i \times V_i}{T_i} = \frac{P_f \times V_f}{T_f}$$

Equação 3

onde:

$P = \text{Pressão};$

$V = \text{Volume}$

$T = \text{Temperatura}.$

Na Equação 3, tomando-se a pressão inicial igual à atmosférica (101 kPa), volume unitário, pressão final (138 MPa) e admitindo-se temperatura constante, tem-se:

$$\frac{101E3 \times 1}{T} = \frac{138E6 \times V_f}{T} \Rightarrow V_f = \frac{1}{1366.4} \quad \text{Equação 4}$$

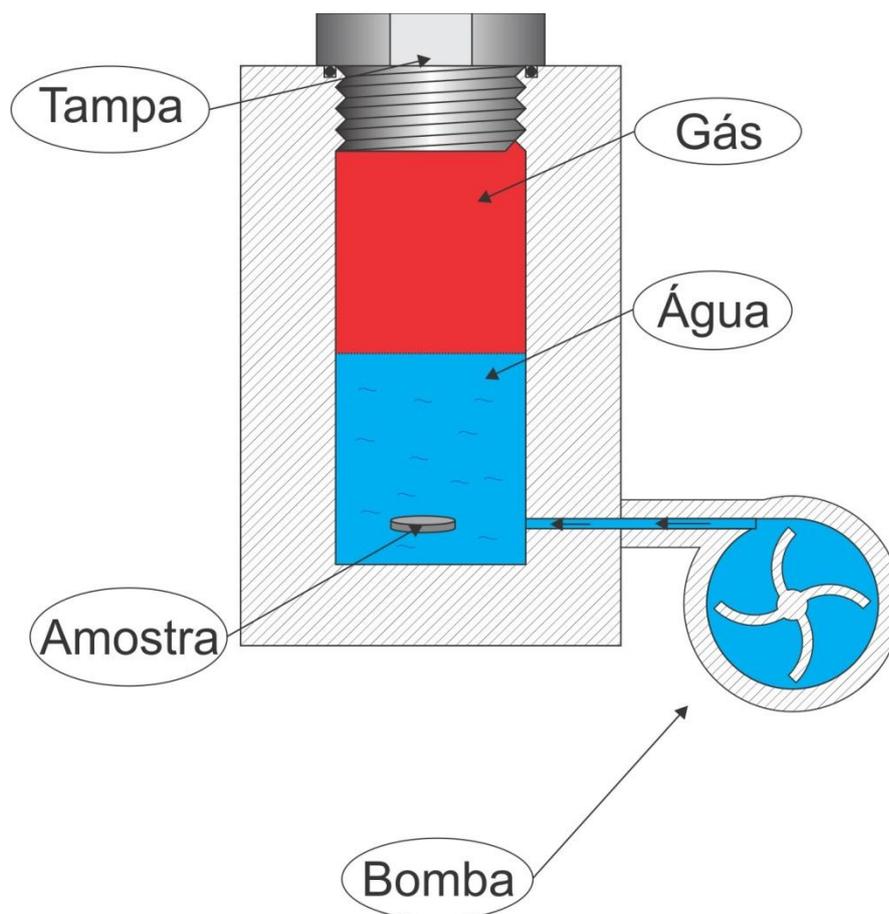
Outro ponto problemático seria o grande volume de gás de a ser suprido em cada ciclo do sistema, o que representaria um risco maior de intoxicação no caso de um vazamento. Por fim, a energia do gás contida no sistema após o processo de compressão seria perigosamente elevada, aumentando o risco de uma explosão em caso de rompimento de algum componente relacionado à contenção da alta pressão.

5.3.2 Segundo princípio de solução

Na Figura 15, tem-se o segundo princípio de solução que foi idealizado. Consiste de um sistema onde gás, inicialmente admitido na câmara com a pressão de suprimento de um cilindro de gás industrial, ocupa a câmara juntamente com a amostra, para em seguida água ser bombeada através de uma bomba de alta pressão. Desta forma, ao ocupar volume dentro da câmara, a água irá comprimir adicionalmente o gás a partir de uma razão bem mais favorável do que aquela de 1360:1 calculada anteriormente, como demonstrado na Equação 5. Assim, pressupondo uma pressão inicial de 300 kPa e temperatura constante, tem-se:

$$\frac{300e3 \times 1}{T} = \frac{138e6 \times V_f}{T} \Rightarrow V_f = \frac{1}{460} \quad \text{Equação 5}$$

Figura 15 - Segundo princípio de solução



FONTE: O AUTOR

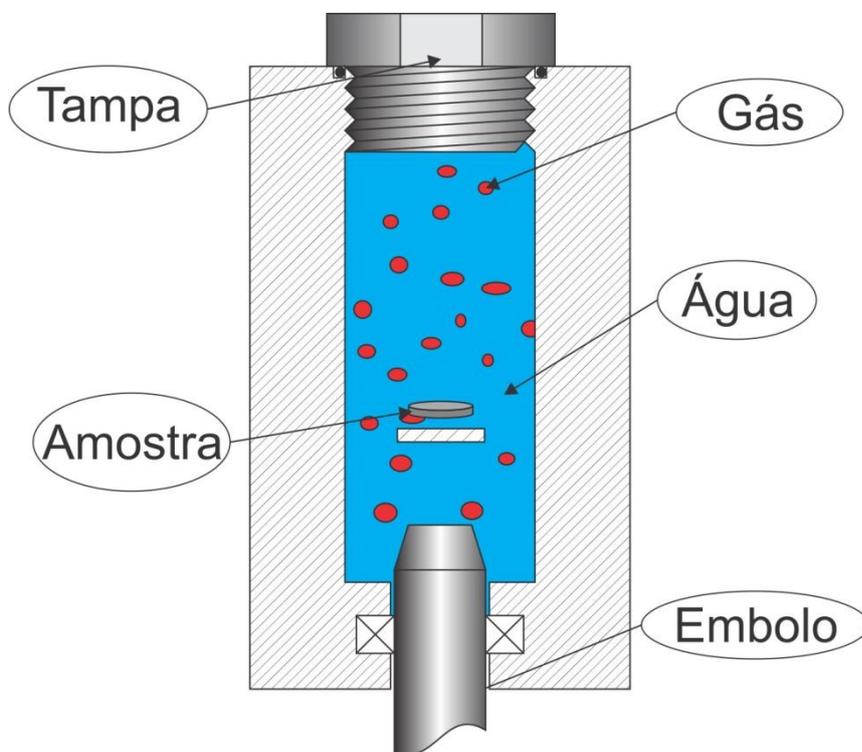
Em qualquer das alternativas anteriores, os aspectos desfavoráveis à segurança relacionados ao volume do gás à energia contida no sistema irão persistir, e em se tratando de um fluido corrosivo a mecânica fina de uma bomba para tal função tenderá a ser rapidamente comprometida ou irá requerer cuidados especiais e provavelmente dispendiosos.

5.3.3 Terceiro princípio de solução

Levando-se em consideração o fato de que líquidos têm compressibilidade extremamente baixa, foi idealizado um terceiro princípio de solução, detalhado na Figura 16. Neste sistema, uma mistura líquida contendo os gases de trabalho previamente dissolvidos é colocada dentro da câmara juntamente com a amostra, para em seguida um embolo de diâmetro menor ser acionado por um atuador hidráulico ou pneumático, de modo a exercer pressão sobre o sistema ao ocupar

volume na câmara. Desta forma, a razão de compressão é minimizada, e o volume de gás reduzido consideravelmente.

Figura 16 - Terceiro princípio de solução



FONTE: O AUTOR

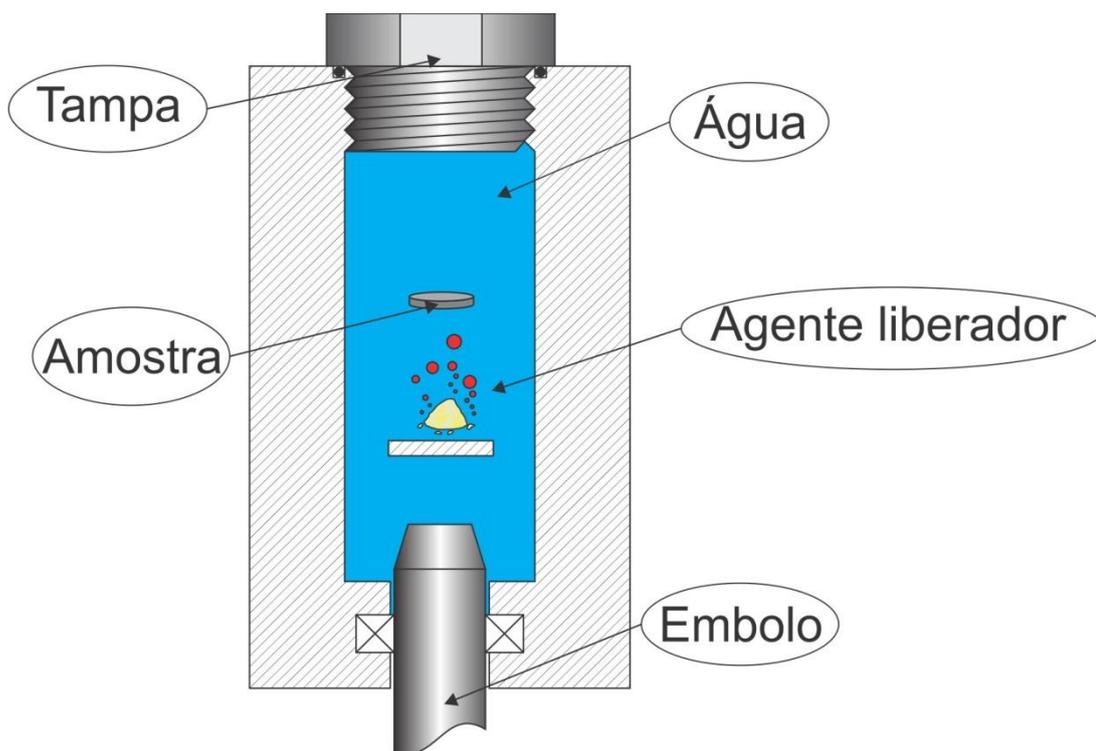
Entretanto, esta solução exige que a mistura seja previamente preparada, o que proporciona maiores riscos de acidentes por contato com o gás.

5.3.4 Quarto princípio de solução

Ao buscar uma evolução para o terceiro princípio de solução, foram estudados os problemas relativos ao manuseio de uma solução tóxica previamente preparada. De acordo com as informações levantadas no subcapítulo 3.2.4 sobre ensaios de laboratório utilizando o H_2S , foi considerado como solução o uso de reagentes químicos que têm por produto H_2S in situ.

Então, um quarto princípio solução, tendo como base o anterior, foi elaborado conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Quarto princípio de solução



FONTE: O AUTOR

5.3.5 APLICAÇÃO DA MATRIZ MORFOLÓGICA

Para organizar as possibilidades de combinação, foi elaborada a Matriz Morfológica mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Matriz morfológica.

Solução / Função	1	2	3	4	5
Aquecer mistura	 Combustão	 Resistência elétrica			
Comprimir mistura	 Eletromecânico &  Êmbolo	 Pneumático &  Êmbolo	 Hidráulico &  Êmbolo	 Bombeamento	
Evitar corrosão galvânica	 Suspend	 Isolar paredes	 Sistema ativo		
Prover intertravamentos	 Mecânico	 Elétrico	 Eletrônico	<pre>if (z==1) { x != y; }</pre> Software	 Eletrônico & <pre>if (z==1) { x != y; }</pre> Software
Executar processo em sequência pré definida	 Mecânico	 Elétrico	 Eletrônico	<pre>for (x=0; x<3; x++) { ... }</pre> Software	
Suprir mistura	 Cilindro de gás	 Reação química	 Solução buffer		
Retirar gases	 Exaustão forçada				 Elaboração de leiaute & exaustão forçada
Conter vazamentos	 Capela	 Paredes duplas			

Conceito 1

Conceito 2

FONTE: O AUTOR

As múltiplas combinações possíveis de princípios de solução (enquanto compatíveis entre si) permitem montar mais do que dois conceitos para solucionar o problema de projeto; com base no discernimento da equipe de projeto, entretanto, foram considerados apenas dois, considerados de maior viabilidade.

Para a comparação dos dois conceitos alternativos, foi empregado o Método de Pugh (de forma adaptada), conforme mostrado na Tabela 5. Os critérios para a comparação foram tomados dos requisitos de projeto, e os seus pesos tomados das suas respectivas importâncias na matriz da CQ. Desta forma, uma pontuação por

alternativa foi determinada através de uma média aritmética ponderada, usando os graus de desempenho para cada conceito, em uma escala 1-5, atribuídos para cada critério. As pontuações foram obtidas somando-se os produtos [pesos] x [graus de desempenho] para cada alternativa conceitual.

Tabela 5 - Aplicação do Método de Pugh (adaptado).

	Pesos	Conceito 1	Conceito 2
Pressão total máxima	197	4	3
Incerteza da medição de pressão	50	4	4
Intervalo de aquisição	65	5	5
Volume de solução	209	5	5
Altura da câmara	117	5	5
Diâmetro da câmara	117	5	5
Temperatura câmara	181	5	3
Corrente entre amostra e partes da célula	88	5	3
Segurança da proteção mecânica	140	5	2
Inter travamentos	132	5	3
Redundância	136	5	3
Minimização da concentração de H ₂ S	160	5	3
Tolerância de alarmes	138	3	3
Tempo de exaustão completa	129	4	5
# ações de operação do sistema	105	4	4
Tempo de setup	71	5	2
Automatizar operações	136	4	2
Válvulas operadas remotamente	136	4	4
# componentes padrão	53	3	3
Pontuação total		561	437

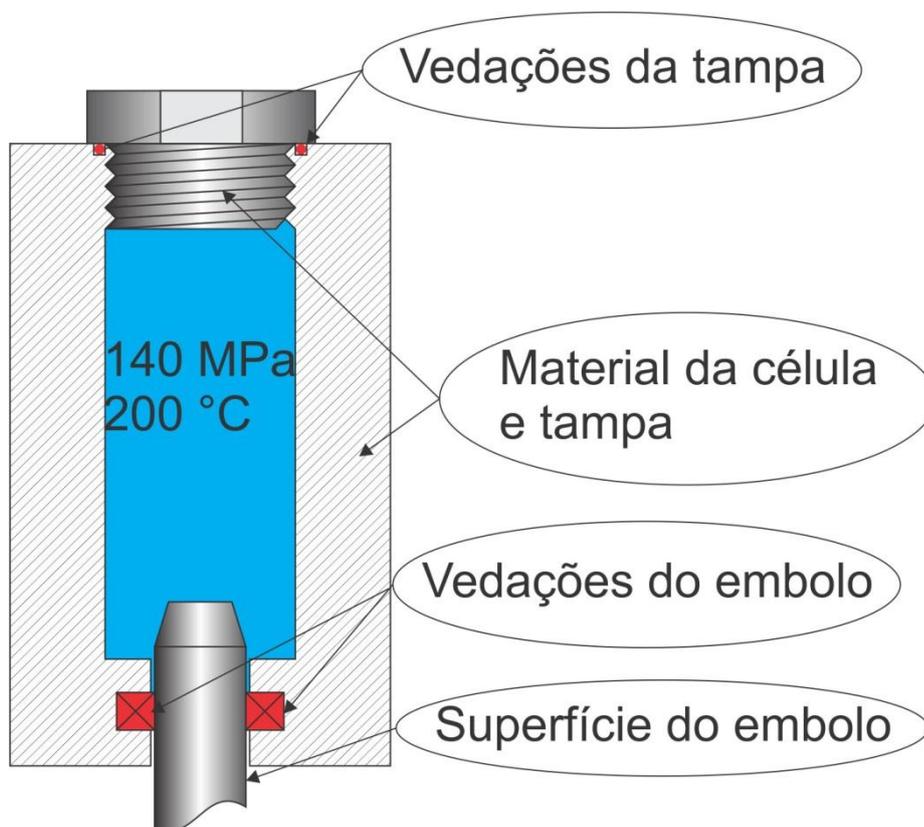
FONTE: O AUTOR

5.3.6 Aplicação do FMEA e do TRIZ ao princípio de solução selecionado para o núcleo do sistema

Ainda que o quarto princípio de solução resolva essencialmente o problema de se pôr o material em teste em contato com o meio ácido e sob alta pressão, foram avaliados outros aspectos referentes aos componentes necessários para permitir o seu funcionamento, tais como vedações e materiais para suportar a corrosão, e ainda o seu aquecimento até a temperatura de teste.

Para melhor entendimento dos problemas simultâneos associados a este conceito, foram destacados os componentes no interior da célula, como mostrado na Figura 19, para serem analisados separadamente.

Figura 19 - Destaque dos elementos da quarta solução



FONTE: O AUTOR

Para analisar as suas possíveis formas de falhar, foi utilizada a ferramenta FMEA, ainda que de forma simplificada, como detalhado na Tabela 6, confrontando os elementos com as suas condições de trabalho. Foi possível notar que algumas falhas podem ocorrer em efeito cascata, ou seja, a falha poderia ter mais de uma causa e se dar em mais de um componente.

Tabela 6 - Aplicação do FMEA para o quarto princípio de solução.

Componente	Função	Modo de falha	Causa	Efeito primário	Efeito secundário	Risco
Tampa	Fechamento	Deformação da rosca	Atrito elevado entre roscas macho/fêmea	Desgaste excessivo da rosca	Inutilização da célula	Moderado
		Corrosão	Ataque corrosivo	Aumento da folga de vedação do o-ring	Extrusão do o-ring	Moderado
Embolo	Pressurização	Corrosão	Ataque corrosivo	Corrosão da superfície de deslizamento	Desgaste do o-ring Espiralamento do o-ring	Alto
O-ring	Vedação	Rompimento	Fricção ao girar a tampa para fechamento	Falha da vedação	Vazamento de fluidos	Moderado
		Desgaste do o-ring	Abrasão da superfície de deslizamento	Falha da vedação	Vazamento de fluido	Elevado
		Extrusão do o-ring	Folga entre embolo e alojamento muito grande	Falha da vedação	Vazamento de fluido	Moderado
			Perda de dureza por temperatura	Baixa resistência	Vazamento de fluido	
		Espiralamento	Atrito elevado entre embolo e o-ring	Falha da vedação	Vazamento de fluido	Elevado
		Corte na montagem	Arestas vivas	Falha da vedação	Vazamento de fluido	Moderado
Explosão por descompressão	Dissolução de gases no material do o-ring	Falha da vedação	Vazamento de fluido	Moderado		
Célula	Conter pressão	Rompimento da câmara	Solicitação de esforço maior do que a de projeto	Explosão	Risco ao usuário	Baixo
			Perda de resistência por aquecimento	Explosão	Risco ao usuário	
Reagente	Liberar componentes químicos	Reação precoce	Contato com solução antes do termino do processo de <i>setup</i>	Perda dos componentes químicos	Falha no teste	Moderado

FONTE: O AUTOR

Com a aplicação do FMEA, as possíveis causas de falhas foram evidenciadas. Com base nestas, foi possível escrever os problemas associados às causas de falhas na forma de contradições técnicas, conforme preconiza o método TRIZ, e aplicá-lo na busca por soluções, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Aplicação do método TRIZ

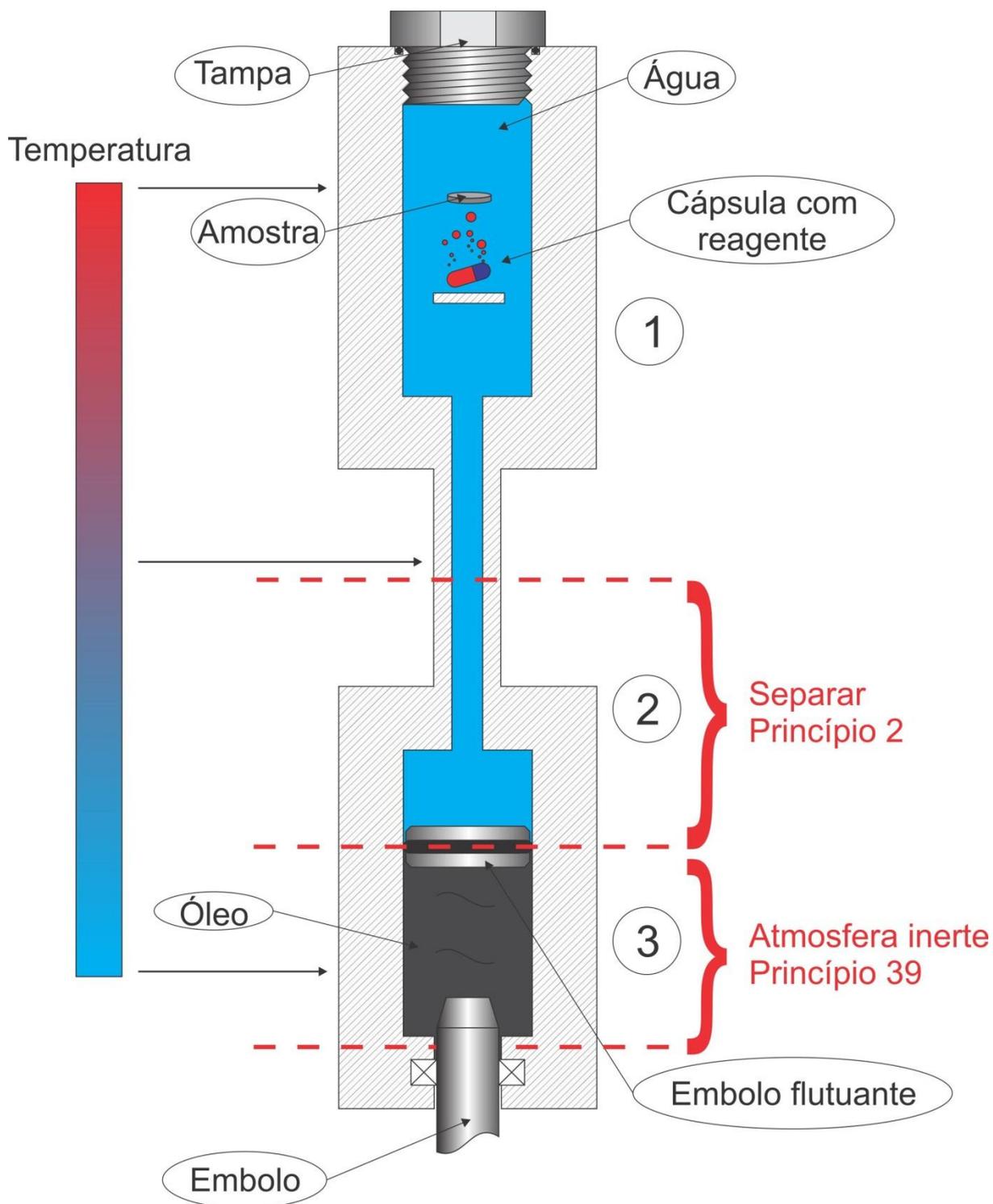
FMEA	TRIZ			
	Problema		Solução	
Causa	Específico	Genérico	Genérico	Específica
Ataque corrosivo	Necessidade de se ter solução ácida concentrada / danifica a resistência superficial do eixo	26: Quantidade da substância / 31: Gera danos no objeto	39: aplicar "atmosfera" inerte	Aplicar interface de óleo
Perda de dureza por temperatura	Necessidade de ser um teste em temperaturas altas / aumenta o estresse do <i>o-ring</i>	17: Temperatura / 11: Estresse ou pressão	2: Retirar do local	Separar vedações críticas da parte quente
Explosão por descompressão	Concentração de gases / dissolução no <i>o-ring</i>	26: Quantidade da substância / 31: Gera danos no objeto	39: aplicar "atmosfera" inerte	Aplicar interface de óleo
Reação precoce	O uso da substancia direto / reage precocemente com a solução	26: Quantidade da substância / 9: aumenta velocidade de reação	34: Descarte e recuperação	Usar contêiner temporário para armazenar reagente (solúvel)

FONTE: O AUTOR

Em consequência da aplicação do método TRIZ, foi realizada a separação da célula em partes (1, 2 e 3), para evitar o contato do calor com as vedações mais críticas, e também a adição de uma interface em óleo para preservar a integridade dos componentes mais sensíveis ao ambiente corrosivo, como Figura 20.

Outra solução associada é o uso de uma capsula solúvel (como as usadas para administração de medicamentos) para evitar a perda de parte ou total do conteúdo do reagente devido a uma eventual reação precoce, ou seja, adiantada em relação ao momento de fechamento do sistema para pressurização.

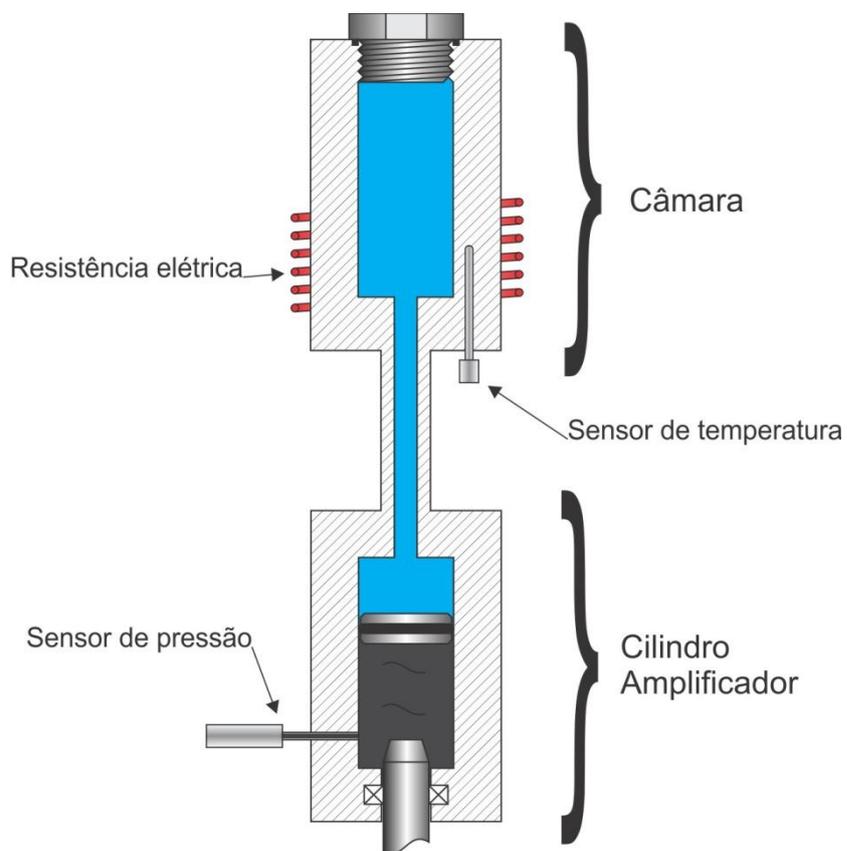
Figura 20 - Conceito final da célula de alta pressão



FONTE: O AUTOR

O conceito proposto e aperfeiçoado pode ser visualizado no esquemático da célula de alta pressão, conforme a Figura 21 (sem compromisso com proporções geométricas).

Figura 21 - Conceito para a célula de alta pressão.

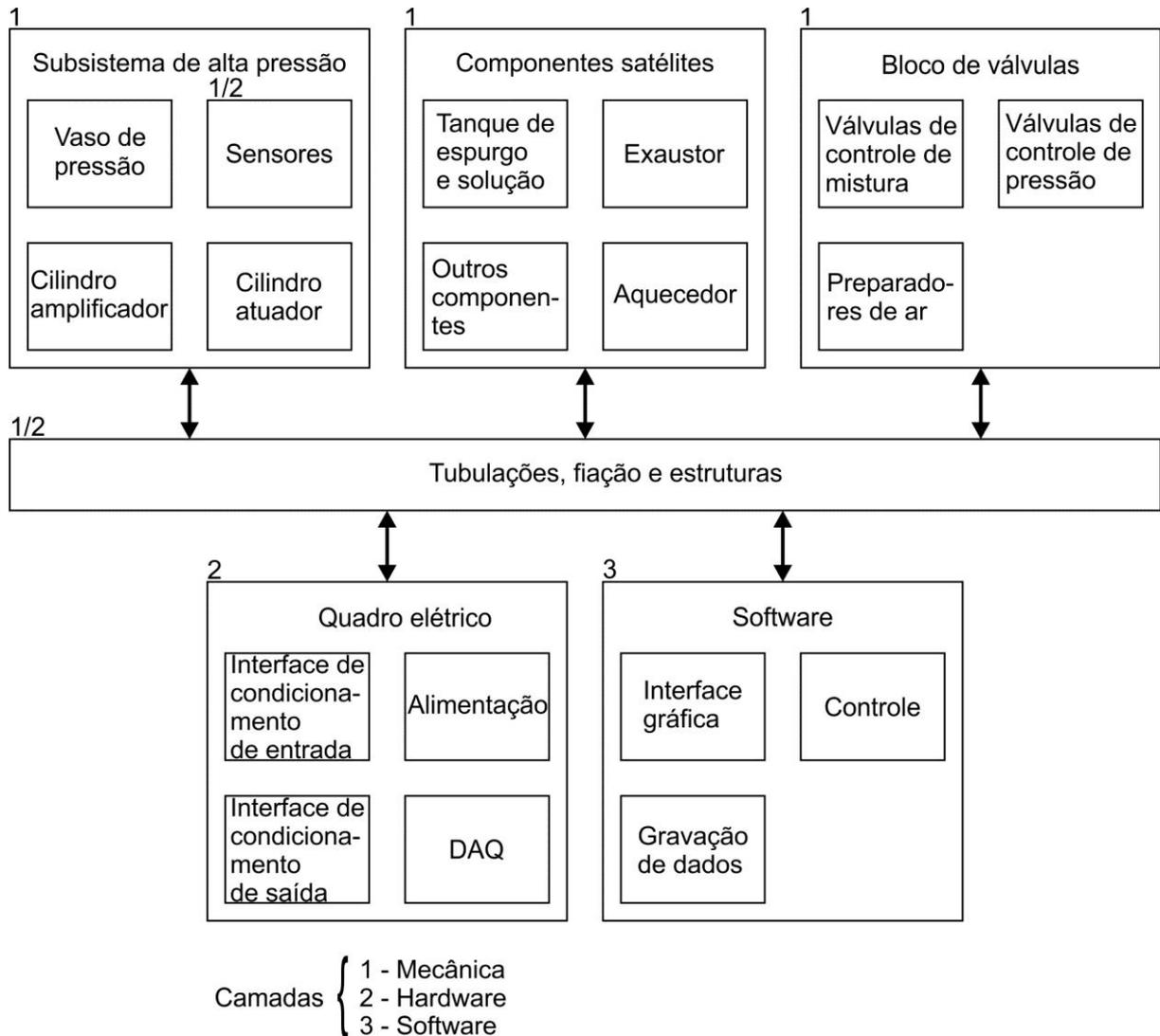


FONTE: O AUTOR

5.4 DIVISÃO EM MÓDULOS REALIZÁVEIS

O conceito do sistema foi dividido em módulos realizáveis, como mostrado na Figura 22, onde constam os principais módulos nas três camadas (eletro-mecânica, hardware e software).

Figura 22 - Módulos realizáveis



FONTE: O AUTOR

5.5 DESENVOLVIMENTO DOS LEIAUTES PRINCIPAIS

As camadas sistema físico (eletromecânica e estrutural), elétrica (hardware), e software são interdependentes entre si. Neste sub-capítulo, são detalhados aspectos de dimensionamento e de arranjo nestas três camadas, com base na alternativa conceitual selecionada.

5.5.1 Camada eletromecânica

O sistema de pressurização é composto pelo cilindro atuador e pelo sistema de êmbolo, que juntos formam um amplificador de pressão. Em teoria, o cálculo das pressões envolvidas em um amplificador de pressão segue a Equação 6, Equação 7

e Equação 8

Considerando que a força é uma razão entre pressão e área, temos:

$$A_1 P_1 = A_2 P_2 + F_{at} \quad \text{Equação 6}$$

Colocando área em função do diâmetro temos

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Equação 7}$$

Fazendo as substituições chega-se à relação do diâmetro do embolo em função da pressão P_1 e P_2 e também do diâmetro do embolo de acionamento do sistema d_1 , visto aqui na Equação 8.

$$\frac{\pi d_1^2}{4} P_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} P_2 + F_{at} \Rightarrow \sqrt{\frac{d_1^2 P_1}{P_2} + F_{at}} = d_2 \quad \text{Equação 8}$$

onde:

P_1 = Pressão no cilindro atuador;

d_1 = Diâmetro do cilindro atuador;

P_2 = Pressão na célula de pressão;

d_2 = Diâmetro do embolo;

F_{at} = Força de atrito do sistema

Resolvendo para os valores:

$$d_1 = 0,2 \text{ m}$$

$$P_1 = 8E5 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 1,4E8 \text{ Pa}$$

$$F_{at} = 0 \text{ (pois a força de atrito não é conhecida)}$$

Temos então o diâmetro do êmbolo:

$$d_2 = 1,51E-3 \text{ m (15mm)}$$

Porém, as vedações comerciais para tal aplicação não estão disponíveis para o diâmetro de 15 mm, e sim para 16 mm. Refazendo-se o cálculo para este diâmetro, a pressão do cilindro atuador requerida para atingir a pressão especificada

dentro da célula de alta pressão é de aproximadamente 890 kPa. Como não foram consideradas as perdas por atrito que ocorrem no sistema de amplificação de pressão, a razão teórica de amplificação é de aproximadamente 157x.

A célula de alta pressão pode ser considerada um vaso de pressão, do que seu dimensionamento seguiu a respectiva norma ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2010), considerando-se temperatura, pressão e material para a célula.

O material selecionado, por motivo de custos, foi o aço inox SAE316L (S31603). De acordo com a norma ASME, para uma temperatura de 200 °C, a tensão admissível de projeto para o aço inox 316L é de 108 MPa, em se tratando de uma matéria prima em formato de barra extrusada. O tarugo cilíndrico disponível para este projeto possui um diâmetro de 95 mm; como o cilindro finalizado necessita ter um diâmetro interno de no mínimo 20 mm para poder alojar a amostra, tem-se um saldo de disponível para parede de 35 mm.

O componente não terá soldas; portanto, coeficientes de projeto relacionado a solda foram considerados iguais a 1 e de acordo com a (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2010) para espessuras de parede maior que metade do raio não é considerado o cálculo de esforços axiais.

Desta forma, a fórmula que determina a pressão máxima de trabalho P do vaso de pressão é dada por:

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

E : Coeficiente da solda;

S : Tensão de projeto para o material na temperatura de trabalho;

t : Espessura da parede;

R : Raio interno do vaso;

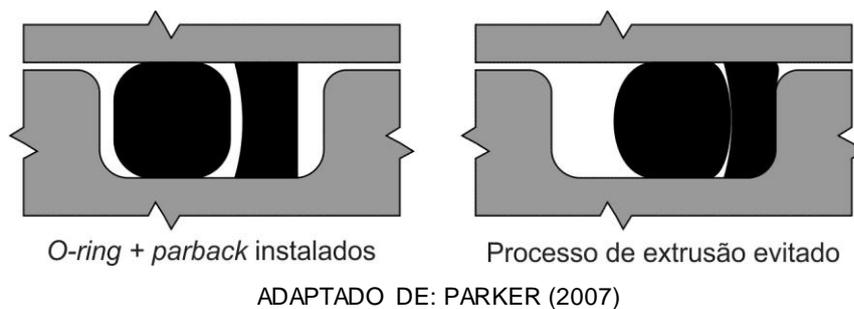
P : pressão de trabalho.

Portanto, para $E = 1$, $S = 108$ MPa, $t = 35$ mm; $R = 10$ mm, temos $P = 122$ MPa (equivalente a 17695 psi).

Para o serviço em alta pressão, foi adaptado um conceito de vedação de alto

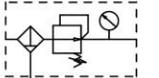
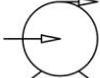
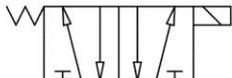
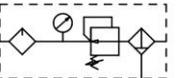
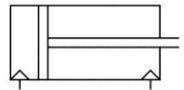
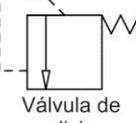
desempenho conforme as recomendações encontradas na literatura técnica de fabricantes tradicionais, a exemplo de PARKER (2007). Neste conceito, são usados anéis 'parback' (ver Figura 23) para evitar a extrusão do anel de vedação pela interface de vedação. Maiores detalhes sobre esta tecnologia encontram-se no ANEXO 01.

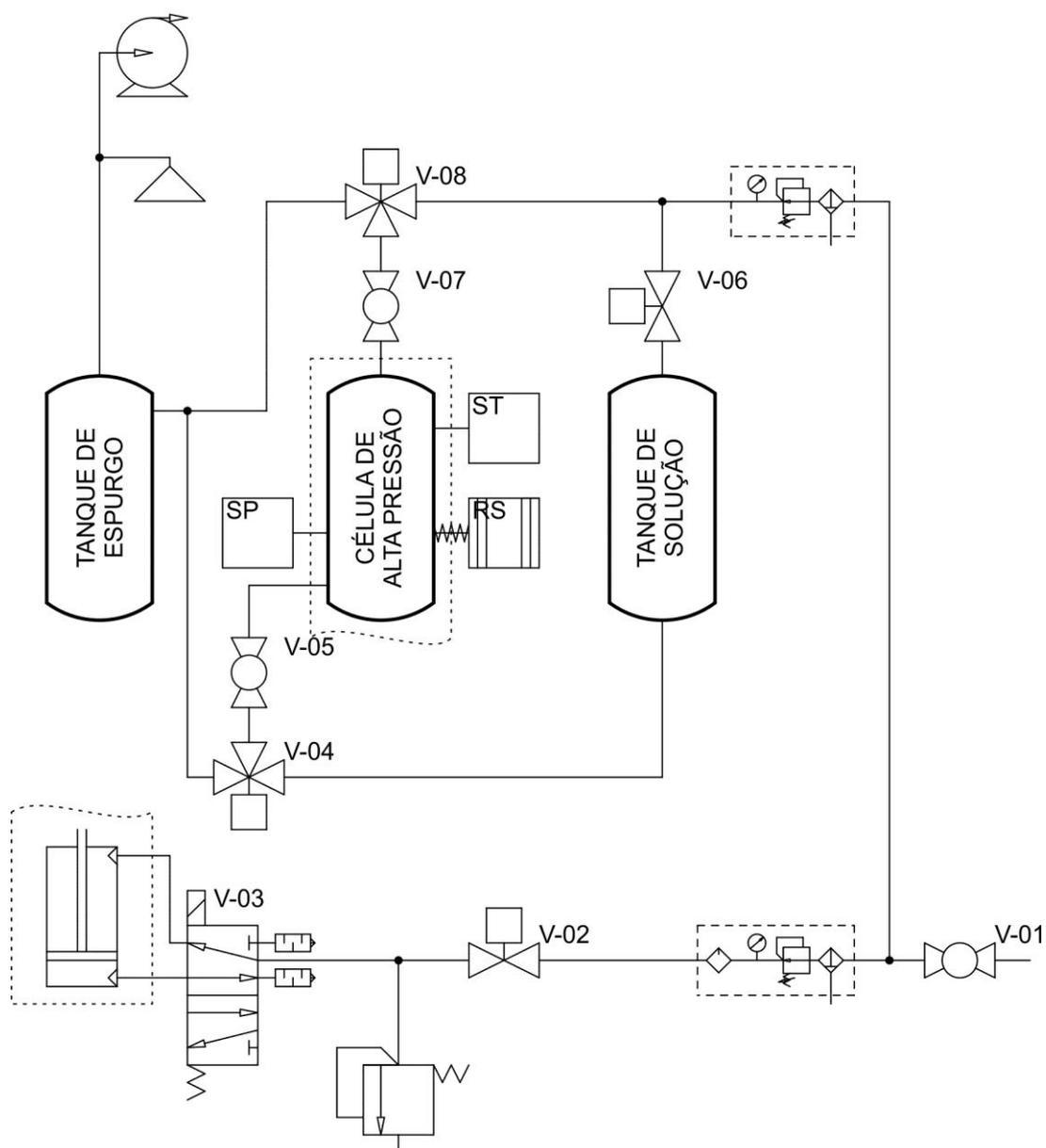
Figura 23 - Funcionamento do *parback*.



O sistema pneumático e a integração de outros elementos do processo que envolvem a movimentação de fluidos pode ser vista no diagrama da Figura 24.

Figura 24 - Diagrama de fluxos e conexões.

 Vaso de pressão	 Regulador c/ filtro e manometro	 Exaustor	 Eletro- válvula 2 vias	 Eletro-válvula 3 vias
 Eletro-válvula 5/2 vias	 Regulador c/ filtro ,manometro e lubrificador	 Capela	 Válvula manual	 Silenciador
 Cilindro dupla ação	 Resistência elétrica	 Sensor de pressão	 Sensor de temperatura	 Válvula de alívio



FONTE: O AUTOR

5.5.2 Camada elétrica

As características dos componentes sensores e de atuação (eletroválvulas, e resistência elétrica) devem ser compatibilizadas com restante do sistema. As eletroválvulas empregadas operam com corrente alternada na tensão de 220 Vac e consomem em média 50 mA. A resistência elétrica é um dispositivo de alta potência, alimentada por 220 Vac, e opera sob uma corrente de até 10 A.

Os sensores são alimentados em tensão, entre 10 e 30 Vdc, com saídas de sinal de 4 a 20 mA. Para interface de aquisição de sinais foi selecionado um módulo *National Instruments* modelo USB-6009. Os sinais de saída digitais desta interface são de 5V, com limite em 5 mA e podem fornecer os sinais para acionamento das eletroválvulas; os sinais analógicos de entrada podem variar entre -10 a 10 V.

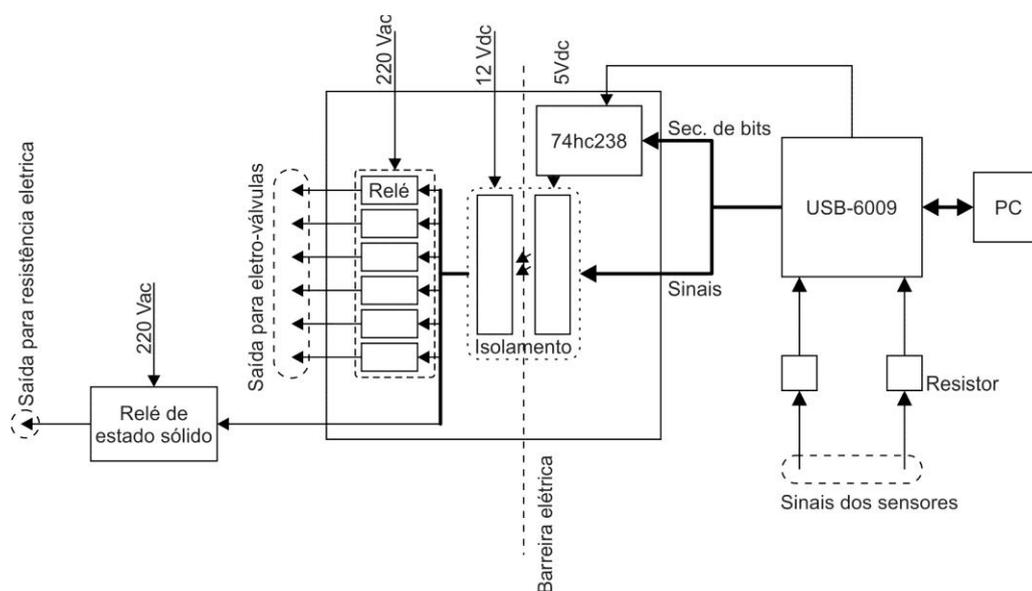
Para fazer a integração entre os sensores / atuadores e o sistema de aquisição de sinais, se faz necessária uma interface para condicionar os sinais adequadamente. Os sinais de saída para acionamento das eletroválvulas precisam ser amplificados, do que optou-se por usar um circuito integrado (ULN2803AN) para pré-amplificar os sinais de comando para acionamento de relés, que por sua vez irão acionar as eletroválvulas, e assim isolar os circuitos de possíveis surtos elétricos (TEXAS INSTRUMENTS, 2006).

A conversão de sinal dos sensores pode ser feita usando um simples resistor ligado em série no terminal de saída de sinal.

Como medida de segurança, para evitar acionamento acidental foi adicionado um circuito demultiplexador (74hc238) que libera o sinal de funcionamento da interface de conversão de sinais elétricos ao receber um sequencia de 4 bits do DAQ (NXP B.V., 2007).

O diagrama conjunto do sistema elétrico pode ser visualizado na Figura 25, onde o quadro central delimita a interface de conversão de saída de sinais, e os resistores indicam a interface de conversão de entrada de sinais.

Figura 25 - Diagrama conjunto do sistema elétrico.



FONTE: O AUTOR

A interface de conversão sinais elétricos entre o sistema de aquisição de dados selecionado e os sensores e atuadores do sistema deve ser dimensionada. Para tanto, foi elaborada a Tabela 8, com as características dos sensores e atuadores utilizados no sistema.

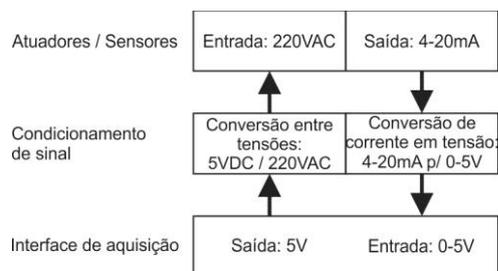
Tabela 8 - Características dos sensores e atuadores.

Sensor/Atuador	Especificações técnicas	Necessidades de projeto	Condição para funcionamento
Sensor de pressão	Sensor para pressão de 0 a 140 MPa, rosca de 1/4" BSP saída de sinal 4-20 mA temp. de trabalho até 85 °C	Medir pressão de 0 a 135 MPa bar	Condicionar sinal de saída para saída de tensão, alimentação de 10-30 V.
Sensor de temperatura	Sensor termopar tipo J com bainha de 6 mm com transmissor de sinal, saída 4-20 mA	Medir temperatura de 0 a 150°C	Alimentação de 10-30 V
Válvulas para controle de fluxos	Válvulas para fluidos em geral 0 a 10 Bar	Controle do transporte de líquido e gases	Alimentação da bobina 220 v AC 50 mA
Válvula para controle do atuador	Válvula 5 vias para fluidos em geral	Controle do atuador	Alimentação da bobina 220 v AC 50 mA
Resistência elétrica	Resistência de 2000 Watts 220 v AC	Aquecer sistema até 150 °C	Alimentação de 220 v AC 10 A

FONTE: O AUTOR

Os sinais dos sensores serão lidos, e os sinais de controle serão emitidos, por intermédio desta interface de condicionamento de sinais, conforme o esquema da Figura 26.

Figura 26 - Relação entre sensores, atuadores e interface de aquisição.



FONTE: O AUTOR

Para a camada elétrica, os principais componentes a serem dimensionados são a fonte de alimentação e os relés para acionamento das eletro-válvulas, bem como o relé de estado sólido para acionamento da resistência elétrica. Os componentes-padrão de relé suportam uma corrente de 16 A, muito acima dos 50 mA exigidos para acionamento de uma eletro válvula.

O dimensionamento do Relé de estado sólido se dá de forma direta: usando um coeficiente 2, temos uma corrente de 20 A; o componente padrão (relé de estado sólido) tem capacidade para 25 A.

A fonte DC necessita fornecer corrente para todos os relés de acionamento, incluindo o de estado sólido. Portanto, a capacidade de corrente exigida para este componente é a soma das correntes de acionamento de todos os relés, dos sensores e dos relés de estado sólido, multiplicada pelo coeficiente 2. Verifica-se, portanto, que a capacidade de corrente nominal da fonte padrão, de 5 A, atende com folga a demanda.

Os componentes do intertravamento eletrônico, são componentes lógicos, seus consumos podem ser supridos pela saída de 5 Vdc do DAQ USB-6009. O circuito da interface de conversão de sinais elétricos de saída pode ser visualizado Figura 27.

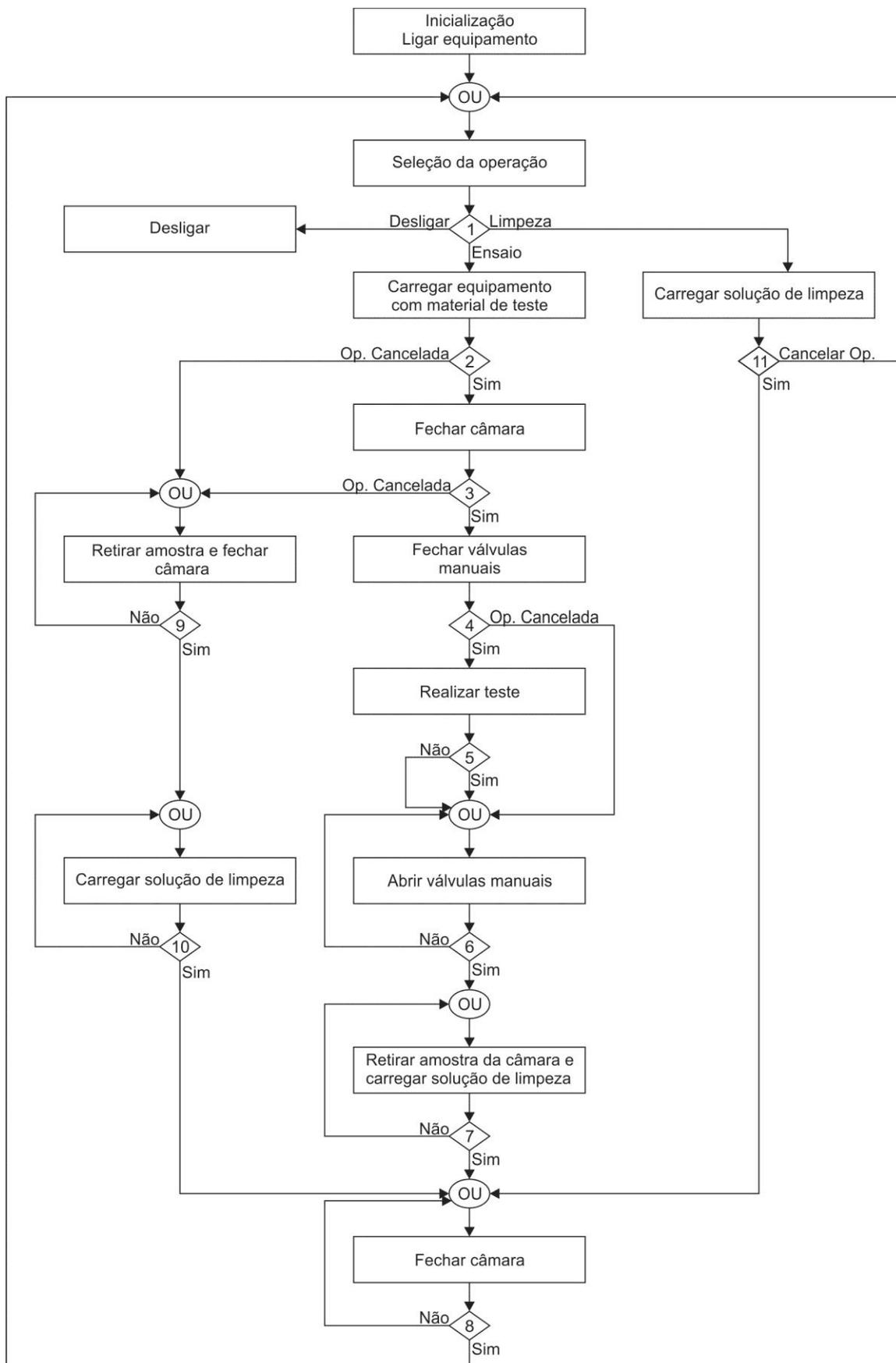
5.5.3 Camada de software

De acordo com o sugerido na abordagem para engenharia de precisão da VDI2221, foi idealizada para o nível mais alto do software, uma interface do usuário gráfica. Um sistema em etapas sequenciais obriga o usuário a executar e conferir todas as tarefas necessárias para operação segura do equipamento, conforme o diagrama da Figura 28. No diagrama são mostradas as ações de usuário e os eventos, correspondentes aos retângulos e aos diamantes, respectivamente.

Este sistema será apoiado pela arquitetura de máquina de estados em um nível mais baixo do software.

Como meio de integração geral, foi escolhida a plataforma de software LabVIEW, que pode ser integrada facilmente com diversas formas de hardware modular e facilita a realização de protótipos (BOEING AERO/NOISE/PROPULSION LABORATORY), (MINK HOLLOW SYSTEMS) .

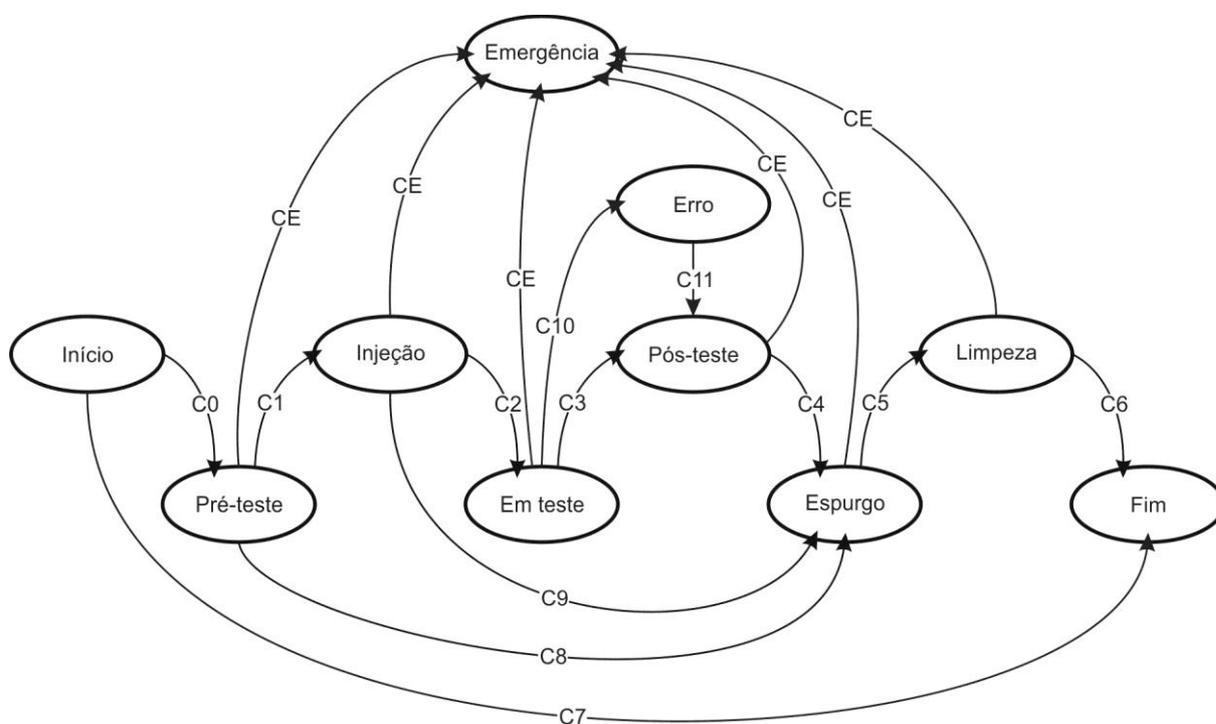
Figura 28- Diagrama de ações do usuário e eventos.



FONTE: O AUTOR

Para a arquitetura de software, foi selecionado o formato em ‘máquina de estados’ para que o processo seja executado de maneira intertravada, pré-definida e com segurança, facilitando a operação do ponto de vista do usuário (WAGNER, SCHMUKI, *et al.*, 2006). Desta forma, o software principal do sistema foi desenvolvido segundo os conceitos de máquinas de estados finitos conforme mostra a Figura 29. A transição de um estado para outro é governada pelas condições de transição (CE para “Emergência” e C# para outros estados), que são determinadas pelas ações tomadas pelo usuário conforme a Figura 28. É importante lembrar que a condição de transição “CE” pode ser disparada de modo autônomo pelo software.

Figura 29 - Diagrama de máquina de estados finitos.



FONTE: O AUTOR

As condições de transição podem ser mais bem entendidas na Tabela 9.

Tabela 9 - Condições de transição da máquina de estados.

Condições de transição	Variáveis					
	Tipo	Pressão	Temperatura	Valv. Manuais	Camara	Emergência
C0	Teste Limpeza	P < 100kPa	T < 40°C	Fechadas	Aberta	Desativada
C1	Teste Limpeza	P < 100kPa	T < 40°C	Abertas	Fechada	Desativada
C2	Teste	P < 100kPa	T < 40°C	Fechadas	Fechada	Desativada
C3	Teste	P = PARAM	T = PARAM	Fechadas	Fechada	Desativada
C4	Teste	P < 100kPa	T < 40°C	Abertas	Fechada	Desativada
C5	Teste	P < 100kPa	T < 40°C	Abertas	Fechada	Desativada
C6	Teste	P < 100kPa	T < 40°C	Fechadas	Aberta	Desativada
C7	Cancelada	P < 100kPa	T < 40°C	Fechadas	Aberta	Desativada
C8	Cancelada	P < 100kPa	T < 40°C	Abertas	Fechada	Desativada
C9	Limpeza	P < 100kPa	T < 40°C	Abertas	Fechada	Desativada
*C10	N/A	P != PARAM	T != PARAM	N/A	N/A	N/A
*C11	N/A	P != PARAM	T != PARAM	N/A	N/A	N/A
*CE	N/A	P < LIMITE	T < LIMITE	N/A	N/A	Ativada

***Condição disparada se qualquer variável for satisfeita em qualquer combinação**

FONTE: O AUTOR

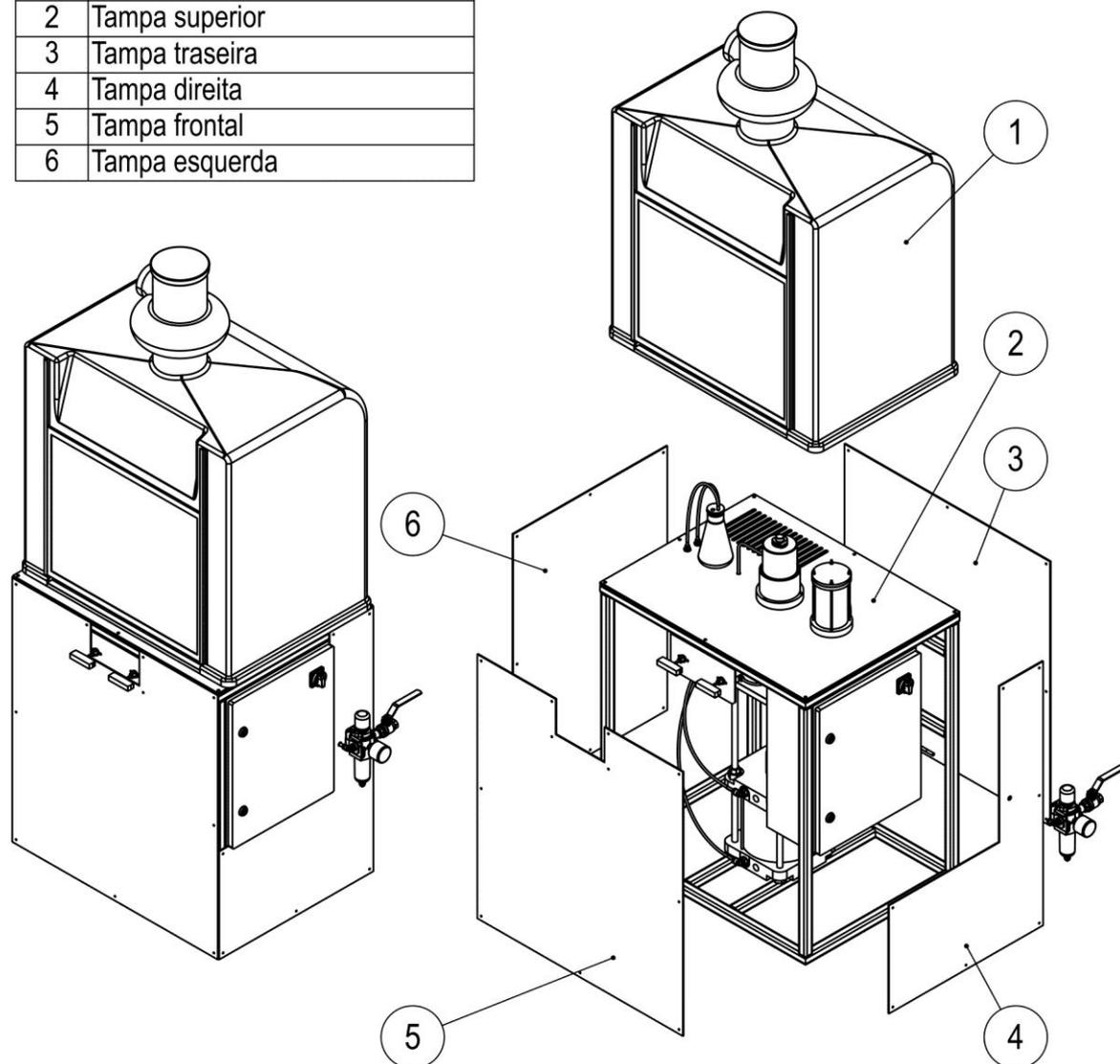
5.6 LEIAUTE GERAL

5.6.1 Camada eletromecânica

A partir dos conceitos elaborados e dimensionados anteriormente, foi criado o leiaute geral do sistema em CAD 3D, como mostram a Figura 30 e a Figura 31.

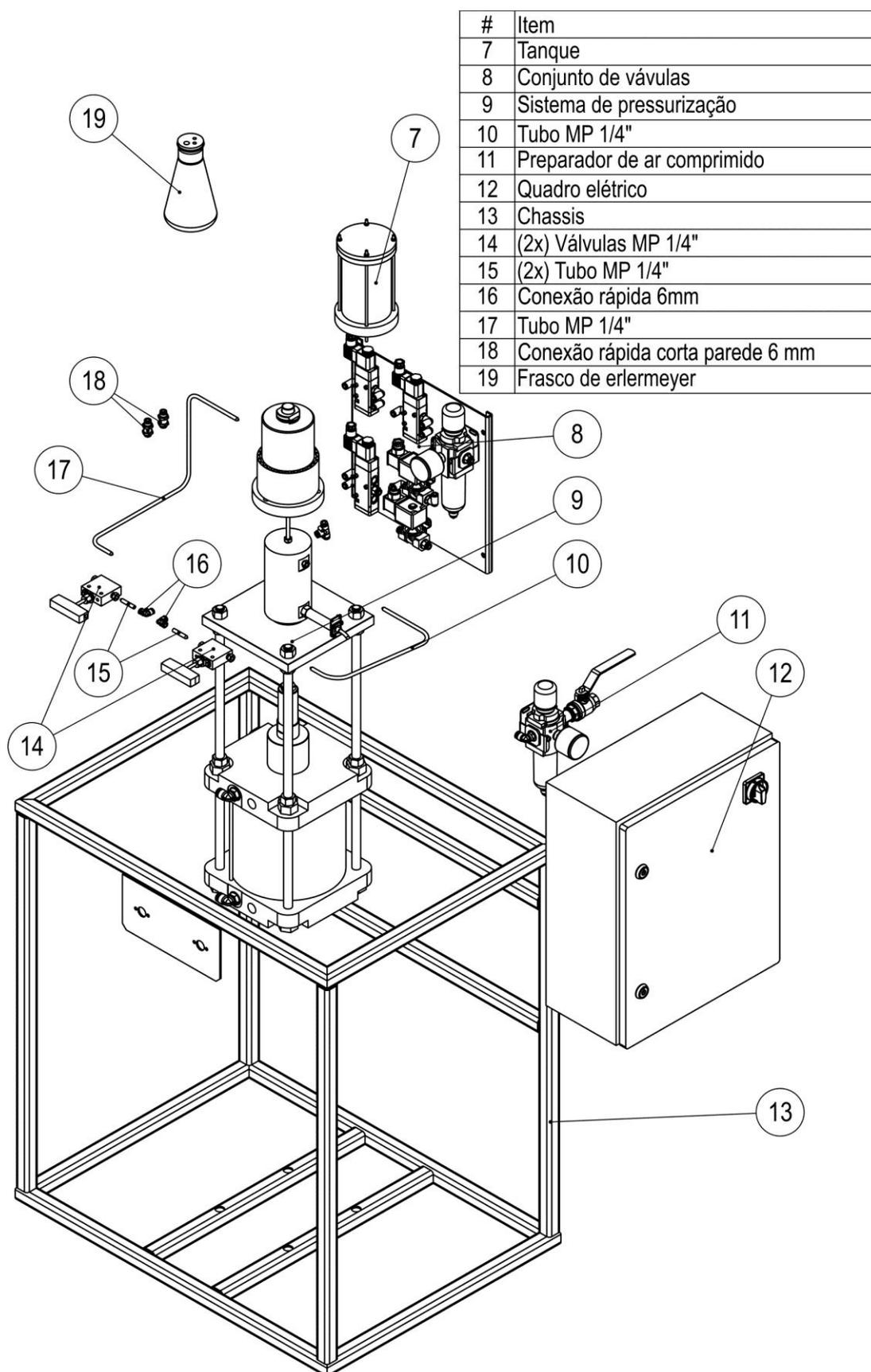
Figura 30 - Leiaute geral (parte 1).

#	Item
1	Capela com exaustor
2	Tampa superior
3	Tampa traseira
4	Tampa direita
5	Tampa frontal
6	Tampa esquerda



FONTE: O AUTOR.

Figura 31 - Leiaute geral (parte 2).



FONTE: O AUTOR.

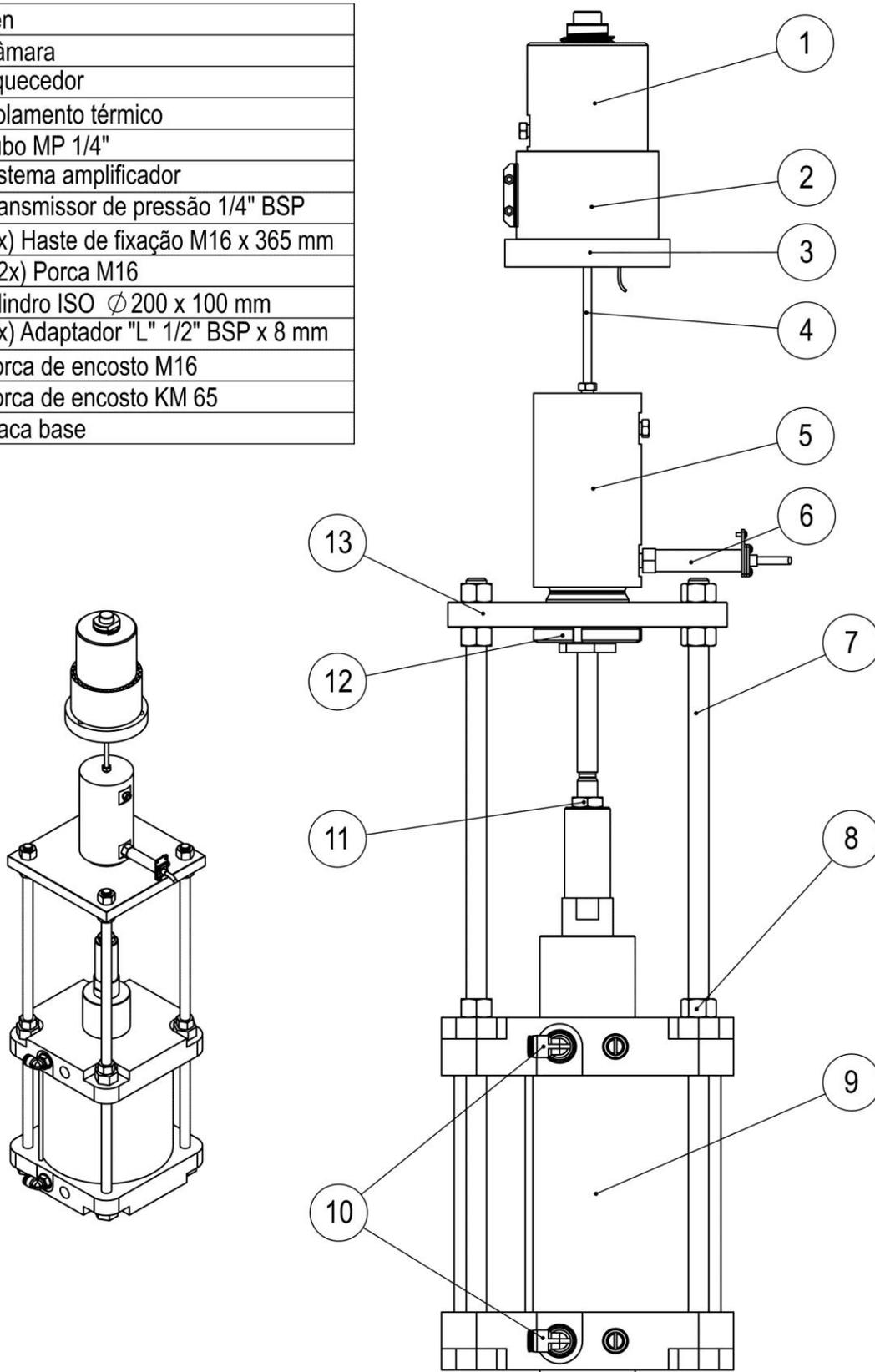
A célula de alta pressão da Figura 32 é composta da câmara (Figura 33) e dos sistemas de compressão (Figura 34) e aquecimento da mistura (item 2). Agregados ao subsistema, estão os sensores de monitoramento de pressão (item 6) e temperatura (item 5 da Figura 33).

O revestimento interno da câmara (Figura 33), feito em Politetrafluoretileno (PTFE), é responsável por evitar um processo de corrosão galvânica, que poderia comprometer o teste e o equipamento. O embolo flutuante (item 3 da Figura 34), tem a função de servir de barreira de separação entre o óleo e a mistura utilizada no teste, que se encontram em equilíbrio de pressões.

Os demais itens agregados são, essencialmente, elementos-satélite das soluções usadas para a célula de alta pressão e componentes de uso comum.

Figura 32 – Célula de alta pressão.

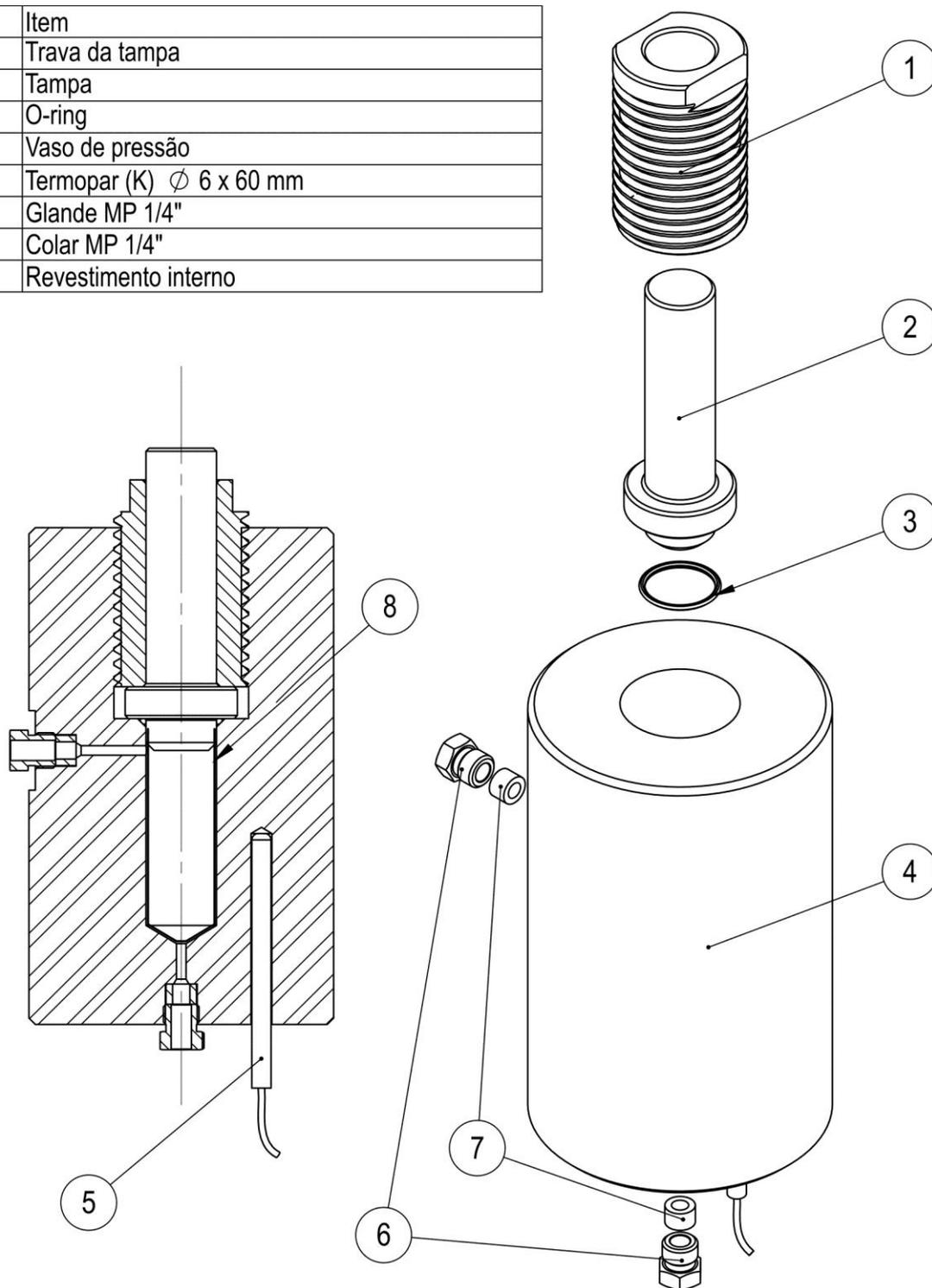
#	Item
1	Câmara
2	Aquecedor
3	Isolamento térmico
4	Tubo MP 1/4"
5	Sistema amplificador
6	Transmissor de pressão 1/4" BSP
7	(4x) Haste de fixação M16 x 365 mm
8	(12x) Porca M16
9	Cilindro ISO $\varnothing 200 \times 100$ mm
10	2(x) Adaptador "L" 1/2" BSP x 8 mm
11	Porca de encosto M16
12	Porca de encosto KM 65
13	Placa base



FONTE: O AUTOR.

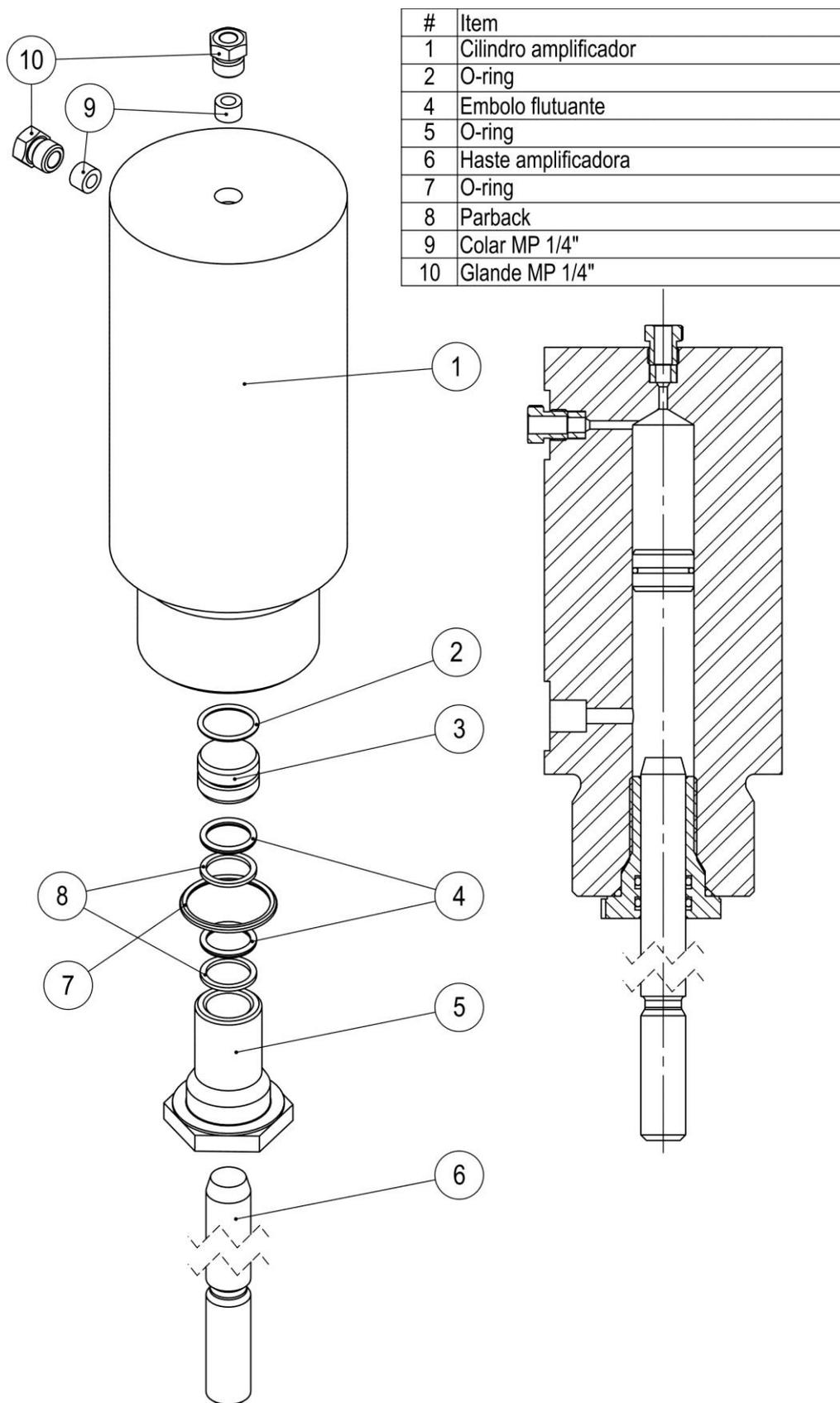
Figura 33 – Câmara.

#	Item
1	Trava da tampa
2	Tampa
3	O-ring
4	Vaso de pressão
5	Termopar (K) \varnothing 6 x 60 mm
6	Glande MP 1/4"
7	Colar MP 1/4"
8	Revestimento interno



FONTE: O AUTOR.

Figura 34 - Sistema amplificador.

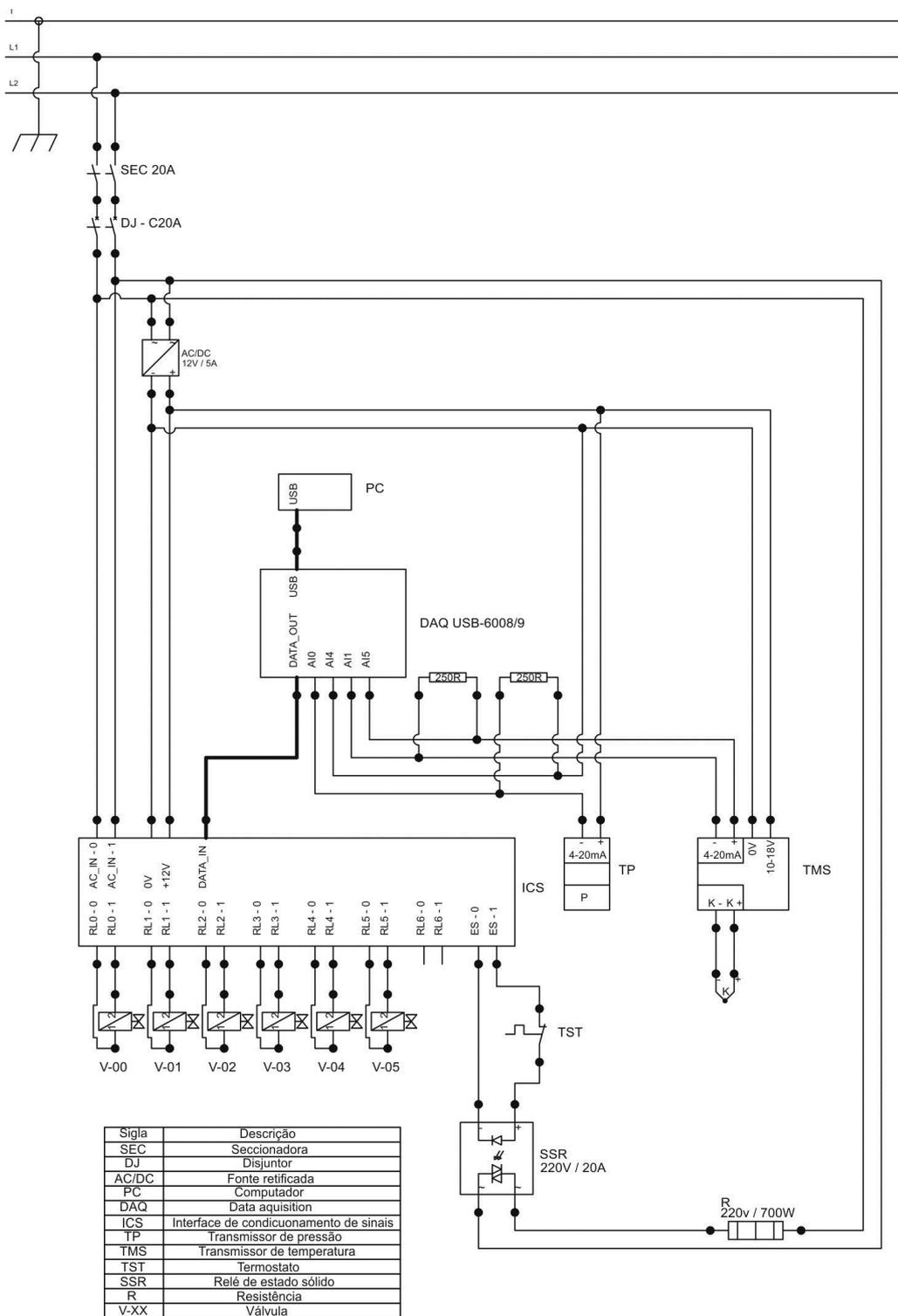


FONTE: O AUTOR.

5.6.2 Camada elétrica

Na Figura 35, tem-se o diagrama elétrico de ligações entre os componentes do equipamento.

Figura 35 - Diagrama elétrico.

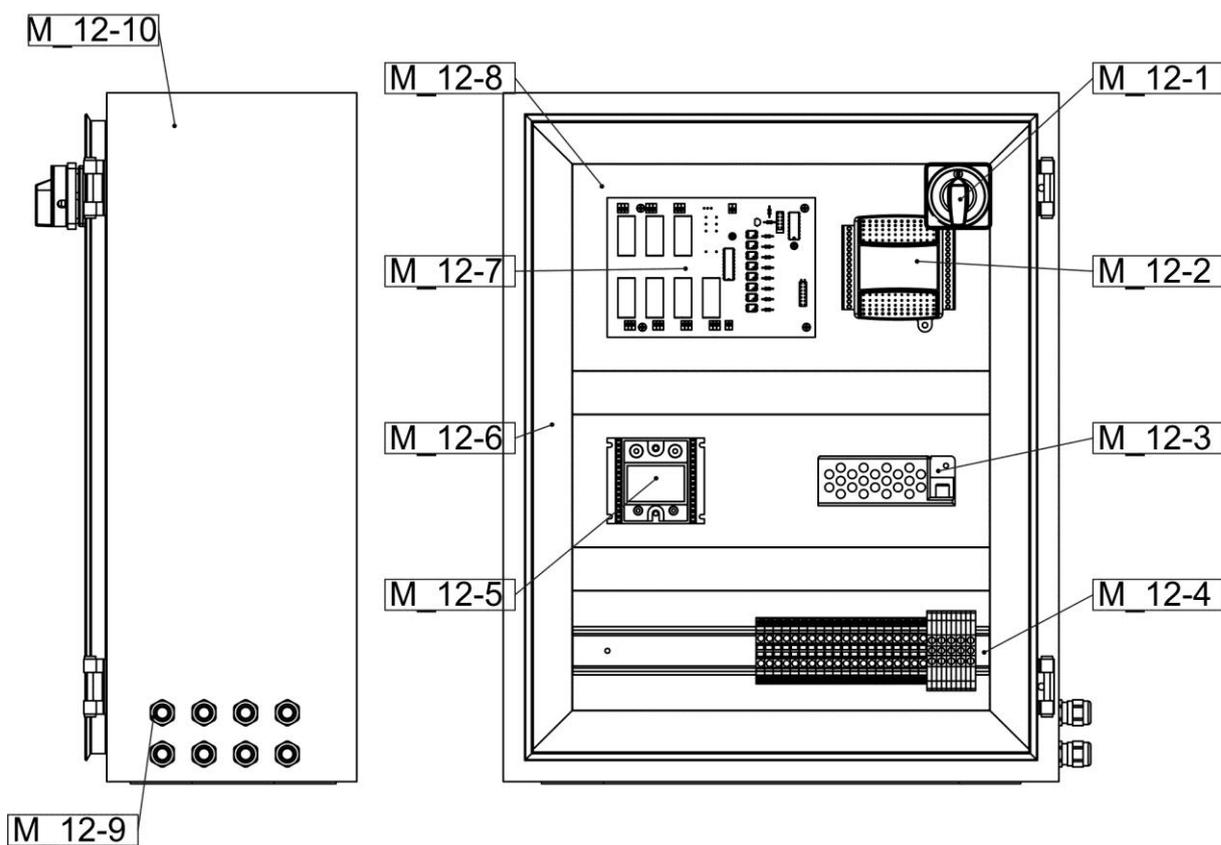


FONTE: O AUTOR

O diagrama corresponde aos componentes que serão instalados dentro do quadro elétrico (item 12 do leiaute geral), conforme a disposição mostrada na figura Figura 36.

Figura 36 - Leiaute de disposição dos componentes no quadro elétrico.

#	Item
M_12-1	Seccionadora 2P
M_12-2	DAQ USB-6008/9
M_12-3	Conversor AC/DC
M_12-4	Régua de borne
M_12-5	Relé de estado sólido
M_12-6	Canaletas passa fio
M_12-7	Interface de condicionamento de sinal
M_12-8	Base para montagem
M_12-9	(8x) prensacabo
M_12-10	Quadro elétrico



FONTE: O AUTOR

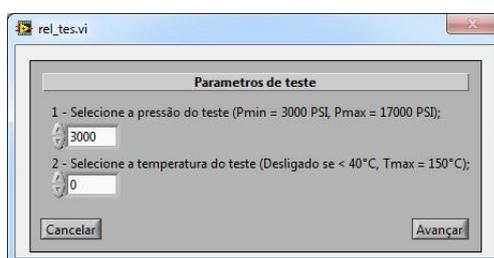
5.6.3 Camada de software

A interface de usuário foi projetada para a realização através de um PC aonde são limitados o número de procedimentos. Com a finalidade de manter a segurança, o processo de parametrização e procedimentos do teste exige, em cada uma das

suas principais etapas, uma confirmação do usuário para seguir ao estado seguinte, conforme mostram a Figura 37 e a Figura 38. Este procedimento torna muito improvável que o usuário desencadeie ações acidentalmente. Por motivos de limitação de recursos, componentes para implementar intertravamentos de segurança físicos não foram previstos para o protótipo.

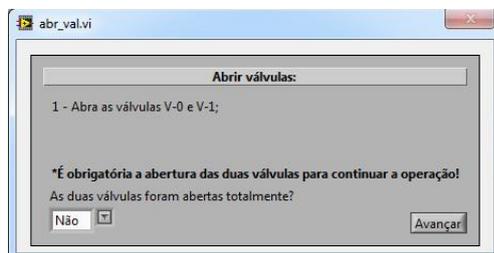
Após a parametrização e o início do teste, o usuário acompanha o teste através da interface da Figura 40.

Figura 37 - Tela para seleção de parâmetros.



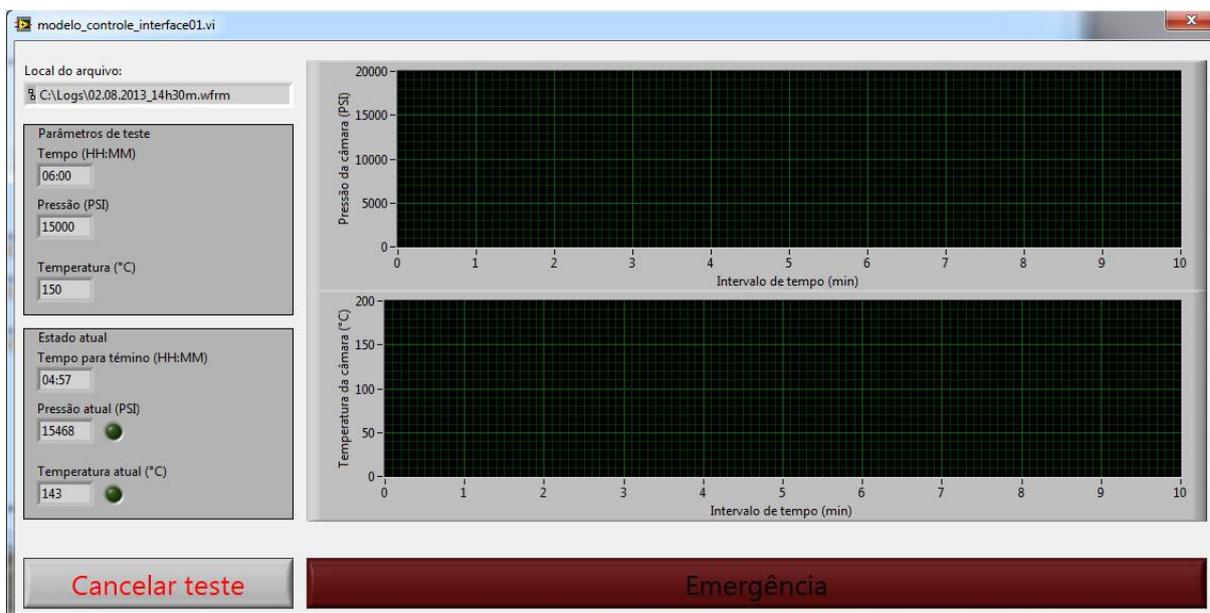
FONTE: O AUTOR

Figura 38 - Tela para confirmação de procedimento.



FONTE: O AUTOR

Figura 39 - Tela de acompanhamento de teste.



FONTE: O AUTOR

5.7 DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO

A documentação deste projeto foi organizada de forma hierárquica, partindo-se do sistema completo para as submontagens, e por fim acrescentando-se os componentes. Para seguir corretamente com o modelo hierárquico, cada folha do projeto recebe o mesmo nome do componente ou submontagem a que pertence. Os principais desenhos e esquemas técnicos do projeto encontram-se no ANEXO 02.

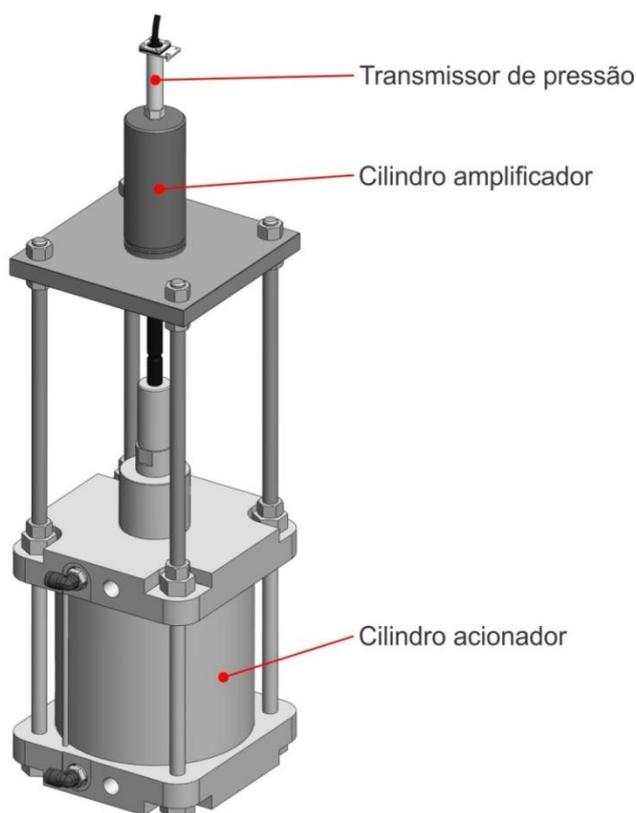
6 PROVA DE CONCEITO DO SUBSISTEMA DE OBTENÇÃO DE ALTA PRESSÃO - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O subsistema de maior dificuldade técnica neste projeto corresponde ao de obtenção de alta pressão. Sendo assim um protótipo funcional foi fabricado com o objetivo de se realizar testes de validação do subsistema sistema de amplificação de pressão, bem como do sistema de vedações adotado, ante uma pressão entre 15000 PSI (103,43 MPa) e 20000 PSI (137,90 MPa), durante um período ininterrupto de no mínimo 9 horas, e desta forma validar os cálculos mais importantes de dimensionamento do sistema.

6.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO ADOTADO PARA O EXPERIMENTO

O protótipo funcional foi construído conforme mostrado na Figura 40. A pressão do cilindro amplificador foi monitorada com um sensor (transmissor) de pressão manométrico com fundo de escala em 20000 psi (138 MPa).- A pressão do cilindro acionador foi monitorada por um segundo transmissor de pressão com fundo de escala em 145 psi (1 MPa), conectado à tomada de ar do sistema.

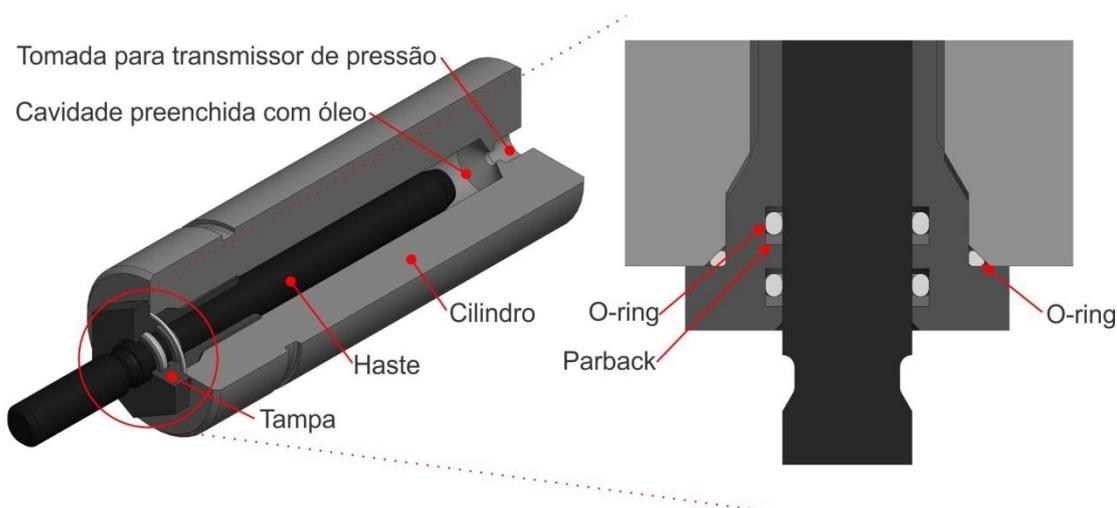
Figura 40 - Montagem do sistema de testes.



FONTE: O AUTOR

O cilindro amplificador do protótipo foi construído em aço SAE 1045 (mais econômico), usando o esquema da Figura 41.

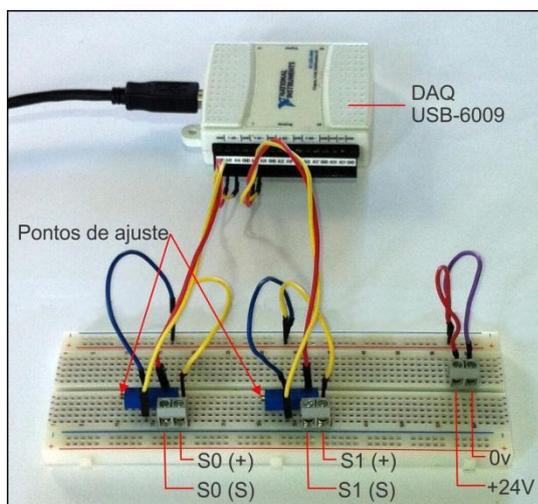
Figura 41 – Montagem para testes do protótipo do cilindro amplificador



FONTE: O AUTOR

Para a leitura dos sinais (4-20 mA) dos sensores, foi elaborada uma interface de condicionamento de sinal, cuja imagem pode ser vista na Figura 42. A interface converte o sinal de corrente para tensão, com ajuste por trimpot para que os sinais se encaixem na faixa de 1-5v. Por sua vez, esses sinais são lidos pela interface de aquisição de dados conectada ao computador pela porta USB.

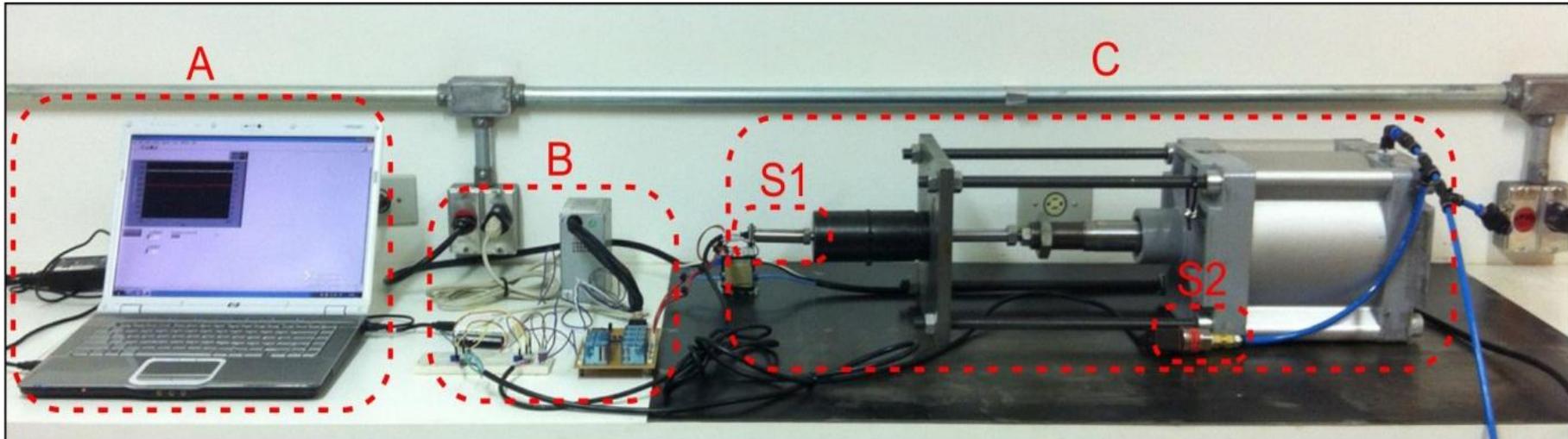
Figura 42 - Interface de condicionamento de sinais.



FONTE: O AUTOR

O lado de baixa pressão do sistema é acionado pelo fluxo de ar proveniente de um compressor com capacidade de até 125 PSI (861,84 kPa), que foi adaptado para ser controlado desde a interface com o usuário, todo sistema pode ser visualizado na Figura 43.

Figura 43 - Montagem do sistema de testes junto ao protótipo funcional.



- A: Software de controle / log.
- B: Interfaces de condicionamento de sinal (entrada e saída).
- C: Sistema de testes.
- S1: Sensor 1 (138 MPa).
- S2: Sensor (1 MPa).

FONTE: O AUTOR

6.2 TESTES

Os sensores utilizados tiveram seus offsets zerados, e o controle do compressor foi ajustado para fornecer um fluxo de ar em uma faixa de 115 PSI (792,90 kPa) a 120 PSI (827,37 kPa). A duração do teste, de 9 h, foi selecionada em atenção aos tempos necessários para os ensaios de corrosão.

6.3 INTEGRAÇÃO GERAL DO SISTEMA

De modo geral, a integração do sistema atendeu aos requisitos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10- Requisitos de projeto supridos

Requisitos de projeto	Valores meta	Valores atingidos/em projeto	Obs.
Pressão total máxima	15-20 kPSI (103-138 MPa)	16,6-16,8 kPSI (114 - 116 MPa)	Confirmado no teste em bancada.
Incerteza da medição de pressão	1%	S/Média = $100 \cdot 173 / 16732 = 1,03\%$	
Intervalo de aquisição	0,5s máximo	Projetado para >0,1s	
Volume de solução	volume Max. 300ml	Projetado para $\pi \cdot r^2 \cdot h = 22,7\text{ml}$	
Altura da câmara	>15mm <50mm	Projetado para 60mm	
Diâmetro da câmara	20mm	Projetado para 22mm	
Temperatura câmara	20-200°C	Projetado para 150°	
Espessura do Revestimento interno	0,2mm	Projetado para 0,2mm	
Segurança (espaço para expansão) da proteção mecânica	1000x o vol. do liquido	Possível > 1000x	
Intertravamentos (por software e/ou físicos)	100%	Projetado para 100%	Misto software/físico (Relativo a válvulas operadas remotamente)
Redundância (diferentes meios de proteção)	2X	Projetado para 71% do valor	Dependente de % de válvulas operadas remotamente
Filtro	<10ppm	Possível neutralizar	
Tolerância de alarmes	2% dos valores de controle	Possível ajustar dentro de qualquer faixa	
Tempo de exaustão completa	5s	3s	Componente padrão
# ações de operação do sistema (físico e soft)	10	Projetado para 8	
Tempo de setup	3min	Possível em 3 minutos	Dependente de treinamento
Automatizar operações	>80% de operações	Projetado para ~50%	Relativo a cinemática do equipamento que pode ser alterada por software
Válvulas operadas remotamente	>80%	Projetado para 2 de 7 = 71%	

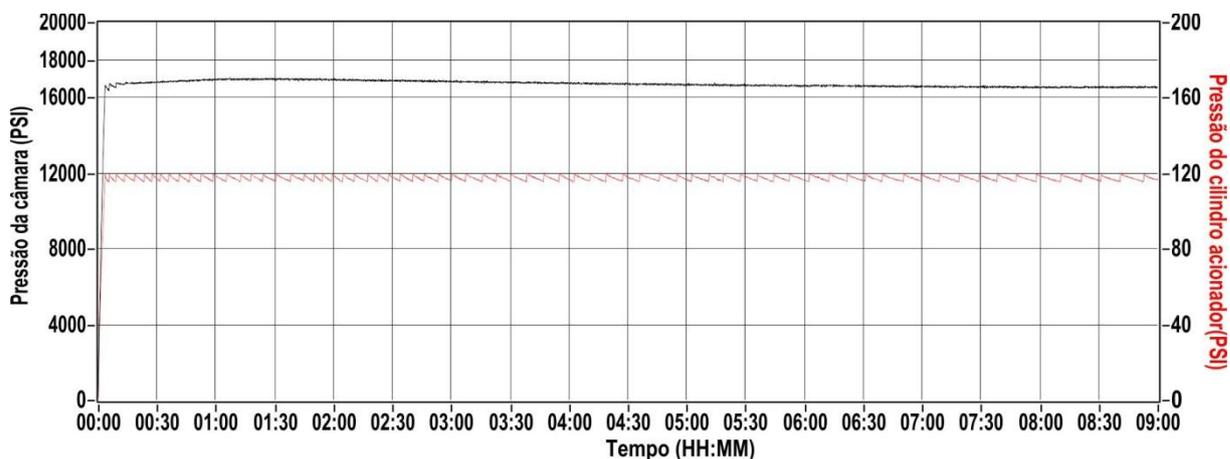
FONTE: O AUTOR

6.4 RESULTADOS DOS TESTES DE FUNCIONAMENTO

Após a elaboração de três testes, foi feito o um tratamento de redução de ruídos das medições. Primeiramente, os registros dos testes foram cortados no tempo exato de 9 horas; em seguida, a quantidade de pontos do arquivo de registro foi filtrada com médias a cada grupo de 16 pontos (para evitar o trecho da rampa de

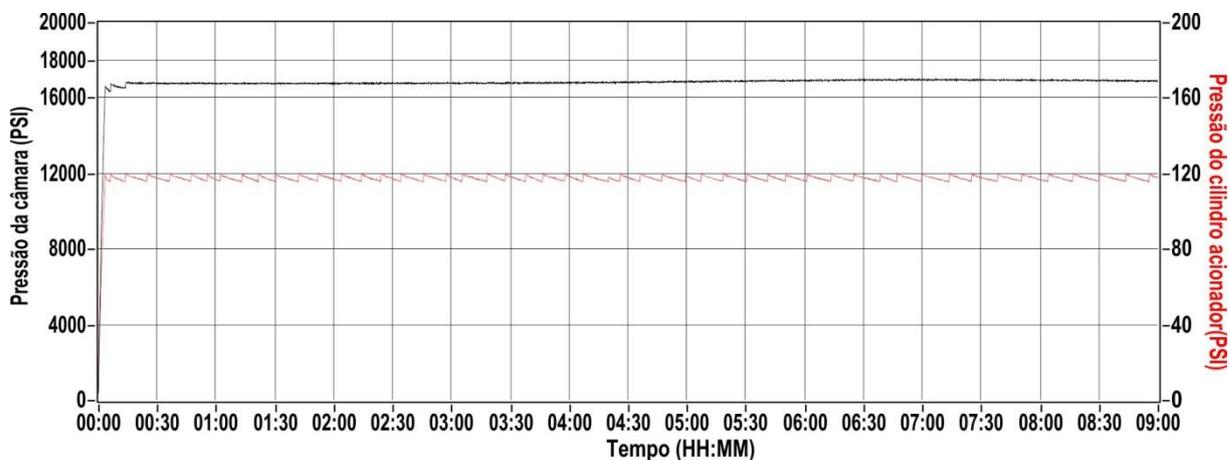
subida da pressão, a operação foi feita na faixa de tempo de 0h20 a 9h00). Os resultados dos três testes de funcionamento do sub-sistema de alta pressão são mostrados nas, Figura 45 e Figura 46 e estão resumidos na Tabela 11.

Figura 44 - Teste de pressão #1.



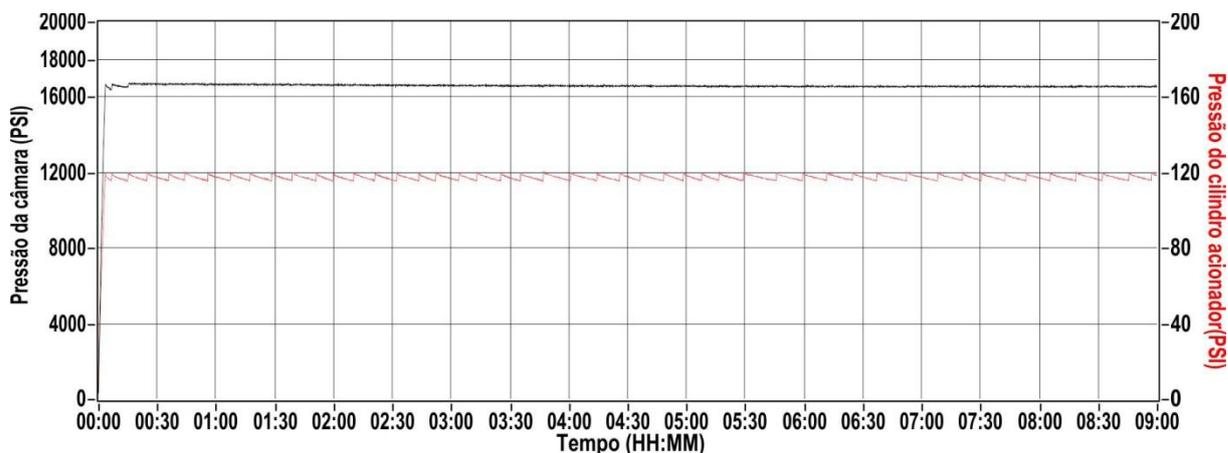
FONTE: O AUTOR

Figura 45 - Teste de pressão #2.



FONTE: O AUTOR

Figura 46 - Teste de pressão #3.



FONTE: O AUTOR

Tabela 11 - Resultado dos testes

# do teste	Pressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Razão de amplificação
1	115,36	1,20	139,4
2	116,10	0,80	140,3
3	114,44	0,69	138,3

FONTE: O AUTOR

Os cálculos de dimensionamento determinaram uma razão de amplificação teórica de 157 vezes. A diferença encontrada entre os cálculos e os resultados experimentais pode ser atribuída às forças de atrito no conjunto mecânico, entre os elementos vedantes e a camisa interna do cilindro amplificador e do cilindro acionador. Os níveis de pressão alcançados, mantidos de forma notavelmente estável, indicam um desempenho bastante satisfatório do subsistema de obtenção de alta pressão.

7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÃO

O equipamento teve o seu projeto e desenvolvimento orientado pelas prescrições da norma VDI-2221, valendo-se ainda de ferramentas da área da engenharia de produtos e sistemas, para minimizar erros de projeto por planejamento deficiente. Ainda que diversas iterações tenham sido necessárias, até mesmo para manter as informações do projeto dentro dos formatos previstos pelas ferramentas, foi possível conduzir o processo de desenvolvimento, em cada etapa da aplicação da VDI-2221, de maneira bastante satisfatória.

A sistematização do processo de projeto contribuiu para que se alcançasse um resultado compatível com os requisitos e especificações propostos inicialmente. Entretanto, o teor generalista das ferramentas exigiu da equipe de projeto sempre uma reflexão para a sua correta aplicação.

De forma geral a aplicação conjunta da VDI-2221 com a casa da qualidade e as ferramentas clássicas de projeto de produto se mostrou satisfatória, e levou à elaboração do conceito e do projeto detalhado a serem usados para a fabricação do equipamento para testes de corrosão de amostras sob condições semelhantes às encontradas nos poços profundos de extração de petróleo.

Em resumo, soluções para manter a câmara de teste na pressão e na temperatura desejadas foram detalhadas. Sistemas auxiliares de condicionamento de sinais para suportar a integração entre software e sistemas eletromecânicos foram criadas e dimensionadas. Uma interface gráfica para o usuário e a automação do sistema através de uma arquitetura de software do tipo máquina de estados foi implementada e integrada com os demais sistemas projetados, ou testados, como no caso do sistema de obtenção de alta pressão.

Um protótipo do sub-sistema de alta pressão, com a finalidade de servir de prova-de-conceito da solução desenvolvida para o problema-chave de engenharia do projeto, foi fabricado e ensaiado em bancada, tendo os testes demonstrado que referida a solução permite sustentar pressões estáveis, com flutuação menor do que 0,8% numa amplitude da ordem de 115 MPa, compatíveis com uma profundidade da ordem de 11 km, por período superior à 9 horas, na câmara de teste.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do sistema, usando a abordagem da VDI2221, teve maior teor relativo ao sistema físico para obtenção de pressão e temperatura com apontamentos para solucionar o problema de lidar com o gás H_2S e recriar as condições químicas de corrosão similares as dos poços de extração de petróleo. Desta maneira ainda se faz necessária uma abordagem mais aprofundada sobre a química ideal para suprir a necessidade supracitada dentro das condições oferecidas como solução para o sistema projetado e testado.

REFERÊNCIAS

VDI SOCIETY FOR PRODUCT DEVELOPMENT, DESIGN AND MARKETING. **VDI 2221**. Tradução de K.M. Wallace. Berlin: Beuth Verlag 1987

NACE INTERNATIONAL. **INTERNATIONAL NACE MR0175/ISO 15156-2**. [S.l.]:IHS, 2003.

BEHRENS, N. J. **Investigation of interactive teaching techniques to promote student understanding in chemistry**. Ames:[s.n.], 2007.

REDE REVESPETRO; **Aplicação da Tecnologia de Revestimentos Depositados por PVD em Ferramentas e Componentes das Indústrias de Petróleo e Gás**, 2009. 14p. Numero de chamada 2662/09.

ALTSHULLER, G. **40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation**. 3ª. ed. Worcester: Technical Innovation Center, Inc., 2002.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code: VIII, Division 1 - RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS**. 2010. ed. Nova York: [s.n.], v. VIII, 2010.

ANEP. **Poços exploratorios em atividade. ANEP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 05 Janeiro 2012. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=58879>>. Acesso em: 14 Fevereiro 2012.

ASM INTERNATIONAL. **Corrosion in the Petrochemical Industry**. [S.l.]: Asm Intl, 1994.

ASM INTERNATIONAL. **Corrosion: Understanding the Basics**. Ohio: ASM Int., 2000.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Metals handbook - Corrosion**. 9. ed. Colorado: ASM International, v. 13, 1987.

BABOIAN, R. **Corrosion tests and standars: application and interpretation**. 2. ed. West Conshohocken: ASTM Internationa, 2010.

BACK, N. et al. **PROJETO INTEGRADO DE PRODUTOS: PLANEJAMENTO**,

CONCEPÇÃO E MODELAGEM. Barueri: Manole, 2008.

BAI, Z. Q. et al. **Corrosion resistance of the anti-sulfide steel in the CO₂/H₂S containing solutions.** *Materials and Corrosion*, 2010. 689-694.

BARDAL, E. **Corrosion and Protection.** Norway: Springer, 2004.

BARRY, K.; DOMB, E.; SLOCUM, M. S. **What Is TRIZ? TRIZ, 2012.** Disponível em: <http://www.triz-journal.com/archives/what_is_triz/>. Acesso em: 4 Março 2012.

BAXTER, M. **Projeto de Produto.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BOEING AERO/NOISE/PROPULSION LABORATORY. **Boeing Measures Reduced Aircraft Noise Emissions with NI PXI and LabVIEW.** Site da National Instruments. Disponível em: <<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-684>>. Acesso em: 10 Junho 2013.

BP. **BP Statistical Review of World Energy.** BP Global, Junho 2011. Disponível em: <http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf>. Acesso em: 14 Fevereiro 2012.

CHENG, L. C.; MELO FILHO, L. D. R. D. **QFD: desdobramento da função da qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos.** São Paulo: Blücher, 2007.

CODY, J. D.; HUTCHEON, I. E.; KROUSE, H. R. **Fluid flow, mixing and the origin of CO₂ and H₂S by bacterial sulphate reduction in Manniville Group, southern Alberta, Canada.** *Marine and Petroleum Geology*, Calgary, 25 Outubro 1999. 495-510.

DAVIS, J. R. **Corrosion: Understanding the basics.** [S.l.]: ASM International, 2000.

DOMB, E. **40 Inventive Principles With Examples.** TRIZ, 1997. Disponível em: <<http://www.triz-journal.com/archives/1997/07/b/index.html>>. Acesso em: 04 Março 2012.

GROYSMAN, A. **Corrosion for Everybody.** New York: Springer Dordrecht

Heidelber London, 2010.

GUIMARÃES, E. M. **Causas e formas de corrosão na unidade de recuperação de enxofre da refinaria gabriel passos (REGAP/PETROBRAS)**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, Julho 2006.

GUOAN, Z. et al. **Effect of HC03- concentration on C02 corrosion in oil and gas fields**. Journal of University of Science and Technology Beijing - Materials, Beijing, 15 Setembro 2004. 44-49.

HAN, J.; CAREY, J. W.; ZHANG, J. **A coupled electrochemical–geochemical model of corrosion for mild steel in high-pressure CO2-saline environments**. International Journal of Greenhouse Gas Control, Los Alamos, 15 Fevereiro 2011. 777-787.

HEIDERSBACH, R.; HEIDERSBACH, B. **Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

HUGHES, M. N.; CENTELLES, M. N.; MOORE, K. P. **Making and working with hydrogen sulfide The chemistry and generation of hydrogen sulfide in vitro and its measurement in vivo: A review**. Free Radicall Biology & Medicine, Londres, 19 Setembro 2009. 1346-1353.

KELLY, R. G. et al. **Eletrichemical Techniques in Corrosion Science and Engineering**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

LÓPEZ, J.; ALMENIDA, R. L. D.; ARAUJO-MOREIRA, R. M. **TRIZ: Criatividade como uma ciência exata?** Revista Brasileira de Ensino de Física, Campinas, v. 27, p. 205-209, Dezembro 2005.

MAUGERI, L. **The age of oil: the mythology, history, and future of the world's most controversial resource**. In: MAUGERI, L. The age of oil: the mythology, history, and future of the world's most controversial resource. Westport: Greenwood, 2006. Cap. 2, p. 19-25.

MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. Produção, São Paulo, 23 Fevereiro 2007.

216-229.

MINK HOLLOW SYSTEMS. **NASA Uses NI LabVIEW to Save Time, Reduce Costs in Automated Testing of Microshutters**. Site da National Instruments. Disponível em: <<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-632>>. Acesso em: 10 Junho 2013.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NASA Uses NI LabVIEW to Save Time, Reduce Costs in Automated Testing of Microshutters - Solutions - National Instruments**. National Instruments, 2012. Disponível em: <<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-632#>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2012.

NATIONAL INSTRUMENTS. **What Is LabVIEW? - National Instruments. National Instruments**, 2012. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/whatis/>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2012.

NESIC, S. **Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – A review**. Corrosion Science, Athens, 14 Julho 2007. 4308-4338.

NXP B.V. **74HC238; 74HCT238: 3-to-8 line decoder/demultiplexer**. [S.l.]: [s.n.], 2007.

PAHL, G. et al. **Projeto na engenharia**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PALMER, D. A. **The Chemistry of Metal Carbonato and Carbon Dioxide Complexes**. Chemistry Division, Oak Ridge National Laboratory. Tennessee, p. 651-731. 1983.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. **Parker O-Ring Handbook**. Cleveland: [s.n.], 2007.

PENNENERGY. **Energy News & Research Covering Oil and Gas, Power Generation and Renewables**, 2012. Disponível em: <http://www.pennenergy.com/index/articles/pe-article-tools-template.articles.offshore.volume-70.issue-2.special-report__carbon.petrobras-tests_new.html>. Acesso em: 14 Fevereiro 2012.

PERRY, D. L. **Hand Book of inorganic compounds**. 2. ed. Nova Yorke: Taylor & Francis Group, 2011.

PETROBRAS. **Nossa História.** Petrobras, 2012. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 14 Fevereiro 2012.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion control: an introduction to corrossion science and engineering.** 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1907.

ROBERGE, P. R. **Handbook of corrosion engineering.** Highstown: McGraw-Hill, 1999.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo.** São Paulo: Saraiva, 2006.

SASTRI, V. S. **Green Corrosion Inhibitors: Theory and Praticce.** New Jersey: John Wiler & Sons, Inc., 2011.

SHERAR, B. W. A. et al. **Characterizing the effect of carbon steel exposure in sulfide containing solutions** **Characterizing the effect of carbon steel exposure in sulfide containing solutions.** Corrosion Science, ONtario, 26 Novembro 2010. 955-960.

SILVA, E. L. D. S.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

TEXAS INSTRUMENTS. **ULN2803AN: DARLINGTON TRANSISTOR ARRAY.** Dallas: [s.n.], 2006.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE AN INTERNATIONAL CODE: MATERIALS - Part D - Properties.** Nova York: [s.n.], 2001.

VASCONCELOS, C.; ROMEIRO FILHO, E. **Projeto Do Produto.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2011.

WAGNER, F. et al. **Modeling Software with Finete State Machines: A Pratical Approach.** Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2006.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e metodos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZHANG, G. A.; CHENG, Y. F. **On the fundamentals of electrochemical corrosion of X65 steel in CO₂-containing formation water in the presence of acetic acid in petroleum production.** Corrosion Science, Calgary, 21 Outubro 2008. 87-94.

ZHANG, G. A.; CHENG, Y. F. **Corrosion of X65 steel in CO₂-saturated oilfield formation water in the absence and presence of acetic acid.** Corrosion Science, Calgary, 17 Abril 2009. 1589-1595.

ZHU, G. et al. **Induced H₂S formation during steam injection recovery process of heavy oil from the Liaohe Basin, NE China.** Journal of Petroleum Science and Engineering, Beijing, 4 Janeiro 2012. 30-36.

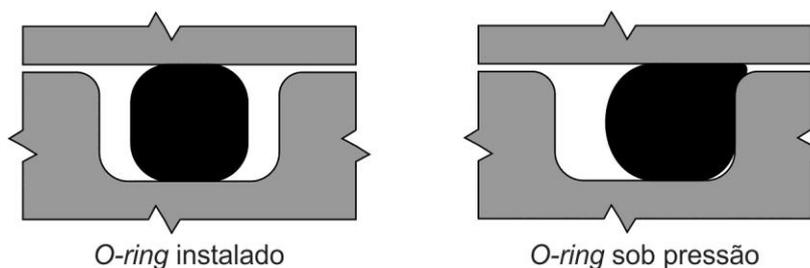
ZHU, S. D. et al. **Corrosion of N80 carbon steel in oil field formation water containing CO₂ in the absence and presence of acetic acid.** Corrosion Science, Xi'an, 12 Julho 2011. 3156-3165.

ANEXO 01 – VEDAÇÕES PARA ALTA PRESSÃO

De acordo com PARKER HANNIFIN CORPORATION (2007), uma vedação *O-ring* consiste em um meio intermediário que previne que um líquido ou gás escape.

O *O-ring* funciona basicamente como um fluido incompressível viscoso com alta tensão superficial. Com a pressão mecânica exercida este fluido viscoso é forçado pelas pequenas aberturas, fechando os espaços para evitar que o fluido menos viscoso escape, conforme a sequência demonstrada na figura Figura 01.

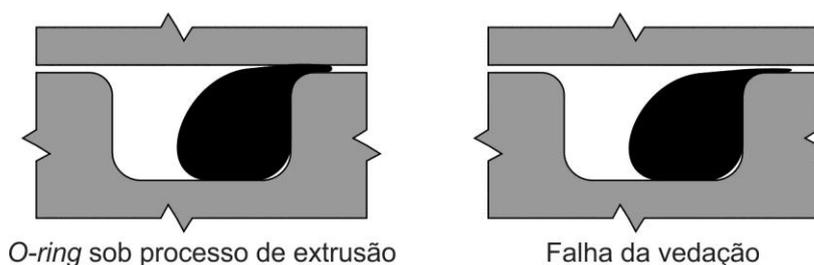
Figura 01 - Operação do *o-ring*.



ADAPTADO DE: PARKER (2007)

Porém, em condições extremas de pressão, o esforço solicitado é maior do que o suportado pelo *o-ring*, ocasionando a falha por extrusão da vedação como mostra a Figura 02.

Figura 02 - Falha por extrusão



ADAPTADO DE: PARKER (2007)

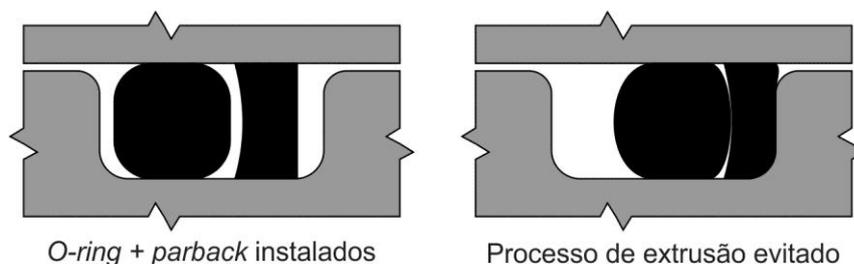
Para evitar o processo de extrusão em sistemas mecânicos que necessitam de folga, PARKER (2007) sugere que o material do *o-ring* seja o mais duro possível (90 SHORE A ou maior), e também o uso de anéis de *backup* (ou *parbacks*).

O anel de backup consiste em um anel de um material relativamente mais duro, que funciona com um assento para evitar a deformação excessiva do *o-ring*,

como mostra a figura Figura 03.

Além da utilização dos *parbacks* para um melhor funcionamento do o-ring em condições de uso de movimento recíproco, é sugerido que as superfícies que deslizarão em contato com o *o-ring* tenham uma dureza elevada e baixo coeficiente de atrito.

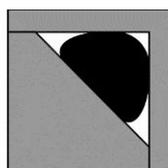
Figura 03 - Funcionamento do *parback*.



ADAPTADO DE: PARKER (2007)

Para aplicações que não exijam folgas mecânicas, PARKER (2007) sugere que a folga seja diminuída ao máximo possível, virtualmente fazendo com que não haja espaço para o *o-ring* "fluir". Também é sugerido, para aplicações em que o custo deve ser reduzido, o uso de um alojamento triangular conforme a figura Figura 04.

Figura 04 - Instalação em alojamento triangular



Alojamento triangular

ADAPTADO DE: PARKER (2007)

Porém, neste tipo de alojamento, o *o-ring* é obrigado a se deformar permanentemente, impossibilitando sua reutilização após ser desmontado.

ANEXO 02 – DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO (DETALHAMENTOS)

1

2

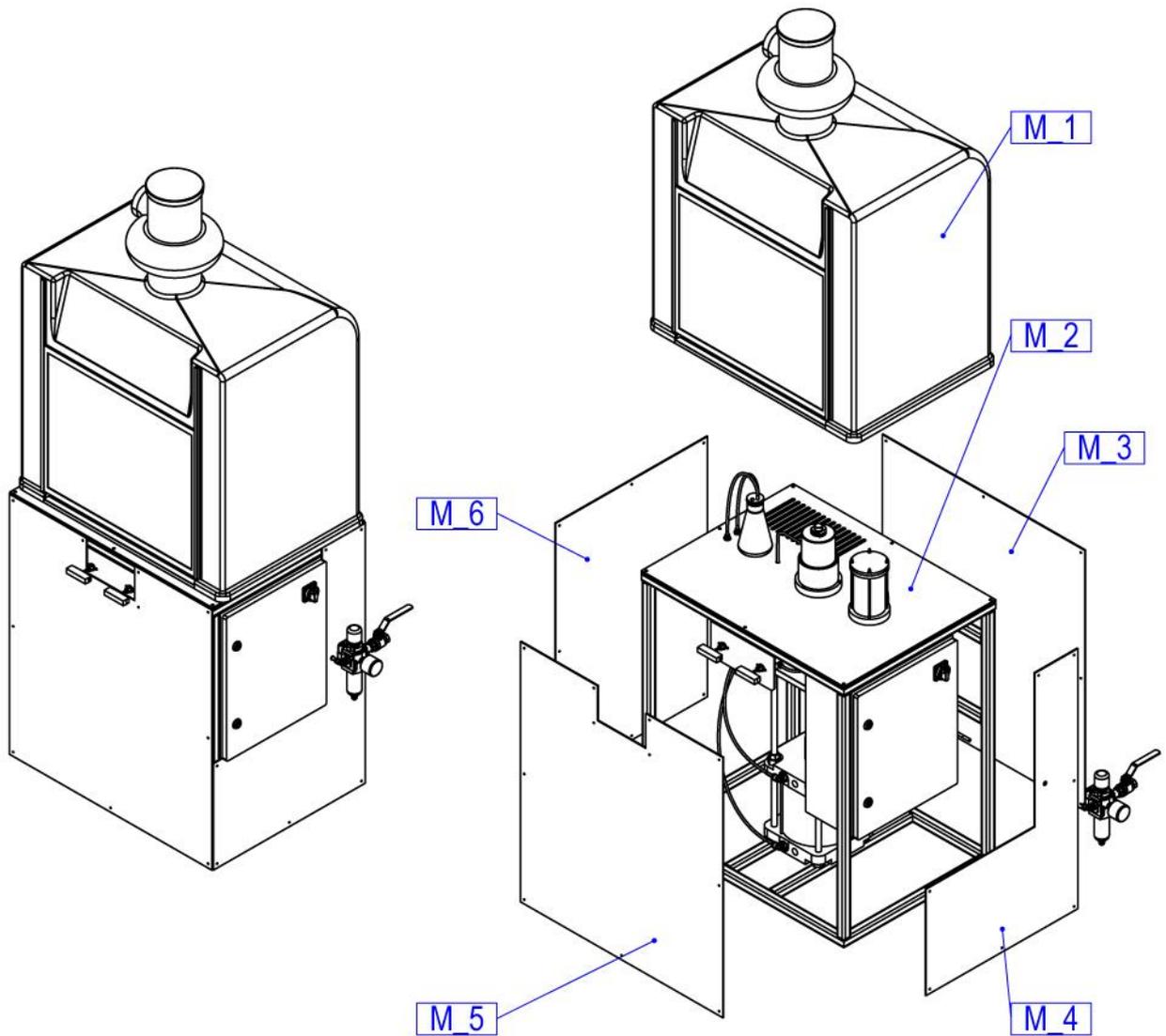
#	Item
M_1	Capela com exaustor
M_2	Tampa superior
M_3	Tampa traseira
M_4	Tampa direita
M_5	Tampa frontal
M_6	Tampa esquerda

D

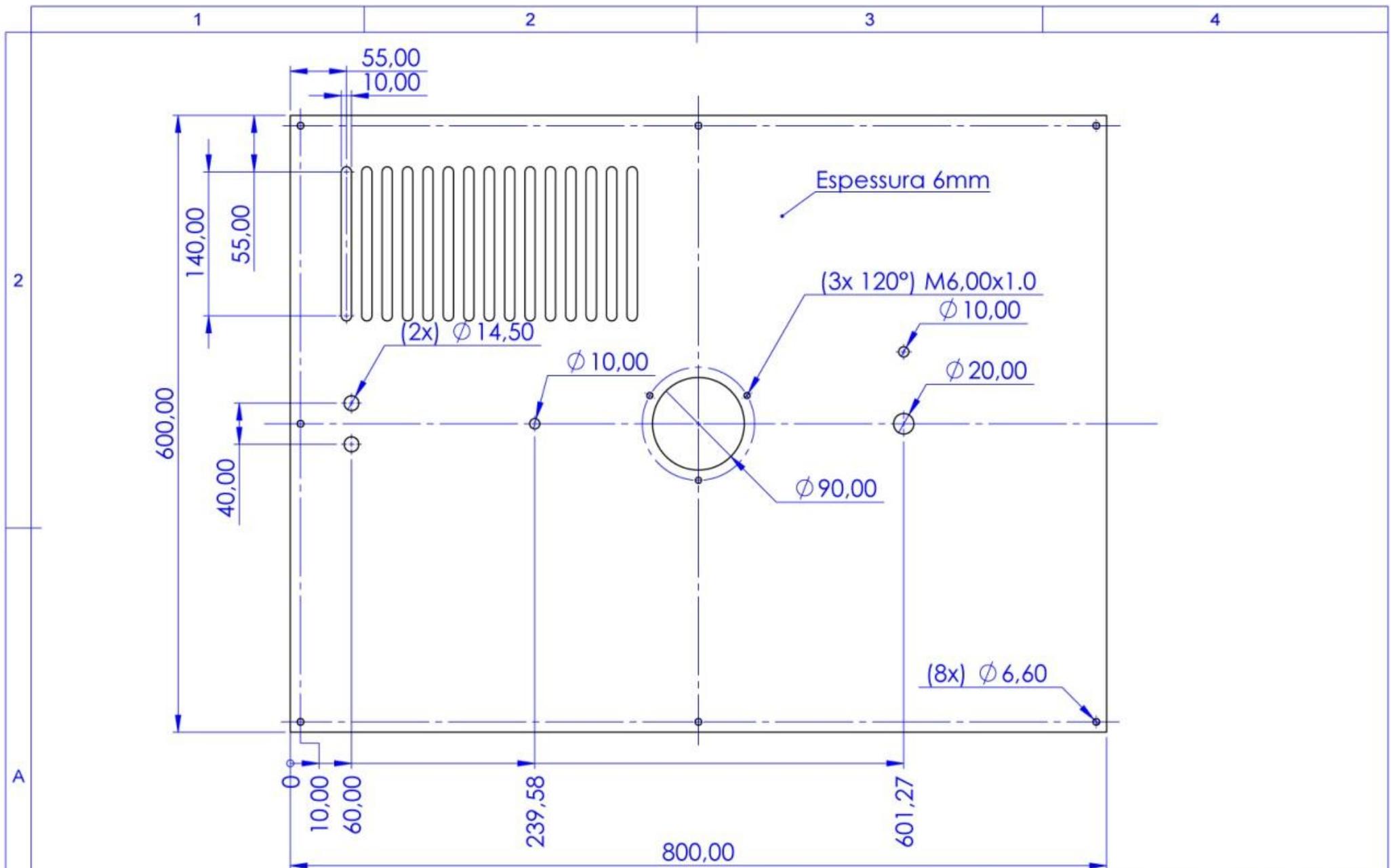
C

B

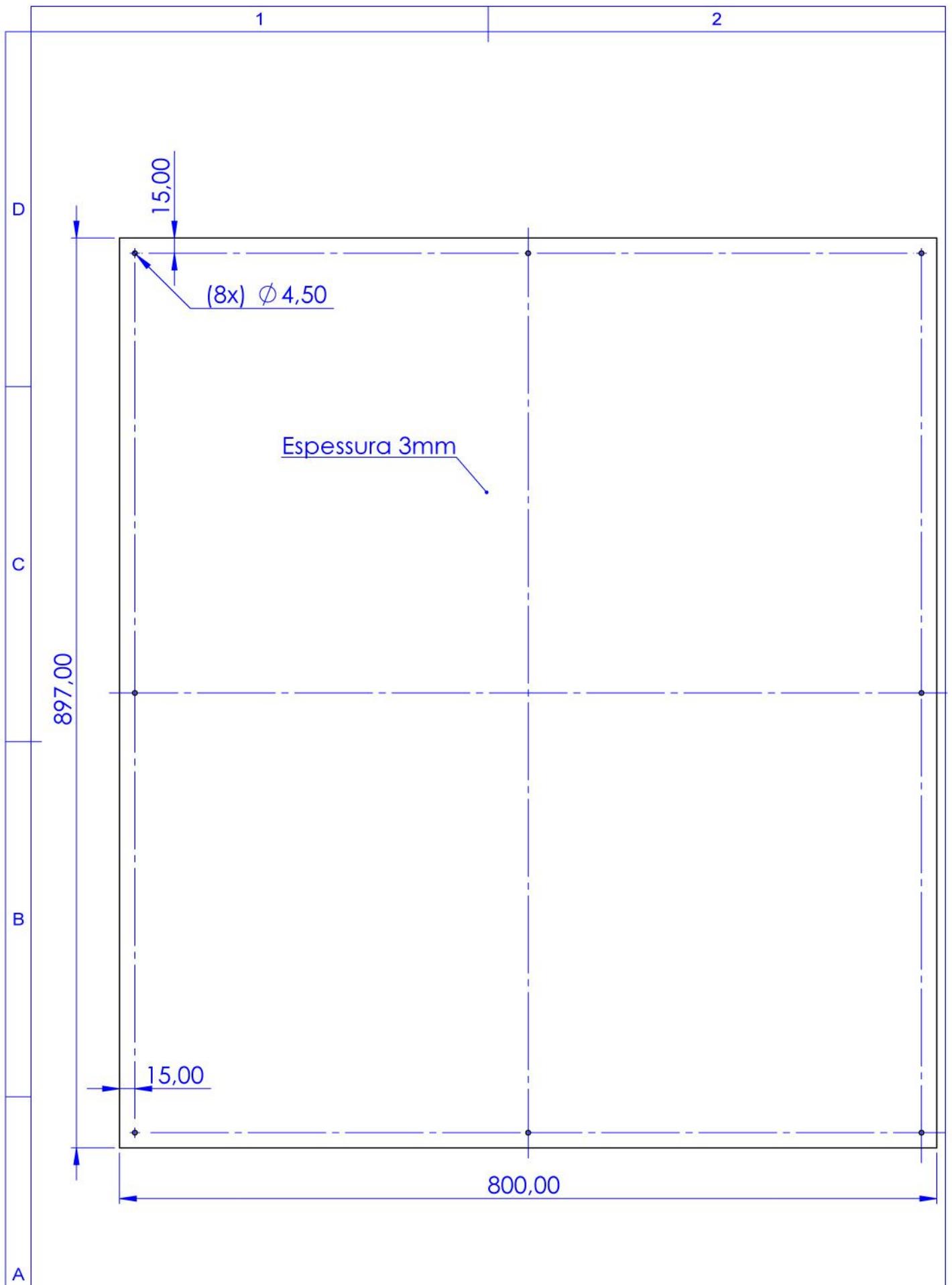
A



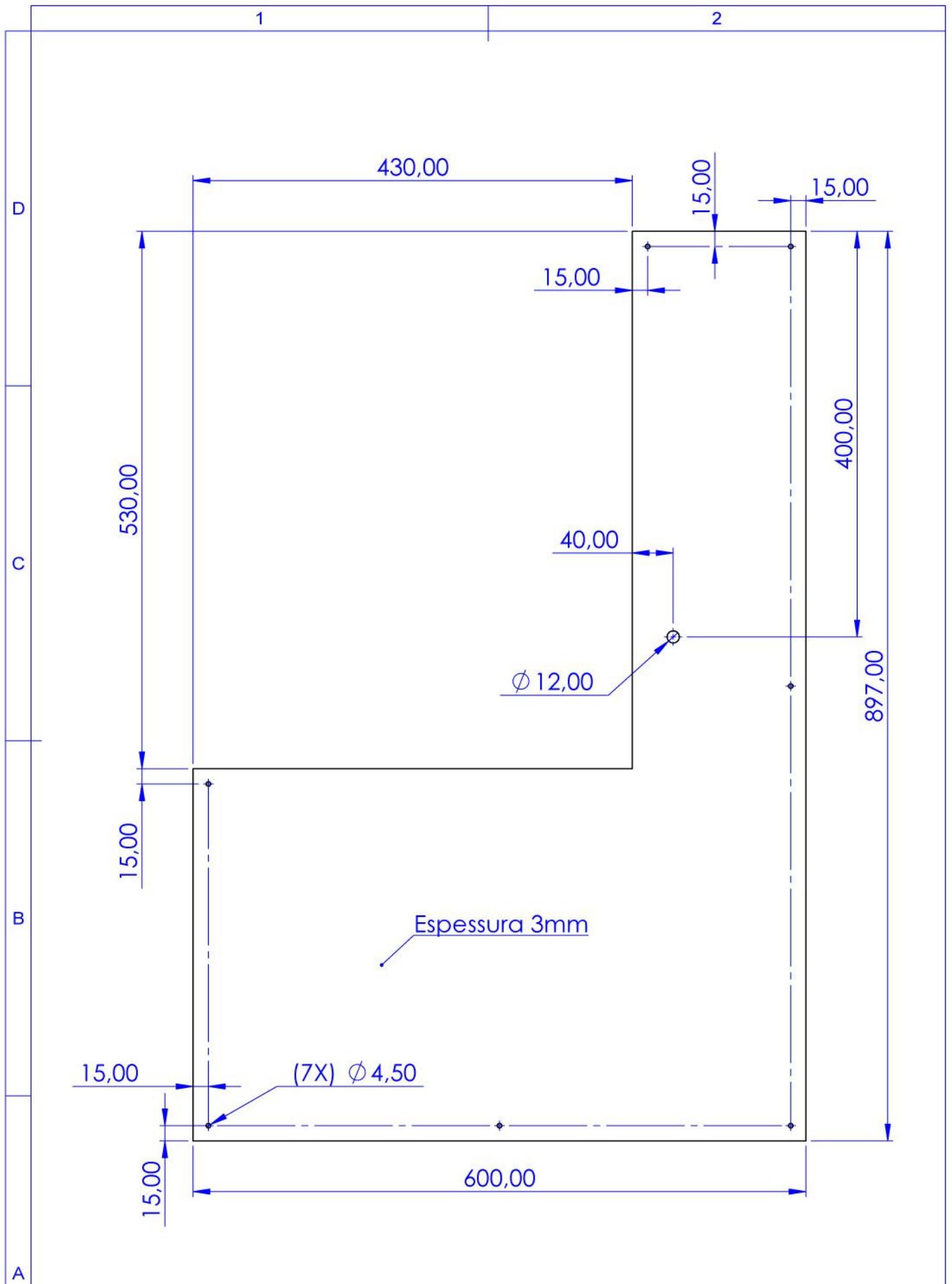
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:20	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO: MONTAGEM GERAL		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M		
			FOLHA: 1/2



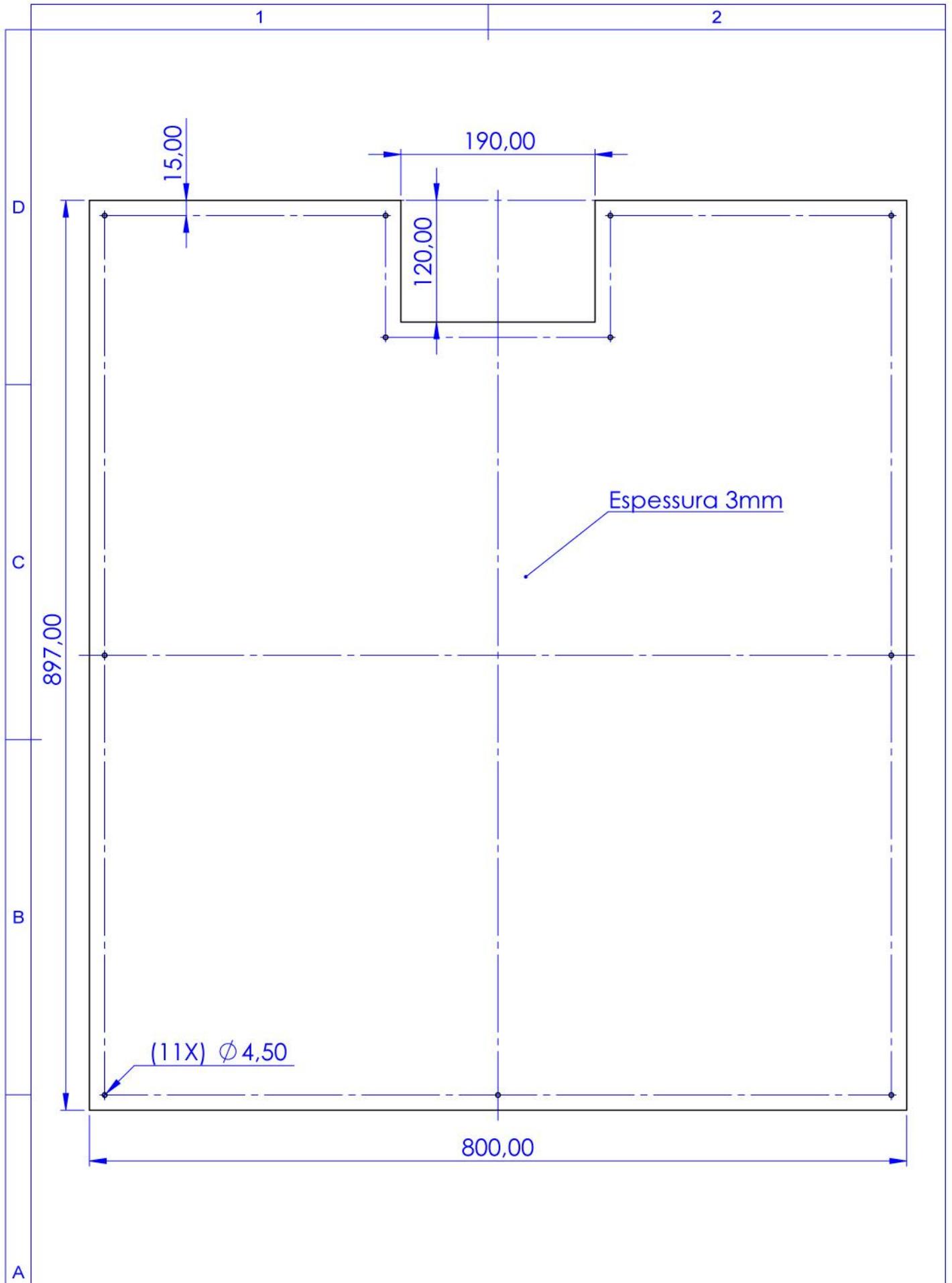
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	TAMPA SUPERIOR		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_2		



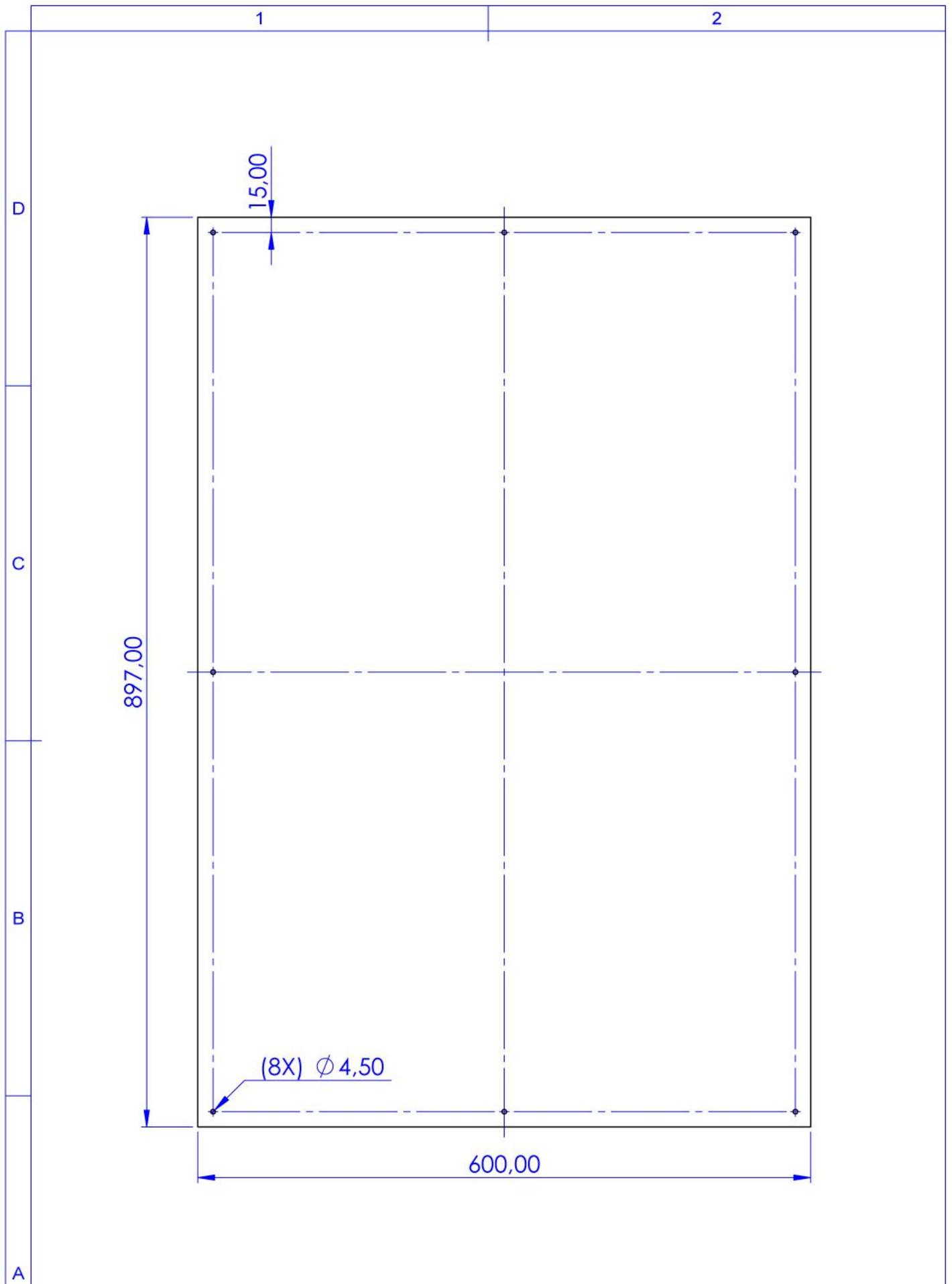
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	TAMPA TRASEIRA		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_3		

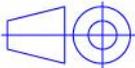


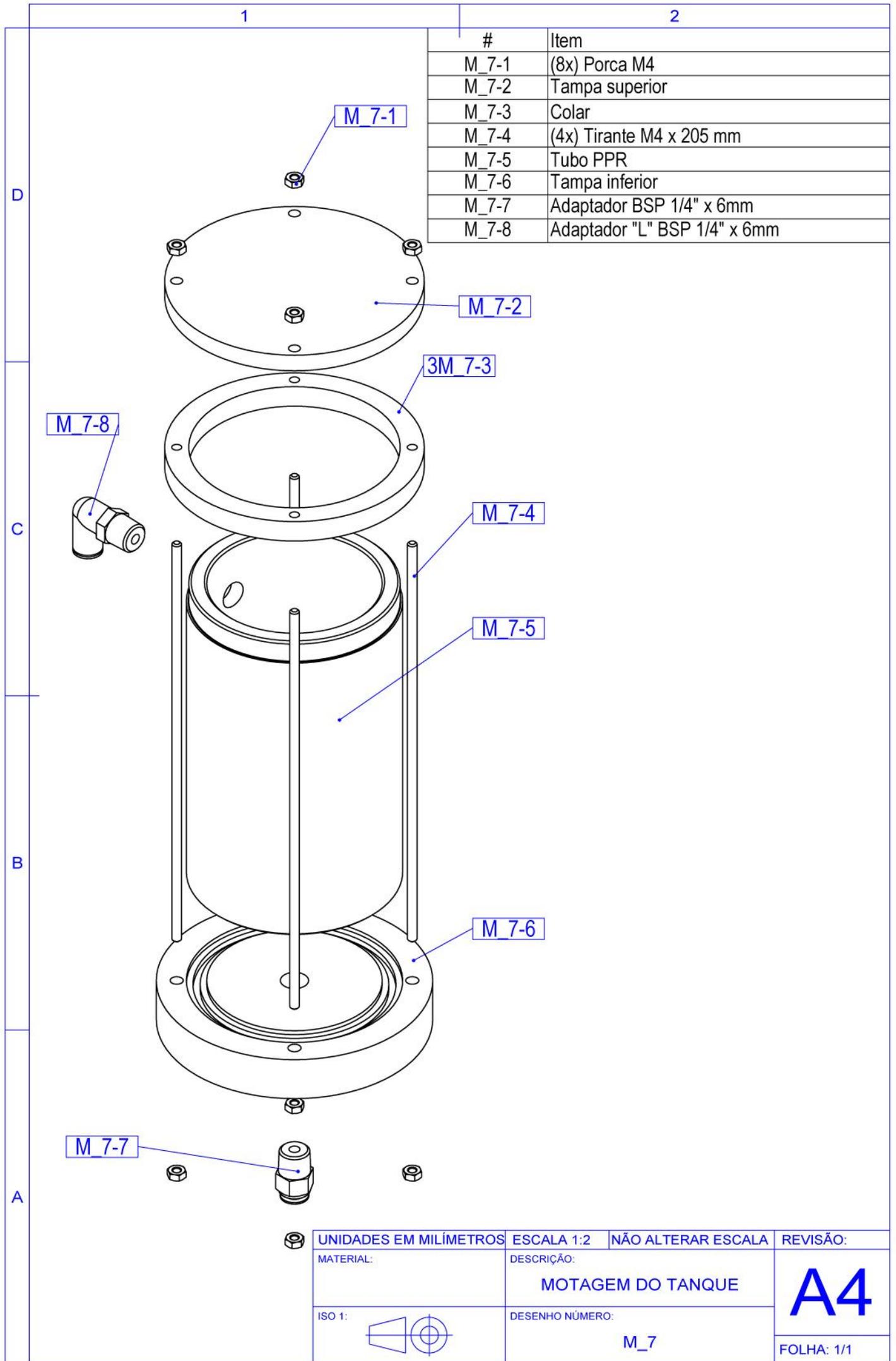
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	TAMPA DIREITA		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_4		



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	TAMPA FRONTAL		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_5		



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	TAMPA ESQUERDA		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_6		



#	Item
M_7-1	(8x) Porca M4
M_7-2	Tampa superior
M_7-3	Colar
M_7-4	(4x) Tirante M4 x 205 mm
M_7-5	Tubo PPR
M_7-6	Tampa inferior
M_7-7	Adaptador BSP 1/4" x 6mm
M_7-8	Adaptador "L" BSP 1/4" x 6mm

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	MOTAGEM DO TANQUE		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_7		

D

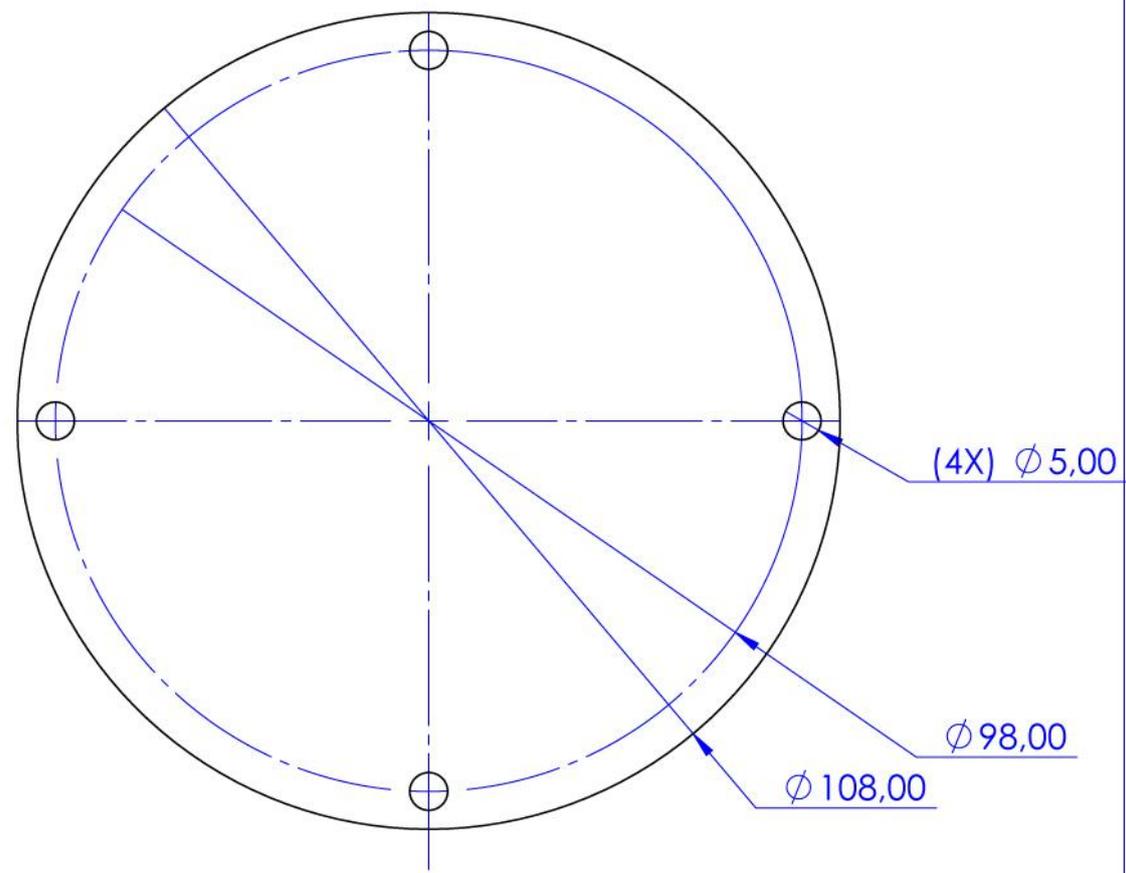
C

B

A

1

2



(4X) ϕ 5,00

ϕ 98,00

ϕ 108,00

8,00

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:	TAMPA	A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO:	M_7-2	

D

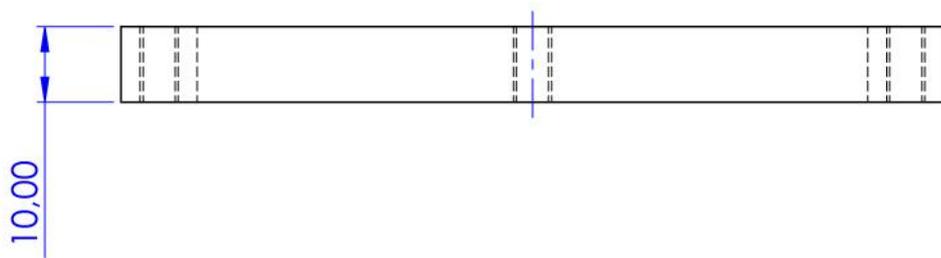
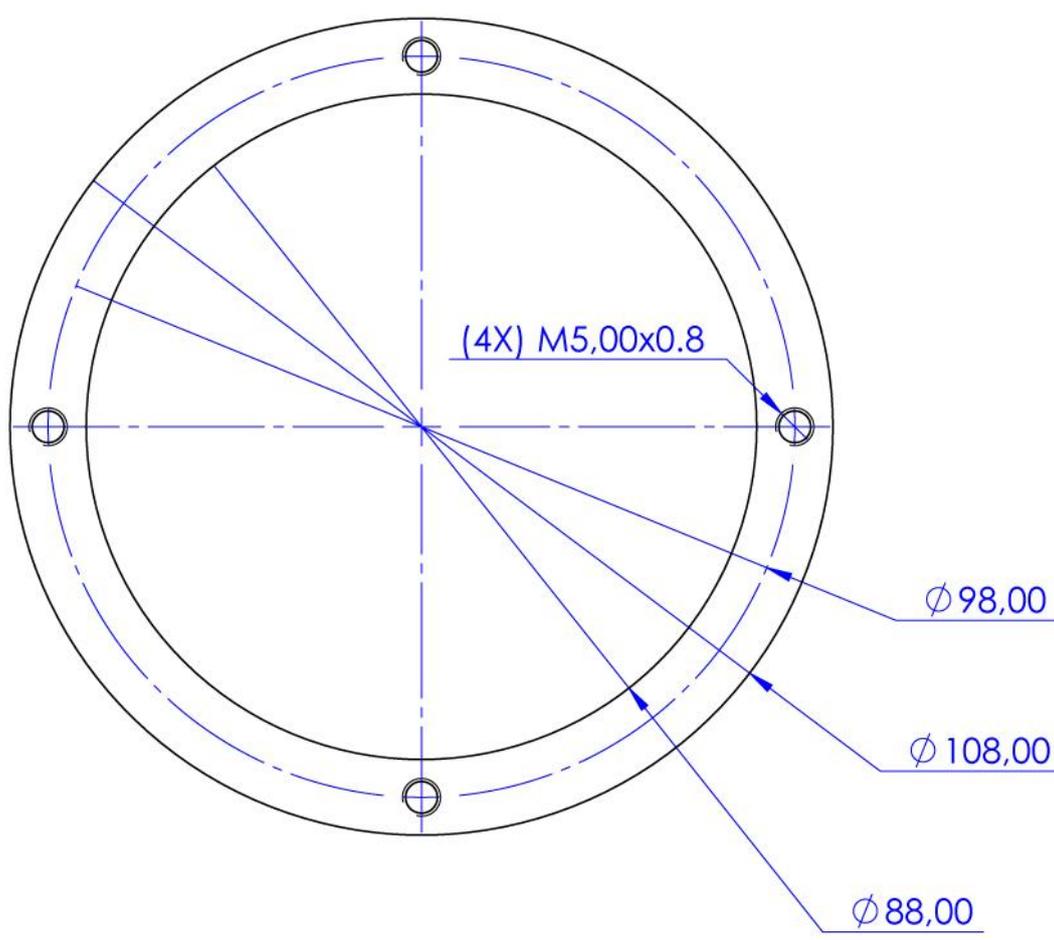
C

B

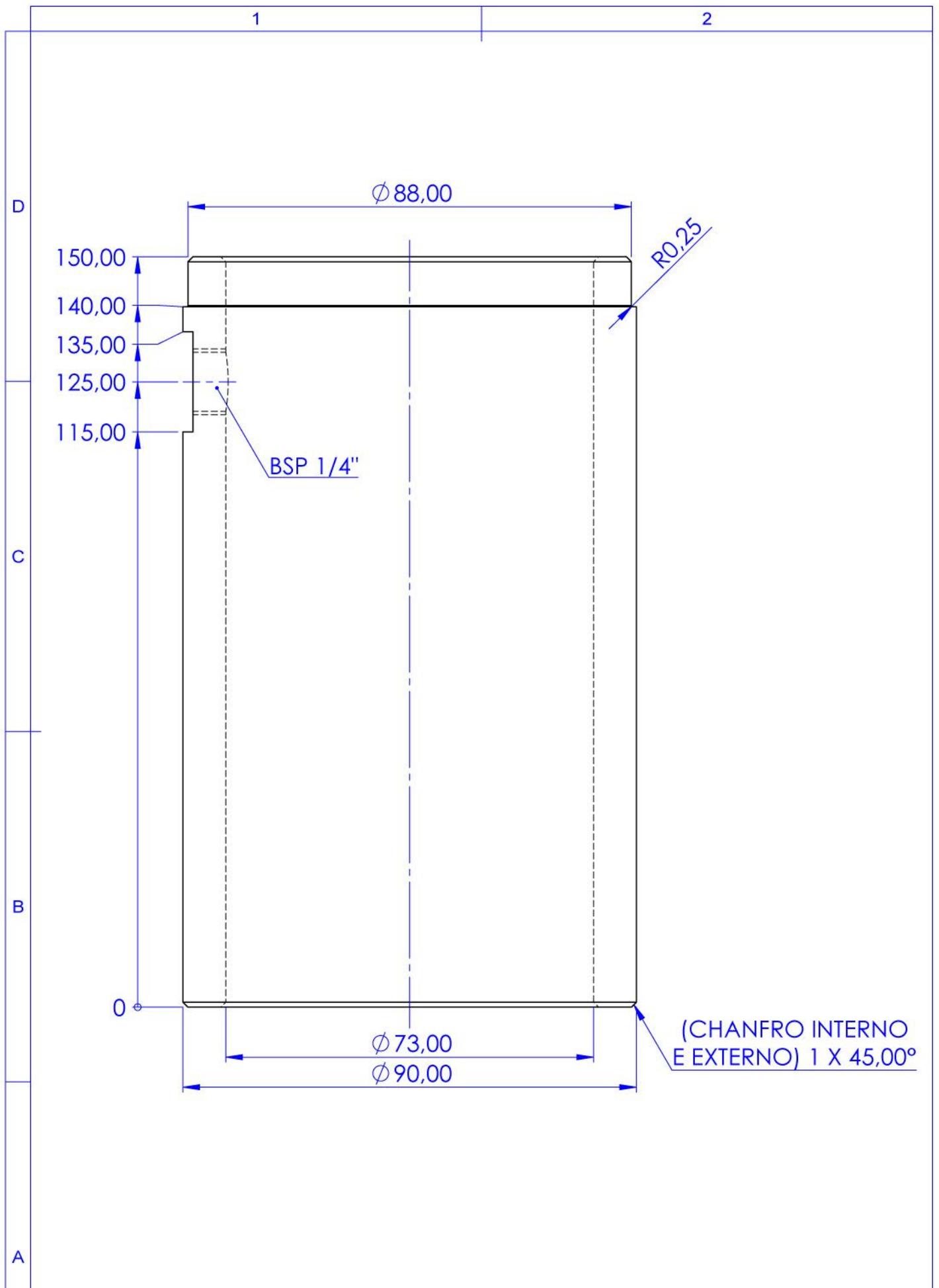
A

1

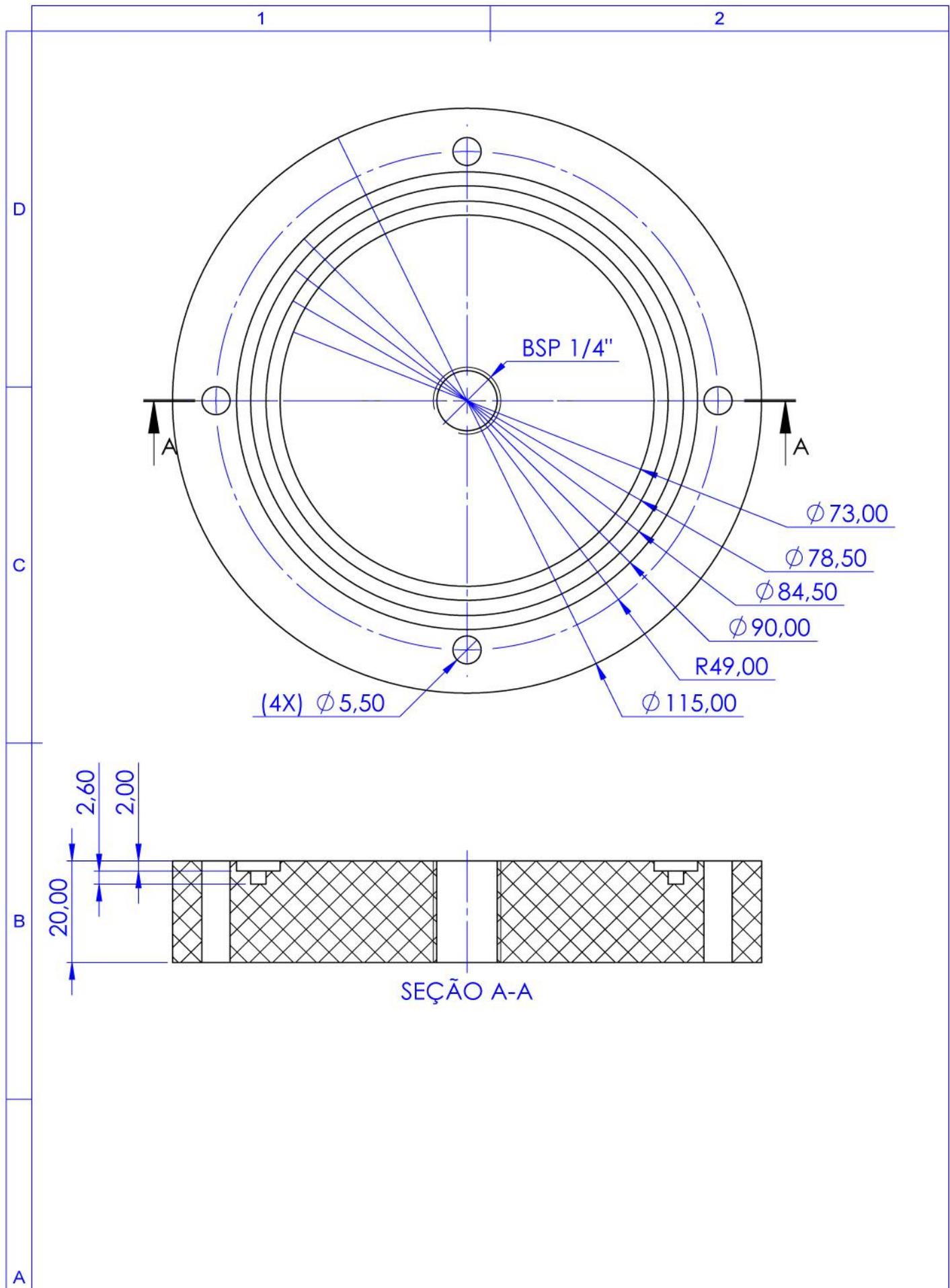
2



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: 7075-T6	DESCRIÇÃO: COLAR	A4	
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_7-3		
			FOLHA: 1/1



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: PPR	DESCRIÇÃO: TANQUE		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_7-5		
			FOLHA: 1/1

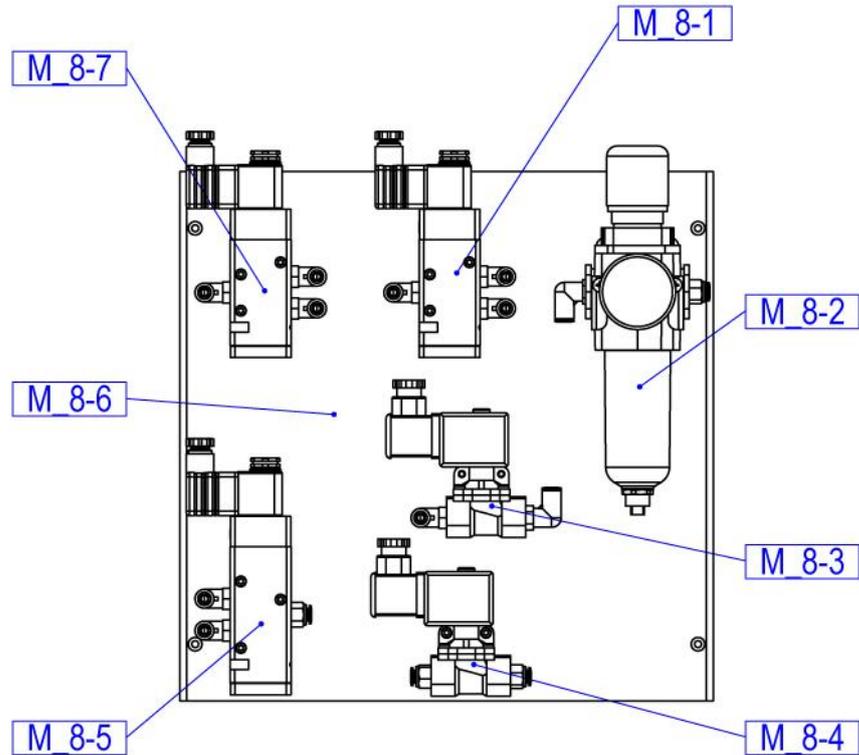


UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: NYLON	DESCRIÇÃO: TAMPA INFERIOR		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_7-6		
			FOLHA: 1/1

1

2

#	Item
M_8-1	Válvula de 3 vias
M_8-2	Filtro regulador 1/2" (10 bar)
M_8-3	Válvula de 2 vias
M_8-4	Válvula de 2 vias
M_8-5	Válvula de 5 vias
M_8-6	Placa base
M_8-7	Válvula de 3 vias

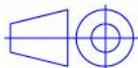


D

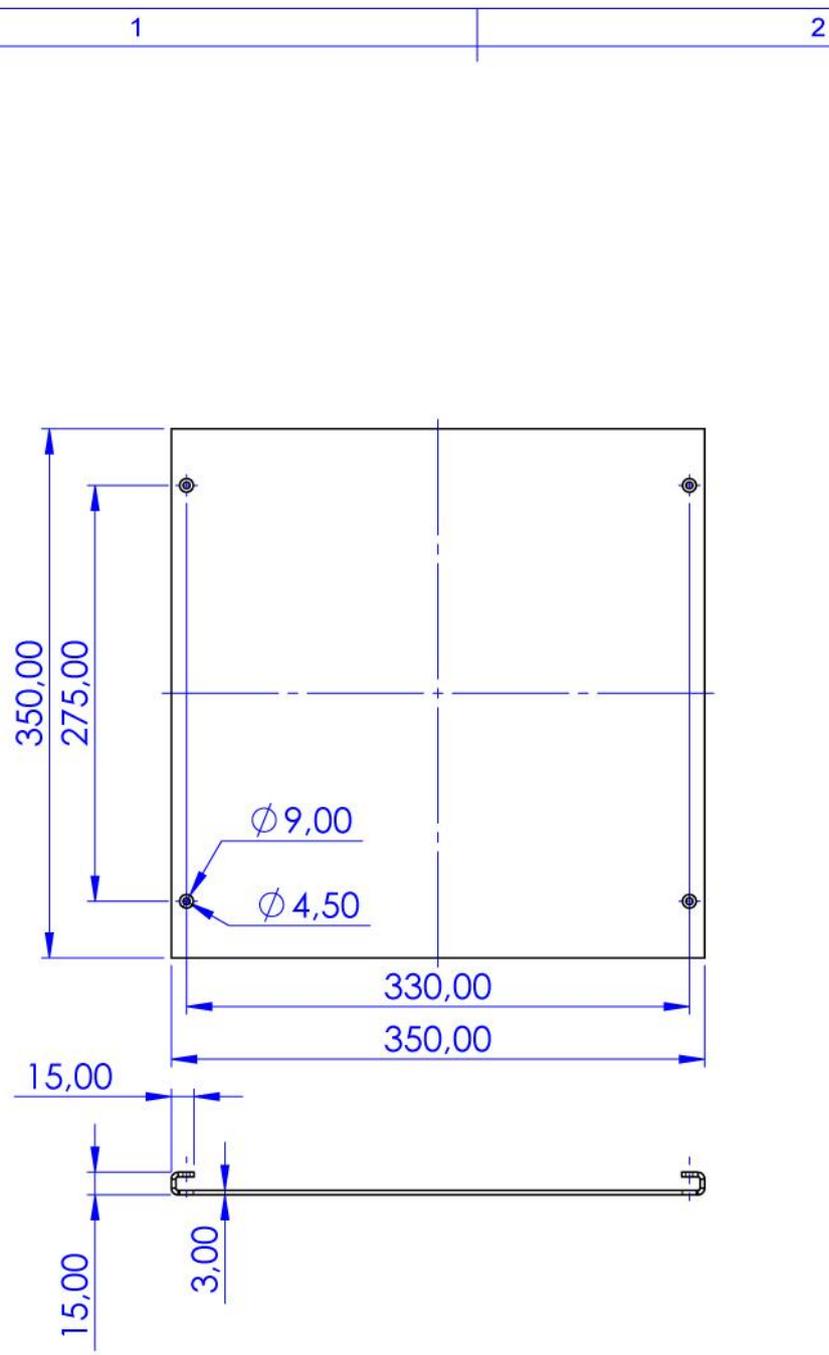
C

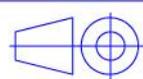
B

A

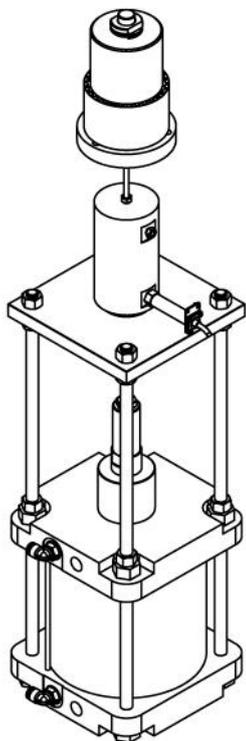
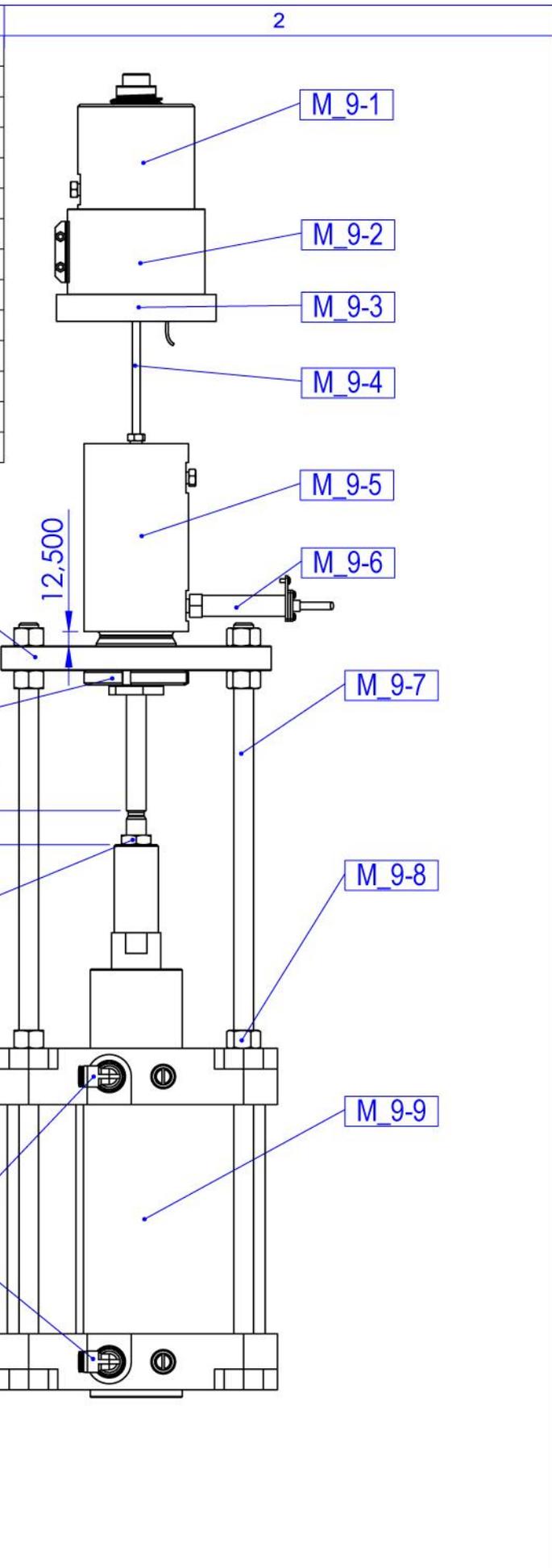
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO: CONJUNTO DE VÁLVULAS		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_8		
			FOLHA: 1/1

D
C
B
A



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		
	M_8-6		FOLHA: 1/1

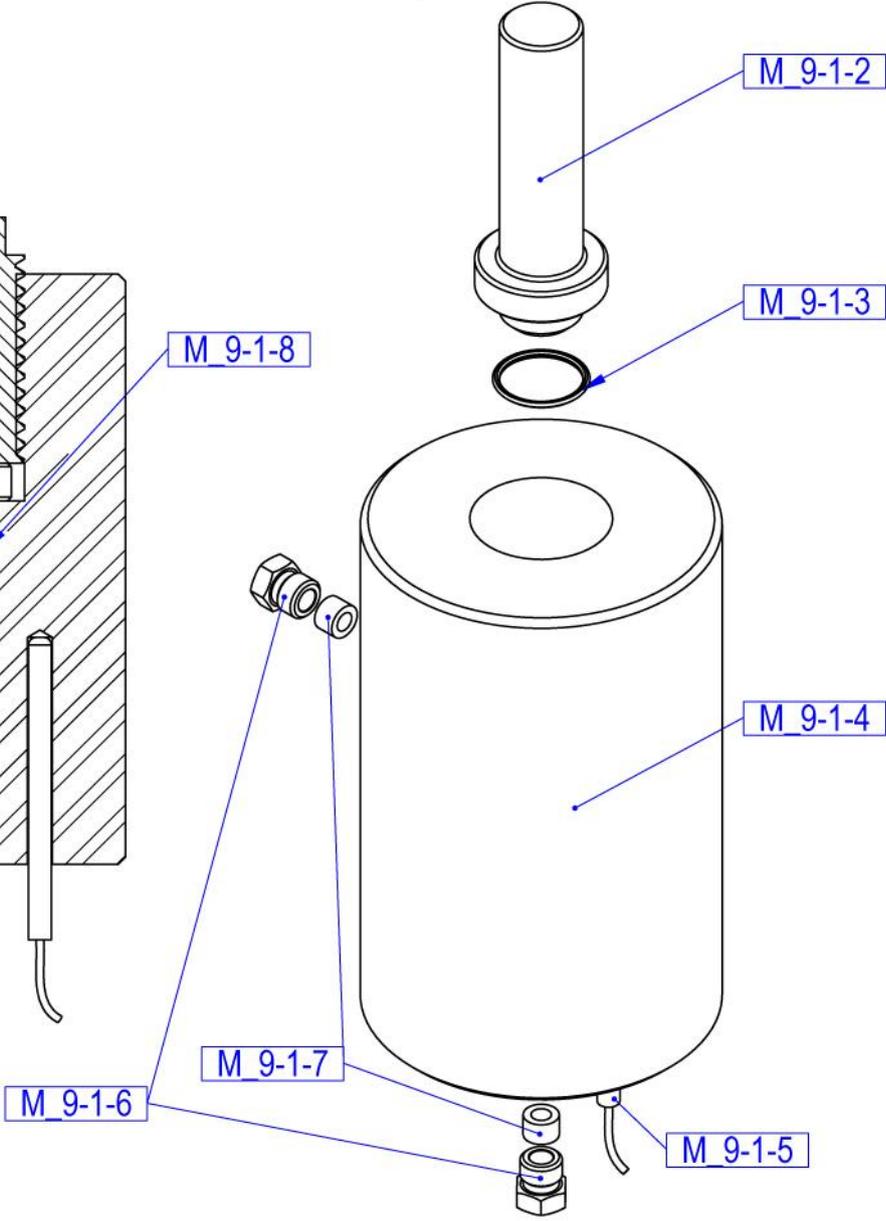
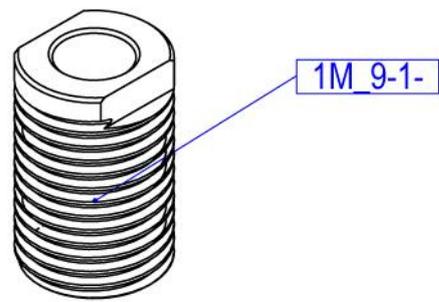
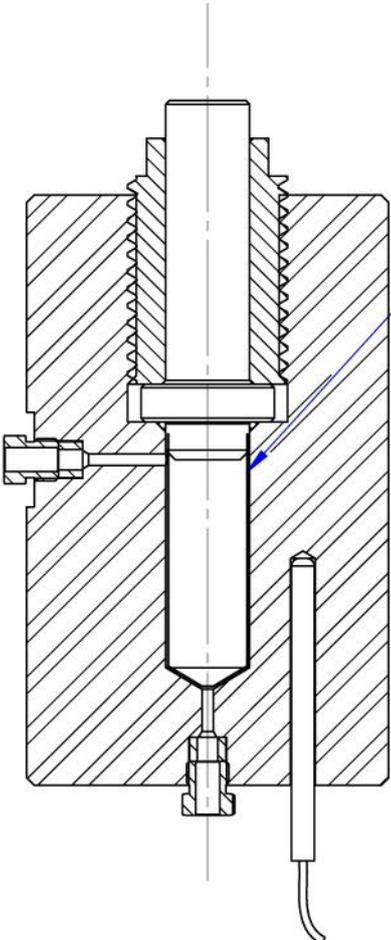
#	Item
M_9-1	Câmara
M_9-2	Aquecedor
M_9-3	Isolamento térmico
M_9-4	Tubo MP 1/4"
M_9-5	Sistema amplificador
M_9-6	Transmissor de pressão 1/4" BSP
M_9-7	(4x) Haste de fixação M16 x 365 mm
M_9-8	(12x) Porca M16
M_9-9	Cilindro ISO ϕ 200 x 100 mm
M_9-10	2(x) Adaptador "L" 1/2" BSP x 8 mm
M_9-11	Porca de encosto M16
M_9-12	Porca de encosto KM 65
M_9-13	Placa base



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	CÉLULA DE ALTA PRESSÃO		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_9		

#	Item
M_9-1-1	Trava da tampa
M_9-1-2	Tampa
M_9-1-3	O-ring
M_9-1-4	Vaso de pressão
M_9-1-5	Termopar (K) \varnothing 6 x 60 mm
M_9-1-6	Glande MP 1/4"
M_9-1-7	Colar MP 1/4"
M_9-1-8	Revestimento interno

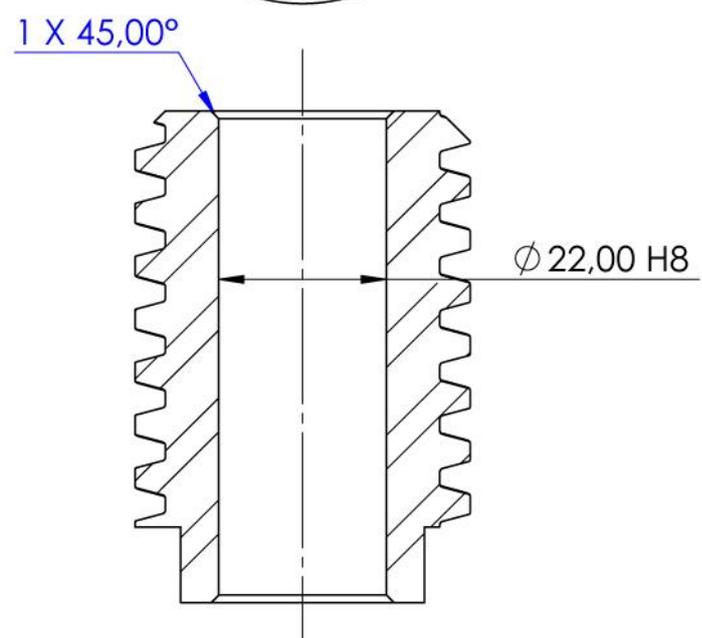
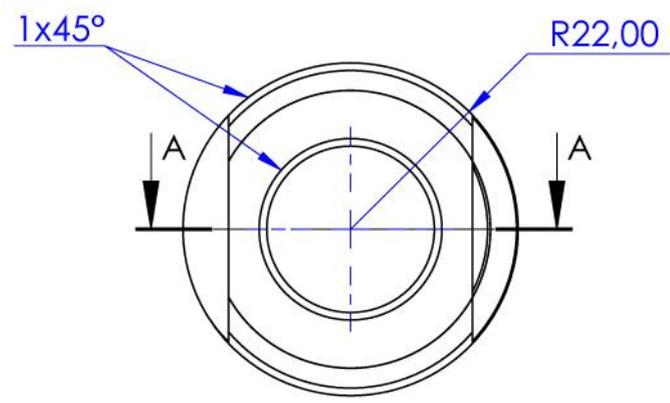
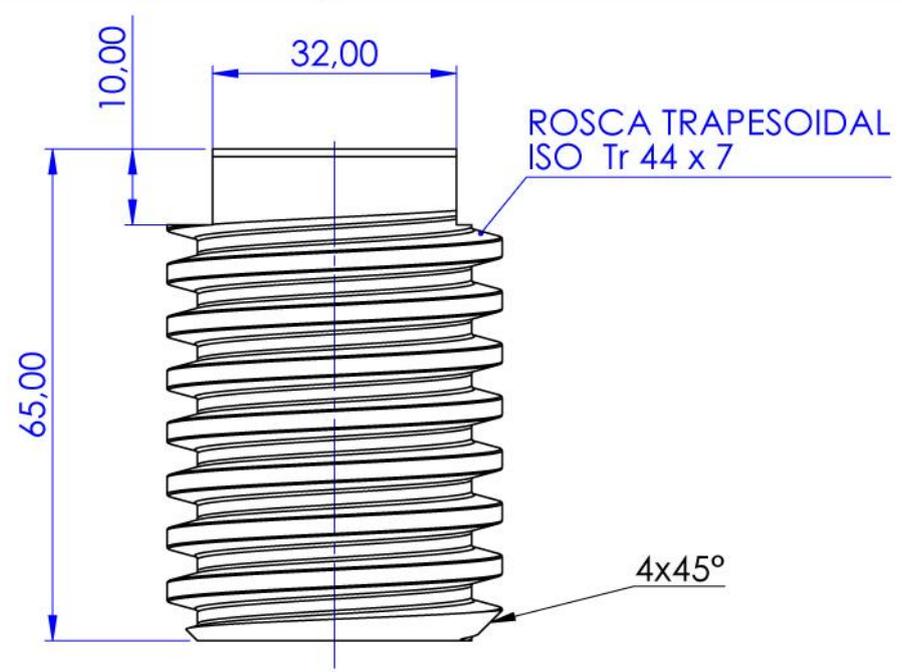
D
C
B
A



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO: CÂMARA		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-1		
			FOLHA: 1/1

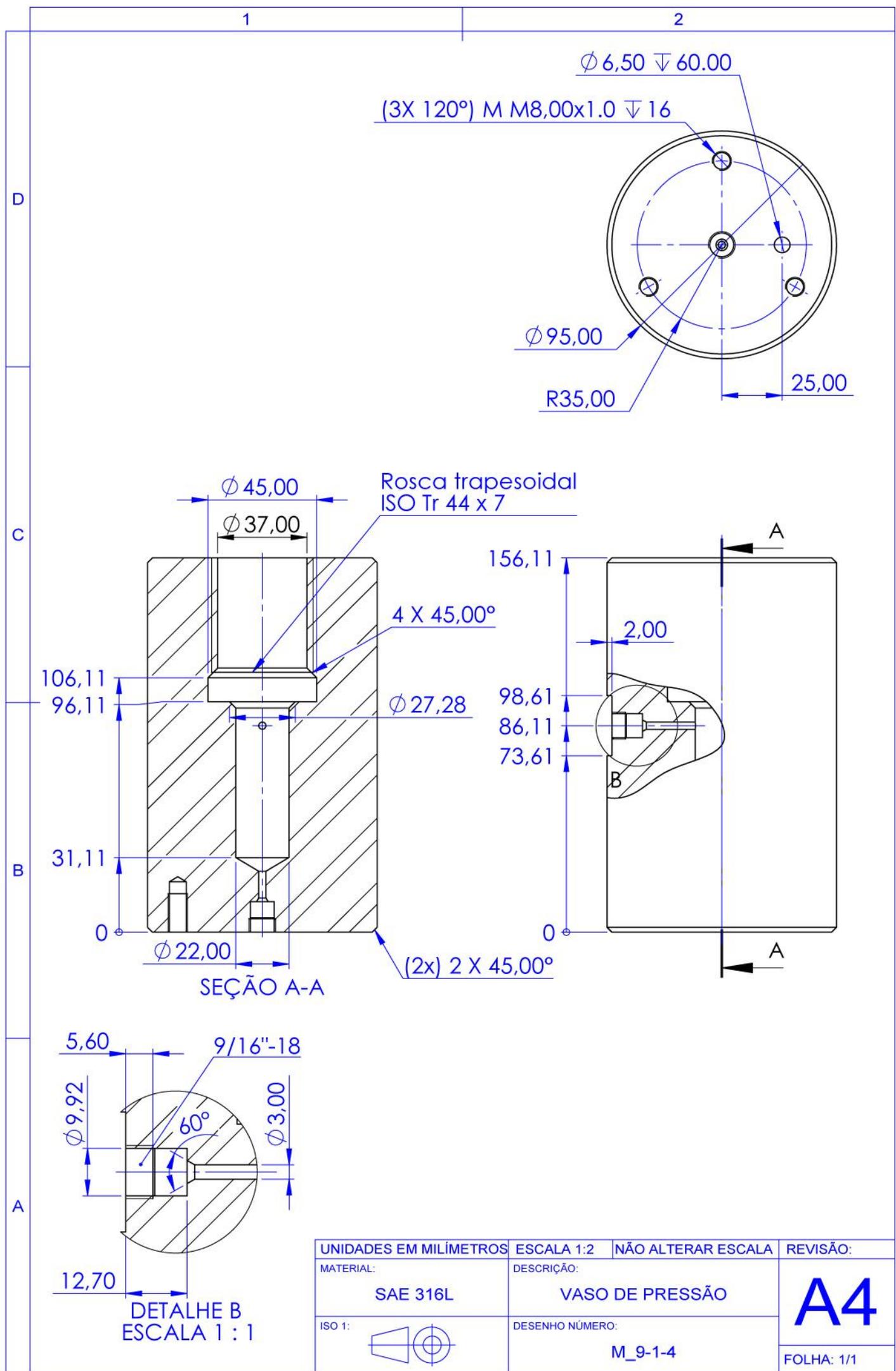
D
C
B
A

1 2

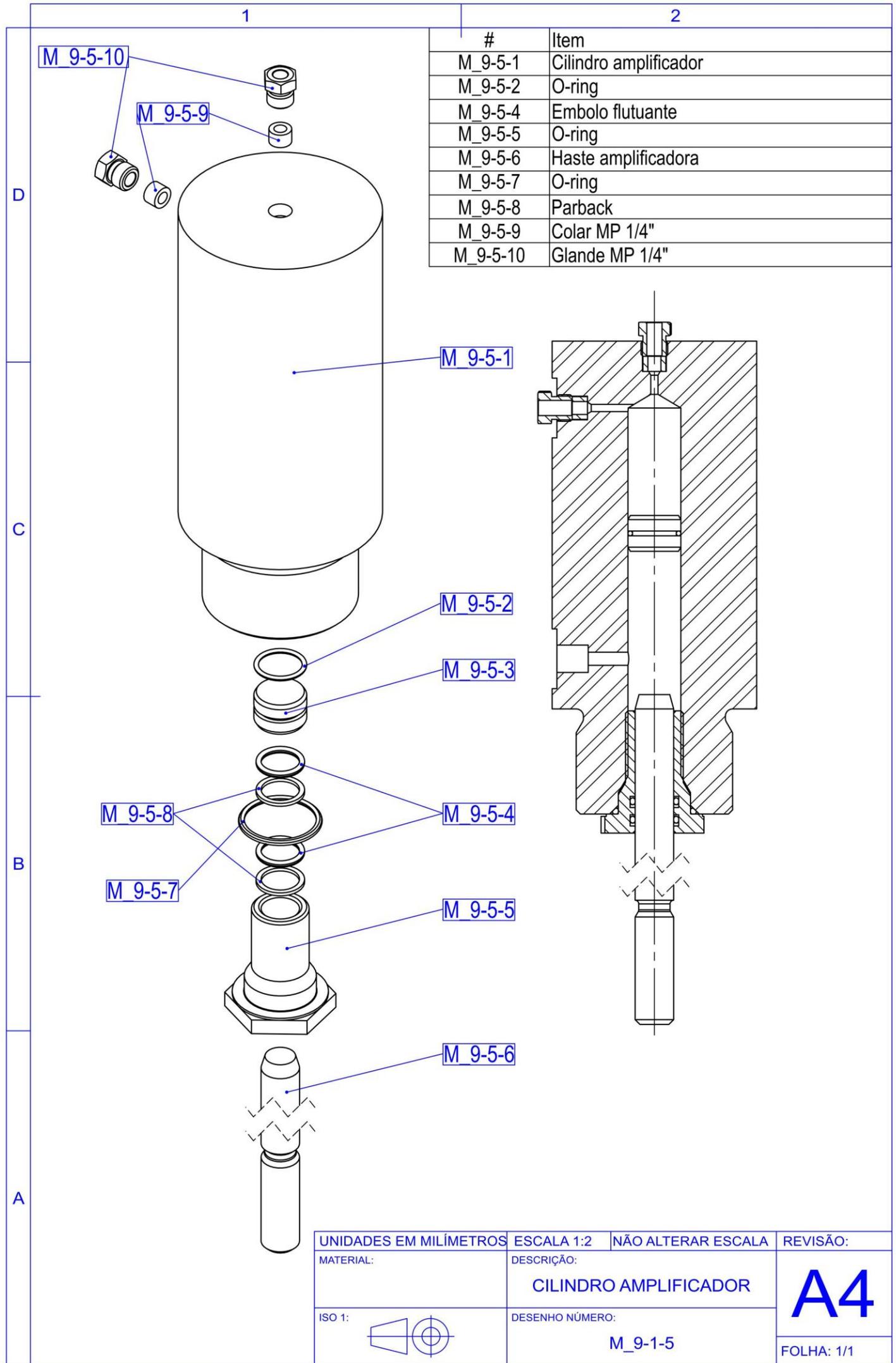


SEÇÃO A-A

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: AISI 1045	DESCRIÇÃO: TRAVA	A4	
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-1-1		
			FOLHA: 1/1

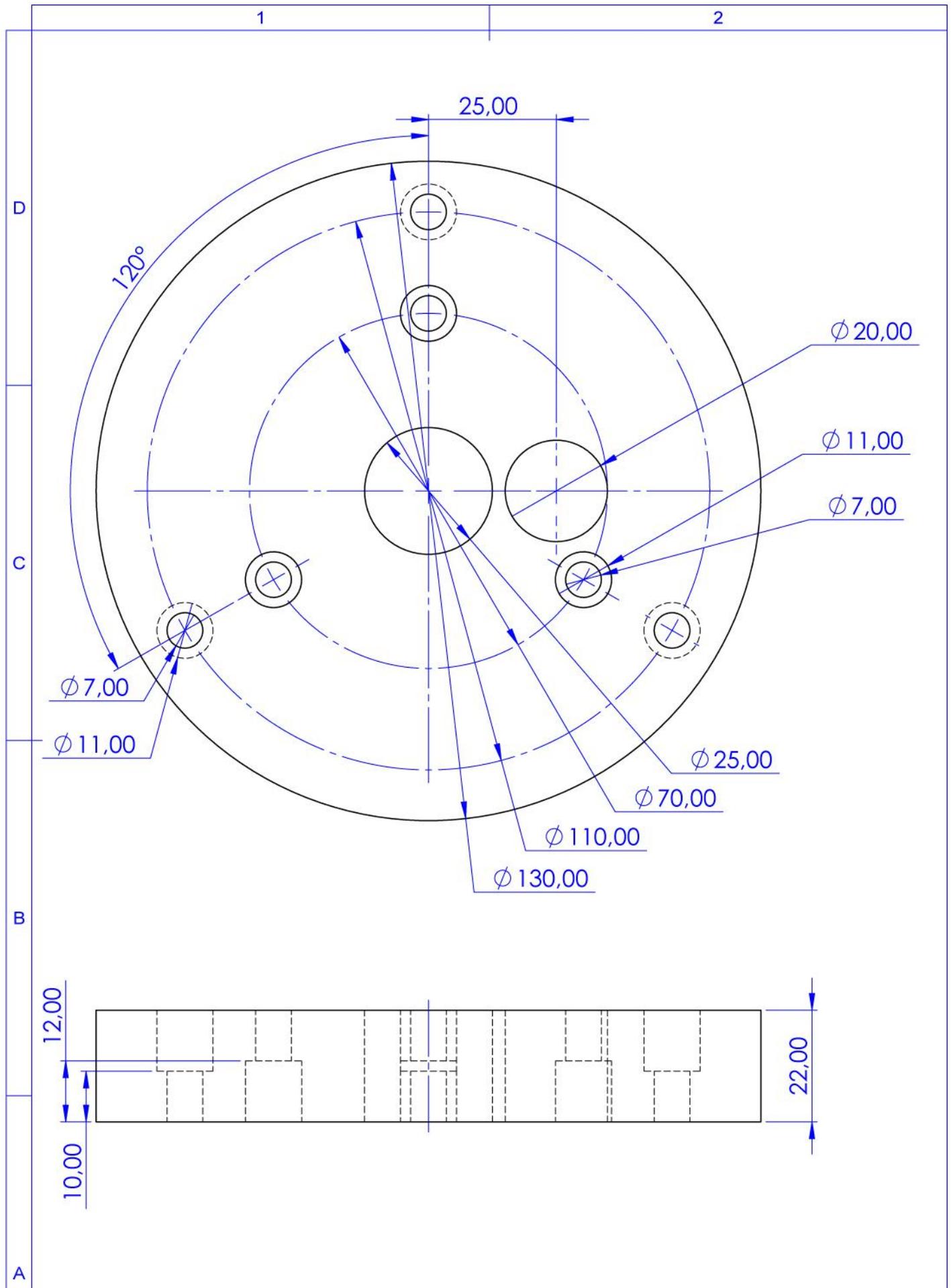


UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
SAE 316L	VASO DE PRESSÃO		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_9-1-4		



#	Item
M_9-5-1	Cilindro amplificador
M_9-5-2	O-ring
M_9-5-4	Embolo flutuante
M_9-5-5	O-ring
M_9-5-6	Haste amplificadora
M_9-5-7	O-ring
M_9-5-8	Parback
M_9-5-9	Colar MP 1/4"
M_9-5-10	Glande MP 1/4"

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO: CILINDRO AMPLIFICADOR		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-1-5		
			FOLHA: 1/1



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: CELERON OU PTFE	DESCRIÇÃO: ISOLAMENTO TERMICO		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-3		
			FOLHA: 1/1

D

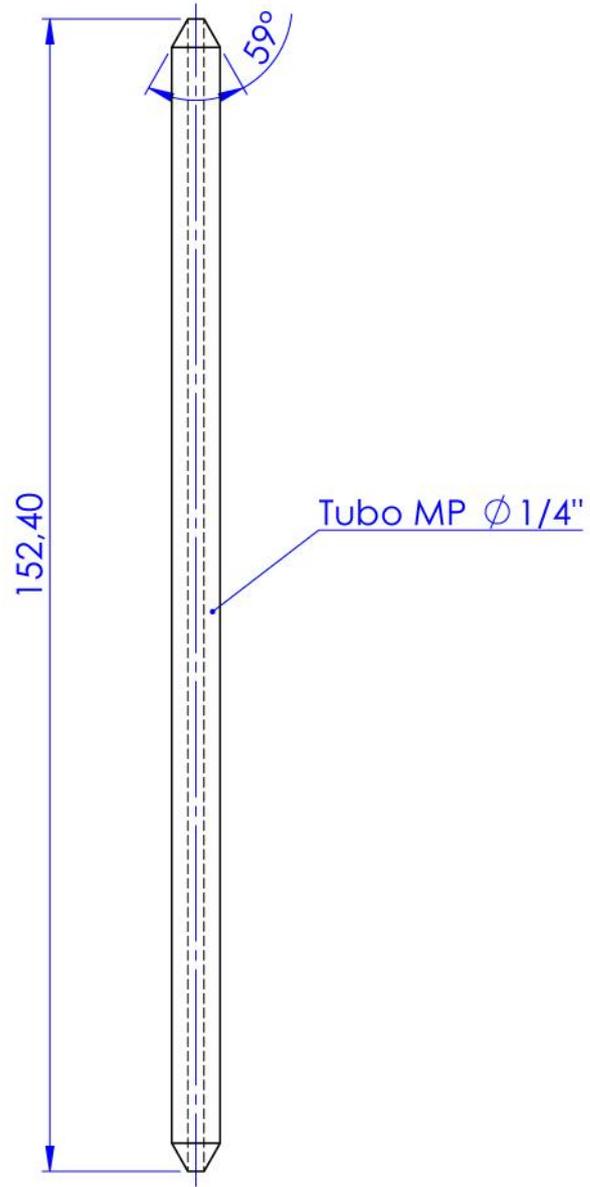
C

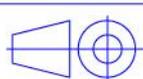
B

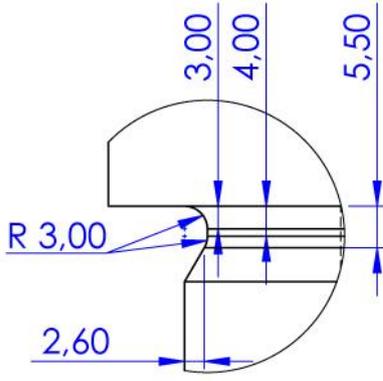
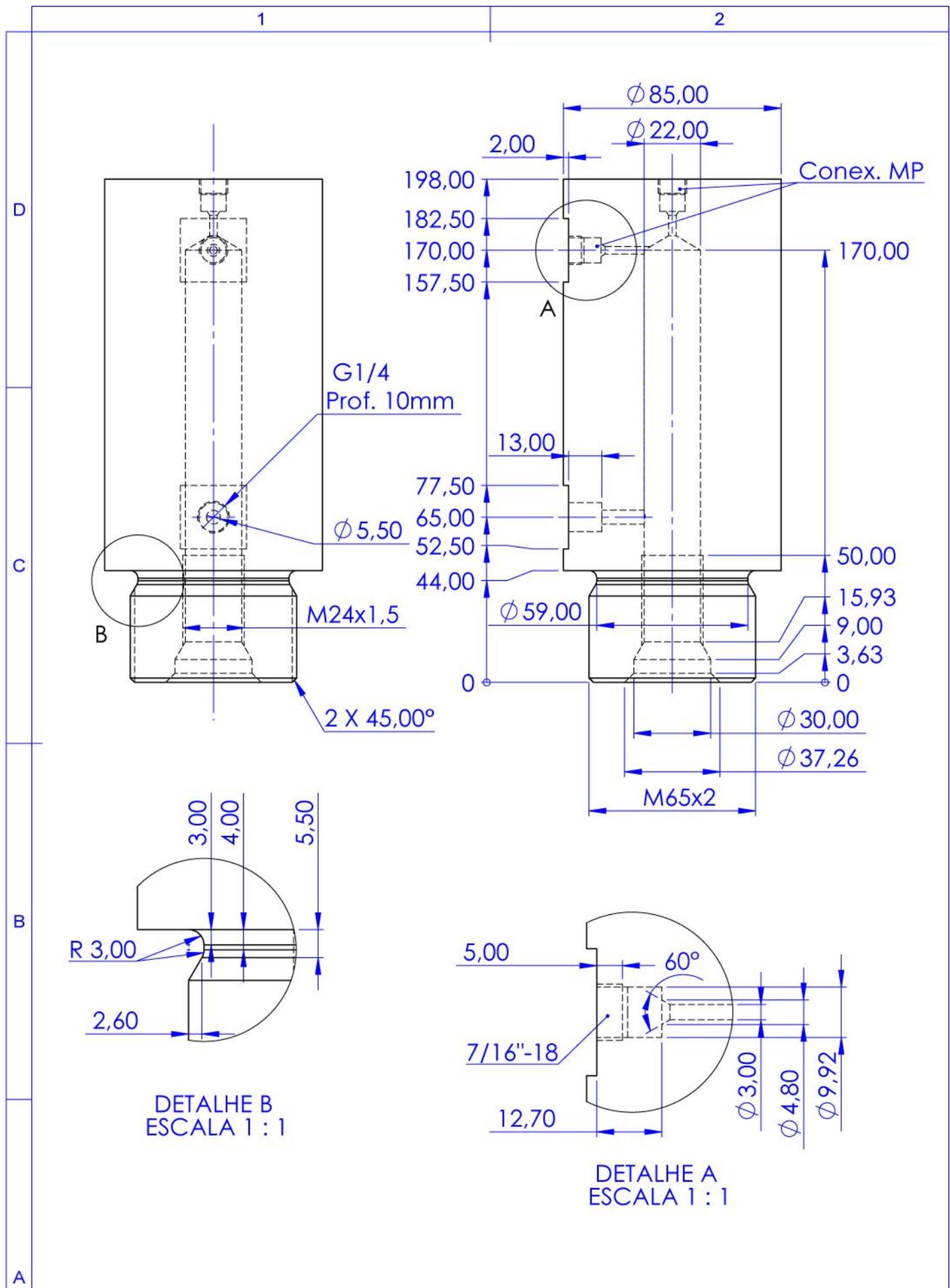
A

1

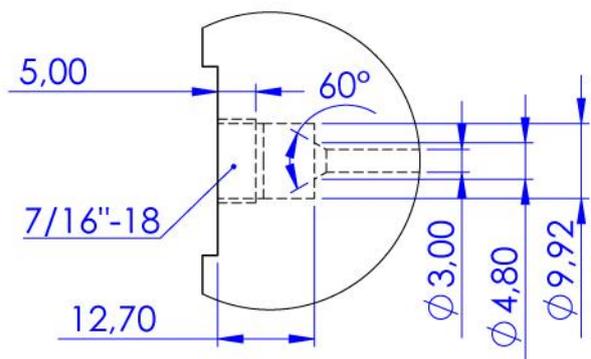
2



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO: TUBO MP 1/4"		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-4		
			FOLHA: 1/1



DETALHE B
ESCALA 1 : 1



DETALHE A
ESCALA 1 : 1

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: SAE 316L	DESCRIÇÃO: CIL. AMPLIFICADOR		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-5-1		
			FOLHA: 1/1

1

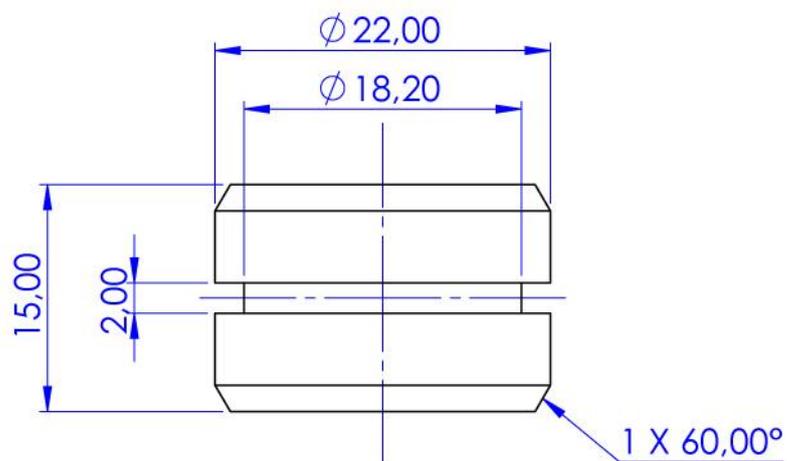
2

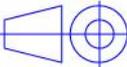
D

C

B

A



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 2:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: NYLON	DESCRIÇÃO: EMBOLO FLUTUANTE	A4	
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-5-3		
			FOLHA: 1/1

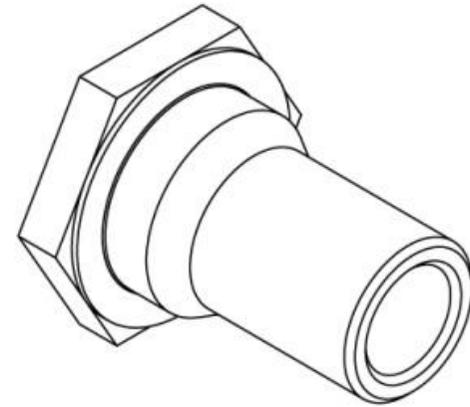
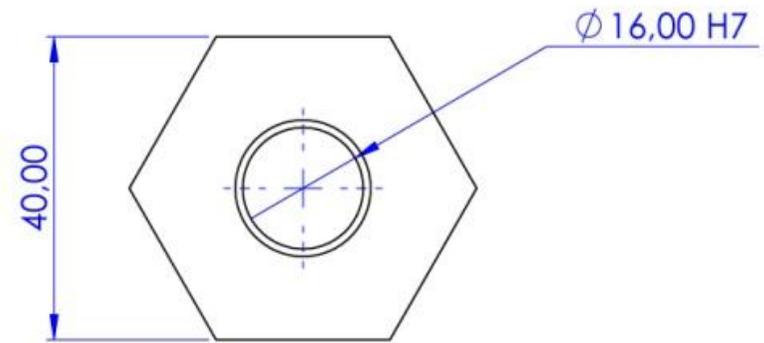
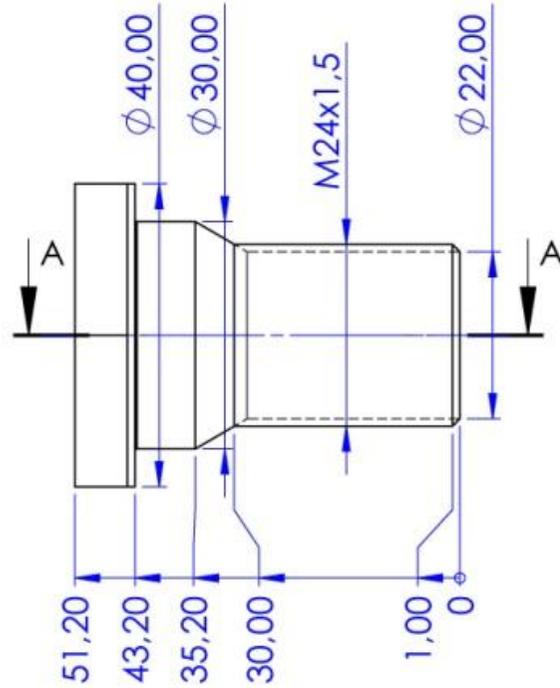
1

2

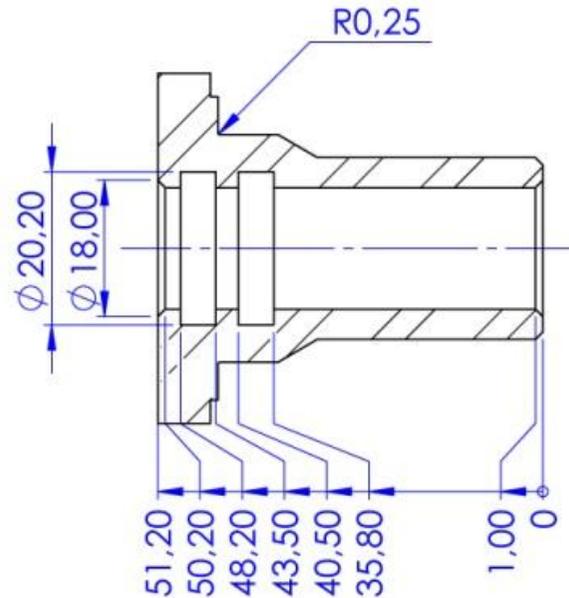
3

4

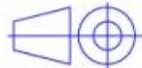
2



A

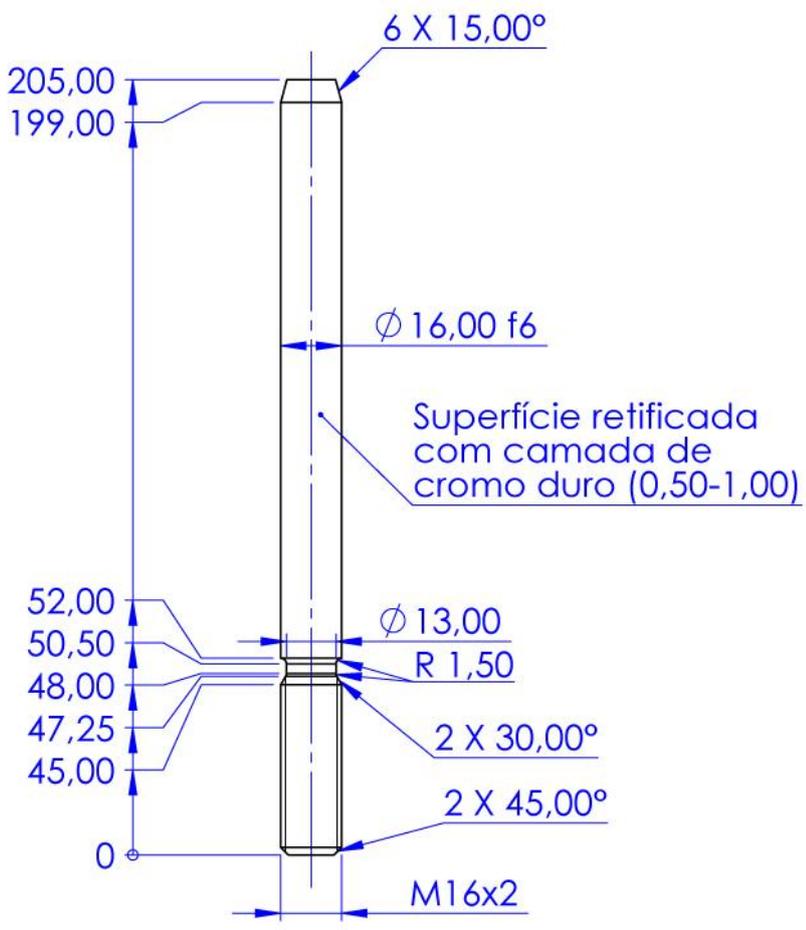


SEÇÃO A-A

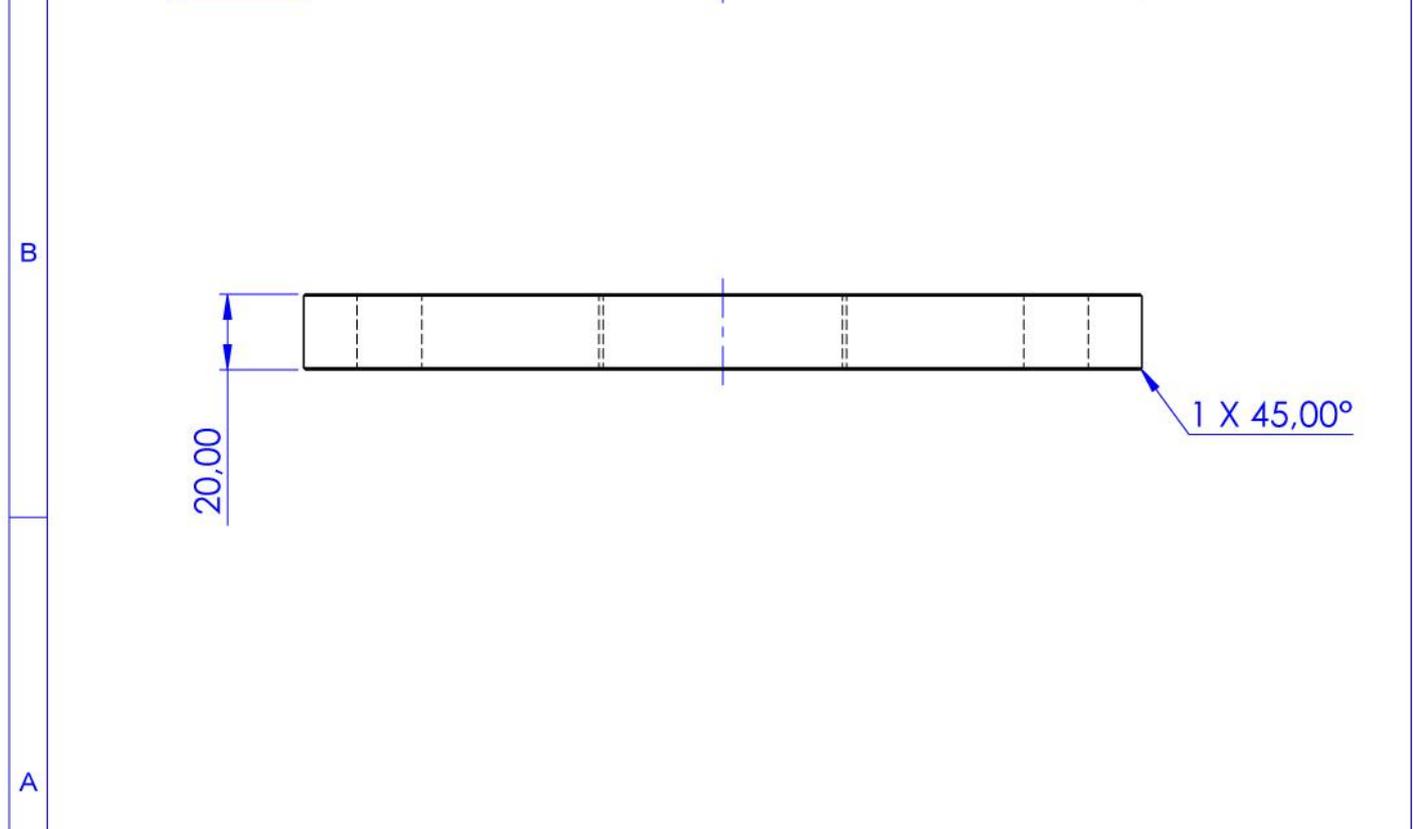
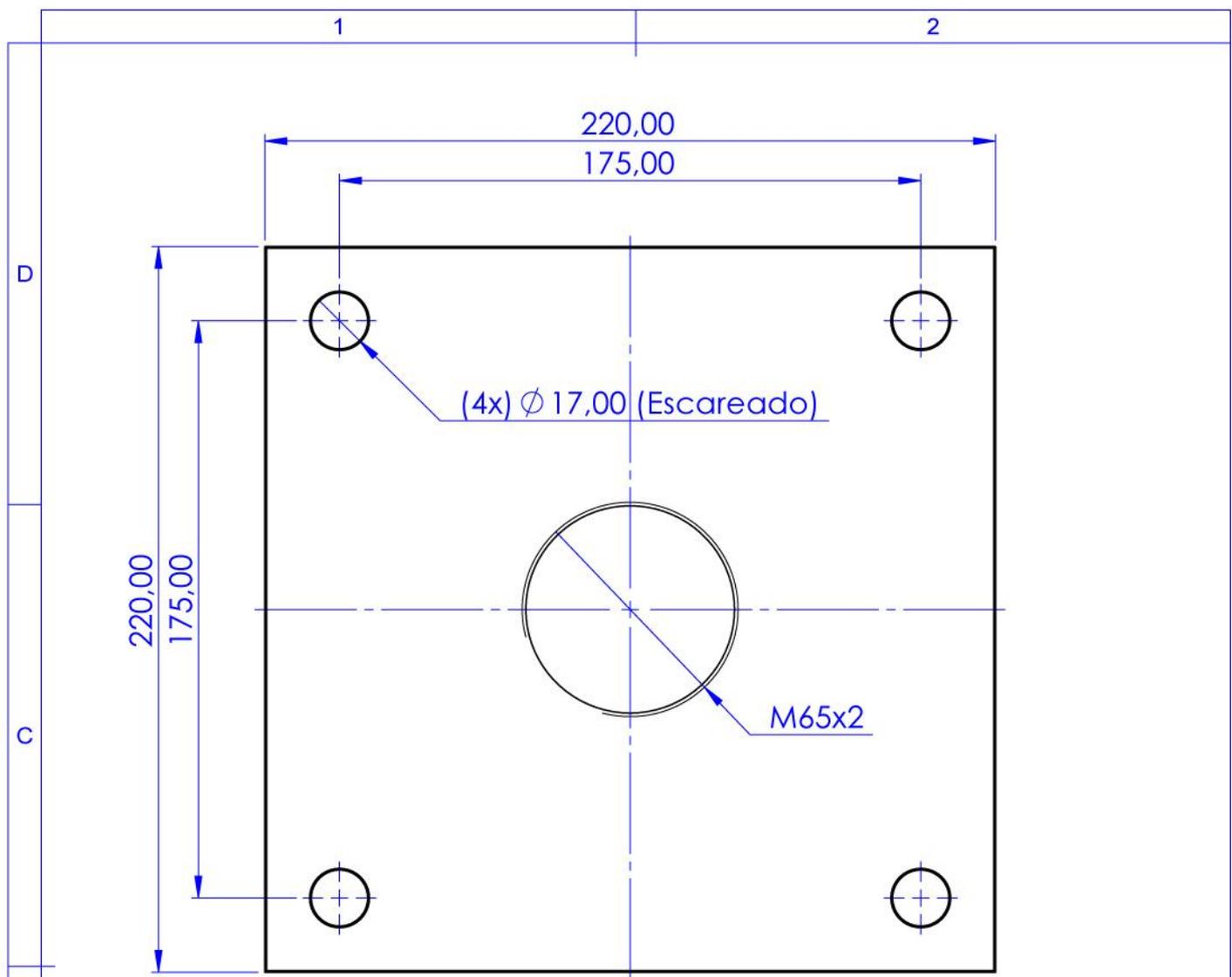
UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: AISI 1045	DESCRIÇÃO: TAMPA		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-5-5		FOLHA: 1/1

D
C
B
A

1 2



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: AISI 1045	DESCRIÇÃO: DESCRIÇÃO		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-5-6		
			FOLHA: 1/1



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: AISI 1045	DESCRIÇÃO: ACOPLAMENTO		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_9-13		
			FOLHA: 1/1

1

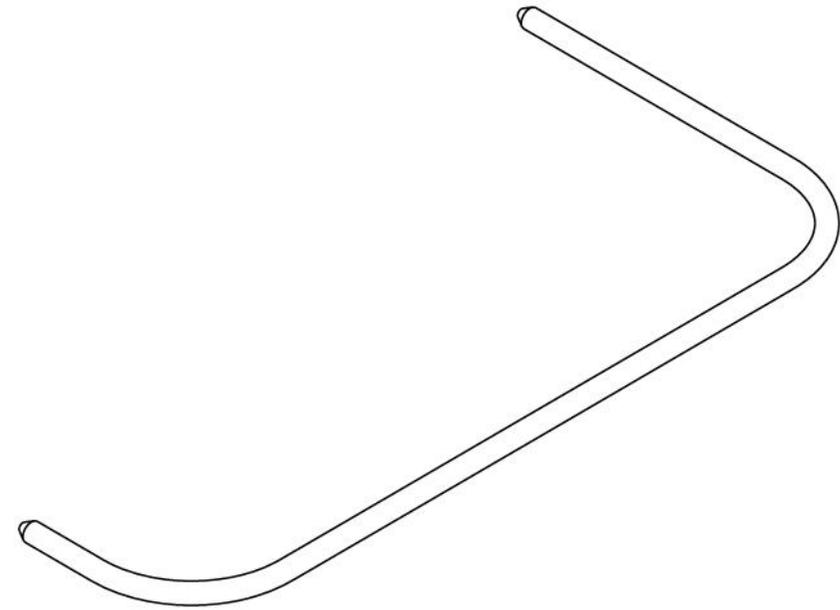
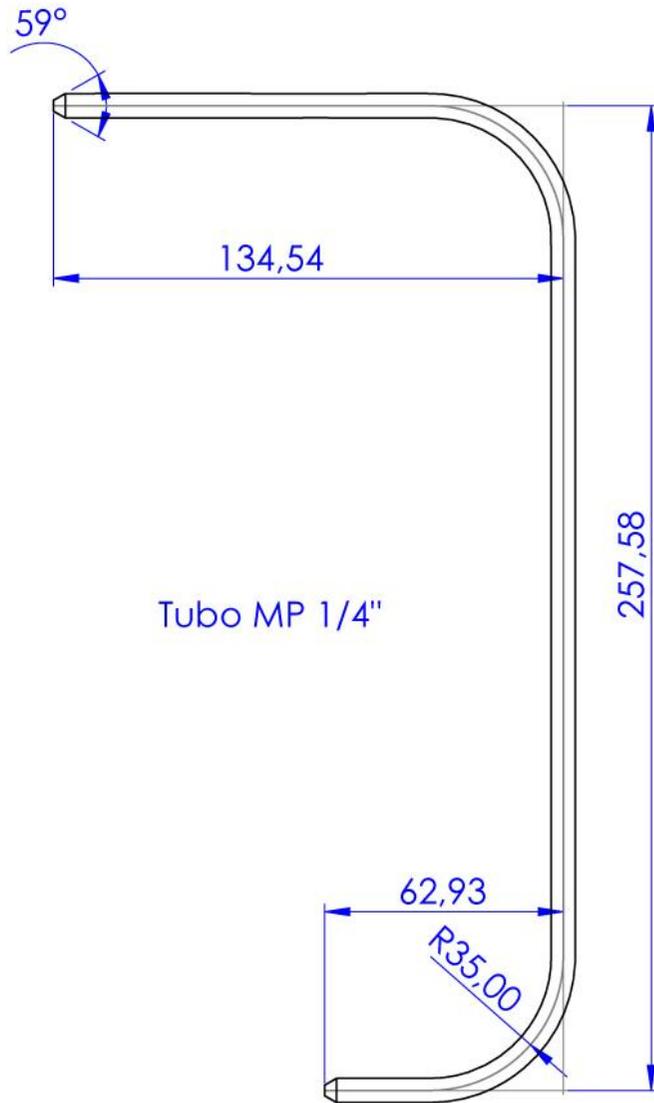
2

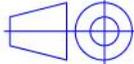
3

4

2

A



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:2	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
N/A	TUBO MP		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_10		

1

2

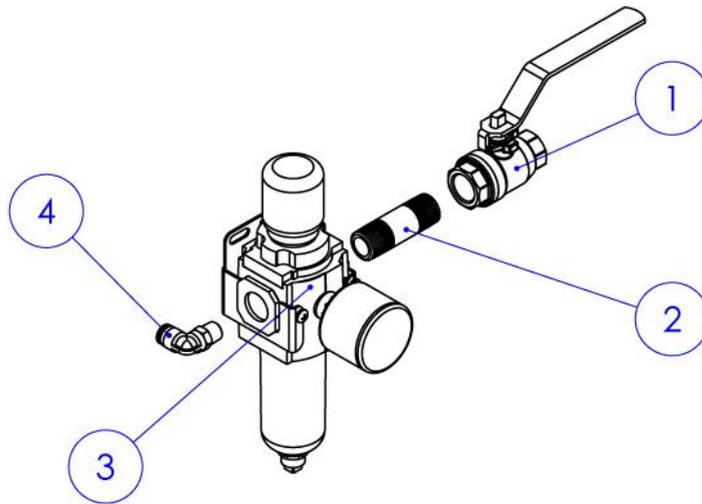
#	Item
1	Válvula de esfera 1/2"
2	Niple 1/2"
3	Filtro regulador 1/2" (10 bar)
4	Conexão "L" BSP1/2" x 8mm

D

C

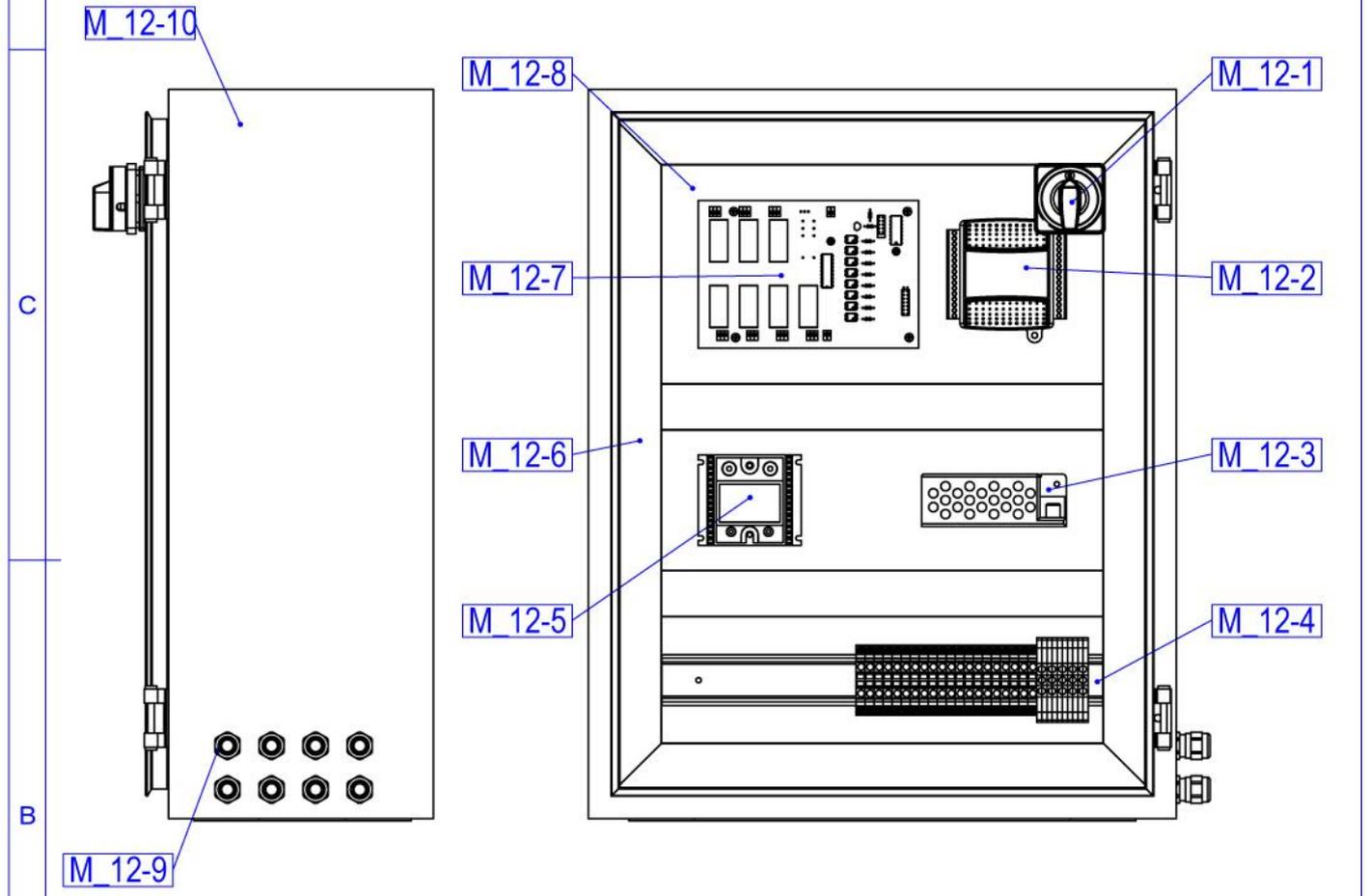
B

A

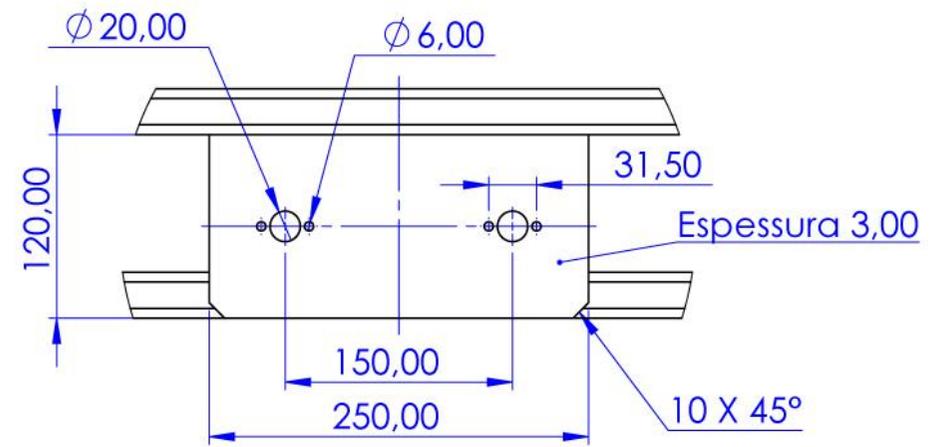
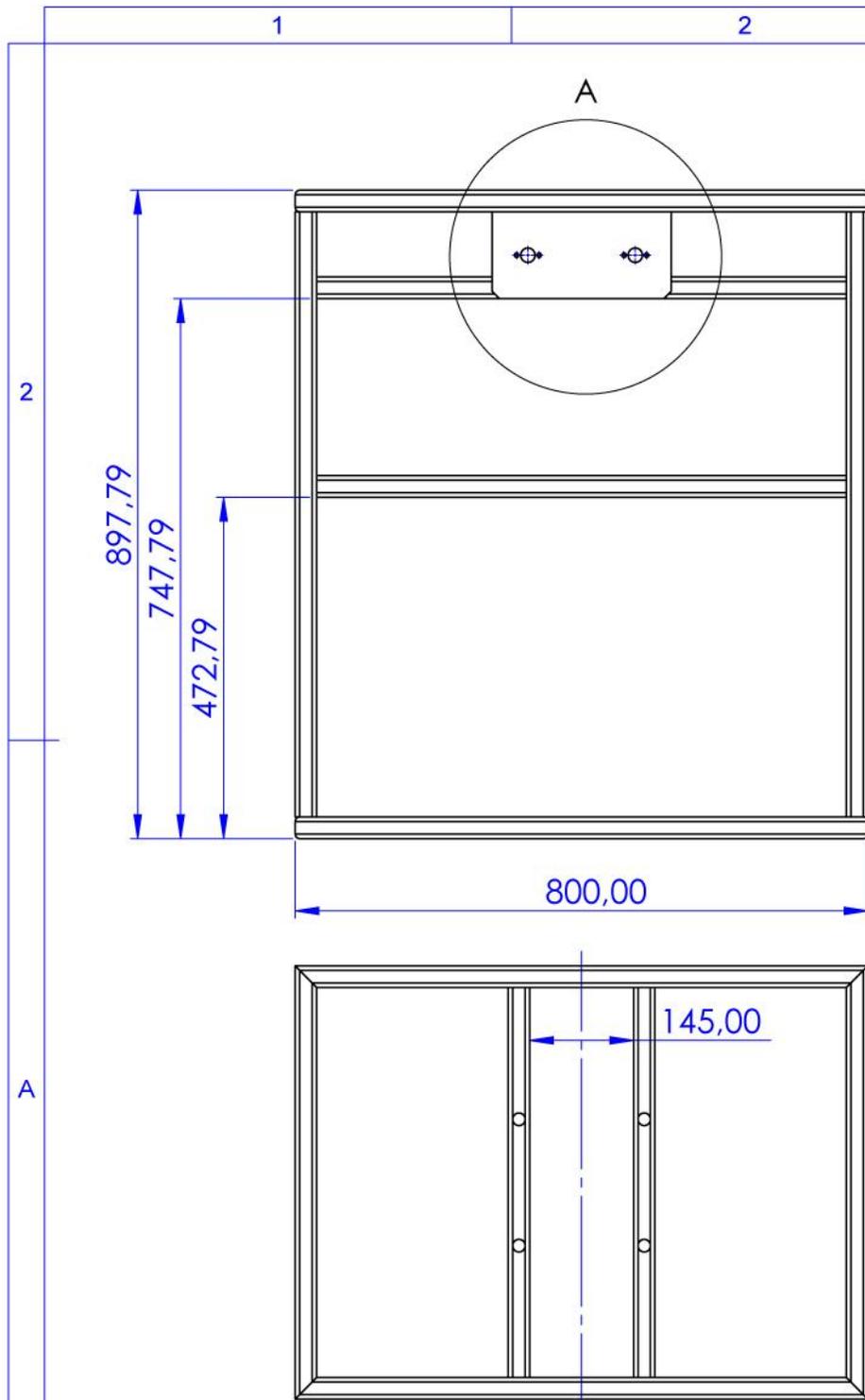


UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: N/A	DESCRIÇÃO: PREPARADOR DE AR		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_11		
			FOLHA: 1/1

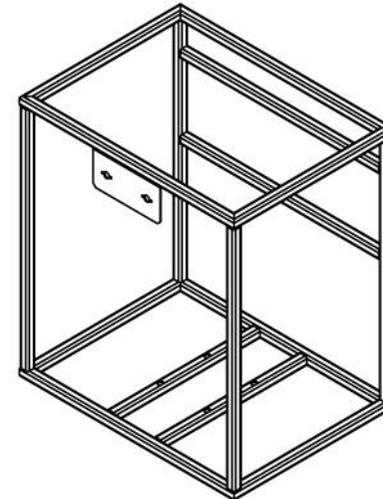
1		2	
#	Item		
M_12-1	Seccionadora 2P		
M_12-2	DAQ USB-6008/9		
M_12-3	Conversor AC/DC		
M_12-4	Régua de borne		
M_12-5	Relé de estado sólido		
M_12-6	Canaletas passa fio		
M_12-7	Interface de condicionamento de sinal		
M_12-8	Base para montagem		
M_12-9	(8x) prensacabo		
M_12-10	Quadro elétrico		

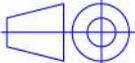


UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:5	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL:	DESCRIÇÃO:		A4
	QUADRO ELÉTRICO		
ISO 1:	DESENHO NÚMERO:		FOLHA: 1/1
	M_12		



DETALHE A
ESCALA 1 : 5



UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 1:10	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: Tubo quadrado 30 x 3	DESCRIÇÃO: CHASSIS		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_13		
			FOLHA: 1/1

1

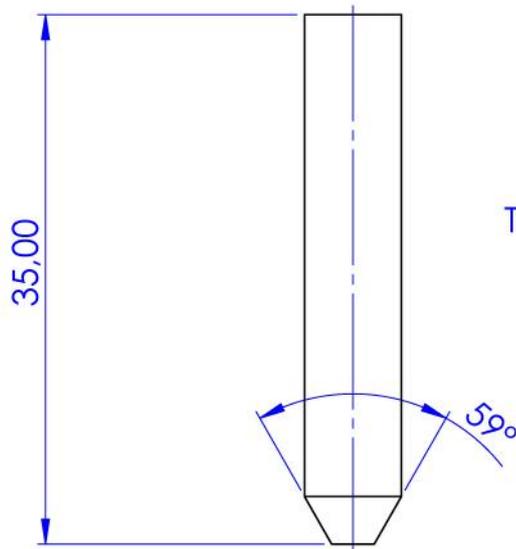
2

D

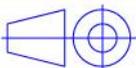
C

B

A



Tubo MP 1/4"

UNIDADES EM MILÍMETROS	ESCALA 2:1	NÃO ALTERAR ESCALA	REVISÃO:
MATERIAL: N/A	DESCRIÇÃO: TUBO MP		A4
ISO 1: 	DESENHO NÚMERO: M_15		
			FOLHA: 1/1

