



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Atividades Laboratoriais de Desenvolvimento de Permutadores de Calor de Placas

Relatório de Estágio para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas
Térmicos

Autor

Carlos Emanuel Resende de Paiva

Orientador

Prof. Doutor Gilberto Cordeiro Vaz

Supervisor na empresa

Arsopi-Thermal, Equipamentos Térmicos, SA

Doutor Hélder Gomes da Silva

Coimbra, dezembro de 2025

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA



Resumo

O presente relatório diz respeito ao Estágio Curricular de Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos. Este estágio, realizado nos últimos 8 meses, teve lugar na empresa Arsopi-Thermal, localizada no concelho de Vale de Cambra. A Arsopi-Thermal é uma empresa que fabrica permutadores de calor de placas, contando com um laboratório que permite testagem e desenvolvimento de permutadores de calor de placas.

O contacto com o laboratório da Arsopi-Thermal permitiu fazer uma análise completa da instalação e encontrar possíveis melhorias ao espaço laboratorial, bem como desenvolver diversas atividades laboratoriais. Ao longo do estágio, foram efetuados testes de pressão máxima de projeto e ensaios hidrodinâmicos a placas de transferência de calor. Estes testes foram realizados com uma nova linha de placas de transferência de calor da Família Skills, ainda não introduzidas no mercado, que trouxeram à empresa dados importantes sobre o desempenho das placas.

De igual importância, os últimos meses trouxeram a oportunidade de desenvolver um projeto de melhoria de instalações laboratoriais: uma nova mesa de testes com elevador do tipo tesoura; e acompanhar todos os passos da sua realização, desde a escolha da tecnologia até à testagem final.

Palavras-chave: Permutadores de Calor de Placas, Placas de Transferência de Calor, Laboratório, Elevador, Skills, Perda de Carga

Abstract

The present report concerns the Master's Degree Internship in Mechanical Engineering – Specialization in Design, Installation and Maintenance of Thermal Systems. The internship, carried out over the past eight months, took place at Arsopi-Thermal, a company located in the municipality of Vale de Cambra. Arsopi-Thermal manufactures plate heat exchangers and has a laboratory dedicated to the testing and development of these units.

The contact with Arsopi-Thermal's laboratory made it possible to perform a comprehensive analysis of the installation and identify potential improvements to the laboratory space, as well as to develop several experimental and testing activities. Throughout the internship, maximum design pressure tests and hydrodynamic tests were performed on heat transfer plates. These tests were conducted on a new line of heat transfer plates – the Skills Family – which has not yet been introduced to the market, providing the company with valuable data on the performance of the plates.

Equally important, during the final months, there was an opportunity to develop a laboratory improvement project: a new test table scissor-type lift, following all stages of its implementation – from the selection of the technology to the final testing phase.

Keywords: Plate Heat Exchangers, Heat Transfer Plates, Laboratory, Lift Table, Skills, Pressure Drop

Agradecimentos

A escrita deste relatório não seria possível sem as pessoas que me acompanharam ao longo deste ano de Estágio Curricular. Deixo o meu mais sincero agradecimento ao meu orientador Prof. Doutor Gilberto Vaz, pelas orientações prestadas e pelo trabalho incansável que me guiou à conclusão deste relatório. De igual forma, expresso a minha gratidão ao meu supervisor da Arsopi-Thermal, Doutor Hélder Silva, por todo o apoio, disponibilidade, paciência e conhecimento transmitidos, que me tornaram um melhor profissional.

Às equipas da Arsopi-Thermal, por tão bem me terem acolhido durante estes meses e por me terem ensinado o que é colaboração e entreaajuda no mundo profissional. Ao Hugo Oliveira, pela partilha de experiências, conselhos e ajuda nas horas de maior trabalho.

Aos meus pais e irmã, por me terem apoiado, mesmo à distância, e por estarem sempre lá quando mais preciso.

À Inês, que me deu toda a força necessária para concluir estes anos de formação e por ter sido o meu braço direito em todos os momentos deste percurso.

À Isecotuna, em especial aos membros da direção, que me ensinaram que é possível unir liderança e amizade. Obrigado pela música e pela descontração que me proporcionaram ao longo dos últimos anos.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Gabriel e ao Nuno, por terem sido os melhores colegas de estudo e trabalho. E aos meus melhores amigos, André e Nuno, por me ouvirem nos melhores e piores momentos.

Gostaria de agradecer ainda a todos aqueles que não mencionei, mas que, de uma maneira ou de outra, tiveram um importante papel no meu percurso académico e no meu crescimento pessoal. Obrigado.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras	vi
Lista de Siglas e Acrónimos.....	viii
Lista de Símbolos.....	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Relatório	2
2 Descrição da Empresa.....	4
3 Permutadores de Calor de Placas com Juntas	6
3.1 Introdução.....	6
3.2 Constituição do Permutador de Calor de Placas com Juntas	8
3.2.1 Estrutura de Suporte	8
3.2.2 Placas de Transferência de Calor.....	10
3.2.3 Juntas.....	11
3.3 Família Skills	13
4 Observação e Análise do Laboratório Arsopi-Thermal.....	17
4.1 Instalação do Laboratório	18
4.1.1 Laboratório: Linhas de Fluido	19
4.1.2 Linhas Secundárias	20
4.1.3 Linhas Principais.....	20
4.1.4 Aplicação de Controlo	21
4.2 Análise Detalhada da Instalação	22
4.2.1 Ferramenta de Análise de Perda de Carga.....	23
4.3 Melhoria do Laboratório	26
5 Atividades Laboratoriais	29
5.1 Testes de Pressão Família Skills	29
5.1.1 Teste de Pressão à Temperatura Ambiente.....	29
5.1.2 Procedimento dos Testes OTPT.....	29

5.1.3	Testes Skills	32
5.1.4	Discussão de Testes de Pressão Skills.....	41
5.2	Testes Hidrodinâmicos.....	44
5.2.1	Cálculo Teórico da Perda de Carga.....	44
5.2.2	Cálculo Perda de Carga Experimental	46
5.2.3	Metodologia de Ensaio de Perda de Carga	47
5.2.4	Ensaio Laboratoriais.....	51
6	Projeto de Elevador.....	53
6.1	Escolha de Tecnologia.....	53
6.2	Projeto e Dimensionamento da Estrutura.....	55
6.3	Projeto e Dimensionamento do Sistema Hidráulico	56
6.4	Circuito Elétrico	59
6.5	Fabrico e Montagem.....	61
6.6	Teste do Elevador	63
7	Conclusão	65
	Referências Bibliográficas.....	66
	Anexos	69
	Anexo A – Desenhos Elevador	69

Índice de Figuras

Figura 2.1 — Fachada Arsopi-Thermal.....	4
Figura 3.1 — Processo Típico de Pasteurização. Manglik et al. (2007).....	6
Figura 3.2 — Constituição de um Permutador de Placas com Juntas.....	8
Figura 3.3 — Permutadores de Calor para Diferentes Tipos de Indústria: a) Indústria Alimentar em Aço Inoxidável; b) Indústria Química em Aço Carbono; https://www.arsopi-thermal.pt	9
Figura 3.4 — Zonas do Corrugado de uma PTC.....	10
Figura 3.5 — Ângulo de Geometria.....	11
Figura 3.6 — Junta com "Slit-in". https://www.arsopi-thermal.pt	12
Figura 3.7 — Zona de Encaixe "Groove-in": a) Imagem Frontal; b) Imagem Lateral.....	13
Figura 3.8 — Placas Skills: a) Placa com "Groove-in"; b) Placa com "Hook lock".	14
Figura 3.9 — Geometria com Plano Diretor: a) na Superfície; b) no Centro.	14
Figura 3.10 — Hanger com Alinhador - Família Skills.	15
Figura 4.1 — Laboratório Arsopi-Thermal.....	17
Figura 4.2 — Fluxograma Laboratório Arsopi-Thermal 2025.	19
Figura 4.3 — Aplicação de Controlo.	21
Figura 4.4 — Réplica Digital 3D. Momtaz (2025), Gonzalez (2025), Bene Inox (2025), Alfa Laval (2025), Traceparts (2025a, 2025b), Grundfos (2025).....	22
Figura 4.5 — Folha de Cálculo da Perda de Carga.	24
Figura 4.6 — Diagrama Kvq Stroke. Alfa Laval (2015) p.2.....	25
Figura 4.7 — Simulação CFD Tramo B-G	27
Figura 4.8 — Método de Ligação Atual.	28
Figura 4.9 — Método de Ligação Proposto.....	28
Figura 5.1 — Teste OTPT Skills DN 32.....	31
Figura 5.2 — Exemplo de Procedimento. Hisaka (2011).	31
Figura 5.3 — Fuga Teste MTP 1.....	33
Figura 5.4 — Deformações nas Juntas.	34
Figura 5.5 — Falha da Estrutura de Suporte DN 65.....	35
Figura 5.6 — Fuga no Teste 2.	36
Figura 5.7 — Deformação nos Alinhadores.	37
Figura 5.8 — Novo Desenho Estrutura DN 65: a) Placa Móvel; b) Placa Móvel com PTC.	37
Figura 5.9 — Representação Exagerada do Desalinhamento da Junta.	39
Figura 5.10 — Junta Mordida.	40
Figura 5.11 — Fuga no Teste 5.	41
Figura 5.12 — Zona de Encaixe: a) Hook lock; b) Groove-in.....	42
Figura 5.13 — Posição da Junta: a) Normal; b) Torcida devido a Pressão.....	43
Figura 5.14 — Ensaio Hidrodinâmico Perda de Carga nos Acessório de Ligação.	50
Figura 5.15 — Testes Hidrodinâmicos Skills DN 32.	51

Figura 6.1 — Modelo 3D do Elevador.....	54
Figura 6.2 — Simulação MEF Pernas H.....	56
Figura 6.3 — Primeiro Esquema Hidráulico.	56
Figura 6.4 — Esquema Hidráulico Final.....	57
Figura 6.5 — Representação da Forças Aplicadas.	58
Figura 6.6 — Esquema Elétrico.	60
Figura 6.7 — Base Inferior Totalmente Soldada.....	62
Figura 6.8 — Elevador Terminado.	63
Figura 6.9 — Teste 750kg.	63
Figura 6.10 — Elevador em Uso.....	64

Lista de Siglas e Acrónimos

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BSP	<i>British Standard Pipe</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CPCJ	Conjunto de Placas com Junta
DE	Direção de engenharia
DG	Direção Geral
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DN	Dimensão Nominal
EN	European standard
EPDM	<i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i>
FKM	<i>Fluorine Kautschuk Material</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
MEF	Método dos Elementos Finitos
MTP	<i>Maximum Test Pressure</i>
NBR	<i>Nitrile Butadiene Rubber</i>
OTPT	<i>Ordinary Temperature Pressure Test</i>
PHE	<i>Plate Heat Exchanger</i>
PTC	Placa de Transferência de Calor
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade

Lista de Símbolos

Alfabeto latino

A	Aperto (mm)
A_{canal}	Área de um canal de escoamento (m^2)
$A_{\text{orifício}}$	Área do furo (m^2)
C	Coefficiente de correção das propriedades físicas
D_e	Diâmetro equivalente (m)
f	Fator de atrito de Fanning
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
K	Constante experimental
Kv_q	Perda de carga específica
L_h	Distancia vertical entre os centros dos orifícios das placas (m)
\dot{m}	Caudal mássico (kg/s)
n	Número de placas
N	Número de canais
N_p	Número de passagens
p	Profundidade (mm)
Q	Caudal volumétrico (m^3/s)
Q_r	Caudal volumétrico que passa por uma placa (m^3/s)
t	Espessura (mm)

Alfabeto grego

α	Constante experimental
β	Ângulo de geometria
ΔP	Perda de carga (Pa)
μ	Viscosidade absoluta (N.s/m ²)
ρ	Massa volúmica (kg/m ³)

1 Introdução

O presente relatório enquadra-se no âmbito do Estágio Curricular do 2º ano de Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos lecionado pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Nos últimos 8 meses, entre 14 de outubro de 2024 e 27 de junho de 2025, realizei o estágio curricular na empresa Arsopi-Thermal, localizada no concelho de Vale de Cambra.

Ao longo deste percurso, tive a oportunidade de ativar o laboratório das instalações da empresa que, embora funcional, se encontrava subaproveitado e era utilizado apenas de forma pontual para prototipagem de equipamentos específicos. Este processo incluiu a análise dos equipamentos existentes, a verificação do seu estado de funcionamento e a realização de estudos laboratoriais, o que contribuiu para a valorização do espaço e para o reforço das capacidades técnicas da empresa.

Durante este processo, tive oportunidade de trabalhar com uma nova linha de placas de transferência de calor, da família Skills, um produto ainda não introduzido no mercado. O estudo da linha Skills trouxe à empresa dados importantes do desempenho das placas, quando consideradas a geometria e o material das respetivas juntas.

No decorrer do estágio, e fruto da utilização regular do laboratório, surgiu a oportunidade de desenvolver o projeto de um elevador do tipo tesoura, com o objetivo de promover uma utilização mais segura, ergonómica e eficiente do espaço laboratorial. Neste sentido, tive oportunidade de acompanhar todas as etapas do ciclo de desenvolvimento do elevador, desde a escolha da solução tecnológica e dos requisitos funcionais até ao desenho detalhado, fabrico e montagem final, o que me permitiu adquirir uma visão integrada de todo o processo de engenharia.

Para além disso, manter contacto diário com a direção de engenharia (DE) e com as várias equipas da Arsopi-Thermal, permitiu a observação das diversas componentes de trabalho desenvolvidas na empresa; o reforço de competências técnicas e profissionais; e a associar o conhecimento adquirido na minha formação académica ao contexto real de trabalho.

1.1 Objetivos

O presente estágio teve como principais objetivos consolidar o conhecimento teórico adquirido durante a formação acadêmica e desenvolver competências práticas na área de permutadores de calor de placas. O contacto com a instalação laboratorial e o departamento de engenharia (DE) da Arsopi-Thermal foram fundamentais para a aquisição de conhecimento sobre os equipamentos utilizados no desenvolvimento de permutadores de calor de placas (PHE) e sobre as exigências do mercado de trabalho.

Para além disso, o meu percurso na Arsopi-Thermal teve também como objetivo a reativação do laboratório da Arsopi-Thermal que se encontrava subaproveitado desde 2016, sendo utilizado apenas para prototipagem de equipamentos específicos. O estabelecimento deste objetivo contribuiu positivamente para o meu crescimento enquanto pessoa e profissional e dotou-me de estratégias práticas de observação, análise e resolução de problemas.

1.2 Estrutura do Relatório

O presente relatório será composto por sete capítulos.

O primeiro capítulo, de carácter introdutório, tem como principal objetivo abordar as razões do presente relatório de estágio curricular, bem como expor os principais pontos a ser explorados nos seguintes capítulos.

O segundo capítulo, relativo à descrição da empresa, tem como objetivo a exploração da história e contexto atual da Arsopi-Thermal, de forma a uma maior compreensão dos projetos descritos e desenvolvidos ao longo do estágio curricular.

O terceiro capítulo, que diz respeito aos permutadores de calor de placas com juntas e todos os seus componentes – estrutura de suporte, placas de transferência de calor e juntas – tem como principal objetivo um enquadramento relativo a este equipamento, que permitirá ao leitor obter a informação necessária para a compreensão dos capítulos seguintes.

Neste sentido, o quarto capítulo foca-se, essencialmente, na instalação do laboratório da Arsopi-Thermal, que o analisa e descreve detalhadamente.

No quinto capítulo descrevem-se as atividades laboratoriais desenvolvidas ao longo do estágio curricular. Este capítulo tem como objetivo a descrição dos testes de pressão máxima de projeto e toda a metodologia e ensaios realizados, bem como a discussão dos resultados obtidos neste processo. Para além disso, tem também como foco os ensaios hidrodinâmicos realizados no laboratório da Arsopi-Thermal, onde, à semelhança da atividade anterior, será apresentada a metodologia e os resultados dos testes efetuados.

O sexto capítulo, de extrema importância, é dedicado à apresentação e descrição do projeto de um elevador, desenhado com o objetivo de melhorar a experiência laboratorial do laboratório da Arsopi-Thermal. Neste capítulo, são descritas todas as decisões e passos tomados, desde projeto, produção e montagem.

Por fim, são apresentadas as conclusões de todas as atividades desenvolvidas ao longo do estágio curricular no capítulo sete.

2 Descrição da Empresa

A Arsopi-Thermal, Figura 2.1, fundada em 1992, resulta da expansão e diversificação do Grupo Arsopi - empresa-mãe, estabelecida em Vale de Cambra em 1942, pelo empresário português Arlindo Soares de Pinho.



Figura 2.1 — Fachada Arsopi-Thermal.

Desde a sua origem, o Grupo Arsopi destacou-se no fornecimento de equipamentos para produtores locais de lacticínios, contribuindo para a modernização e expansão das suas operações. A visão inovadora do fundador permitiu a introdução de novos processos produtivos que combinaram tradição e modernidade, aumentando a capacidade de produção sem comprometer a qualidade.

Ao longo das décadas, o Grupo Arsopi expandiu o seu portefólio, passando a fornecer equipamentos para as indústrias química e petroquímica, consolidando-se como referência nacional e europeia na produção de maquinaria complexa e em materiais nobres. Assim, a criação da Arsopi-Thermal representa a evolução natural do grupo, estabelecendo uma marca própria especializada no fabrico de permutadores de calor de placas destinados à distribuição global.

A empresa beneficia de tecnologia e licenciamento da produtora japonesa Hisaka Works, com quem mantém até aos dias de hoje um acordo de transferência de tecnologia, o que lhe permite alargar o seu âmbito de fornecimento a diversos setores, incluindo as indústrias alimentar, química, petrolífera, aquecimento, AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e outros segmentos industriais. O investimento contínuo na capacidade de produção e o reforço da parceria estratégica com a Hisaka Works criaram bases sólidas para um crescimento sustentado, impulsionando a expansão comercial e fortalecendo a posição competitiva da Arsopi-Thermal no mercado global.

Para responder a um conjunto alargado de requisitos de mercado, a empresa opera com um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) certificado pela ISO 9001:2015.

Adicionalmente, está qualificada para cumprir as exigências regulamentares do mercado europeu de equipamentos sob pressão, detendo certificação nos módulos H e H1 da Diretiva PED 2014/68/EU.

No que respeita a requisitos específicos de projeto e de controlo da qualidade, o SGQ abrange ainda os âmbitos ASME U Stamp e AD 2000 Merkblatt HP0, encontrando-se igualmente apto a responder às inspeções periódicas exigidas no setor marítimo por entidades classificadoras como o Bureau Veritas, a DNV e a Lloyd's Register.

Pelo aumento progressivo do número de colaboradores da Arsopi-Thermal e na iminência de equipas numerosas com funções cada vez mais diversificadas, a estrutura organizacional da Arsopi-Thermal conta com seis direções: direção geral, financeira, qualidade, comercial, engenharia e operações.

Ao longo do estágio curricular, tive oportunidade de colaborar com a direção de engenharia (DE), que se posiciona sob a influência da direção geral (DG). A direção de engenharia é responsável por assegurar a integridade e fiabilidade da informação, gerir e organizar o conhecimento técnico, liderar o projeto mecânico, elaborar e rever desenho técnico, realizar diagnóstico e apoio técnico, preparar, validar e submeter documentação a clientes, bem como conceber e implementar novas ferramentas e metodologias de trabalho. Para além disso, ainda assegura a articulação e a colaboração com as iniciativas desenvolvidas pelos restantes departamentos.

A Arsopi-Thermal distingue-se pela sua presença internacional, pela qualidade técnica dos seus produtos e pela capacidade de desenvolver soluções personalizadas para diferentes segmentos industriais. A empresa mantém o compromisso com a inovação, a excelência operacional e a satisfação do cliente, sustentando a sua reputação como parceiro de referência no setor dos permutadores de calor.

3 Permutadores de Calor de Placas com Juntas

3.1 Introdução

Um permutador de calor de placas é um equipamento composto por um arranjo de placas estanques que permitem a passagem de dois ou mais fluidos nos espaços entre elas (os canais). A energia é transmitida entre os fluidos na forma de calor através das placas e sem haver contacto entre os mesmos.

Os permutadores de calor de placas são, essencialmente, constituídos por uma estrutura de suporte, placas de transferência de calor e juntas. O conjunto das placas com junta (CPCJ), ao ser comprimido pela estrutura de suporte, garante a estanquicidade do equipamento.

Estima-se que, em finais do século XIX (1878, aproximadamente), surgiu a primeira patente de um PHE por Albrecht Dracke, que ilustra o princípio de funcionamento de um permutador de calor de placas. Ainda assim, como em muitos outros equipamentos, a evolução do PHE surge por necessidade de inovação.

No final do mesmo século, com o aumento da atenção pública a problemas de saúde e a crescentes exigências legais à indústria alimentar, nomeadamente à indústria dos lacticínios – uma vez que a tuberculose é transmitida pelo leite não pasteurizado – houve um aumento exponencial de patentes de PHEs. No entanto, foi apenas em 1923 que os PHEs começaram a ser comercializados pela APV International, fundada por Dr. Richard Seligman, que denominou o seu equipamento como *o pasteurizador de placas*.

Ao longo do tempo, com o crescente sucesso na indústria alimentar, o permutador de calor de placas foi alcançando outros mercados, estando, atualmente presente na Indústria Geral (como papel e automóvel), no AVAC, na Indústria Química, na Indústria Petrolífera, na Indústria Naval e outros segmentos do mercado.

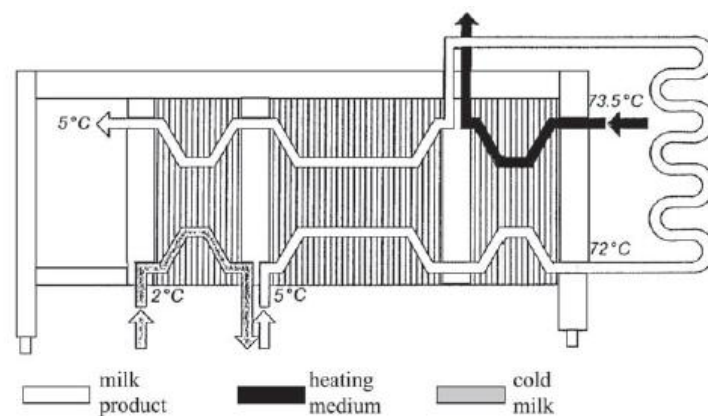


Figura 3.1 — Processo Típico de Pasteurização. Manglik et al. (2007).

Um exemplo emblemático da indústria é o pasteurizador. O processo de pasteurização, representado na Figura 3.1, envolve aumentar a temperatura do fluido (que se encontra a uma temperatura inferior ao ponto de ebulição) e manter essa temperatura durante um tempo definido. Em seguida, o fluido é rapidamente arrefecido a uma temperatura próxima da temperatura de conservação. Durante o tempo em que o fluido é mantido a alta temperatura, os micro-organismos patogênicos que estão presentes no leite cru são eliminados.

Existem várias razões pelas quais os permutadores de calor de placas tiveram tanto sucesso na indústria alimentar. Segundo Manglik *et al.* (2007), os PHEs podem ser facilmente abertos e limpos de forma completa. Se as placas forem fabricadas em aço inoxidável, garantem o cumprimento de requisitos higiênicos extremamente rigoroso. Para além disso, os elevados coeficientes de transferência de calor promovidos pelos canais corrugados entre as placas, permitem operar com diferenças de temperatura de aproximação muito reduzidas (até 1°C). Uma vez que as três secções enquadadas na pasteurização podem ser integradas num único PHE, a unidade do permutador torna-se muito compacta, proporcionando uma redução significativa no espaço necessário para a instalação, bem como uma vantagem em termos de custo financeiro em relação a outros tipos de permutadores de calor.

O permutador de calor de placas oferece diversas vantagens quando comparado com outros permutadores de calor. Entre estas destacam-se a flexibilidade no dimensionamento térmico (as placas podem ser simplesmente adicionadas ou removidas para responder a diferentes exigências de carga térmica); a facilidade de limpeza, essencial para manter condições as higiênicas necessárias nas indústrias alimentar, farmacêutica e de laticínios; a possibilidade de operar em contracorrente com aproximações de temperatura muito reduzida; e o elevado desempenho de transferência de calor. Deste modo, o projeto dos PHE contempla uma grande diversidade de tipos de placas e respetivas corrugações superficiais, arranjos de escoamento, características de desempenho, bem como aspetos de construção e de aplicação (Manglik *et al.*, 2007).

3.2 Constituição do Permutador de Calor de Placas com Juntas

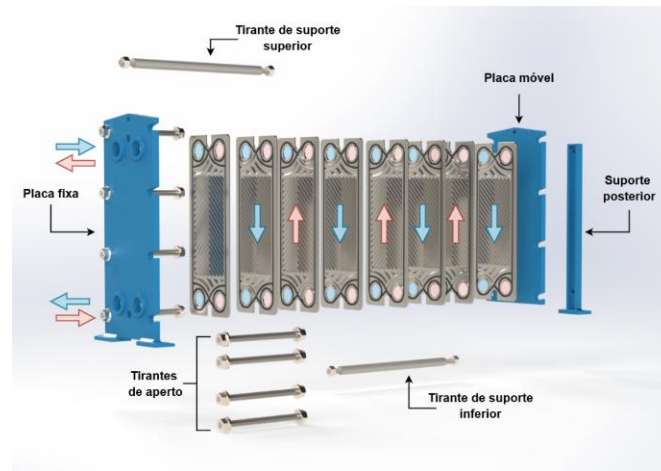


Figura 3.2 — Constituição de um Permutador de Placas com Juntas.

Como observado na Figura 3.2, e como referido anteriormente, o permutador de calor de placas é, essencialmente, constituído por uma estrutura de suporte, placas de transferência de calor e juntas.

3.2.1 Estrutura de Suporte

A estrutura de suporte de um permutador de calor de placas é constituída essencialmente por placas de aperto fixa e móvel, tirantes de aperto, tirantes de suporte superior e inferior e, caso necessário, suporte posterior.

Placas de Aperto

As placas de aperto são elementos importantes do PHE, uma vez que garantem a rigidez e estabilidade de todo o permutador. A principal função das placas de aperto é segurar as placas de transferência de calor (PTC), de forma a garantir uma cota de aperto uniforme e estanque em todo o permutador, evitando fugas. A sua espessura é calculada com o objetivo de garantir que as placas não deformem ao realizar o devido aperto.

É, principalmente, nas placas de aperto que se realizam as ligações dos fluidos que atravessam o CPCJ. Estas ligações podem ser, essencialmente, ligações roscadas, flangeadas e clamps.

A placa fixa, como o nome indica, garante a fixação do permutador, estando acoplada ao solo ou a outro tipo de estruturas. A fixação também pode ser auxiliada pelo uso de um suporte posterior (como representado na Figura 3.2), ainda que também possam ser utilizados outros tipos de equipamentos de fixação.

No que diz respeito à placa móvel, como o nome indica, é uma placa com capacidade de se mover, possibilitando a abertura do permutador para processos como limpeza manual ou manutenção do CPCJ.

Tirantes de Suporte: Superior e Inferior

Os tirantes de suporte superior e inferior têm a principal função de alinhar o CPCJ e a placa móvel à placa fixa. Neste sentido, os tirantes de suporte estão devidamente dimensionados para suportar o peso destes componentes: CPCJ, placa móvel e fluidos que os atravessam. O seu design é influenciado pelo método de ligação das PTCs, podendo ter diversas geometrias.

Tirantes de Aperto

É nas placas de aperto que são acoplados os tirantes de aperto: equipamentos constituídos por varão roscados, porcas e anilha. Os tirantes de aperto têm como função forçar o fecho das placas fixa e móvel, de forma a garantir, uma vez mais, a força de aperto que impõe a estanquicidade do PHE. A dimensão dos tirantes de aperto depende da pressão e temperatura do projeto a que estão submetidos.

Todos os equipamentos referidos são, normalmente, produzidos com recurso a aço carbono ou aço inoxidável (Figura 3.3). Porém, a escolha de matéria-prima é influenciada pelas normas restritivas que se aplicam ao setor onde vão ser utilizados.

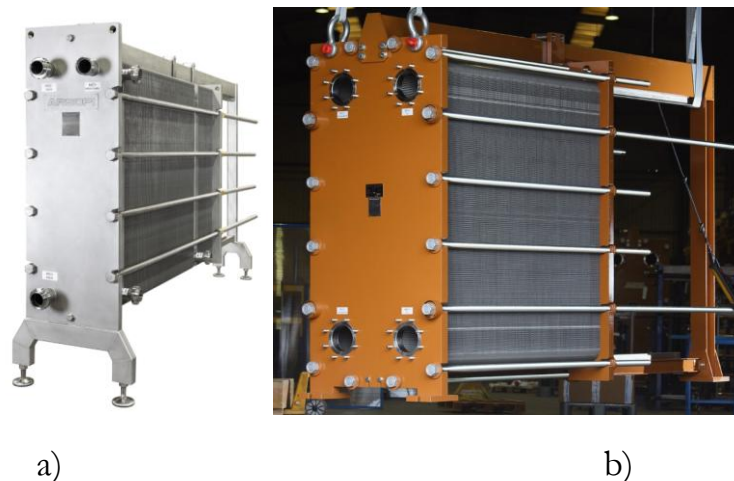


Figura 3.3 — Permutadores de Calor para Diferentes Tipos de Indústria: a) Indústria Alimentar em Aço Inoxidável; b) Indústria Química em Aço Carbono; <https://www.arsopi-thermal.pt>

3.2.2 Placas de Transferência de Calor

As placas de transferência de calor são o núcleo funcional do sistema do permutador de calor de placas, a partir das quais ocorre a transferência de energia térmica entre os fluidos que as atravessam.

As PTC são fabricadas a partir de chapas finas de metal resistente à corrosão, como o aço inoxidável e o titânio. Para obter a sua forma, estas placas passam por processos de estampagem e corte, que lhes dá uma superfície corrugada, um canal para a fixação da junta e quatro furos para a passagem de fluidos. É de notar, contudo, que a abertura dos quatro furos pode ser executada em diferentes combinações entre furos abertos e fechados para satisfazer o fluxo de circulação estabelecido para os fluidos.

A superfície corrugada das placas de transferência de calor oferece à placa maior resistência mecânica, maior área de transferência de calor e potencia o fluido a permanecer em regime turbulento. Esta superfície pode ser dividida em duas zonas distintas: zona de distribuição e área de transferência de calor (Figura 3.4). Como o nome indica, a zona de distribuição difunde o fluido, de forma que abasteça a área de transferência de calor uniformemente.

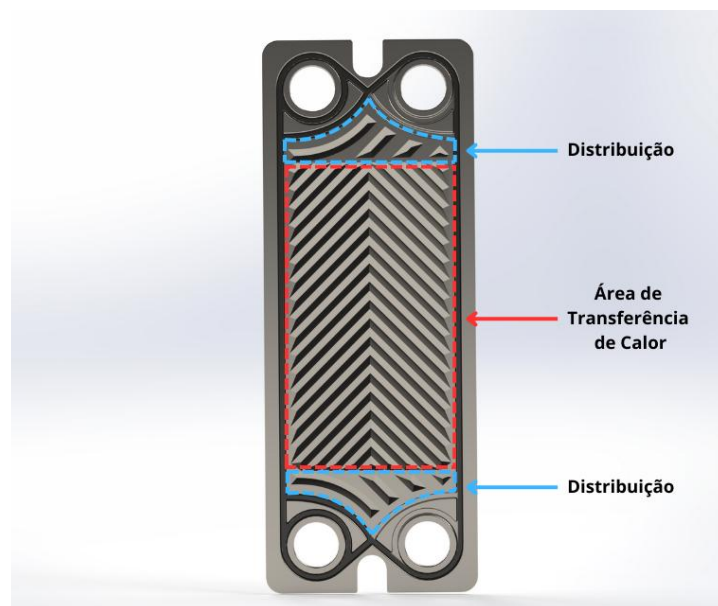


Figura 3.4 — Zonas do Corrugado de uma PTC.

Já a área de transferência de calor, como o nome indica, diz respeito à área onde ocorrem as maiores permutas de energia. Esta área pode apresentar vários padrões de corrugado, sendo os mais comuns o padrão espinha de peixe (*chevron*) e a tábua de lavar (*washboard*).

O padrão *washboard* é caracterizado pelo seu escasso contacto metálico, que leva a um baixo Número de Unidades de Transferência (NUT). Este padrão é frequentemente utilizado em processos em que exista possibilidade de entupimento e em processos em que o fluido contenha lamas ou fibras.

O padrão *Chevron*, ao contrário do padrão anteriormente referido, é um padrão no qual o contacto metálico é elevado, o que proporciona um elevado desempenho de transferência de calor. Este padrão é essencialmente caracterizado pelo seu ângulo da geometria (β), representado na Figura 3.5, no qual quanto maior β , menor será o NUT e a perda de carga (ΔP).

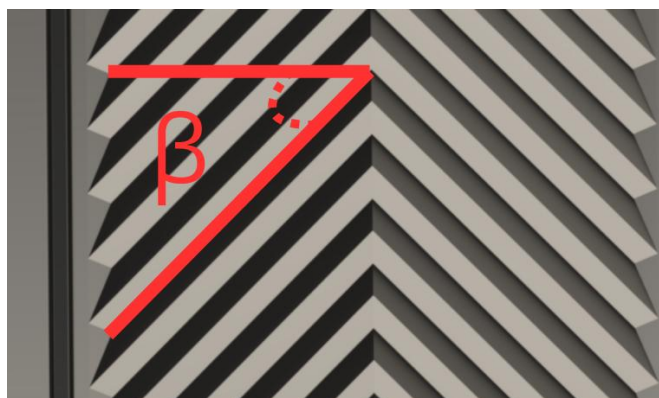


Figura 3.5 — Ângulo de Geometria.

3.2.3 Juntas

As juntas são um componente essencial para o funcionamento do permutador de calor de placas com junta. A junta é o equipamento que promove a estanquidade do CPCJ. A força de compressão exercida pelos tirantes de aperto, designada de força de aperto, comprime as juntas entre as duas placas, de forma a vencer as forças criadas pela pressão exercida pelos fluidos que circulam no interior do permutador.

Os permutadores de calor de placas com junta estão presentes em vários setores da indústria, podendo trabalhar com diferentes fluidos que requerem requisitos operacionais distintos. Por essa razão, as juntas são produzidas com recurso a diversas matérias-primas e vários processos que alteram as suas propriedades mecânicas, de forma a responder às condições e necessidades de cada projeto.

Segundo Manglik *et al.* (2007), os três materiais mais comuns para a produção de juntas são os materiais NBR (do inglês “*nitrile butadiene rubber*”), EPDM (do inglês “*ethylene propylene diene monomer*”) e FKM (do inglês “*fluorine kautschuk material*”).

O NBR, por norma, é um material que permite atingir temperaturas máximas de 140°C, pelo que a sua utilização é mais indicada para trabalhar com fluidos no estado líquido. Neste sentido, juntas em NBR são utilizadas em processos da indústria alimentar e farmacêutica, podendo, também, abranger a indústria petrolífera.

O EPDM é, geralmente, utilizado em processos com temperaturas máximas de 160°C, o que o torna capaz de trabalhar em processos com vapor e água quente. O EPDM apresenta capacidade para lidar com algumas soluções ácidas e fortes soluções alcalinas, contudo, pode demonstrar dificuldade no trabalho com óleos e soluções gordurosas.

Quando ao FKM, é um material com capacidade para trabalhar em processos com fluidos até aos 180°C, pelo que desempenha positivamente com soluções ácidas e vapor, óleos e lubrificante, podendo ser igualmente utilizado na indústria alimentar.

No que diz respeito à montagem das juntas com as placas de transferência de calor, é necessário um mecanismo que as mantenham unidas e que possibilite a montagem do CPCJ. A Arsopi-Thermal utiliza duas formas para a fixação da junta na PTC: o uso de cola ou a tecnologia “slit-in” (juntas de encaixe).

- O uso de cola é uma forma simples e fácil de fixar as juntas às PTCs. Este método não requer que a placa tenha geometrias adicionais ao canal da junta para a fixar, o que simplifica o desenho e o processo de fabrico da placa. A cola é aplicada durante a montagem do CPCJ e tem uma capacidade adesiva que mantém unicamente o peso da junta, não oferecendo nenhuma resistência adicional, sendo possível remover manualmente as juntas depois de coladas. Contudo, o principal entrave do uso da cola é a preocupação dos clientes acerca de possíveis contaminações dos fluidos que atravessam o permutador.
- O “slit-in” é um mecanismo de retenção da junta, realizado por duas geometrias: uma geometria na junta e outra na PTC. As juntas com “slit-in”, Figura 3.6, são dotadas de vários apêndices que encaixam em pequenos cortes nas PTC, fixando a junta durante a montagem do CPCJ e evitando o uso de cola, sem correr o risco de contaminar os fluidos que atravessam o permutador.



Figura 3.6 — Junta com "Slit-in". <https://www.arsopi-thermal.pt>

3.3 Família Skills

Os permutadores de calor da família Skills são uma nova família de placas e estruturas pertencente à Arsopi-Thermal. Esta família de placas distingue-se das outras famílias do catálogo da empresa pela sua morfologia e pela sua origem.

As placas da família Skills foram inventadas pelo empresário italiano Luca Cipriani que, em 2013, iniciou uma parceria com a Arsopi-Thermal, por necessitar de uma empresa que fosse capaz de estampar e testar as suas placas de transferência de calor. Contudo, e infelizmente, os testes de produção não foram satisfatórios, uma vez que o desenho original das placas requeria processos de conformação mais complexos que fragilizavam as PTCs, levando à rutura do material. Entretanto a Arsopi-Thermal tornou-se detentora destas geometrias.

As placas da família Skills foram originalmente pensadas com o intuito de inovar a colocação das juntas nas PTCs, com recurso a robôs para automatizar o processo. Ainda assim, para esse efeito, era necessário complexificar o processo de conformação das PTCs.

As juntas originais possuíam um método de fixação idêntico ao “slit-in”, mas ao contrário do “slit-in”, no qual a junta é fixada a partir de rasgos na parte exterior da PTC, as juntas originais da Skills possuem pequenos apêndices triangulares que ficam presos numa zona de encaixe localizada no corrugado lateral das PTCs. Esse método de fixação simplifica o processo de automatização, bastando colocar a junta sobre o canal e pressioná-la até ficar retida na zona de encaixe, fazendo o efeito de “groove-in”(Figura 3.7).

A conformação da zona de encaixe mostrou ser um desafio produtivo. O processo de estampagem necessitava de uma etapa extra que afinava o canal que forma a zona de encaixe. Nessa etapa, a placa tinha a tendência a fissurar no local, não conseguindo garantir a qualidade de produção.

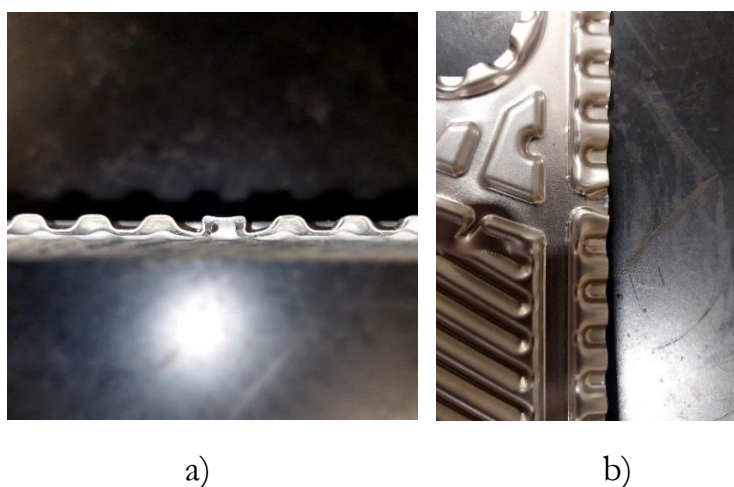


Figura 3.7 — Zona de Encaixe “Groove-in”: a) Imagem Frontal; b) Imagem Lateral.

Posteriormente, o desenho original da placa tornou-se obsoleto e, atualmente, as novas placas da família Skills estão desenhadas para acomodar juntas com “hook lock”, nas quais as extremidades da junta abraçam a placa e ficam presas como ganchos nas zonas de encaixe da PTC. Estas placas são uns milímetros mais largas do que as placas originais, uma vez que precisam de espaço para acomodar o “hook lock”. Os diferentes métodos de fixação podem ser observados na Figura 3.8.

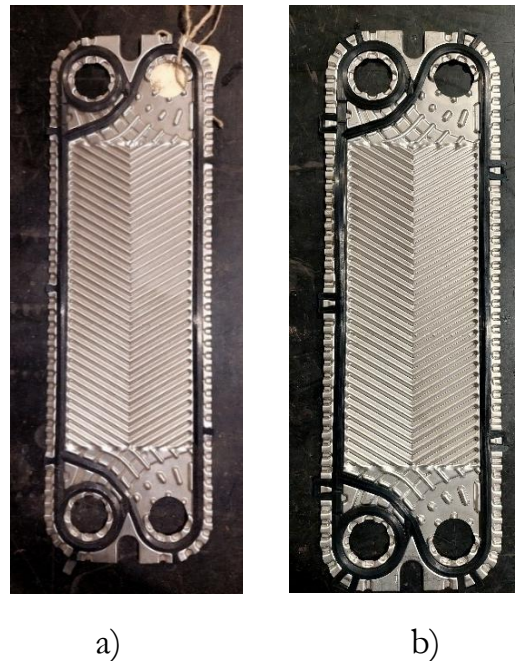


Figura 3.8 — Placas Skills: a) Placa com "Groove-in"; b) Placa com "Hook lock".

As placas de transferência de calor desta família utilizam um método único de alinhamento de placas. Grande parte das placas de transferência de calor da Arsopi-Thermal utilizam o canal da junta e a própria junta como guia para alinhamento das placas na montagem do CPCJ. Uma vez que o plano diretor se encontra no centro da placa, cada placa acomoda 50% da altura de perfil das duas juntas (em condições de força de aperto máximo). Contudo, devido à geometria das PTCs da família Skills, o plano diretor encontra-se na extremidade da placa, pelo que acomoda a totalidade da junta no seu canal (em condições de aperto máximo). Na Figura 3.9 é possível comparar as diferentes geometrias.

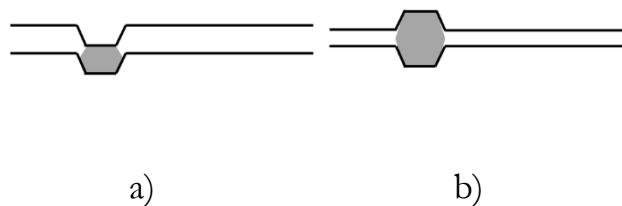


Figura 3.9 — Geometria com Plano Diretor: a) na Superfície; b) no Centro.

As PTCs da família Skills possuem um “*hanger*”, com um alinhador que se eleva entre 2,15mm e 3mm da superfície da placa (Figura 3.10). O alinhador, por ter um formato afunilado, consegue encaixar-se no “*hanger*” da placa seguinte, o que permite assegurar o alinhamento das placas.



Figura 3.10 — *Hanger com Alinhador - Família Skills.*

Para além disso, as placas de transferência de calor da família Skills têm uma particularidade nas suas juntas. Comparando com o catálogo de juntas que a Arsopi-Thermal normalmente utiliza nos seus produtos, as juntas da família Skills diferem no perfil de secção e no processo de fabrico.

Relativamente ao perfil de secção, as juntas da Arsopi-Thermal têm habitualmente um formato hexagonal ou octogonal. Este formato faz com que, quando a junta é comprimida por duas placas, as superfícies da junta que estão em contacto com as placas sejam superfícies planas.

Já as juntas da família Skills têm um perfil de secção pentagonal, o que faz com que as zonas de contacto entre as duas placas sejam uma superfície plana e um vértice. Durante a compressão da junta, o vértice é comprimido, fazendo com que a junta também fique com um aspeto hexagonal.

Conclui-se, assim, que apesar de as juntas da família Skills e das juntas tradicionais apresentarem perfis de secção idênticos quando comprimidas, as tensões a que estão sujeitas são totalmente distintas.

No que diz respeito ao processo de fabrico, as juntas que a Arsopi-Thermal normalmente utiliza nos seus permutadores são juntas conformadas a partir de moldação por compressão.

Na moldação por compressão a matéria-prima é depositada nas cavidades do molde. O molde fecha e a matéria-prima é submetida a altas pressões e temperaturas, iniciando o processo de cura. Durante este processo, a estrutura molecular da matéria-prima é alterada, aprimorando propriedades mecânicas e, ao mesmo tempo, permitindo que ganhe a forma do molde.

Em contraste, as juntas da Skills são conformadas a partir de moldação por injeção. Na moldação por injeção, a matéria-prima alimenta uma máquina injetora, que a aquece e a injeta a altas pressões para um molde que lhe dá o formato desejado. As propriedades mecânicas da junta são principalmente controladas pela temperatura do molde, pressão e temperatura da injeção e o tempo de arrefecimento do material.

Estes permutadores são de elevada importância para o presente relatório, uma vez que foram os únicos com os quais tive contacto ao longo dos meses. Assim, dois dos três capítulos de discussão do trabalho desenvolvido ao longo deste Estágio Curricular estão focados na família Skills.

4 Observação e Análise do Laboratório Arsopi-Thermal

O laboratório da Arsopi-Thermal (Figura 4.1) é um espaço com 168m² e pé direito entre os 7,2m e os 8,2m e que se dedica inteiramente à engenharia da empresa. É neste espaço que decorrem os processos de prototipagem e experimentação de permutadores completos, componentes individuais ou ferramentas de produção. No laboratório são encontradas bancadas de trabalho, usadas para prototipagem; uma instalação de teste de PTCs; e o respetivo armazenamento de PTCs e estruturas de permutadores de calor.



Figura 4.1 — Laboratório Arsopi-Thermal.

4.1 Instalação do Laboratório

A instalação denominada de “laboratório” é um equipamento extremamente complexo e de grandes dimensões, que está maioritariamente contida no interior do laboratório, ocupando uma grande parte da área disponível. O laboratório é uma instalação que tem como principal propósito avaliar experimentalmente o desempenho térmico e hidrodinâmico das placas de transferência de calor.

Anteriormente à construção do laboratório, as placas de transferência de calor da Arsopi-Thermal eram analisadas no laboratório da Hisaka, situada no Japão, o que representava um atraso na fluidez do seu desenvolvimento.

Em 1991, iniciou-se a primeira fase de projeto do laboratório, com o aparecimento do primeiro fluxograma e de outros documentos que continham os objetivos de desempenho e equipamentos necessários à sua construção.

No entanto, foi apenas em 2010, em parceria com o INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) que houve um avanço significativo neste projeto. Esta parceria surgiu com o objetivo de proporcionar ao INEGI um espaço onde pudesse analisar as suas placas de transferência de calor em contexto laboratorial. Assim, nesta fase, foi realizada uma inventariação dos equipamentos adquiridos pela Arsopi-Thermal ao longo dos anos, uma revisão ao fluxograma da instalação e definida a metodologia experimental, que se baseou nos protocolos desenvolvidos pela Hisaka.

Em 2011, iniciou-se a montagem dos componentes e tubagem e do sistema de aquisição de dados do laboratório. O primeiro teste laboratorial foi realizado em junho de 2012.

Durante os dois anos seguintes, o laboratório realizou vários testes de PTCs, mas devido aos custos de funcionamento, a sua atividade reduziu significativamente, sendo que o último teste anteriormente realizado tenha data em 2016.

Contudo, todas as linhas são geridas por uma aplicação num computador dedicado ao laboratório.

4.1.2 Linhas Secundárias

A linha de vapor é alimentada por vapor proveniente de uma caldeira de vaporização rápida, capaz de produzir 1250 kg/h de vapor a 12 bar e a temperatura máxima de 190°C. A caldeira não trabalha unicamente para fornecer vapor ao laboratório. O vapor é também utilizado na lavagem de PTCs e, por isso, existe a necessidade de utilizar um distribuidor de vapor que o subdivide pelas tarefas.

O vapor utilizado no laboratório alimenta dois permutadores idênticos de modelo FH10 com 72 placas que aquecem as linhas de água quente e de óleo quente.

Pelo contrário, a linha de água gelada é arrefecida em torres de arrefecimento que, tal como a caldeira, também fornecem água a outros processos na empresa. Esta linha apresenta este nome uma vez que, nas versões iniciais do projeto da instalação, o fluido iria ser arrefecido por um banco de gelo associado a um chiller. Ainda que a tecnologia de arrefecimento tenha sido alterada, o nome da linha de água manteve-se. Esta água é utilizada para arrefecer a linha de água fria num permutador de modelo FH30 com 139 placas.

4.1.3 Linhas Principais

Como mencionado anteriormente, são os fluidos que circulam nas linhas principais que realizam os testes térmicos e hidrodinâmicos no permutador em estudo. Estas linhas operam em circuito fechado dentro do laboratório: a água fria e a água quente estão armazenadas em tanques de 5000 litros; e o óleo quente num tanque de 2000 litros.

As linhas de água fria e de água quente são utilizadas para a análise em regime de escoamento turbulento. Já a linha de óleo quente é utilizada em análises em regime de escoamento laminar, juntamente com a linha de água fria.

A linha de óleo é acionada por uma bomba de engrenagens, que, infelizmente, se encontra inoperacional devido a uma falha mecânica.

Porém, as linhas de água quente e água fria encontram-se operacionais, sendo acionadas por bombas centrífugas com motores controlados por variadores de frequência, que são capazes de fornecer uma gama alargada de caudais.

4.1.4 Aplicação de Controle

O laboratório é controlado a partir de uma aplicação em *labview*, criada pelo INEGI juntamente com a TECNOCON (pertencente ao grupo Arsopi). A Figura 4.3 representa a interface com o utilizador.

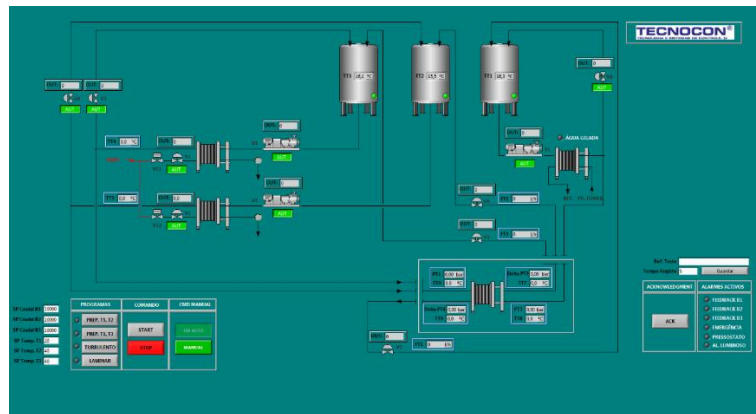


Figura 4.3 — Aplicação de Controle.

A aplicação dispõe de dezassete sensores:

- 9 termopares;
- 2 transdutores de pressão absoluta;
- 3 transdutores de pressão diferencial;
- 3 caudalímetros (2 eletromagnéticos e 1 pelo princípio de Coriolis).

E controla:

- 8 válvulas de globo com acionamento pneumático;
- 3 bombas com variadores de frequência.

Para além disso, a aplicação permite realizar quatro programas:

- PREP. T1, T2;
- PREP. T1, T3;
- TURBULENTO;
- LAMINAR.

Os dois primeiros programas (PREP. T1, T2 e PREP. T1, T3) efetuam a preparação do laboratório para os testes que irão realizar. O utilizador fornece à aplicação os valores de temperatura em que os tanques devem estar e a aplicação controla os processos de aquecimento e arrefecimento dos depósitos para os valores de temperatura escolhidos pelo utilizador.

Relativamente ao programa Turbulento e Laminar, ambos realizam os ensaios ao permutador em teste. O utilizador define os caudais pretendidos para os dois fluidos em trabalho e a aplicação gere as bombas de maneira a conseguir igualar o valor lido pelos caudalímetros ao valor imposto pelo utilizador.

A aplicação permite ao utilizador criar uma folha de Excel com os valores de todos os sensores envolvidos do programa e estes valores são retirados periodicamente em intervalos de tempo definidos pelo utilizador.

4.2 Análise Detalhada da Instalação

Uma vez que o laboratório se encontrava inoperacional, o tempo disponível foi aproveitado para conhecer melhor a instalação. O laboratório esteve em fase de projeto durante 20 anos, tendo sofrido várias alterações ao longo do tempo, o que criou, inevitavelmente, algumas falhas nos registos do projeto.

Na tentativa de conhecer o laboratório e encontrar potenciais melhorias, foi decidido criar uma réplica digital 3D em Solidworks das três linhas principais, como representada na Figura 4.4. No processo de mapeamento da instalação, as medições das tubagens e dos depósitos foram efetuadas com recurso a fita métrica que, apesar de não ser uma medição com boa exatidão, não é problemática para a representação.

Na representação de alguns equipamentos, acessórios e flanges, foram utilizados modelos provenientes de bibliotecas de CAD como Traceparts e 3DCentral. Alguns destes modelos necessitaram de ser alterados para representar de forma mais fiel os elementos do laboratório.



Figura 4.4 — Réplica Digital 3D. Momtaz (2025), Gonzalez (2025), Bene Inox (2025), Alfa Laval (2025), Traceparts (2025a, 2025b), Grundfos (2025).

4.2.1 Ferramenta de Análise de Perda de Carga

Com as linhas principais representadas, foi decidido estudar a perda de carga nas tubagens que executam o programa Turbulento (linha de água fria e linha de água quente), utilizando a ferramenta de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pertencente ao Solidworks. A utilização desta ferramenta representa uma vantagem significativa, uma vez que permite reduzir substancialmente o tempo de cálculo da perda de carga. Dado que não é facilmente disponibilizada informação sobre componentes como valores de perda de carga dos elementos da instalação, este programa permite, a partir do modelo tridimensional, a obtenção de valores o mais aproximados possível dos valores reais.

Segundo Versteeg & Malalasekera (1995), a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é a análise de sistemas que envolvem o escoamento de fluidos, transferência de calor e fenómenos associados, como reações químicas, através de simulações computacionais. Esta técnica é extremamente poderosa e abrange uma vasta gama de aplicações industriais e não industriais.

Apesar das tubagens em análise não serem muito complexas, as simulações CFD requerem muito poder computacional, uma vez que a qualidade dos resultados obtidos são proporcionais ao tempo necessário para o cálculo.

Tendo em conta que o grau de exigência da análise não é crítico, foi decidido que uma malha automática de nível 5 (o seu máximo permitido é 7) seria suficiente para obter resultados para a simples análise.

Em relação à perda de carga nos tramos, foram realizadas 15 simulações. Cada simulação simula todos os tramos a ser atravessados por um certo caudal de água a temperatura ambiente. Os 15 caudais escolhidos foram selecionados tendo em conta valores de caudal retirados de testes reais executados anteriormente no laboratório.

Para conseguir analisar a perda de carga foi necessário dividir as linhas em quatro partes:

1. Os tramos A-B e F-G são os tramos entre o depósito e as bombas (água fria e água quente, respetivamente);
2. Os tramos B-C e G-H são os tramos entre as bombas e os permutadores de arrefecimento/aquecimento, respetivamente;
3. Os tramos C-D e H-I são os tramos entre os permutadores arrefecimento/aquecimento e o permutador em teste;
4. Os tramos D-E e I-J são os tramos entre o permutador em teste e os depósitos da água quente e água fria.

Ao obter os dados desta análise, foi possível criar uma ferramenta de simulação em Excel. Esta ferramenta consegue calcular a perda de carga de toda a instalação quando se executa um teste no programa Turbulento.

Calculo CFD						
Q	67	m ³ /h				
Tm	10	°C				
Modelo	FA-11	ligação	EN DN80/MCH100			
Nº de canais	20					
ΔP[local]	Simulado					
Calcular						
Linha fria						
Tramo	P[in]	P[out]	ΔP[Pa]	ΔP[mca]	ΔP[local]	H[mca]
AB	111779,9	101464,6	10315,22	1,052152		1,052152
BC	442612,4	110461,7	332150,7	33,87937		33,87937
CD	113329,2	104407,4	8921,836	0,910027	1,005921637	1,915949
DE	186374	89928,25	96445,77	9,837469	7,720086642	17,55756
total tubagem			447833,5	45,67902		54,40503
PHE2 FH30-HP-139						5,180359
Modelo	FA-11					139,6439
Magueiras C	C[in]	h		m		1,902393
	C[out]	h		m		1,902393
Total						257,4391
Linha Quente						
Tramo	P[in]	P[out]	ΔP[Pa]	ΔP[mca]	ΔP[local]	H[mca]
FG	111780,8	102046,4	9734,416	0,99291		0,99291
GH	319408,2	111721,3	207686,9	21,18407		21,18407
HI	123819,1	107964,5	15854,6	1,617169	1,005921637	2,623091
IJ	182135,9	89942,97	92192,91	9,403676	7,720086642	17,12376
total tubagem			325468,9	33,19782		41,92383
PHE1 FH10-HP-21						6,469061
Modelo	FA-11					139,6439
Magueiras C	C[in]	h		m		1,902393
	C[out]	h		m		1,902393
Total						233,7654

Figura 4.5 — Folha de Cálculo da Perda de Carga.

Como observado na representação da folha de cálculo (Figura 4.5), o utilizador consegue introduzir:

- O caudal movimentado pelas bombas;
- A temperatura média no permutador em teste;
- O modelo do permutador em teste;
- O número de canais em que o fluido passa pelo permutador;
- O tipo de ligação em que o laboratório se liga ao permutador em teste;
- Selecionar se o cálculo de perda de carga nas válvulas de globo é calculado de forma teórica ou a partir de dados simulados por CFD;
- As cotas das ligações do permutador em relação à tubagem da instalação.

O cálculo da perda de carga nos tramos é feito a partir da regressão linear (função PROJ.LIN no Excel) dos dados obtidos em CFD, obtendo uma equação polinomial da perda de carga em função do caudal.

A perda de carga provocada pelos permutadores da instalação, que fazem o aquecimento / arrefecimento das linhas, e a perda de carga do permutador em teste

são calculadas a partir de fórmulas de cálculo utilizadas pela Arsopi-Thermal para o projeto de permutadores de calor de placas.

O valor da perda de carga nas tubagens flexíveis de ligação do laboratório ao permutador em teste é calculado a partir de uma equação polinomial de segundo grau de dados, adquiridos pela análise do gráfico disponibilizado pela PENFLEX.

O cálculo para a perda de carga nos acessórios de ligação entre o permutador e as tubagens flexíveis de DN80 é, também, feito a partir de uma equação polinomial criada a partir de dados obtidos por estudos em CFD. Foram realizadas 30 simulações a cada um dos 10 acessórios capazes de ligar as tubagens flexíveis de DN 80 aos 8 permutadores.

O valor da perda de carga causada pelas válvulas de globo pode ser calculado de duas formas: teórica e simulada.

Na forma teórica é utilizada a fórmula disponibilizada pelo fabricante da válvula. Segundo Alfa-Laval (2015), a perda de carga introduzida pela válvula pode ser calculada a partir da equação (4.1) com o auxílio da Figura 4.6.

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{Kv_q} \right)^2 \quad (4.1)$$

$Kv_q=60$, uma vez que a válvula vai estar sempre aberta e tem uma DN 65 (Figura 4.6).

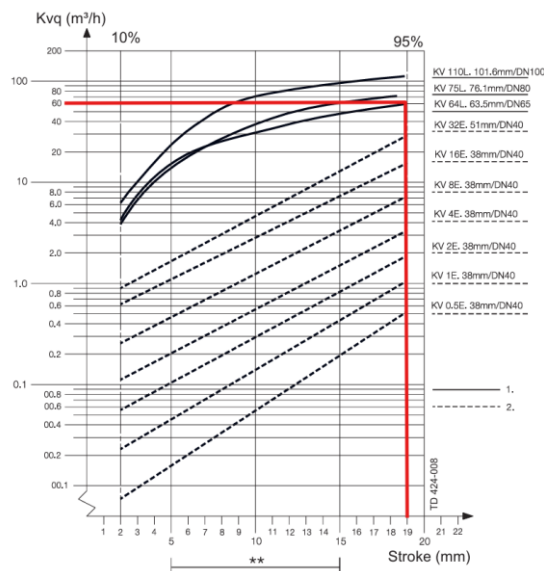


Figura 4.6 — Diagrama Kvq Stroke. Alfa Laval (2015) p.2.

A segunda forma de análise foi feita através da utilização de dados de CFD de uma representação da válvula em 3D, concebida a partir de desenhos 2D encontrados na ficha técnica da válvula.

4.3 Melhoria do Laboratório

Como anteriormente mencionado, a análise do laboratório foi realizada com o intuito de encontrar possíveis melhorias à instalação.

À primeira vista, o planeamento da instalação pode parecer aquém do desejado, uma vez que apresenta um desenho ortogonal, a tubagem alinhada de forma complanar, uso excessivo de curvas de 90° e elevações desnecessárias. Contudo, a instalação foi desenhada tendo em consideração a acessibilidade dos equipamentos, que permitem caminhar livremente entre a tubagem, acesso a todas as válvulas e instrumentos e facilidade de acesso aos equipamentos mais pesados, como as bombas e permutadores, com recurso a um pequeno empilhador.

Ao realizar uma análise de perda de carga na instalação, foi possível verificar que o desenho ortogonal teve um impacto negativo na instalação. Ainda assim, esse impacto acabou por não ser significativo, tendo em conta os benefícios de acessibilidade que o desenho proporcionou. Foi possível detetar quatro zonas onde a perda de carga é excessiva, no entanto, estas zonas podem ser facilmente alteradas sem impactar o curso da tubagem. Estas zonas estão localizadas nos tramos entre a bombas e o permutador de aquecimento/arrefecimento (B-C e G-H) e nos tramos entre os permutadores em teste e os tanques (D-E e I-J).

No que diz respeito aos tramos (B-C e G-H), a perda de carga elevada é criada pelo aumento da dimensão nominal do tubo ao sair da bomba. Porém, este aumento de dimensão nominal (DN) está também a criar uma zona morta, que começa no início do cone e se vai propagando até ao final da segunda curva, representada na Figura 4.7.

Uma possível maneira de reduzir este fenómeno é aumentar o comprimento do cone. Quando aumentado, o fluido que circula no cone apresenta uma expansão mais controlada, permitindo evitar a criação de zonas mortas e dotando a zona da instalação de maior capacidade de resposta aos caudais máximos das bombas.

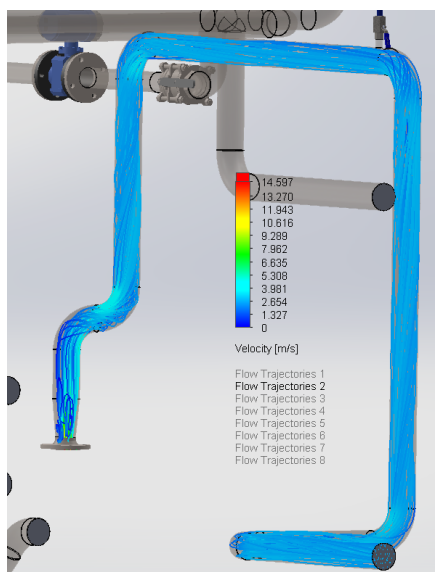


Figura 4.7 — Simulação CFD Tramo B-G

A enorme perda de carga dos tramos D-E e I-J acontece devido à utilização de uma válvula de globo como válvula de seccionamento. As válvulas de globo são válvulas reguladoras que, como o nome indica, são utilizadas para controlar o caudal de fluidos. Porém, simultaneamente, estas válvulas introduzem uma enorme perda de carga, mesmo estando completamente abertas. A escolha inicial destas válvulas surgiu com a ideia de que as bombas não iriam possuir variadores de frequência, uma vez que estariam sempre a trabalhar em carga máxima, levando à necessidade de haver controlo do caudal, recorrendo à perda de carga induzida pelas válvulas reguladoras. Contudo, com a aplicação de variadores de frequência, as válvulas trabalham completamente abertas ou completamente fechadas podendo ser facilmente substituídas por uma válvula de seccionamento que, por norma, introduzem menores perdas de carga (por exemplo, electroválvula de macho esférico).

Com o decorrer do estágio curricular foi possível entrar em contacto com a instalação, realização de testes hidrodinâmicos e testes de pressão. O uso do laboratório neste contexto demonstrou algumas barreiras que dificultaram o trabalho laboratorial.

As tubagens flexíveis e os acessórios que fazem a ligação da instalação ao permutador em teste são bastantes pesados, o que dificulta a sua utilização. As tubagens flexíveis são blindadas e de aço inoxidável, com ligações flangeadas de DN 80, como apresentado na Figura 4.8. Quando completamente cheias, o peso da água contida no interior das quatro tubagens flexíveis equivale a 170,8kg, o que faz com que, em ensaios a permutadores de calor de placas de dimensões pequenas, seja necessário a utilização de um arco móvel com 2 garibaldis, para suportar o peso dos acessórios de ligação e não danificar o permutador com o seu peso.

Assim, uma forma de facilitar os ensaios para a utilização de permutadores mais pequenos é criar acessórios de ligação com uma dimensão nominal inferior.

Depois de alguma ponderação, a solução por mim proposta seria adquirir quatro tubagens flexíveis de DN 50, unidas à instalação por cones de redução de DN 80 para DN 50; e criar acessórios de ligação das tubagens flexíveis ao permutador em teste (Figura 4.9).

Desta forma, os novos acessórios de ligação teriam a capacidade de fazer o acoplamento dos sensores de pressão e sensores de temperatura, e fariam a redução de DN para a dimensão de ligação do PHE a ser testado. Apesar do aumento do trabalho de montagem dos acessórios de ligação, os novos acessórios e as novas tubagens flexíveis iriam reduzir significativamente o peso das ligações. O peso da água contida dentro de cada tubagem flexível iria reduzir de 42,7kg para 19kg, facilitando o trabalho de ligação.

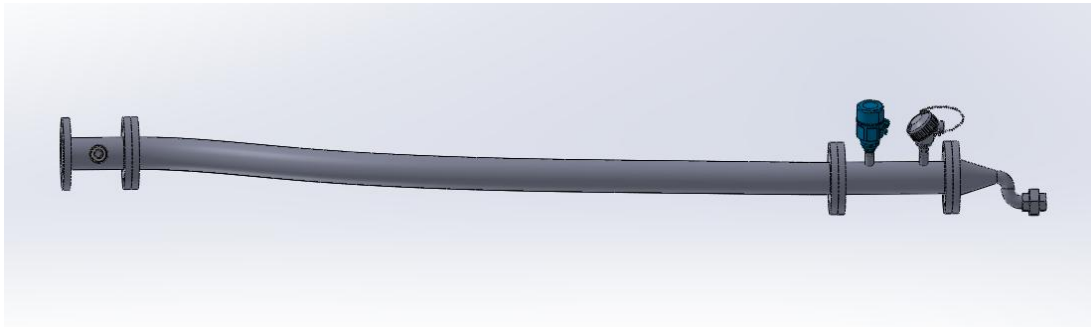


Figura 4.8 — Método de Ligação Atual.

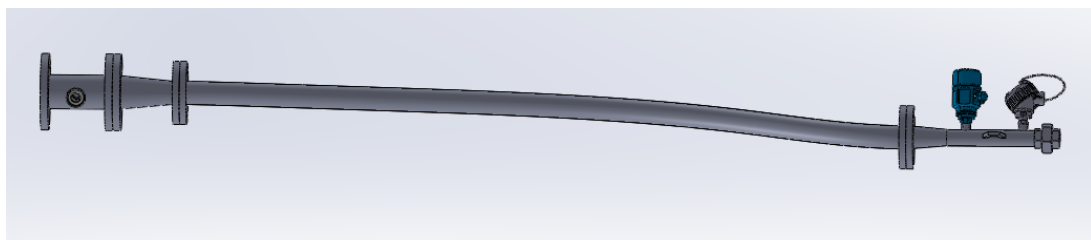


Figura 4.9 — Método de Ligação Proposto.

5 Atividades Laboratoriais

5.1 Testes de Pressão Família Skills

5.1.1 Teste de Pressão à Temperatura Ambiente

O teste de pressão à temperatura ambiente OTPT (do inglês, *Ordinary Temperature Pressure Test*) é um teste experimental de extrema importância associado à produção de PHEs e ao desenvolvimento de placas de transferência de calor e juntas. O OTPT consiste na análise do comportamento de um PHE, quando submetido a um fluido à temperatura ambiente a uma determinada pressão. Neste teste são utilizados permutadores à escala real e, dependendo do objetivo de teste, pode ser um teste destrutivo.

Normalmente, o OTPT é utilizado na Arsopi-Thermal durante o processo produtivo como ensaio hidráulico dos permutadores, depois da sua montagem. Neste ensaio, é utilizada água à temperatura ambiente para elevar a pressão dentro do permutador, até à pressão de teste. A pressão de teste representa a pressão de projeto multiplicada por um coeficiente de segurança. Este ensaio assegura a qualidade dos permutadores produzidos, garantindo que o permutador não apresenta nenhum erro de montagem ou componente com defeito, e seja indiscutivelmente capaz de sustentar a pressão a que foi projetado.

Outra utilidade do OTPT é obter a pressão de teste máxima: MTP (do inglês, *Maximum Test Pressure*). O MTP é a representação do OTPT à pressão mais alta, antes de apresentar alguma falha, dividida por um coeficiente de segurança. O MTP é utilizado na fase de desenvolvimento dos PHEs, na análise de novas placas, juntas ou até mesmo estruturas.

5.1.2 Procedimento dos Testes OTPT

O procedimento dos testes de pressão utilizado durante o presente estágio curricular, baseou-se no documento “*Ordinary Temperature Pressure Test Procedure*” (Hisaka Works, 2011).

Os testes de OTPT consistem em submeter um permutador de calor de placas a incrementos de pressão até aos primeiros sinais de fuga ou deformação. Os próximos parágrafos representam de forma simplificada o procedimento utilizado durante os testes:

1. O permutador deve ser preparado com 21 a 41 placas de transferência de calor, todas com o mesmo material, espessura e propriedades mecânicas. As juntas devem ser preparadas de igual forma. Neste caso, os testes realizados foram feitos com um CPCJ com 31 placas.
2. Não são permitidas configurações de multipasse e multi-seção, estando limitadas a configurações de um único passe.
3. Arranjos com diferentes ângulos de β são aconselhados (arranjo MIX), de forma a assegurar a estanquidade do equipamento em condições propícias a alongamento das PTCs.
4. Devem ser utilizadas estruturas dedicadas para teste, sem limitação quanto à escolha de material. Contudo, a estrutura não deve interferir com o resultado dos testes. Neste caso, foi utilizado aço-carbono como matéria-prima das estruturas de teste.
5. O aperto do permutador (equação 5.1) deve ser feito até ao valor mínimo de força resistente, ou seja, a cota de aperto deve estar no valor máximo.

$$A = n \times (p + t) \quad (5.1)$$

$$A = 31 \times (2,6 + 0,5) = 96,1 \text{ (mm)}$$

- A – Aperto (mm)
- n – Número de placas
- p – Profundidade (mm)
- t – Espessura (mm)

6. O manómetro deve estar devidamente calibrado e deve ser colocado no ponto mais alto. Nos ensaios realizados foram utilizados um manómetro, uma bomba manual, uma válvula de cunha, dois acessórios de ligação ao permutador e uma curva de 90°, como apresentado na Figura 5.1.



Figura 5.1 — Teste OTPT Skills DN 32.

7. Deve ser aplicada pressão a um único lado do permutador, estando o outro lado à pressão ambiente. A pressão deve ser mantida no mínimo 20min e o permutador deve ser analisado de fugas e deformações. Caso não haja sinais de falha, o teste deve continuar de forma idêntica ao exemplo representado na Figura 5.2. Os incrementos de pressão devem manter-se entre os 1 e 2 bar, sendo aconselhado aumentar mais 0.1 a 0.5 bar à pressão especificada, com o objetivo de combater as eventuais perdas de pressão por ar preso no interior do permutador.

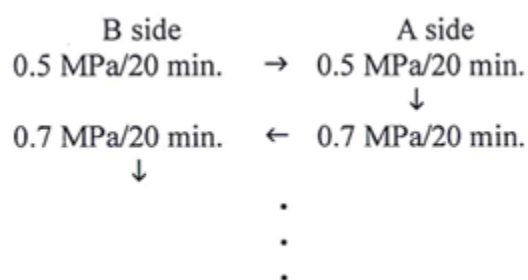


Figura 5.2 — Exemplo de Procedimento. Hisaka (2011).

8. Em caso de fuga ou deformação, o teste deve ser dado como terminado e o permutador deve ser desmontado e analisado.

5.1.3 Testes Skills

Os testes de pressão Skills foram realizados com o objetivo de analisar o desempenho do novo desenho das placas de transferência de calor da família Skills e das novas juntas com “hook lock”, obtendo o MTP do equipamento. Foram testadas placas com DN 32 e DN 65, contudo, e infelizmente, não foi possível testar as placas de DN 100 devido a limitações de tempo.

No total, ao longo do estágio curricular, foram realizados 5 testes de pressão em diferentes condições. É de realçar, sobre os resultados destes testes, que mesmo seguindo os procedimentos de forma rígida, é de extrema importância a experiência prática. Na verdade, sem essa mesma experiência, tornou-se difícil detetar os primeiros sinais de falha do permutador de calor durante os testes de pressão.

O primeiro teste de pressão teve início a 27 de janeiro de 2025 e o último teste terminou no dia 25 de junho do mesmo ano. Durante esse tempo, houve um enorme contacto com permutadores de calor de placas, desde a sua montagem e desmontagem, até à realização de testes de pressão ou hidrodinâmicos. Essas atividades permitiram-me desenvolver competências técnicas, refinando a minha capacidade de verificar anomalias no comportamento dos PHEs.

5.1.3.1 Teste Original

O teste original ocorreu quando os primeiros protótipos foram realizados. Os permutadores testados possuíam placas com o desenho original, juntas com “groove-in”, e as estruturas eram as estruturas originais. Não há valores concretos da pressão máxima alcançada, mas os valores seriam superiores a 20 bar. Este valor, apesar de não ser muito exato, foi interpretado como um objetivo a alcançar.

5.1.3.2 Teste 1: Skills DN 32

O primeiro teste foi realizado com as novas PTCs e com uma nova estrutura. As juntas que foram disponibilizadas pelo fornecedor eram juntas do modelo antigo com “groove-in” - possivelmente, as juntas tinham sido guardadas e, inicialmente, produzidas para o primeiro protótipo, datado de 2013. As juntas com “groove-in” não são compatíveis com as novas placas com “hook lock”, sendo que é necessário cortar os apêndices triangulares das juntas e fixá-las com cola às placas de transferência de calor. No entanto, é importante lembrar que a cola não é capaz de criar resistência à pressão exercida dentro do permutador, o que não traz nenhuma vantagem quando comparado com o “hook lock” ou o “groove-in” original.

Em relação ao arranjo de placas, foi utilizado um arranjo MONO, uma vez que as placas DN32 só possuem um ângulo de β .

O primeiro teste iniciou com uma pressão de 16 bar. A pressão manteve nos 16 bar, apresentando uma pequena descida devido à existência de ar preso dentro do permutador. Os testes seguintes até aos 23 bar foram idênticos.

Infelizmente, os testes que se seguiram foram impropriamente realizados, uma vez que eram os primeiros e não se conhecia o local onde o permutador iria ter tendência a falhar, levando-nos a não identificar os primeiros sinais de falha.

Durante a preparação do teste a 24 bar, foi utilizado um novo método de preparação do PHE que ajudou a remover o ar preso dentro do permutador. Esse método fez com que a descida de pressão durante o decorrer do teste reduzisse, dando a falsa segurança de que o teste a 24 bar tivesse sido o melhor teste a ser realizado.

Os testes entre os 26 até aos 28 bar foram realizados com pequenas descidas de pressão. Mas apenas aos 29 bar foi possível observar a primeira grande descida de pressão. Ainda que não se tivesse descoberto a causa (uma vez que não havia sinais de fuga) foi decidido continuar.

Nos testes aos 30 bar ocorre a primeira fuga na zona de encaixe do “hook lock”(Figura 5.3). Após uma análise mais detalhada do permutador, foi descoberto que algumas das juntas das placas sob pressão estão a deformar nas zonas de encaixe.

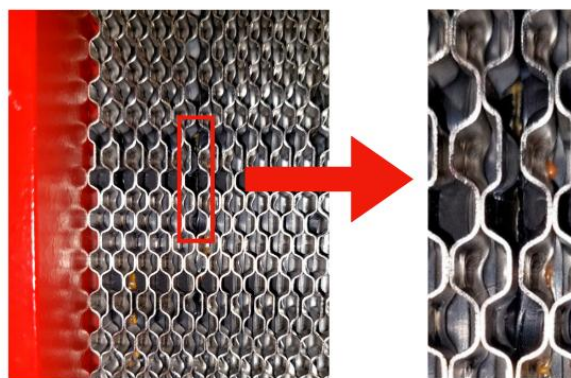


Figura 5.3 — Fuga Teste MTP 1.

Com a descoberta da fuga o teste foi dado como terminado. As placas que demonstravam deformações das juntas foram marcadas com caneta permanente e, rapidamente, se iniciou o processo de desmontagem do permutador de placas de calor.

Ao desmontar o permutador, foi possível detetar três juntas com grandes deformações, apresentadas na Figura 5.4.

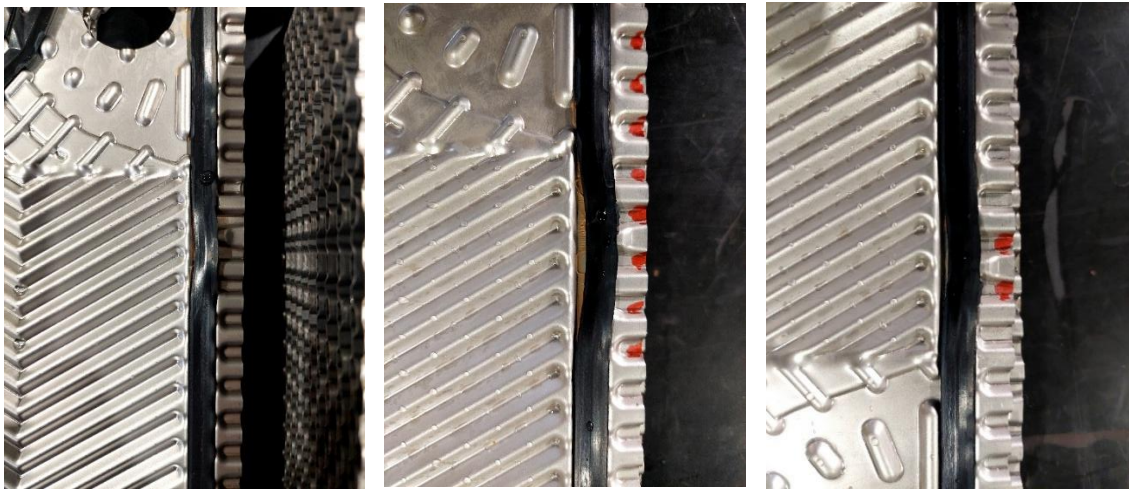


Figura 5.4 — Deformações nas Juntas.

Ao analisar estas juntas, é possível detetar que as deformações estão sempre localizadas na zona do “hook lock”, no lado dos furos que estão a alimentar a placa. O processo de marcar e tirar fotografias das zonas deformadas foi rapidamente realizado, o que se relevou especialmente útil, uma vez que, para nosso espanto, as deformações da junta não eram deformações plásticas e sim elásticas. No espaço de 30min, as juntas voltaram à sua forma inicial, sem apresentar nenhum sinal de deformação. Esta revelação levantou preocupação, uma vez que indica que deformações pequenas possam não ser possíveis de detetar.

Para confirmar a integridade da junta nos locais de deformação, foram realizados os mesmos testes em novas juntas, que ainda não tinham sido utilizadas. Os resultados desses testes demonstraram que, mesmo depois de terem sofrido grandes deformações, as juntas apresentavam o mesmo valor de dureza e altura de perfil das juntas novas.

O último valor de pressão registado antes de ter sido detetada uma fuga foi de 29 bar. Contudo, este valor não representa o verdadeiro valor onde ocorreu a primeira falha, uma vez que não eram conhecidos os valores de pressão onde começaram a surgir as primeiras deformações nas juntas, o que invalidou todos os ensaios realizados anteriormente.

Visto que as juntas que apresentavam deformações não perderam propriedades, decidiu-se realizar um novo ensaio. Neste ensaio foram removidas as 3 placas que apresentaram deformações na junta, de forma a garantir que não iriam impactar os novos ensaios. Para além disso, foi também substituído 45% do CPCJ testado anteriormente (14 placas).

Estes últimos ensaios foram realizados com extrema atenção às juntas nos locais de encaixe do “hook lock”. Desta vez, as primeiras deformações aconteceram no teste a 24 bar.

5.1.3.3 Teste 2: Skills DN 65

O teste 2 foi realizado com placas de DN 65, desenhadas com encaixe “hook lock”, juntas com “groove-in” e uma estrutura original. A montagem do CPCJ foi idêntica à montagem do DN 32, mas desta vez foram utilizados um arranjo de placas MIX, uma vez que as placas DN 65 foram estampadas com dois ângulos de β .

As juntas fornecidas eram bastantes largas e com tendência a não ficarem retidas no canal da placa, pelo que foi necessário o uso de cola e uma montagem mais cuidada.

A estrutura é uma estrutura original desenhada pelos criadores da família Skills, que contém uma placa fixa e uma placa móvel produzidas desde 2013. Ao realizar a montagem do CPCJ, foi possível encontrar um problema: as estruturas originais foram desenhadas para acomodar as placas originais, 5mm mais estreitas que as novas placas com encaixe “hook lock”. Assim, não seria possível utilizar a métrica original dos tirantes de aperto, uma vez que a sua rosca entrava em contacto com as PTCs, forçando a reduzir a métrica dos tirantes de aperto de M20 para M16; e comprometendo o aperto do permutador.

Os testes iniciaram com uma pressão de 16 bar e ocorreram sem nenhum problema até à pressão de 19bar. No teste de pressão a 20 bar, foi detetada uma falha estrutural: os tirantes de aperto localizados no centro da estrutura não estavam a conseguir resistir à força exercida pela pressão, não conseguindo garantir o aperto. Isto fez com que as estrutura e os próprios tirantes começassem a fletir (Figura 5.5).



Figura 5.5 — Falha da Estrutura de Suporte DN 65.

Como foi uma falha da estrutura e não do CPCJ os resultados destes testes ficaram totalmente inválidos, uma vez que, como enunciado no capítulo 5.1.2 ponto 4: “devem ser utilizadas estruturas dedicadas para teste, não estando limitadas quanto a escolha de material. Mas a estrutura não deve interferir com o resultado dos testes”.

Mas apesar da falha estrutural foi decidido continuar o teste, não com o intuito de obter o MTP do equipamento, mas sim com o intuito didático de falhas estruturais do permutador.

Estes ensaios foram realizados com extrema cautela, não comprometendo a segurança. A falha ocorreu as 25 bar (Figura 5.6), com a falha da junta na zona da distribuição e O-ring, havendo fuga para o lado que não estava sob pressão. Esta falha ocorreu devido á flexão excessiva da estrutura, oque fez com que a juta da segunda placa perdesse a força de aperto, causado que a estanquidade fosse comprometida.

O segundo teste foi dado como concluído, declarando estrutura original DN 65 como obsoleta. Tendo em conta este resultado foi dimensionada e produzida uma nova estrutura de testes.

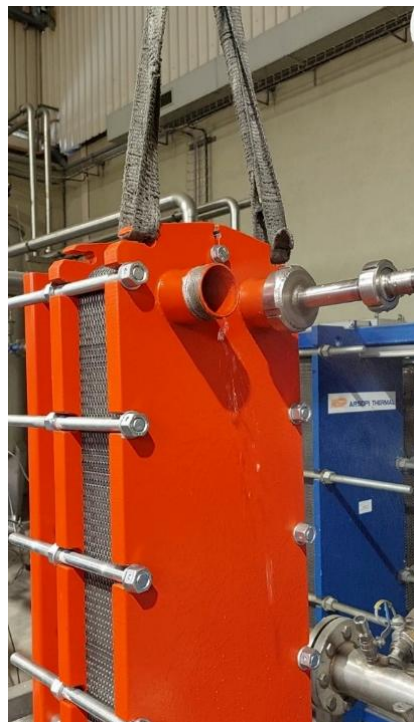


Figura 5.6 — Fuga no Teste 2.

Os ensaios foram realizados numa banca de ensaios dedicada para o laboratório. Esta bancada foi projetada com o intuito de ajudar o utilizador a realizar ensaios térmicos e hidrodinâmicos em permutadores de dimensões pequenas, estando esta capaz de fixar os permutadores e auxiliar o manuseamento das ligações à instalação

do laboratório. O seu uso em testes de OTPT não é ideal, uma vez que não permite a visibilidade integral do permutador, limitando muito a visão na parte inferior e superior do permutador. Isso fez com que só fosse mais tarde detetado outro erro estrutural que afeta as duas estruturas anteriormente testadas.

Como foi anteriormente mencionado no capítulo 3.4, as placas da Skills tem um “*hanger*” dotado de um alinhador que se eleva a poucos mm da superfície das placas. As placas móveis utilizadas nas esturras de teste eram completamente planas, não tendo em conta a geometria única das placas da Skills, estando a deformar os alinhadores das últimas placas criando uma má distribuição do aperto na parte superior e inferior das placas (Figura 5.7).



Figura 5.7 — Deformação nos Alinhadores.

Como solução foi decidido acrescentar à geometria da placa móvel duas caixas que acomodam as caudas da última placa (solução representada na Figura 5.8). A nova estrutura DN 65 já teve esta alteração no desenho de produção da placa móvel. Em relação a estrutura DN 32, a placa móvel foi reaproveitada, maquinado as caixas sem comprometer a sua integridade.



a)

b)

Figura 5.8 – Novo Desenho Estrutura DN 65: a) Placa Móvel; b) Placa Móvel com PTC.

5.1.3.4 Teste 3: Nova Estrutura Skills DN 65

O teste 3 foi realizado nas mesmas condições que o teste 2, tendo como única diferença a utilização de uma nova estrutura de testes.

A nova estrutura de testes é uma estrutura sobredimensionada, removendo por completo a sua influência no resultado dos testes de OTPT. A nova estrutura comparada com a estrutura original possui maior espessura nas placas fixa e movel, e possui uma maior métrica nos tirantes de aperto. A nova estrutura substitui a forma de ligação, abandonando a ligação roscada BSP (do inglês, *British Standard Pipe*) por uma ligação flangeada DIN EN 1092-1, com o intuito de aumentar o tempo de vida dos acessórios de ligação e de reduzir o tempo de montagem. Mas infelizmente também aumentou a quantidade de ar retida dentro do permutador, acabando por tornar o processo de preparação mais lento.

Os testes iniciaram-se a uma pressão de 16 bar, e ocorreram sem nenhum sinal de falha até as 23 bar. Tal como o primeiro teste o permutador apresentou pequenas deformações na zona de encaixe do “hook lock” à pressão de 24 bar.

Tal como o primeiro teste a deformação das juntas desapareceu durante o processo de desaperto do permutador.

5.1.3.5 Teste 4: Novas Juntas DN 32

O quarto e quinto testes foram realizados com novas juntas já com fixação com “hook lock”. As novas juntas apareceram com algumas diferenças comparado com as juntas anteriores.

A altura do perfil de secção, comparada com as juntas antigas é 0,2mm inferior. Ao realizar a encomenda das novas juntas, foi utilizada como referência o modelo 3D das juntas originais. Esta representação da junta tinha uma altura de perfil de 3mm, o que fez com que as juntas novas chegassem com uma altura de perfil de 3,1mm. Infelizmente o desenho original da junta deve ter sofrido alterações que não foram catalogadas, pois as juntas anteriormente testadas apresentavam uma altura de perfil de 3,3mm. Isto faz com que a força de aperto do permutador seja inferior com as juntas novas, afetando o MTP.

Outra observação a dureza da junta. Ao analisar as duas juntas, era possível sentir que as juntas novas aparentavam ser mais flexíveis que as juntas antigas. Então foram realizados ensaios de dureza para comprovar a suspeita. Ao realizar os ensaios foi possível comprovar que as juntas novas apresentavam valores de dureza inferiores as juntas antigas, tendo as juntas novas uma dureza média de 77HB e as juntas antigas dureza média de 82HB.

Por último, as juntas novas apresentam um excesso de comprimento ainda superior às juntas antigas. Como foi mencionado no capítulo 5.1.3.3 as juntas testadas anteriormente também eram ligeiramente longas, mas como era necessário o uso de cola para a fixação das juntas, esses pequenos excessos de comprimento foram facilmente controlados, permitindo a montagem do CPCJ sem muitos cuidados. No caso das juntas novas estas apresentam comprimentos ainda mais longos que as juntas antigas, e, como as juntas novas já possuíam o devido método de fixação à placa de transferência de calor (“hook lock”), o uso de cola já não era aceite. Então foi necessário fazer uma seleção das juntas com menores discrepâncias ao comprimento desejado, e a montagem do CPCJ foi realizada com cuidado redobrado na sobreposição das placas. Devido à flexibilidade das juntas e ao peso que as placas exercem quando o CPCJ é montado, as juntas foram acomodando no canal das placas, dando a aparência que os excessos de comprimento não eram assim tão significativos. Mas com uma análise mais cuidada, é possível detetar o acumular de excesso junto ao furo de entrada e saída de fluido. A Figura 5.9 representa uma visão exagerada do desalinhamento da junta criada pelo excesso de comprimento.

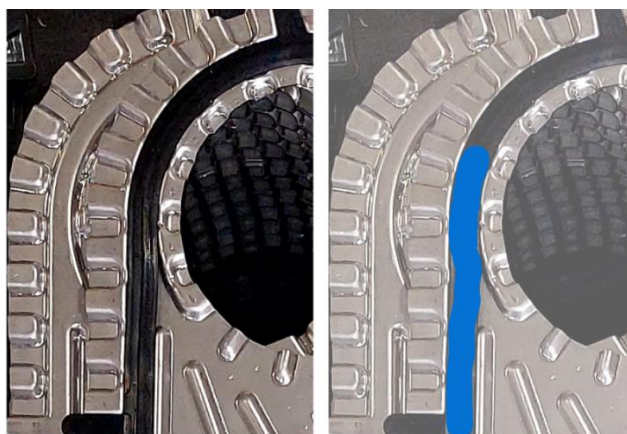


Figura 5.9 — Representação Exagerada do Desalinhamento da Junta.

A montagem do CPCJ no permutador foi realizada com algumas dificuldades, havendo algumas juntas que acabavam por sair do canal da junta, correndo o risco de acabarem por ser mordidas pelo corrugado das PTCs quando fosse realizado o aperto. A Figura 5.10 apresenta uma junta mordida devido a uma montagem imprópria.



Figura 5.10 — Junta Mordida.

Com as dificuldades da montagem do permutador foi decidido começar os testes de pressão a 10 bar. Os primeiros testes foram efetuados sem nenhuma dificuldade, mas, surpreendentemente, as juntas começaram a mover-se na zona do “hook lock” a uma pressão de 14 bar e fuga à pressão de 16 bar.

Para confirmar que era defeito de montagem, o teste foi repetido com recurso a nova placa e nova junta. Para tentar suprimir o erro da altura das juntas, decidiu-se ultrapassar a cota de aperto máximo, apertando o permutador a uma cota de 95,5mm.

Assim, foi realizado um novo teste. Porém, à pressão de 17 bar, apareceram os primeiros sinais de falha e fuga.

5.1.3.6 Teste 5: Novas Juntas DN 65

O quinto teste encontrou problemas idênticos ao quarto teste, com a diferença de que as novas juntas DN 65 têm uma altura de perfil igual às juntas antigas (3,3mm). Tal como as novas juntas DN 32, as juntas DN 65 também apresentam um comprimento superior que afeta a montagem do CPCJ e a sua montagem na estrutura.

Apesar da altura de perfil da junta ser de valor igual às juntas antigas, decidiu-se ultrapassar a cota mínima de aperto (de 96,1 mm para 95,5 mm), de forma a aumentar a força de aperto, uma vez que as novas juntas apresentam uma dureza inferior às antigas.

Os testes começaram a 10 bar, mas apresentaram uma deformação e fuga à pressão de 18 bar. Uma vez mais, a fuga foi localizada na zona do “hook lock” (Figura 5.11).

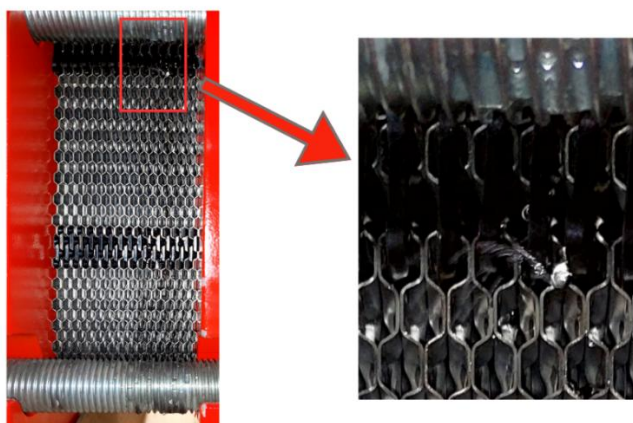


Figura 5.11 — Fuga no Teste 5.

5.1.4 Discussão de Testes de Pressão Skills

Depois da análise dos cinco testes realizados, e como tentativa de explicar a discrepância dos resultados obtidos em 2013 e 2025, foram colocadas três hipóteses que poderão explicar este insucesso:

1. A primeira hipótese tem como foco a alteração da geometria da placa de transferência de calor, que vê como o principal problema.
2. A segunda hipótese coloca em causa a qualidade das juntas, que aponta como a causa da inconsistência dos resultados.
3. E, pelo contrário, a terceira hipótese defende as alterações geométricas das placas de transferência de calor, mas põe em causa o perfil de secção da junta.

5.1.4.1 Primeira Hipótese

Ao longo da realização dos testes de pressão foi possível encontrar um padrão: as deformações das juntas e consequentes fugas ocorrem sempre na zona do “hook lock”.

Esta hipótese suspeita que as juntas com “groove-in” que o fornecedor disponibilizou, usadas nos testes 1 ao 3, sejam juntas produzidas em excesso para os testes originais em 2013. É provável que, ainda que cuidadosamente preservadas e em condições controladas, tenham envelhecido e, consequentemente, perdendo elasticidade e aumentando dureza. Esta suspeita reforça a teoria de que os testes realizados em 2013 tenham usado juntas com a mesma dureza que as juntas usadas nos testes 4 e 5.

Confiando nesta hipótese, é possível atribuir a culpa dos baixos resultados obtidos no teste 5 à alteração do método de fixação da junta. Com uma simples análise, é possível visualizar na Figura 5.12 que as zonas de encaixe dos “hook lock”, quando comparadas com as zonas de encaixe dos “groove-in”, apresentam uma menor capacidade de reter a junta, uma vez que esta tem duas cavidades bastante maiores que a única cavidade encontrada nas zonas de encaixe “groove-in”.

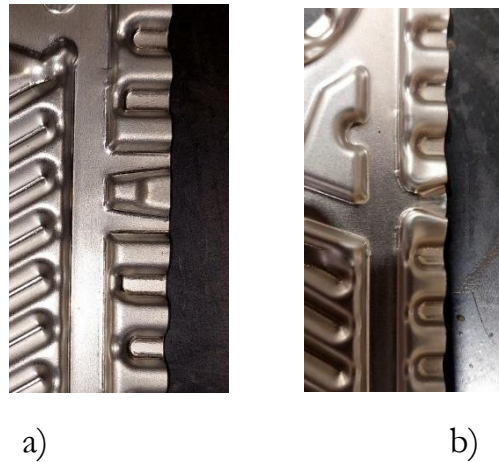


Figura 5.12 — Zona de Encaixe: a) Hook lock; b) Groove-in.

Uma possível solução seria abandonar por completo a criação de geometrias de fixação de juntas e utilizar cola para a fixação das mesmas. Ao eliminar essas geometrias estar-se-ia a garantir um canal da junta que não tenha nenhuma interrupção, oferecendo sempre a mesma capacidade de retenção.

5.1.4.2 Segunda Hipótese

O fornecedor das juntas da família Skills é um novo fornecedor da Arsopi-Thermal, pelo que todas as outras juntas que a empresa utiliza nos seus equipamentos são fornecidas por outros fornecedores.

Ao longo da realização dos testes, o controlo de qualidade do fornecedor foi posto em causa. Antes de ser feita a encomenda das juntas para os testes 4 e 5, foram pedidas amostras, que apresentavam todas as dimensões esperadas e montavam facilmente nas placas de transferência de calor. Porém, como repetidamente enunciado na descrição dos testes, a maioria das juntas encomendadas apresentavam um comprimento de junta superior, dificultando a montagem do CPCJ.

Outra característica das juntas importante de clarificar com o fornecedor é a dureza. Durante os testes foram utilizados dois tipos de juntas que, como falado na hipótese anterior, apresentavam valores de dureza bastante distintos. A utilização de

componentes com uma grande discrepância de características físicas e dimensionais não contribuem para a exatidão dos resultados dos ensaios.

Uma possível solução para evitar estas inconsistências seria garantir o controlo da qualidade da produção das juntas: melhor controlo da temperatura do molde, melhor controlo da pressão e temperatura de injeção e melhor controlo do tempo de arrefecimento do material. No caso deste controlo não ser possível, a solução poderá passar pela troca do processo de conformação para moldação por compressão.

5.1.4.3 Terceira Hipótese

Outro padrão observado durante a realização dos testes relaciona-se com as deformações das juntas, que ocorrem sempre da mesma forma. As juntas têm tendência a torcer e mover-se fora do seu canal, como apresentado na Figura 5.13.

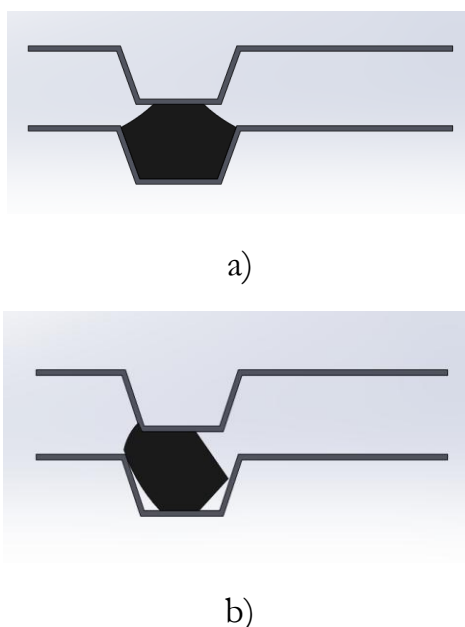


Figura 5.13 — Posição da Junta: a) Normal; b) Torcida devido a Pressão.

Como descrito anteriormente, as juntas da família Skills são as únicas juntas na Arsopi-Thermal que utilizam uma geometria de perfil pentagonal.

É de extrema importância clarificar novamente que toda a experiência que adquiri ao longo deste estágio curricular foi com permutadores da família Skills, ou seja, com juntas com secção pentagonal. Assim, através de uma análise teórica, foi possível verificar que este perfil aparenta ser instável, uma vez que a sua deformação não é igual nos pontos de contacto com a placa, o que cria tensões não simétricas e uma enorme concentração de forças no centro da superfície superior.

Esta instabilidade torna mais fácil a compressão da junta na face inferior e, ao mesmo tempo, um equilíbrio precário na superfície superior, permitindo a rotação da junta e levando a deformações e fugas.

Avaliar a performance de um permutador com junta de perfil de secção tradicional poderia ser uma mais-valia, uma vez que permitiria formar conclusões sobre o desempenho das PTCs, recorrendo a resultados reais.

5.2 Testes Hidrodinâmicos

A realização de testes hidrodinâmicos surgiu com o intuito de verificar o estado do laboratório não só em termos de funcionamento, calibração de instrumentos e estado de componentes, como de forma educativa relativa ao estágio curricular.

Em termos de equipamento em análise foi escolhido as placas da Skills DN 32 que já tinham sido analisadas em setembro de 2013, assim podendo comparar os resultados.

O equipamento para análise escolhido foram as placas da Skills DN 32, que já tinham sido previamente analisadas em setembro de 2013. Esta escolha surge da possibilidade de se poder comparar os resultados obtidos.

5.2.1 Cálculo Teórico da Perda de Carga

Segundo os documentos redigidos pelo INEGI, no cálculo de perda de carga são tidas em conta estas três componentes:

- Perda de carga no escoamento nos canais corrugados (ΔP_1);
- Perda de carga no furo das placas e na zona de distribuição (ΔP_2);
- Variação de pressão por mudança de cota (ΔP_3).

A expressão da perda de carga (ΔP) é dada pela equação 5.2.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (5.2)$$

Por sua vez, a perda de carga ΔP_1 é calculada pela Equação de Fanning (equação 5.3).

$$\Delta P_1 = \frac{2 f L_h}{\rho D_e} \left(\frac{\dot{m}}{N A_{\text{canal}}} \right)^2 \quad (5.3)$$

- f – Fator de atrito de Fanning;
- L_h – Distância vertical entre os centros dos orifícios das placas (m);
- D_e – Diâmetro equivalente (m);
- \dot{m} – Caudal mássico do fluido quente ou frio (kg/s);
- N – Número de canais;
- A_{canal} – Área de um canal de escoamento (m²).

A perda de carga na zona do furo e da distribuição (ΔP_2) pode ser calculada a partir da equação 5.4.

$$\Delta P_2 = \frac{K N_p}{2 \rho} \left(\frac{\dot{m}}{A_{orificio}} \right)^2 \quad (5.4)$$

- N_p – Número de passagens;
- $A_{orificio}$ – Área do furo (m²);
- K – Constante experimental (1,4);
- ρ – Massa volúmica (kg/m³);
- \dot{m} – Caudal mássico do fluido quente ou frio (kg/s).

Devido há mudança de cota, a variação da pressão pode ser calculada a partir da equação 5.5.

$$\Delta P_3 = \rho g L_h \quad (5.5)$$

- ρ – Massa volúmica (kg/m³);
- g – Aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
- L_h – Distância vertical entre os centros dos orifícios das placas (m).

Assim, a expressão de perda de carga pode ser expressa através das equações 5.6 e 5.7:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (5.6)$$

$$\Delta P = \frac{2 f L_h}{\rho D_e} \left(\frac{\dot{m}}{N A_{canal}} \right)^2 + \frac{K N_p}{2 \rho} \left(\frac{\dot{m}}{A_{orificio}} \right)^2 + \rho g L_h \quad (5.7)$$

5.2.2 Cálculo Perda de Carga Experimental

Na Arsopi-Thermal, o cálculo da perda de carga é efetuado com a metodologia da Hisaka Works. Este cálculo é apresentado em função do caudal e efetuado com recurso a constantes experimentais. A sua expressão resulta da soma da perda de carga no furo (ΔP_h) e da perda de carga nos canais (ΔP_p). A fórmula da perda de carga (ΔP) é apresentada pela equação 5.8.

$$\Delta P = \Delta P_h + \Delta P_p N_p \quad (5.8)$$

O N_p representa o número de passagens que o fluido faz no permutador. É importante realçar que o número de passagens do fluido é o número de vezes que o fluido ascende ou descende no permutador, não correspondendo ao número de canais que o fluido atravessa.

As ΔP_p e ΔP_h são muito idênticas às ΔP_1 e ΔP_2 , respetivamente. A sua diferença é que a ΔP_3 está contida nos valores das constantes experimentais, uma vez que os ensaios de perda de carga são realizados exclusivamente no fluido quente e com o fluido em ascensão pelo permutador. As ΔP_h e ΔP_p (equação 5.9 e 5.10, respetivamente) em regimes de fluido turbulento são apresentadas através das seguintes fórmulas:

$$\Delta P_h = \alpha_3 \cdot Q^{\alpha_2} \cdot f \quad (5.9)$$

$$\Delta P_p = \alpha_1 \cdot Q_r^{\alpha_2} \cdot f \quad (5.10)$$

- Q – Caudal Volumétrico Total;
- Q_r – Caudal Volumétrico que passa por uma placa;
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – Constantes experimentais.

As constantes experimentais (α_1, α_2 e α_3) são os valores que são retirados dos resultados dos ensaios de perda de carga. O f , representado nas equações anteriores, é identificado pela Hisaka Works como um fator de correção das propriedades físicas (equação 5.11) que se alteram com a temperatura. Este fator pode ser calculado da seguinte forma:

$$f = \left(\frac{\rho}{1000} \right)^{0,9} \cdot \mu^{0,1} \quad (5.11)$$

- ρ – Massa volúmica (kg/m^3);
- μ – Viscosidade absoluta (mPa/s).

O objetivo do teste hidrodinâmico é obter o valor das constantes experimentais α_1, α_2 e α_3 .

5.2.3 Metodologia de Ensaio de Perda de Carga

A metodologia apresentada neste capítulo foi baseada num documento de junho de 2012, fornecido pela Hisaka Works: *Laboratory Pressure Drop Tests and Generic Information*. A metodologia apresentada neste documento é uma metodologia geral, que pode ser realizada em qualquer laboratório. Contudo, neste capítulo serão apresentados arranjos adicionais que remetem características únicas do laboratório da Arsopi-Thermal, que influenciam os valores adquiridos.

É importante ter algumas noções gerais sobre esta metodologia. Os testes de perda de carga devem ser divididos em dois.

- **Teste de perda de carga no canal** – Nestes testes, são analisados permutadores com um CPCJ com 3 a 5 placas, nos quais o fluido só atravessa 1 ou 2 canais. A perda de carga no furo é mínima, podendo ser considerada como desprezável.
- **Teste de perda de carga no furo** – Nestes testes, são utilizadas CPCJ com o mínimo de 21 placas, o que aumenta o impacto do furo na perda de carga.

A ΔP é sempre medida no lado quente, estando o fluido quente em ascensão pelo permutador. O teste de ΔP é limitado por duas condições: a ΔP_{max} (equação 5.12) e a ΔP_{min} (5.13).

$$\Delta P_{max}: P_{Cold Side} \geq P_{Hot Side} + 1.5 \text{ (bar)} \quad (5.12)$$

$$\Delta P_{min}: P_{Cold Side} = 0 \quad (5.13)$$

5.2.3.1 Metodologia Geral

Valores Perda de Carga Total

Para obter a correlação de ΔP_{min} são necessários os seguintes passos:

1. Encontrar os limites de caudal (Q_1 e Q_2), correspondentes a perdas de carga de 1.5 (ΔP_1) e 0.3 bar (ΔP_2) em P_{min} , sem *back pressure* (inglês para contrapressão, ou seja, pressão exercida por um fluido na outra face da placa);
2. Obter os valores de ΔP_3 , ΔP_4 e ΔP_5 para os caudais Q_3 , Q_4 e Q_5 (que correspondem a caudais entre Q_1 e Q_2);
3. Tratar matematicamente os dados adquiridos e fazer um gráfico logarítmico Q vs ΔP .

Por sua vez, para obter a correlação de ΔP_{\max} são necessários os seguintes passos:

4. Obter os valores de ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 , ΔP_4 e ΔP_5 , correspondentes aos caudais Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 e Q_5 utilizados no ensaio anterior, mas desta vez com *back pressure*;
5. Tratar matematicamente os dados adquiridos e fazer um gráfico logarítmico Q vs ΔP ;
6. Realizar uma análise de paridade, onde a divisão entre ΔP_{\max} sobre ΔP_{\min} deve estar próxima de 1 (equação 5.14).

$$\text{Paridade: } \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{\min}} \approx 1 \quad (5.14)$$

Os resultados são analisados da seguinte forma:

- Paridade = 1 (ótimo);
- Paridade = 1,5 (aceitável);
- Paridade = 2 (inaceitável).

Valores Perda de Carga nos Canais

Neste caso, não é necessário obter valores de ΔP_{\min} , uma vez que são desprezáveis.

Para obter a correlação de ΔP_{\max} são necessários os seguintes passos:

1. Obter os valores de Q_1 e Q_2 correspondentes às ΔP_1 e ΔP_2 , semelhante ao primeiro passo da perda de carga total, mas com *back pressure*);
2. Obter os valores de ΔP_3 , ΔP_4 e ΔP_5 , correspondentes aos caudais, Q_3 , Q_4 e Q_5 , idêntico ao ensaio anterior;
3. Tratar matematicamente os dados adquiridos e fazer um gráfico logarítmico Q vs ΔP .

Tratar os Valores de Perda de Carga e Obter Constantes Experimentais

1. Tratar os valores obtidos de ΔP_p (equação 5.15) de maneira a obter o valor das constantes experimentais (α_1 , α_2).

Para isso, é necessário transformar a fórmula de ΔP_p num formato de $y=mx+b$ (equação 5.16).

$$\Delta P_p = \alpha_1 \cdot Q_r^{\alpha_2} \cdot f \quad (=) \quad (5.15)$$

$$(\Rightarrow) \ln\left(\frac{\Delta P_p}{f}\right) = \alpha_2 \ln(Q_r) + \ln(\alpha_1) \quad (5.16)$$

Fazendo uma regressão linear com os resultados obtidos em Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 e Q_5 , é possível obter o valor das constantes experimentais (α_1, α_2).

2. Com as constantes (α_1, α_2) obtidas, é possível retirar o valor de ΔP_p aos valores de perda de carga total e obter os valores de ΔP_h (equação 5.17).

$$\Delta P_h = \Delta P_{total} - \Delta P_p \quad (5.17)$$

Com os valores de ΔP_h calculados é possível proceder ao tratamento matemático dos valores, rearranjando a fórmula da ΔP_h (equação 5.18) em formato $y=mx+b$ (equação 5.19), fazendo novamente uma regressão linear e obtendo o valor das constantes (α_2, α_3):

$$\Delta P_h = \alpha_3 \cdot Q^{\alpha_2} \cdot f \quad (\Rightarrow) \quad (5.18)$$

$$(\Rightarrow) \ln\left(\frac{\Delta P_h}{f}\right) = \alpha_2 \ln(Q) + \ln(\alpha_3) \quad (5.19)$$

5.2.3.2 Arranjos na Metodologia

Como mencionado na introdução deste capítulo (5.2.3) foi necessário recorrer a alguns ajustes para seguir a metodologia proposta.

Perda de Carga nos Acessórios de Ligação

Devido à fragilidade dos tubos capilares, os sensores de pressão diferencial encontram-se num local fixo da tubagem. Entre cada terminal do sensor e o permutador, existe uma tubagem flexível blindada de aço com 2m de comprimento, um tubo flangeado de DN80 com 330mm de comprimento (onde se encontram os sensores de pressão absoluta e temperatura) e um acessório de ligação de flange DN80 a BSP DN32.

Estes acessórios adicionam uma ΔP significativa. Por isso, é necessário subtrair os valores de perda de carga destes acessórios à perda de carga lida diretamente do programa. Para obter coeficientes experimentais da perda de carga do acessório, é efetuada uma ligação direta entre as duas roscas BSP DN32 (Figura 5.14) e são

obtidos valores de ΔP para um alargado número de caudais. As constantes experimentais de ΔP nos acessórios são calculadas de forma idêntica às constantes de ΔP do permutador.



Figura 5.14 — Ensaio Hidrodinâmico Perda de Carga nos Acessório de Ligação.

Devido ao custo associado em manter a temperatura do fluido quente a 45°C , os testes hidrodinâmicos foram realizados com água a temperatura ambiente. Segundo a Hisaka Works, os testes de perda de carga em regime de fluido turbulento devem ser realizados com fluido quente a temperaturas mínimas entre os 20°C e os 30°C e temperaturas máximas entre os 60°C e os 80°C . Contudo, as constantes experimentais são calculadas para valores de temperatura a 45°C . Quando não é possível manter a temperatura média do lado quente a 45°C , é necessário utilizar o coeficiente de correção das propriedades físicas (C), calculado a partir da equação 5.20.

$$C = \frac{f_{45^{\circ}\text{C}}}{f_0} \quad (5.20)$$

$$f_0 = \rho^{0,9} \times \mu^{0,1} \quad (5.21)$$

$$f_{45^{\circ}\text{C}} = \rho_{45^{\circ}\text{C}}^{0,9} \times \mu_{45^{\circ}\text{C}}^{0,1} = 0,9416 \quad (5.22)$$

- f_0 – fator de correção á temperatura da realização do teste (equação 5.21);
- $f_{45^{\circ}\text{C}}$ - fator de correção á temperatura de 45°C (equação 5.22).

O coeficiente C é multiplicado à ΔP lida do programa, ajustando-a para valores de $\Delta P_{45^{\circ}\text{C}}$.

5.2.4 Ensaio Laboratoriais

Como referido anteriormente, os ensaios hidrodinâmicos realizados no laboratório não tiveram como principal objetivo a obtenção de novas constantes experimentais utilizadas para o cálculo da perda de carga em permutadores de calor de placas. Pelo contrário, estes ensaios tiveram como foco a componente educativa relativa aos ensaios em permutadores e a verificação do estado do laboratório. A Figura 5.15 representa o permutador Skills DN 32 em teste.

É importante realçar que os valores obtidos durante os ensaios hidrodinâmicos foram obtidos através de equipamentos sem calibração atualizada, colocando, assim, em causa a veracidade dos resultados obtidos.



Figura 5.15 — Testes Hidrodinâmicos Skills DN 32.

As placas Skills DN 32 já tinham sido testadas em 2013 e as respetivas folhas de cálculo em Excel das constantes experimentais foram devidamente guardadas. Estas folhas serviram como base na construção de uma nova folha de cálculo, adaptada a novas condições de teste. As folhas são extremamente detalhadas e contêm os antigos registos experimentais, que foram usados como guia e comparação dos resultados obtidos nos novos ensaios hidrodinâmicos.

Nos ensaios originais para o teste de perda de carga nos canais (ΔP_p) foram utilizadas 5 placas; e para o teste de perda de carga total (ΔP_{total}) foram utilizados arranjos com 21, 41 e 51 placas. Contudo, nos ensaios atuais, devido ao número limitado de placas

à disposição, os testes de perda de carga total foram realizados com 21, 31 e 41 placas.

Ao analisar a folha de cálculo original, foi possível encontrar uma incongruência que falha à metodologia e que desrespeita os valores de paridade admissíveis. Na metodologia, os valores iguais ou superiores a 2 são considerados inadmissíveis e, na folha original, os valores de paridade encontraram-se entre 2,36 e 3,73. Esta paridade também não foi conseguida na nova folha de cálculo, que apresentou valores entre 1,65 e 2,51.

Outra dificuldade enfrentada e que desrespeita a metodologia imposta pela Hisaka Works relaciona-se com a temperatura do teste. Como descrito anteriormente, os testes hidrodinâmicos em regime turbulento estão limitados a uma temperatura mínima de fluido quente entre 20°C e os 30°C e a uma temperatura máxima de fluido quente entre os 60°C e os 80°C. Contudo, alguns dos testes realizados apresentaram uma temperatura de fluido quente de 17,75°C.

A nova folha de cálculo das constantes experimentais é idêntica à folha de cálculo de 2013, com a principal diferença de que os testes realizados em 2013 foram efetuados com água quente a 45°C, não necessitando de utilizar o coeficiente C para corrigir a ΔP lida.

Depois da folha de cálculo devidamente preenchida, foi possível notar que, no teste realizado com 21 placas, o ΔP_{total} , que remete a Q_2 , é inferior ao valor de ΔP_p calculada, impossibilitando o cálculo das constantes α_2 e α_3 , para este arranjo de placas.

Este erro deve-se ao facto de que, durante os ensaios atuais de perda de carga nos canais, houve dificuldades na obtenção de valores baixos de Q_2 (caudal de teste inferior), tendo os testes originais o valor de 1m³/h e o teste atual de 1,9m³/h. A impossibilidade de chegar a valores tão baixos ocorreu pelo facto de que as bombas não conseguem trabalhar em baixas rotações, devido ao seu sistema de segurança que evita o sobreaquecimento do motor da bomba. Este arrefecimento é fornecido por um ventilador que está acoplado ao veio de transmissão, estando o seu desempenho diretamente relacionado com as rotações do veio do motor.

Devido a este entrave, os valores que são tratados matematicamente para obter os valores das constantes α_2 e α_3 não contemplam valores de Q_r inferiores a 0,95m³/h; e um terço dos valores obtidos de perda de carga total encontram-se a valores inferiores, o que compromete a validade dos resultados.

6 Projeto de Elevador

Com a análise e sugestões de possíveis melhorias do laboratório, identificou-se a necessidade de melhorar a estação de trabalho utilizada para os ensaios de permutadores de calor de placas. A mesa anteriormente existente para esse efeito apresentava várias limitações: apesar de permitir a fixação dos permutadores e auxiliar na montagem dos acessórios de ligação, o sistema de fixação recorria a barrotes de madeira, o que comprometia a segurança estrutural e a estabilidade durante as operações.

Outro inconveniente encontrado residia no facto de se tratar de uma mesa de altura fixa. Esta característica dificultava significativamente tarefas como: colocação dos permutadores na superfície de trabalho, realização das ligações ao laboratório e, sobretudo, a inspeção visual completa do permutador durante os testes (como ocorreu nos testes de OTPT 1 e 2).

Face a estas limitações, e sob sugestão do supervisor da empresa, foi proposto o desenvolvimento de um projeto para a construção de uma mesa elevatória. Depois de alguma reflexão, percebeu-se que este novo equipamento deveria ser:

- Robusto e seguro, garantindo estabilidade durante a montagem e ensaio dos permutadores de calor;
- Ajustável em altura, facilitando o posicionamento do equipamento, melhorando a ergonomia e permitindo a inspeção visual de todos os elementos;
- Adequado ao ambiente de laboratório, com um sistema de fixação eficiente que dispensasse o uso de soluções improvisadas, como os barrotes de madeira.

O objetivo principal do projeto do elevador foi conceber uma solução que aumentasse a segurança, a eficiência e a ergonomia das operações realizadas com os permutadores de calor, garantindo simultaneamente maior acessibilidade e visibilidade durante os testes experimentais.

6.1 Escolha de Tecnologia

Após a análise das necessidades do projeto e dos objetivos estabelecidos, procedeu-se a um estudo comparativo de diferentes tecnologias que pudessem satisfazer os requisitos de robustez, segurança e acessibilidade – necessidades anteriormente encontradas. Foram consideradas várias soluções, sendo que as mais viáveis apresentavam o mesmo princípio estrutural: o uso de um mecanismo de elevação do tipo tesoura.

Esta configuração apresenta diversas vantagens. Tem uma elevada estabilidade, devido à geometria do sistema, que distribui as cargas de forma uniforme; robustez estrutural, que permite suportar cargas significativas com reduzida deformação; e capacidade de carga elevada, adequada aos permutadores de calor. Para além disso, a sua compactidade, permite que o mecanismo seja integrado num espaço reduzido, sem comprometer a funcionalidade.

Definida a estrutura geral, foi necessário selecionar o sistema de acionamento para a elevação. Para o efeito, foram consideradas duas alternativas principais: parafuso de acionamento mecânico, caracterizado por simplicidade mecânica e precisão, mas com menor velocidade de operação e maior desgaste por atrito; e sistema hidráulico, com elevada força de elevação, operação suave, boa durabilidade e manutenção relativamente simples.

Contudo, tendo em conta fatores como as soluções disponíveis no mercado, requisitos de segurança, simplicidade de implementação, restrições de tempo para o desenvolvimento do projeto e desempenho global, optou-se pela adoção de um mecanismo hidráulico como sistema de elevação. Esta solução proporcionou uma relação favorável entre custo, eficiência e fiabilidade, sendo particularmente adequada para aplicações industriais e laboratoriais. A Figura 6.1 representa o desenho final do elevador.



Figura 6.1 — Modelo 3D do Elevador.

6.2 Projeto e Dimensionamento da Estrutura

O projeto do elevador foi pensado de forma estratégica, com o objetivo de utilizar o máximo de stock já existente da Arsopi-Thermal e usufruir dos recursos de produção que a empresa executa. Esta decisão permitiu evitar a aquisição de novos componentes e a acumulação de stock sem uso, reduzindo custos de material e produção.

Assim, os componentes estruturais do elevador foram desenhados de forma a facilitar a sua montagem. A estrutura do elevador está dividida em quatro peças principais: base superior, base inferior, pernas H e pernas U.

Estas peças são compostas por vários componentes soldados, uma ligação permanente e de elevada robustez. As ligações entre as quatro peças são feitas por furo e veio, recorrendo a seis veios fixados por anéis de retenção, um método de ligação não permanente, o que permite uma desmontagem rápida e simples sempre que necessário.

O dimensionamento da estrutura da mesa elevatória foi realizado recorrendo à ferramenta de cálculo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) do software SolidWorks. Esta tecnologia baseia-se na divisão do modelo tridimensional de um conjunto de elementos (finitos) interligados por nós, permitindo resolver numericamente as equações que descrevem o comportamento mecânico da estrutura sob diferentes condições de carga.

Este método de simulação possibilita a avaliação de parâmetros como tensões, deslocamento e deformações, permitindo prever o desempenho estrutural. Esta ferramenta de simulação foi utilizada para testar múltiplas configurações da estrutura, nomeadamente: perfis estruturais diferentes, no que diz respeito à geometria e dimensão; variação da localização do sistema hidráulico; e alterações no desenho global.

A utilização desta ferramenta revelou ser vantajosa, uma vez que, face à limitação temporal do projeto, permitiu reduzir significativamente o tempo de desenvolvimento do elevador. Para além disso, foram realizados diversos ensaios com diferentes níveis de ajuste que, em condições tradicionais, exigiriam uma alteração total do cálculo, aumentando o tempo de execução.

Para reduzir o tempo de cálculo, algumas das simulações foram realizadas a componentes individuais, nomeadamente, os que apresentavam maiores tensões enquanto se encontravam em esforço (Figura 6.2). Esses componentes foram simulados com malhas finas (tamanho máximo de elemento de 2mm e mínimo de 0,2mm), evitando a criação de singularidades - elementos que apresentam tensões excessivas, inviabilizando as simulações.

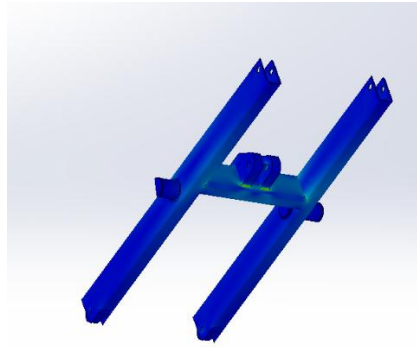


Figura 6.2 — Simulação MEF Pernas H.

Adicionalmente, a estrutura do elevador foi dimensionada para suportar cargas superiores a 1t. Contudo, com as restrições ao material existente no stock da Arsopi-Thermal, a estrutura acabou por ficar sobredimensionada.

Não obstante, o elevador foi limitado a uma carga máxima de 750kg, para garantir a segurança dos seus utilizadores.

6.3 Projeto e Dimensionamento do Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico é um mecanismo que anima o elevador em tesoura. Este sistema foi projetado para ser capaz de sustentar e elevar a carga suportada pelo elevador, assegurando movimentos lentos e controlados, de forma a preservar a segurança do utilizador em todos os momentos da operação. Com o objetivo de responder aos requisitos de movimento e segurança do elevador, foi proposto o seguinte esquema hidráulico:

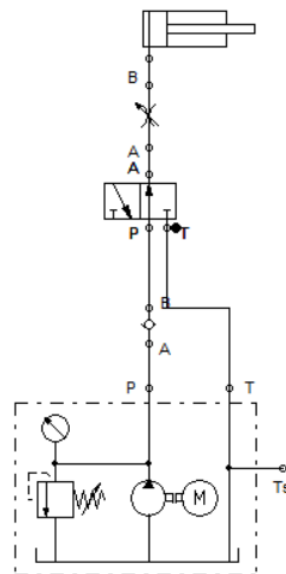


Figura 6.3 — Primeiro Esquema Hidráulico.

Este primeiro esquema hidráulico concretizava todos os requisitos definidos. Como observado na Figura 6.3, o controlo da velocidade dos movimentos do pistão hidráulico era regulado por uma válvula reguladora de caudal; o sentido do movimento era imposto por uma válvula de três vias e duas posições; e a segurança era imposta por uma válvula de segurança, que impõem uma pressão máxima, e uma válvula antirretorno, que impede a circulação do fluido na direção contrária, evitando a descida espontânea do elevador e evitando danos à bomba.

Contudo, ao entrar em contacto com o fornecedor dos componentes hidráulicos foi sugerida uma versão mais simplificada:

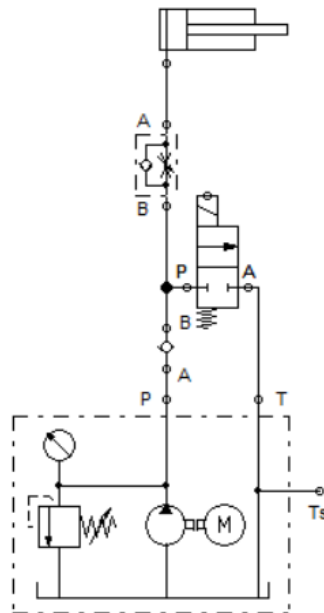


Figura 6.4 — Esquema Hidráulico Final.

O circuito apresentado na Figura 6.4 é utilizado nas docas de camião para alinhar a altura da doca à altura do atrelado. A velocidade de subida não é controlada, mas é imposta pelo dimensionamento da bomba e motor, que se certificam que a subida seja lenta, independentemente da carga. A válvula de duas vias duas posições permite a descida do elevador, que é regulada a partir de uma válvula reguladora de caudal unidirecional. E, por fim, as válvulas de antirretorno e de segurança são utilizadas de forma semelhante ao esquema anterior. Esta principal diferença é o que torna o circuito mais seguro e simplificado.

Para além disso, com este circuito hidráulico foi possível utilizar uma minicentral, uma solução compacta, onde se localizam a maior parte dos componentes do circuito hidráulico.

Nesta minicentral, podemos encontrar:

- Motor trifásico de 0,75kW;
- Bomba com $1,2\text{cm}^3/\text{rot}$;
- Depósito de 5L;
- Válvula de segurança;
- Válvula antirretorno;
- Válvula solenoide de 2 vias 2 posições 12V DC.

No circuito exterior da minicentral encontramos um manómetro que indica a pressão a que se encontra o circuito. Já junto ao pistão hidráulico é possível encontrar a válvula reguladora unidirecional, que se encontra num local com ótimo acesso, permitindo ao utilizador facilmente regular a velocidade de descida.

O pistão hidráulico foi dimensionado tendo em consideração o cenário de carga mais desfavorável: quando o elevador se encontra em maior esforço. Isto acontece quando o elevador se encontra na posição mais baixa, enquanto a sua carga está totalmente localizada sobre as pernas, onde o pistão hidráulico atua. Se o pistão hidráulico conseguir vencer as forças impostas neste cenário, o seu desempenho está assegurado para qualquer outra posição de operação da mesa elevatória. A Figura 6.5 representa as forças aplicadas para o cálculo da força executada pelo pistão (força B) a contrariar 1000kg de carga (representadas pela força A). O cálculo da força é demonstrado na equação 6.1.

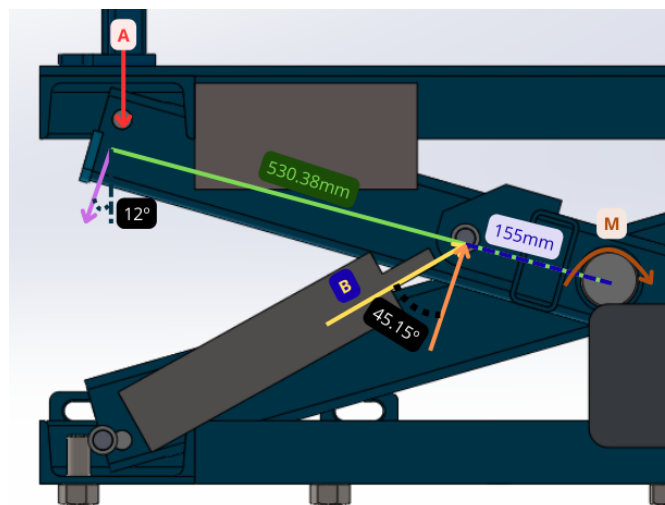


Figura 6.5 — Representação da Forças Aplicadas.

$$\{M = 0 (=) \{B \times \cos(45,15^\circ) \times 155 - A \times \cos(12^\circ) \times 530,38 = 0 (=) \quad (6.1)$$

$$(\Rightarrow) B = \frac{A \times \cos(12^\circ) \times 530,38}{\cos(45,15^\circ) \times 155}$$

$$B = \frac{1000 \times \cos(12^\circ) \times 530,38}{\cos(45,15^\circ) \times 155} = 4745,86 \text{ kgf}$$

M – Momento no eixo da tesoura (kgf.mm)

A – Força da carga (kgf)

B – Força do pistão (kgf)

Depois de efetuar os cálculos, e tendo em conta os resultados obtidos, foi decidido utilizar um pistão hidráulico com o diâmetro interior de 63mm, segundo a norma ISSO 6020-2: 2015, a uma pressão de 160 bar. A força (F) é calculada a partir da equação 6.2.

$$F = A \times P \text{ (N)} \quad (6.2)$$

$$F = \pi \times 0,0315^2 \times 16000000 = 49875,9N$$

A – Área (m²)

P – Pressão (Pa)

No entanto, é necessário lembrar que, apesar do elevador estar a ser dimensionado para uma carga de 1000kg, a sua carga máxima é de 750kg, necessitando apenas de uma força no pistão hidráulico de 35594 N.

6.4 Circuito Elétrico

No que respeita ao circuito elétrico, é facto que o elevador necessita de energia elétrica para o seu funcionamento. O motor elétrico responsável pelo movimento ascendente do elevador, necessita de corrente alternada em 3 fases de 220V. Já a válvula solenoide, responsável pela descida do elevador, necessita de 12V em corrente contínua.

O comando destes dois equipamentos é efetuado por uma botoneira com dois botões: um botão para acionar o motor e outro botão para acionar a válvula

solenóide. A botoneira é dotada de um mecanismo de segurança que não permite que ambos os botões sejam carregados ao mesmo tempo, com o objetivo de evitar o uso incorreto do mesmo.

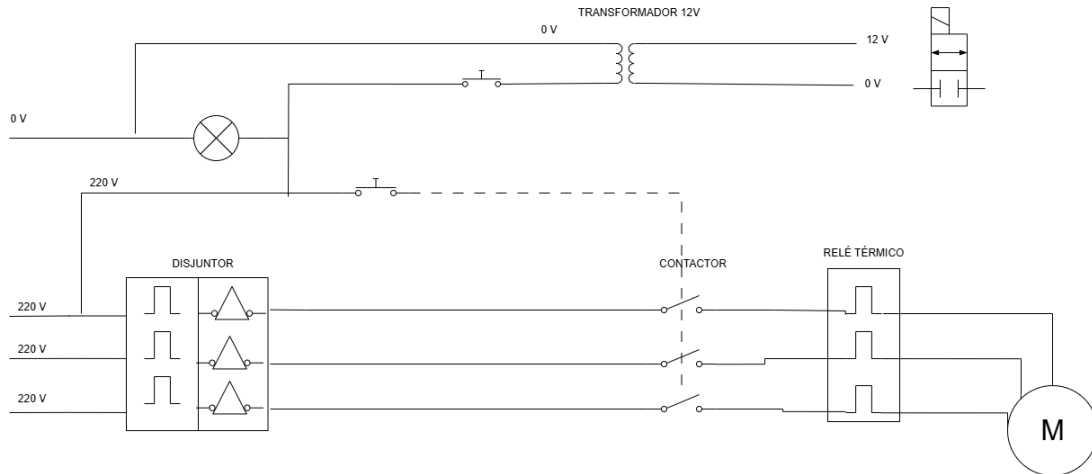


Figura 6.6 — Esquema Elétrico.

O circuito elétrico utilizado no elevador está representado no esquema da Figura 6.6. Neste circuito, podemos encontrar dois equipamentos que promovem a segurança: o relé térmico e o disjuntor. O relé térmico assegura que o motor não está a trabalhar acima da corrente nominal e o disjuntor protege o motor de sobrecargas e curtos-circuitos.

No circuito trifásico também é aplicado um contactor, responsável por abrir ou fechar o circuito, ativando ou desligando o motor. Quando o contactor não recebe energia, os contactos estão abertos devido a molas que atuam sobre eles. Pelo contrário, quando o contactor recebe energia, uma bobina é ativada e o seu campo magnético vence a força da mola, estabelecendo contacto e fechando o circuito. Este sistema consegue abrir e fechar as três fases do circuito trifásico de forma instantânea e segura.

O circuito monofásico é proveniente de uma das fases trifásicas e é nele que encontramos um sinalizador LED e um transformador. O sinalizador LED foi instalado no circuito com o intuito de avisar o utilizador se o circuito possui energia. O transformador tem como função transformar a corrente alternada de 220V em corrente contínua de 12V, ativando a válvula solenóide.

A botoneira está representada na Figura 6.6 pelos dois botões no circuito monofásico. Um dos botões fecha o circuito que alimenta o transformador de 12V e o outro botão fecha o circuito que ativa o contactor, controlando, assim, a subida e descida do elevador.

6.5 Fabrico e Montagem

Como referido anteriormente, o elevador foi projetado para que a maioria dos processos de fabrico fossem executados na Arsopi-Thermal. Contudo, alguns dos componentes tiveram de ser adquiridos a outras empresas.

As pernas da tesoura foram cortadas a laser com recurso a um fornecedor, uma vez que se tornou impossível realizar os cortes circulares no centro das pernas com a precisão e exatidão requerida. Ainda que a Arsopi-Thermal tivesse os recursos necessários para a produção das tesouras, a necessidade urgente e o tempo disponível para execução deste componente impulsionou a decisão de recorrer a um fornecedor.

Quanto às rodas de poliamida e os anéis de retenção, por não haver forma de produção, optou-se pela compra a fornecedores.

Os restantes componentes foram produzidos pela Arsopi-Thermal, a partir de processos de corte, utilizando ferramentas como serra de fita horizontal e corte jato de água. Os furos encontrados nestes componentes foram maquinados para as tolerâncias requeridas, recorrendo a máquinas CNC, torno e furadora radial.

Todas as peças a serem soldadas passaram por um processo de tratamento superficial: a decapagem. Este tratamento remove quaisquer oxidações ou impurezas encontradas na superfície, ajudando ao processo de soldadura e, mais tarde, à pintura das peças.

As peças foram soldadas com recurso a soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), representada na Figura 6.7. As peças foram totalmente soldadas, evitando o uso de soldadura por pontos e criando uma ligação rígida e contínua; e para evitar a infiltração de água entre as peças, eliminando locais propícios a corrosão (Anexo A).



Figura 6.7 — Base Inferior Totalmente Soldada.

Depois de terminada a soldadura, os componentes foram pintados com recurso a primário e tinta, o que criou uma forte camada na superfície dos componentes, evitando a formação de corrosão.

A montagem foi realizada com dificuldade, uma vez que as tolerâncias utilizadas não permitiram folga suficiente para que alguns dos veios conseguissem passar e acoplar as peças. Contudo, esta dificuldade foi combatida com a utilização de massa lubrificante e uma pequena remoção de material da superfície do furo, usando uma ferramenta de polimento.

A montagem da parte elétrica e hidráulica foi realizada sem dificuldade, uma vez que depois da montagem se mostraram devidamente seguras. Foi decidido aplicar uma manta de borracha sobre o tampo e fixá-la com cola, prevenindo, assim, que os permutadores deslizassem sobre o tampo do elevador e, simultaneamente, não removessem a tinta que protege a superfície do elevador do meio ambiente. A Figura 6.8 representa o elevador após montagem.



Figura 6.8 — Elevador Terminado.

6.6 Teste do Elevador

Depois de concluída a montagem do elevador, procedeu-se à testagem do equipamento utilizando uma carga de 750kg (carga máxima), que elevou com facilidade, não apresentando flexões nem sinais auditivos de stress nos veios, como representado na Figura 6.9.



Figura 6.9 — Teste 750kg.

O elevador foi utilizado como mesa de teste nos teste de pressão 4 e 5 (igura 6.10) e mostrou ser a ferramenta ideal para a montagem dos permutadores de calor e para a realização deste teste. A possibilidade de elevar e rebaixar os permutadores de forma controlada e segura, auxiliou a montagem do CPCJ na estrutura do PHE e permitiu obter uma visão total de todo o permutador durante os testes, ajudando a verificar com facilidade os primeiros sinais de fuga.



Figura 6.10 — Elevador em Uso.

7 Conclusão

Ao longo do presente estágio e através do constante contacto com o laboratório da Arsopi-Thermal, tive a oportunidade de trabalhar com uma instalação dedicada a testes laboratoriais de permutadores de calor de placas, que se revelaram uma mais-valia para a aquisição de conhecimentos deste ano curricular. Apesar de ter encontrado possíveis melhorias à instalação do laboratório, concluo que este espaço é um espaço importante, útil e capaz, que contribuiu para o meu entusiasmo ao longo destes meses.

Durante este processo, tive oportunidade de realizar os testes de pressão, o que me permitiu participar diretamente numa atividade de desenvolvimento de uma nova família de placas de transferência de calor, contribuindo assim para um momento de grande importância para a Arsopi-Thermal.

Da mesma forma, apesar de não terem apresentado resultados viáveis devido ao tempo, custos e falta de calibração de sensores, os testes hidrodinâmicos realizados ao longo do estágio também contribuíram para a minha experiência e conhecimento sobre atividades laboratoriais.

Por fim, mas não menos importante, desenvolver de raiz um projeto como o elevador foi uma experiência única e importante para a minha formação enquanto profissional, tendo sido o meu primeiro projeto a ser realizado. No decorrer deste projeto, tive contacto com fornecedores e equipas de produção, o que me permitiu adquirir estratégias de resolução de problemas, tomada de decisão e trabalho em equipa.

Esta experiência dotou-me de formação teórica e prática, úteis para o meu trabalho enquanto futuro engenheiro; e também conhecimento humano e de trabalho em equipa, úteis para o meu crescimento enquanto indivíduo.

Grundfos. (2025, setembro, 18). NKE 65-180/172 ASA1F1S3ESBQQENWB. <https://product-selection.grundfos.com/products/nk-nke-nke-series-2000-nk-bare-shaft/nke-series-2000/nke-65-180172-92778458?pumpsystemid=2675432545&tab=variant-cad>

Hisaka Works. (2011). Ordinary Temperature Pressure Test Procedure.

Hisaka Works (2012) *Laboratory Pressure Drop Tests and Generic Information*.

INEGI. (2011). Metodologia Experimental. Universidade do Porto

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 6020-2:2015: Hydraulic fluid power — Mounting dimensions for single rod cylinders, 16 MPa (160 bar) series — Part 2: Compact series*.

Manglik, R. M., Wang, L., & Sunden, B. (2007). Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance. Wit Press.

Momtaz, M. (2025, setembro, 18). Promag. 3Dcontentcentral. <https://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=294145&partnumber=Promag~>

Traceparts. (2025, setembro, 18). DIN 2576. <https://www.traceparts.com/pt/product/din-flat-flange-for-welding-pn-10-dn-150-pipe-din-series-with-chamfers-for-shipbuilding-face-of-joint-machined-rt-160?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP07007010&Product=22-05032003-063678&PartNumber=DIN%202576%20PN%2010%20DN%20150%20DIN%20BS%20B>

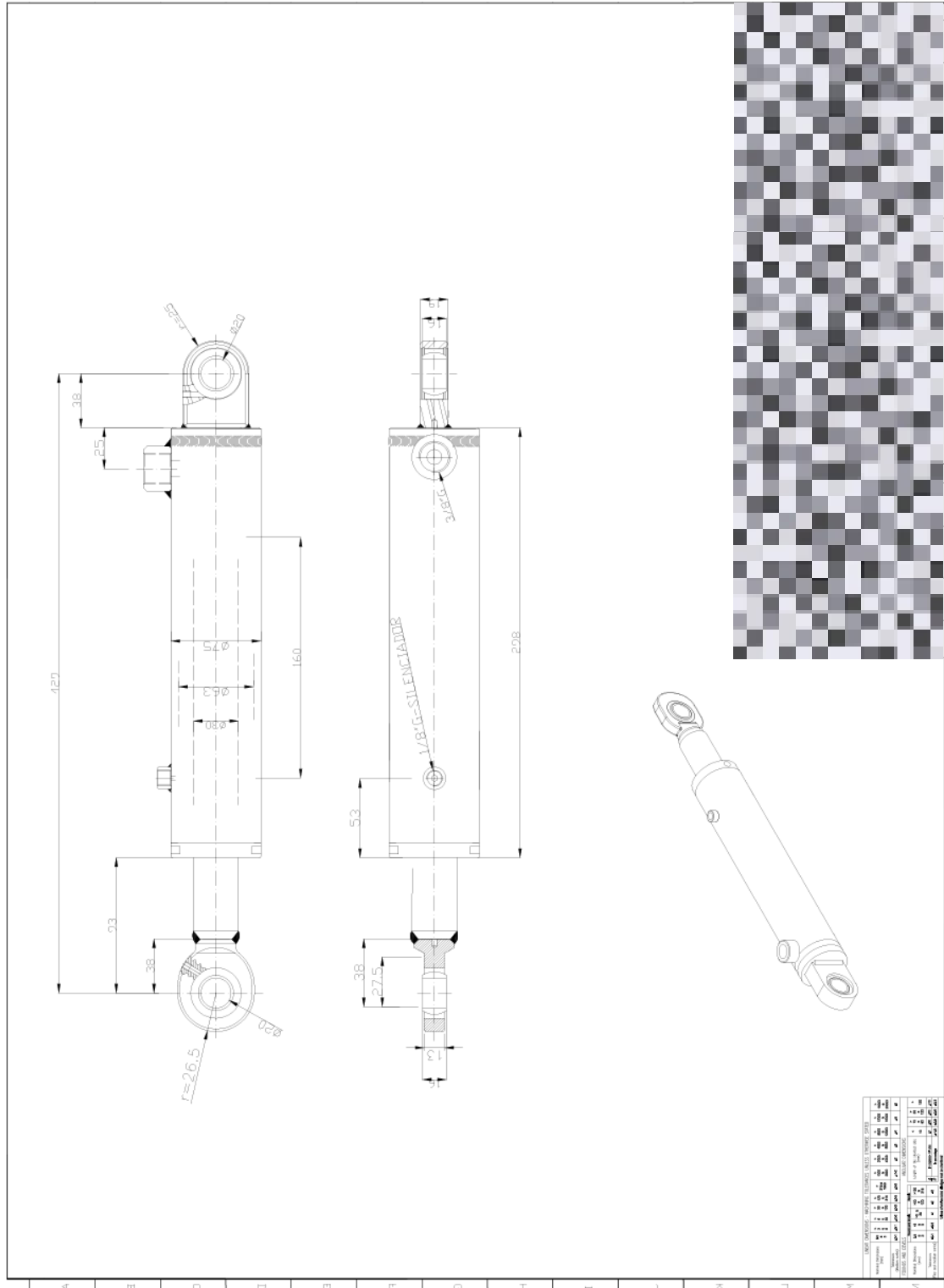
Traceparts. (2025, setembro, 18). DIN 2633. <https://www.traceparts.com/pt/product/din-welding-neck-flange-pn-16-dn-10-pipe-din-series-double-male-nesting-shape-f?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP07007007&Product=22-06032003->

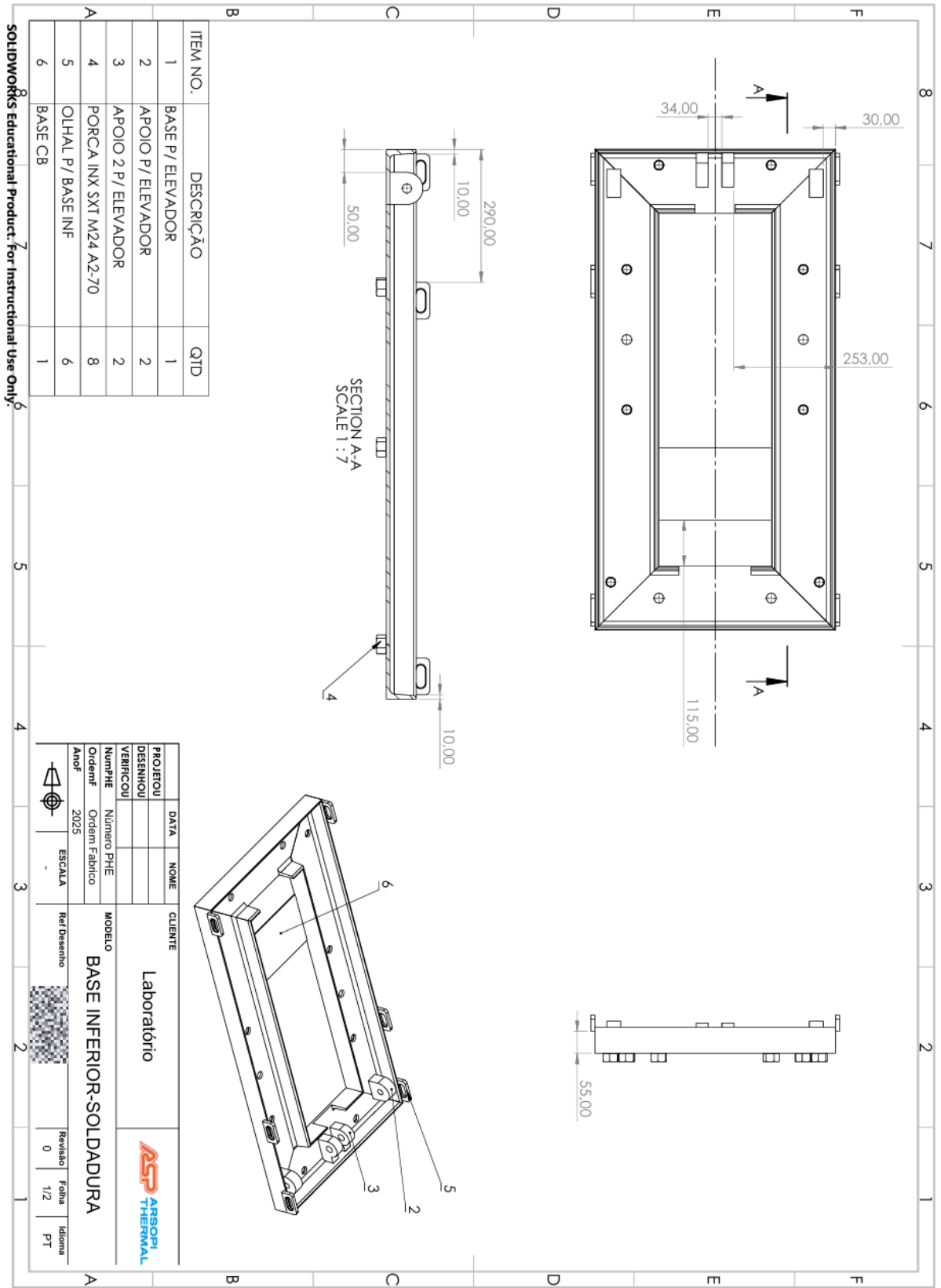
079042&PartNumber=DIN%202633%20-%20PN%2016%20-%20DN%2010%20-%20DIN%20-%20DIN%202512%20-%20F

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Pearson Education Limited.

Anexos

Anexo A – Desenhos Elevador

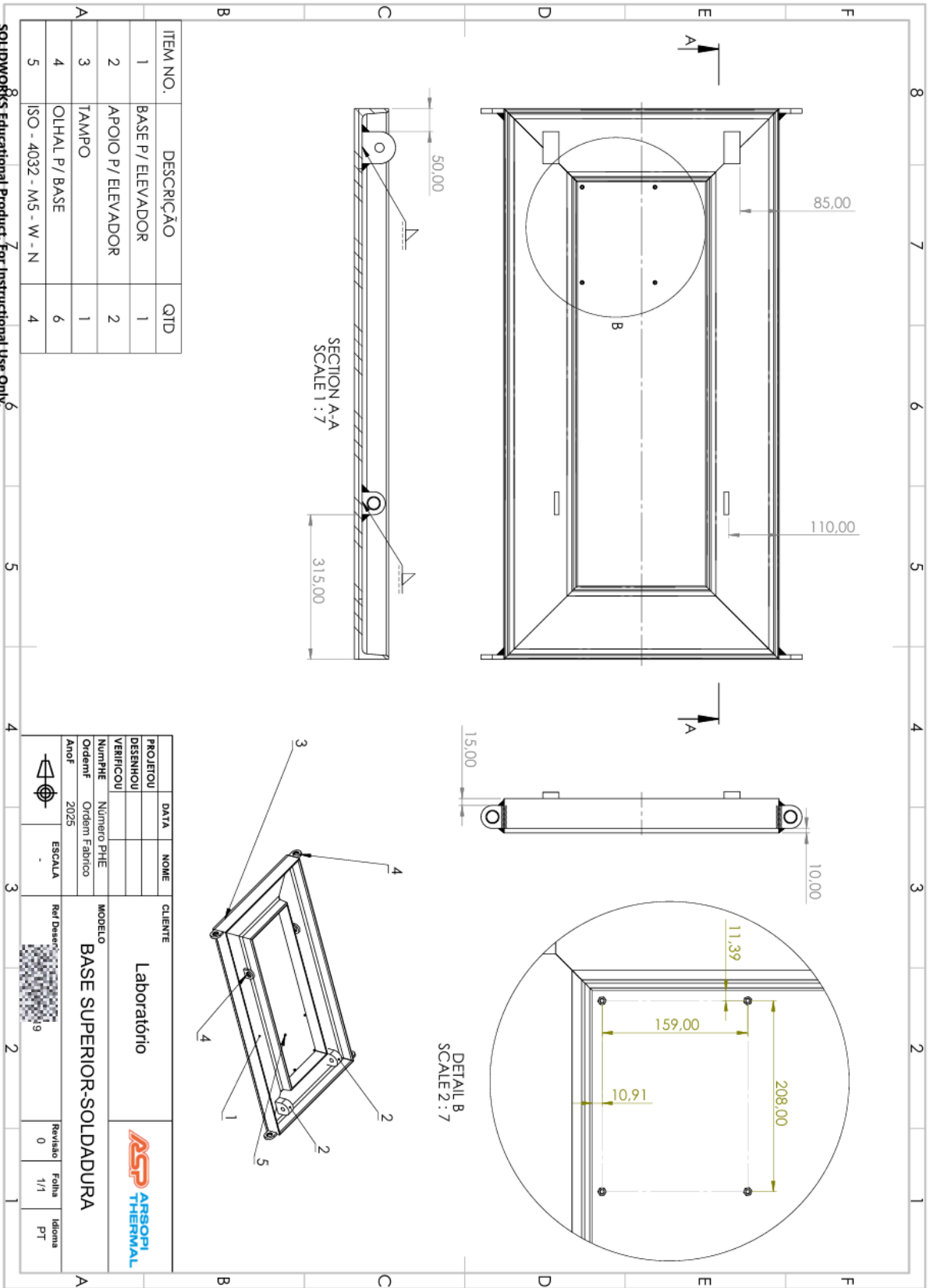


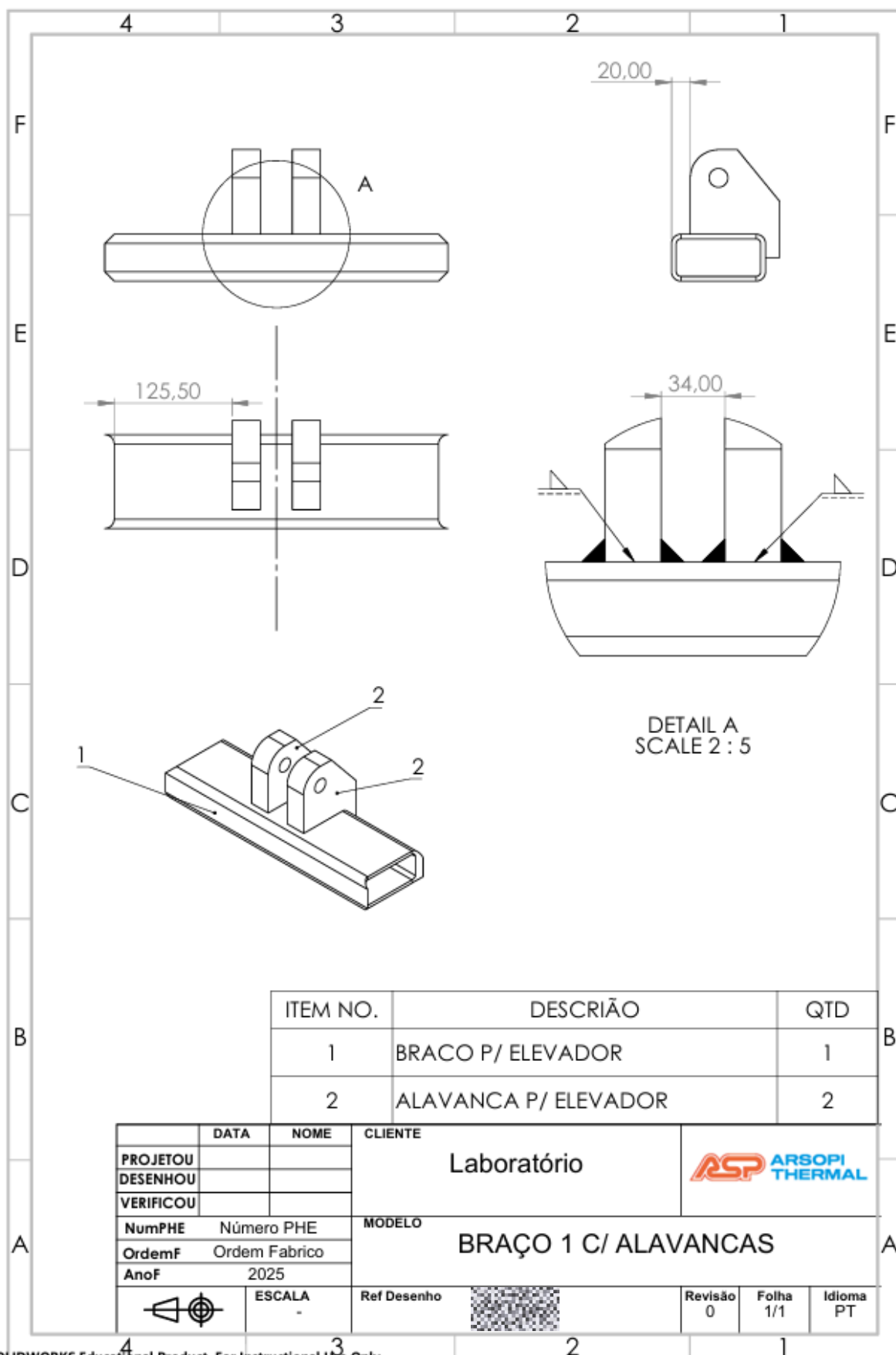


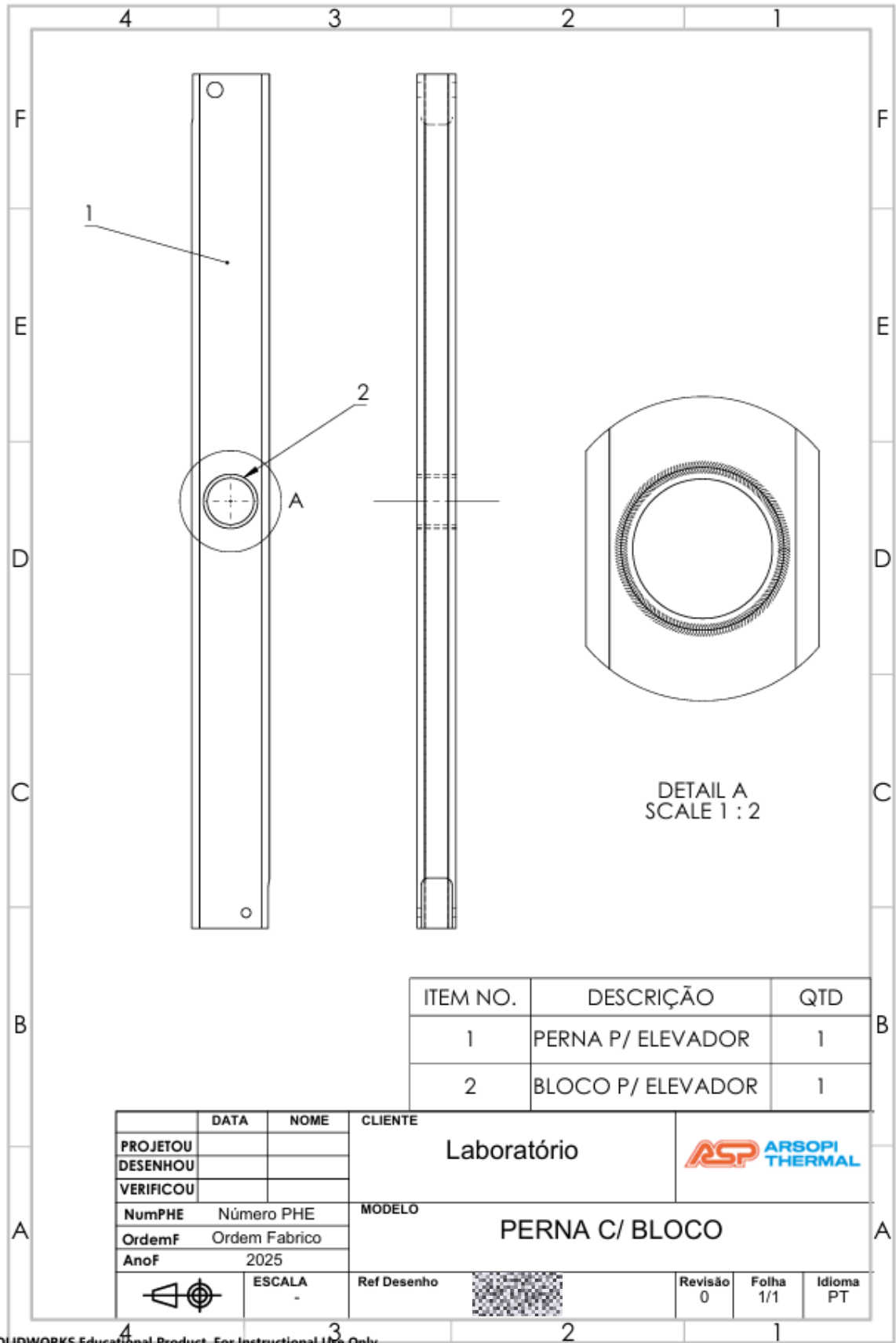
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

PROJETO	DATA	NOME	CIENTE
DESIGNHO			Laboratório
VERIFICOU			
NumPHE	Numero PHE		MODELO
OrdemF	Ordem Fabrico		BASE INFERIOR-SOLDADURA
Anof	2025		
	ESCALA	Ref Desenho	
	Revisao	Folha	Idioma
	0	1/2	PT

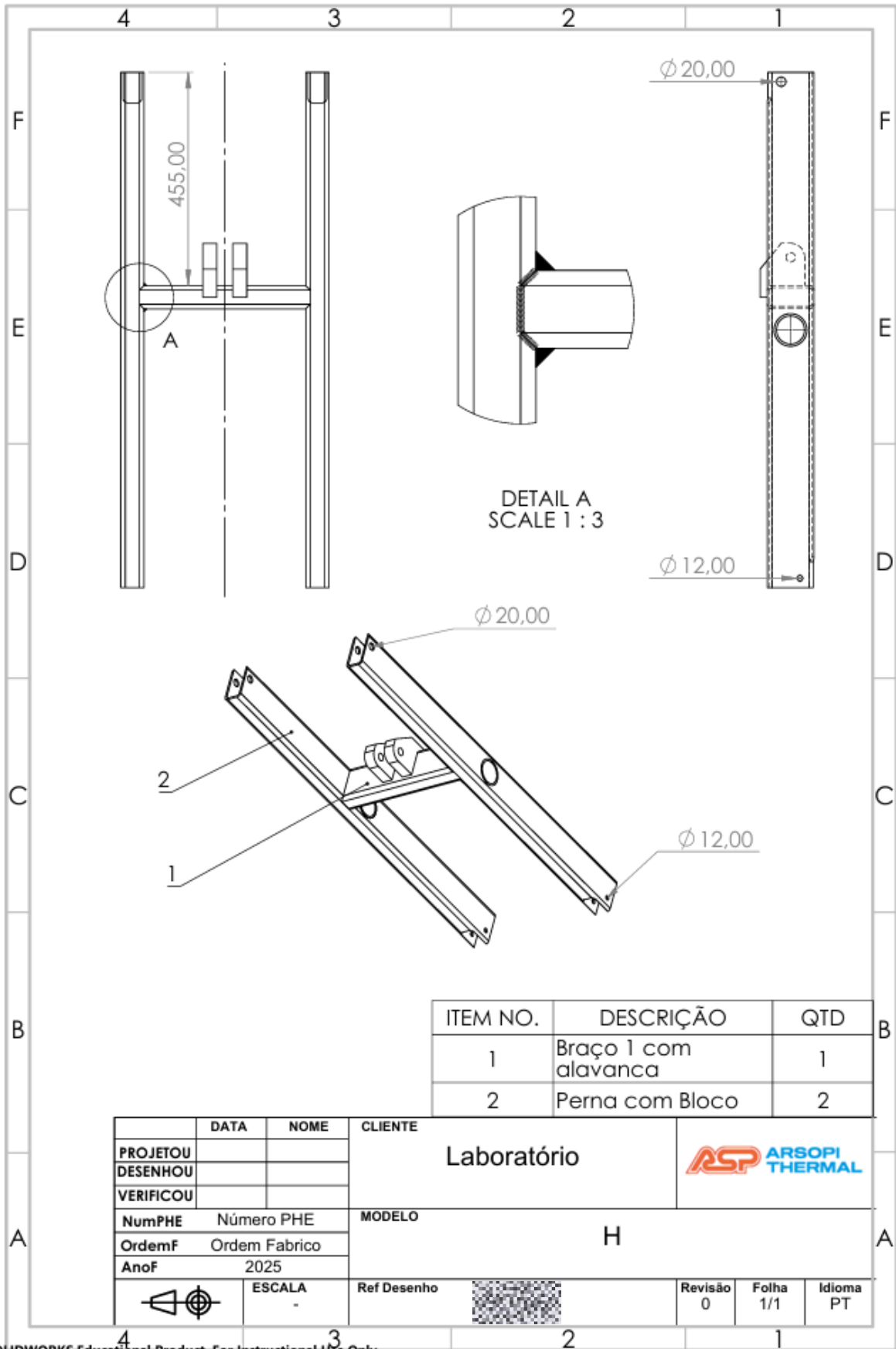




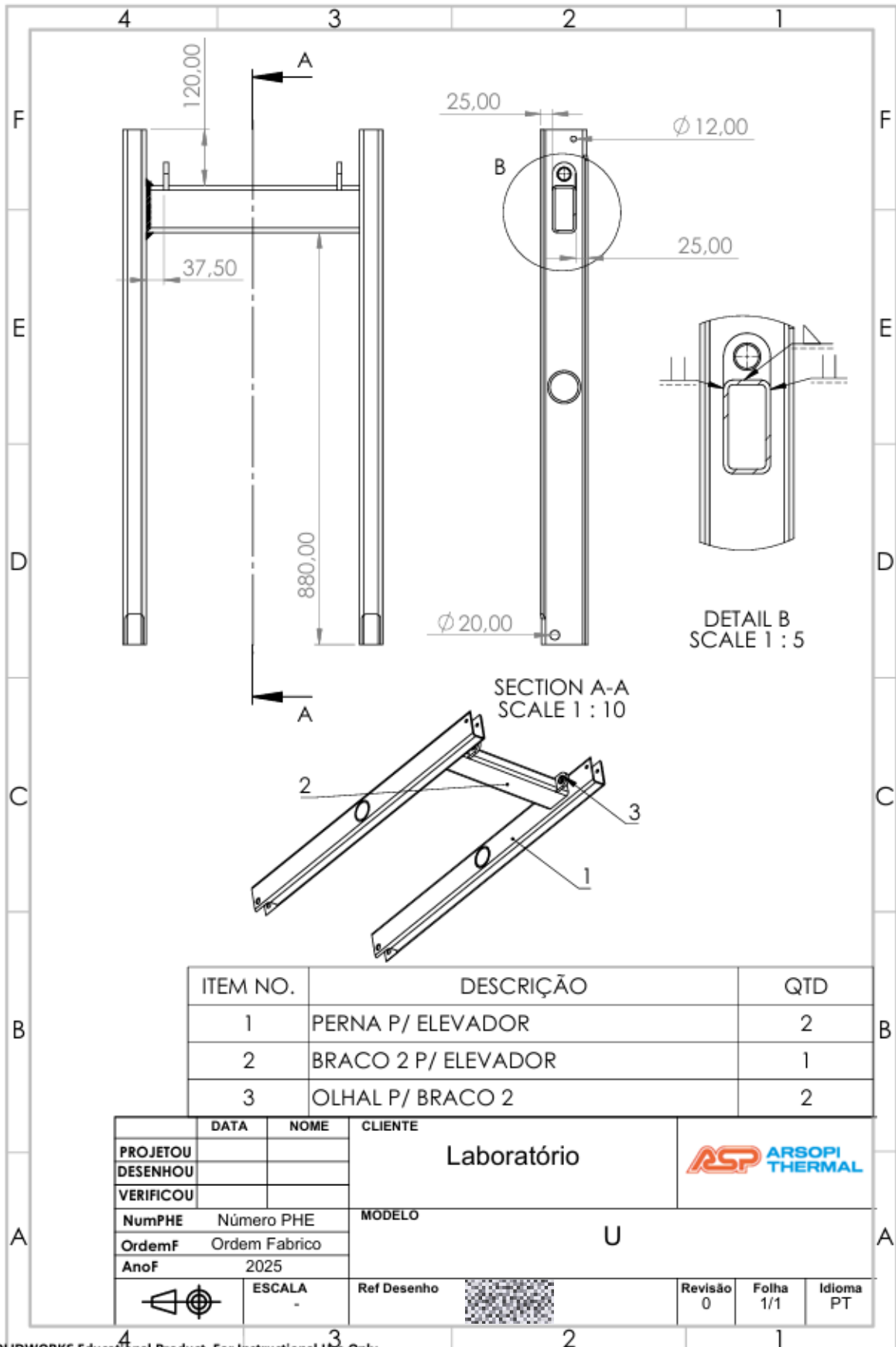




SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra