

Universidade de Lisboa

Faculdade de Ciências
Departamento de Física



**A infra-estrutura de teste da
câmara multi-telescópio
do GRAVITY**

Pedro Carvas de Sousa

Mestrado em Engenharia Física
2012

Universidade de Lisboa

Faculdade de Ciências
Departamento de Física



**A infra-estrutura de teste da
câmara multi-telescópio
do GRAVITY**

Pedro Carvas de Sousa

Dissertação orientada por:
Prof. Doutor António Joaquim Rosa Amorim Barbosa

Mestrado em Engenharia Física
2012

Resumo

Esta dissertação teve como principal objectivo o desenvolvimento, desenho e construção de uma infra-estrutura de teste para um sub-sistema de um instrumento denominado por GRAVITY (*General Relativity Analysis via VLT InTerferometry*), sendo este destinado a ser instalado no telescópio VLT (*Very Large Telescope*) do ESO (*European Southern Observatory*). O VLT é composto por um conjunto de 4 telescópios com aberturas de cerca de 8 metros.

Esta infra-estrutura de teste é destinada a testar o sub-sistema referido, que consiste numa câmara multi-telescópio, ou seja, que receberá luz dos 4 telescópios, e através de várias operações ópticas permitirá monitorizar os feixes recebidos, efectuando diversas medições. As condições de funcionamento da câmara são em alto-vácuo (10^{-6} mbar) e com temperaturas criogénicas de cerca de 80K.

Ao longo da dissertação é definida o seu enquadramento geral, explicando um pouco a história do ESO, dos seus telescópios e a importância da utilização de instrumentos específicos nos telescópios. No que diz respeito ao tema central, que é a infra-estrutura de teste da câmara multi-telescópio do GRAVITY é descrito todo o processo de desenho, concepção e implementação da infra-estrutura de teste, incluindo desenhos técnicos dos seus componentes, explicando quando necessário as opções efectuadas. Como a infra-estrutura de teste se encontrará em vácuo, e com temperaturas criogénicas no seu interior, foi necessário abordar temas específicas nestas duas áreas, que muitas vezes vêm juntas.

Os testes e resultados nas condições de funcionamento revelaram que a infra-estrutura de teste será capaz de recriar as condições de funcionamento da câmara multitelescópio, embora alguns testes mais conclusivos deveriam ser ainda realizados.

O grau de aprendizagem na temática das tecnologias de vácuo e de criogenia teve um progresso positivo ao longo da escrita deste dissertação. Outra componente que foi positiva, foi o envolvimento com empresas de mecânica de precisão e de outras áreas com elas relacionadas, que contribuiu para um melhor entendimento da dinâmica empresarial, que por vezes é um bastante diferente da dinâmica académica.

Palavras chave:

Criogenia, tecnologia de vácuo, óptica, astrofísica, VLT, ESO, GRAVITY

Abstract

The main objective of this thesis is the development, design and construction of a testing infrastructure for a subsystem of the GRAVITY (General Relativity Analysis via VLT InTerferometrY) instrument, which will be installed in the ESO's (European Southern Observatory) VLT (Very Large Telescope) telescope. The VLT is has 4 telescopes each with a 8 meter aperture.

This testing infrastructure will be used to test the subsystem referred before, which is a multi-telescope camera. It will receive the light from the 4 telescopes and, using several optical operations will monitor the received beams, and perform several measurements. The working conditions of this camera will be in high vacuum (10^{-6} mbar) with cryogenic temperatures near 80K.

Throughout the thesis the context of the this work will be defined, explaining some part of ESO's history and its telescopes, and the importance of using specific instruments on the telescopes. Regarding the main subject of the thesis, which is the testing infrastructure of the GRAVITY's multi-telescope camera, the whole design and assembly is described, including the technical drawings of its components, explaining, when necessary, the options that were made. As the testing infrastructure will be in vacuum and with cryogenic temperatures inside, it was necessary to talk about some specific matters on these two areas, which very often come together.

The tests and results in the working conditions revealed that the testing infrastructure was able to match the working conditions of the multi-telescope camera, although some more conclusive tests should be conducted.

My learning trend on the in vacuum and cryogenic technologies had a positive progress throughout the writing of the thesis. Another positive component was the involvement with companies of high precision metalworking, and other areas related with them. This contributed to a better understanding of business dynamics, which sometimes is quite different from the academic dynamic.

Keywords:

Criogenics, vacuum technology, optics, astrophysics, VLT, ESO, GRAVITY

*I started from the imaginary and discovered reality,
but behind reality, there is again imagination.¹*

Agradecimentos

A minha curiosidade e gosto pela Física começou bem cedo, e sempre tentei seguir um caminho, tanto a nível pessoal como profissional, que me levasse a poder estar envolvido nesta ciência. Esta dissertação só foi possível graças ao apoio incondicional dos meus pais, Carlos e Carmita, da minha irmã Lara, das minha avós Manuela e Nini e dos meus avôs, que já partiram, Rui e Manuel João. A todos eles estou imensamente agradecido.

Também queria agradecer a todos os meus colegas e amigos mais próximos, que me apoiaram em todas as alturas, quer melhores ou piores. Não vou nomeá-los a todos, são muitos, mas eles sabem quem são.

Ao meu orientador, António Amorim, agradeço de forma especial todo o seu apoio sempre que precisei, e por me ter integrado numa equipa fantástica, com a qual aprendi imenso, participando em projectos interessantíssimos e motivantes. Nesta equipa do Centro SIM², queria também agradecer ao Jorge Lima, André Moitinho, Filipe Maçarico e Ângela Antunes pela sua colaboração e apoio.

¹Jean-Luc Godard, *From Critic to Film-Maker, in Cahiers Du Cinema: Volume II*

²www.sim.ul.pt

Índice

1	Introdução	1
1.1	O <i>Very Large Telescope</i>	2
1.2	Óptica Adaptativa	8
1.2.1	<i>Laser Guide Stars</i>	11
1.3	Interferometria: o VLTI	13
1.4	Instrumentação para o VLT e VLTI	15
1.5	O futuro da astronomia na Europa	15
1.6	Âmbito desta dissertação	16
2	O GRAVITY	17
2.1	Objectivos científicos	17
2.1.1	Detecção de exoplanetas	17
2.1.2	Estudo de núcleos galácticos activos	18
2.1.3	Estudo do Centro Galáctico	18
2.2	Descrição funcional do instrumento	19
2.3	Os subsistemas principais do GRAVITY	21
2.3.1	Sensor de frente de onda	21
2.3.2	Fibras ópticas e acoplador	22
2.3.3	Combinador de feixes	22
2.3.4	Sistema de metrologia	22
2.3.5	Câmara de aquisição	23
2.4	Considerações finais	23
3	A câmara de infra-vermelhos multi-telescópio do GRAVITY	25
3.1	Desenho e construção do sistema óptico	26
3.1.1	Primeiro estágio óptico	26
3.1.2	Segundo estágio óptico – o analisador de feixes	27
3.2	Desenho mecânico	30
3.3	Considerações de criogenia	33
4	A infra-estrutura de teste da câmara de infra-vermelhos do GRAVITY	37
4.1	Materiais utilizados para a construção	37
4.1.1	Aço inoxidável do tipo 304	38
4.1.2	Teflon (Politetrafluoretileno)	38

VIII	Índice	
4.1.3	Epóxi reforçada com fibra de vidro	38
4.2	Desenho conceptual da infra-estrutura de teste	39
4.2.1	Cilindro base da infra-estrutura de teste	39
4.2.1.1	Dimensionamento da espessura: a pressão de colapso	40
4.2.2	Desenho e fabrico dos componentes da infra-estrutura de teste	42
4.2.3	Interfaces de acesso ao interior localizadas no cilindro	44
4.2.3.1	Portas de entrada dos feixes	44
4.2.3.2	Flanges para suporte das tampas	46
4.2.4	Interfaces de acesso ao interior localizadas nas tampas	48
4.2.5	Alimentação de Azoto líquido	48
4.2.6	Vácuo: acoplamento de bombas de vácuo, medição de pressão e detecção de fugas	56
4.2.6.1	Bombas de vácuo: acoplamento e montagem	56
4.2.6.2	Controlo da bomba rotatória	58
4.3	Sistema de abertura das tampas	61
4.4	Mesa de suporte para a câmara de aquisição	63
4.5	Desenho final e imagens da implementação	65
4.6	Vedação, polimento e limpeza do interior da infra-estrutura de teste	67
4.6.1	Vedantes e cavidades para vedantes	67
4.6.1.1	Perfil das cavidades para <i>O-Rings</i>	68
4.6.2	Polimento do interior da infra-estrutura de teste	70
4.6.3	Fitas de aquecimento	70
4.6.4	Limpeza do interior da infra-estrutura de teste	72
4.7	Instrumentação da infra-estrutura de teste	73
4.7.1	Medidor de pressão	73
4.7.2	Sensores de temperatura	73
4.8	Considerações finais	76
5	Testes e resultados nas condições de funcionamento	77
5.1	Teste de pressão e detecção de fugas	77
5.2	Teste do sistema de criogenia	80
5.2.1	Determinação do caudal para injeção de Azoto líquido	81
5.3	Considerações finais	84
5.3.1	Tempo de arrefecimento da câmara de aquisição	84
5.3.2	Outros testes a realizar	86
5.3.2.1	Escudos de radiação	86
5.3.2.2	Sistema óptico de injeção para feixes	86
	Anexos	87
A	O parâmetro de Fried e a turbulência atmosférica	89
A.1	Outros parâmetros importantes para óptica adaptativa	90

B Instrumentos instalados no VLT e VLTI	93
C Propriedades criogénicas dos materiais	95
C.1 Coeficiente de expansão térmica linear	95
C.2 Condutividade térmica	96
C.3 Variação das propriedades da sílica fundida com a temperatura . .	98
C.3.1 Variação do índice de refração com a temperatura	98
C.3.2 Coeficiente de expansão linear térmica	99
D Descrição teórica de vazio residual	101
D.1 Teoria cinética dos gases	102
D.1.1 Distribuição de Maxwell-Boltzmann para velocidades mo- leculares	102
D.1.2 Taxa de impacto molecular	105
D.1.3 Pressão e densidade molecular	106
D.1.4 Livre percurso médio	108
D.1.5 Resumo dos resultados obtidos	109
D.1.6 Evaporação e condensação	111
D.1.7 Número de Knudsen	112
Bibliografia	114

Lista de Figuras

1.1	Um dos espelhos de 8m do VLT em fase de polimento na REOSC	4
1.2	Desenho óptico de cada telescópio do VLT.	5
1.3	Secção lateral de toda a estrutura que constitui cada telescópio do VLT.	6
1.4	Um dos telescópios do VLT, onde se pode observar uma das plataformas Nasmyth, e na base a estrutura que sustenta o espelho principal M1.	7
1.5	Fotografia do VLT no Paranal, já na fase final da sua construção .	8
1.6	Modo de operação de um sensor Shack-Hartmann.	9
1.7	Esquema de um sistema de óptica adaptativa.	11
1.8	Um sistema de <i>laser guide star</i> sendo utilizado no VLT.	13
1.9	Representação esquemática dos componentes do VLTI. Mostra-se os percursos subterrâneos dos vários telescópios para a longa linha de atraso central.	14
2.1	Esquema funcional do instrumento GRAVITY.	19
2.2	Representação esquemática do GRAVITY no VLTI.	21
2.3	Protótipo do combinador de feixes cujas dimensões correspondem às de um circuito micro-electrónico.	23
3.1	Vista da câmara de aquisição montada no combinador de feixes do GRAVITY.	26
3.2	Primeiro estágio óptico da câmara de aquisição.	27
3.3	Segundo estágio óptico da câmara de aquisição – o analisador de feixes.	28
3.4	À esquerda e direita está representado um esquema óptico do analisador de feixes, visto de frente (à esquerda) e numa vista lateral (à direita). No centro estão representados os módulos individuais que constituem o analisador de feixes.	29
3.5	Suporte para os espelhos com ajustes de posição.	31
3.6	Suporte para as lentes com ajustes de posição.	31
3.7	Estrutura da câmara de aquisição em corte parcial.	32
3.8	Duas vistas da câmara de aquisição e respectivas dimensões. . . .	32
3.9	Estrutura que incorpora o analisador de feixes e o detector.	33
3.10	Estrutura que incorpora o analisador de feixes e o detector.	34

XII Lista de Figuras

4.1	Representação 3D do cilindro base da infra-estrutura de teste. . .	40
4.2	Chapa para corte a laser dos componentes da infra-estrutura de teste	43
4.3	Tubo da porta de entrada do feixe.	44
4.4	Flange suporte para a janela de entrada.	45
4.5	Tampa que acomoda a janela de entrada do feixe.	46
4.6	Representação 3D da porta de entrada de um feixe.	47
4.7	Flange que liga o cilindro base às tampas já existentes no SIM. . .	47
4.8	Representação 3D da infra-estrutura de teste com as janelas de entrada e flanges acopladas.	48
4.9	Corpo base da infra-estrutura de teste.	49
4.10	Representação 3D das tampas. À esquerda: tampa utilizada para alimentação de Azoto líquido e ligação do conector para medição de temperaturas. À direita: tampa utilizada para acoplamento da bomba de vácuo, ligação do medidor de pressão e conexão do detector de fugas.	49
4.11	Tampa da infra-estrutura de teste com a tampa de alimentação de Azoto líquido incorporada. Na esquerda a parte de fora, e no lado direito a parte que ficará para o interior da infra-estrutura de teste.	50
4.12	Tubo para alimentação de Azoto líquido.	51
4.13	Tampa de alimentação de Azoto líquido.	51
4.14	Representação 3D em corte do tanque de Azoto líquido.	52
4.15	Desenho técnico do tanque de Azoto líquido.	53
4.16	Representação 3D do suporte do tanque de Azoto e as epóxis para fixação.	53
4.17	Esquema de alimentação do Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.	54
4.18	Representação 3D do sistema de alimentação de Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.	55
4.19	Representação 3D do conector para instalação de sensores de temperatura.	55
4.20	Esquerda: bomba turbo-molecular. Direita: bomba rotatória com vedação a óleo.	57
4.21	À direita: representação em corte da flange de ligação da bomba turbo-molecular. À esquerda: esquema de fixação da bomba turbo-molecular na tampa da infra-estrutura de teste.	58
4.22	Implementação das bombas turbo-molecular e rotatória.	59
4.23	Botões ajustáveis para controlo do funcionamento da bomba rotatória.	60
4.24	Porta-paletes ajustado para movimentação das tampas da infra-estrutura de teste.	61
4.25	Representação 3D do sistema de movimentação das tampas da infra-estrutura de teste.	62
4.26	Mesa elevatória para movimentação da infra-estrutura de teste. .	62

4.27	Mesa óptica para suporte da câmara de aquisição com suportes de fixação à tampa.	63
4.28	Mesa óptica para suporte da câmara de aquisição com suportes de fixação à tampa.	64
4.29	Imagem do suporte da mesa óptica.	64
4.30	Imagem do suporte da mesa óptica.	65
4.31	Representação 3D da infra-estrutura de teste com a câmara de aquisição.	66
4.32	Imagem mostrando o interior da infra-estrutura de teste onde se pode ver a calha onde a mesa óptica desliza.	66
4.33	Imagem evidenciando o porta-paletes acoplado à tampa que incorpora o tanque de azoto e a mesa óptica.	67
4.34	Um <i>O-Ring</i> genérico para vedação.	68
4.35	Secção e dimensões de cavidades em “cauda de pomba” para <i>O-Rings</i>	69
4.36	Secção e dimensões de cavidades com secção rectangular para <i>O-Rings</i>	70
4.37	Máquina para polimento das superfícies.	71
4.38	Polimento da superfície de uma das tampas da infra-estrutura de teste.	71
4.39	Fitas de aquecimento para aumento da desgaseificação da infra-estrutura de teste.	72
4.40	Sensor de pressão acoplado à tampa da infra-estrutura de teste.	73
4.41	Sensor de pressão acoplado à tampa da infra-estrutura de teste.	74
4.42	Sensores de temperatura PT100.	74
4.43	Sensores de temperatura no interior da infra-estrutura de teste. Em baixo à esquerda: sensores soldados ao conector. Em baixo à direita: ligação dos sensores ao tanque de Azoto líquido.	75
4.44	À esquerda: monitor de temperatura. À direita: conector e cabo para ligação ao monitor de temperatura.	76
5.1	Evolução da pressão no tempo para um sistema com fuga: linha a tracejado, e um sistema sem fuga significativa.	78
5.2	Local onde o detector de fugas foi conectado.	79
5.3	Esquematização do processo de detecção de fugas.	80
5.4	Imagem exemplificando a montagem para alimentação de Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.	81
5.5	Variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de arrefecimento.	82
5.6	Variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de aquecimento (desde os 80K até à temperatura ambiente) do tanque de Azoto líquido.	83
A.1	Ilustração da imagem esperada num sensor variando o tempo de exposição, e definido os perfis de irradiância.	91

XIV Lista de Figuras

C.1	Variação do coeficiente de expansão linear térmica integrado com a temperatura.	97
C.2	Variação do coeficiente de condutividade térmica com a temperatura.	98
C.3	Variação do coeficiente de expansão linear térmica da sílica fundida com a temperatura.	100
D.1	Distribuição de velocidades para moléculas de ar a temperaturas para várias temperaturas.	105
D.2	Taxa de impacto molecular através da superfície dS	106
D.3	Geometria considerada para determinação do livre percurso médio de uma molécula.	108
D.4	Trajectórias moleculares num gás. a) Caos molecular num gás, b) trajectória típica de uma molécula, c) trajectória num gás rarefeito, em que λ é superior às dimensões do recipiente.	110
D.5	Fluxos de evaporação e condensação da superfície de um líquido num volume fechado.	111

Lista de Tabelas

1.1	Instrumentos instalados nos vários focos dos telescópios do VLT e VLTi.	15
3.1	Dimensões e peso da câmara de aquisição.	31
4.1	Propriedades do cilindro base da infra-estrutura de teste.	42
4.2	Valores para as dimensões de cavidades em “cauda de pomba” para <i>O-Rings</i> de secção circular.	68
4.3	Valores para as dimensões de cavidades com secção rectangular para <i>O-Rings</i> de secção circular.	69
C.1	Coefficientes c_n para o coeficiente de expansão linear térmica integrado.	96
C.2	Coefficientes c_n para o coeficiente de condutividade térmica.	97
C.3	Coefficientes para a equação de Sellmeier dependente da temperatura para a sílica fundida do tipo Corning 7980.	99
D.1	Valores de J , n e λ para moléculas de N_2 a várias pressões e à temperatura de 295K e designações do tipo de vácuo.	110

1. Introdução

O progresso científico depende do desenvolvimento tecnológico da instrumentação. Isto é particularmente verdade no que diz respeito à astronomia e astrofísica, onde o estudo de objectos muito distantes, requer técnicas sofisticadas de detecção.

Na primeira metade do século vinte, a astronomia era feita em terra e observando apenas a parte visível do espectro electromagnético. Enquanto que nos Estados Unidos da América (EUA) se construía telescópios cada vez maiores, na Europa os desenvolvimentos nesta área eram mais modestos, em parte devido a condições climatéricas inadequadas, mas também devido à falta de investidores privados (ao contrário dos EUA). Em 1964, as condições políticas e financeiras para a ciência na Europa melhoraram consideravelmente, e nesse ano foi fundado o *European Southern Observatory* (ESO), sendo esta uma organização intergovernamental para a qual contribuíram nessa altura meia dúzia de países. Entretanto, mais países também se tornaram membros, sendo que presentemente o número de estados membros é de 15, sendo estes: Alemanha, Austria, Bélgica, Brazil, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Holanda, Itália, Portugal, Reino Unido, Republica Checa, Suécia e Suíça.

A construção de grandes observatórios em lugares remotos, onde as condições de observação são óptimas, constitui custos muito elevados. No entanto, nos meados do século vinte, acompanhando a crescente união entre os países europeus, surgiu a possibilidade para a criação de instalações científicas de grande escala. Assim, foi fundado a *European Organization for Nuclear Research* (CERN), e mais tarde, tal como já foi referido, foi fundado o ESO e seguidamente a *European Space Agency* (ESA). Estas colaborações criaram uma base intelectual e financeira para que a Europa tenha ambição para competir a nível mundial.

Por volta de 1975, o problema principal que a comunidade mundial de astrónomos encarava era que até ali apenas uma parte muito pequena do universo observável tinha sido estudada. A chave para o progresso nesta área seria a capacidade de observar galáxias mais ténues a distâncias maiores e também estrelas mais ténues na nossa própria galáxia. Toda a física associada a estes objectos só seria devidamente descrita melhorando a resolução angular recorrendo a melhores técnicas de observação, ou no caso do nosso sistema solar, realizar, por exemplo, estudos *in situ*. Por outro lado, também se sabia que as observações feitas nos comprimentos de onda do visível eram incompletas, e já nessa altura observações no

2 1. Introdução

comprimento de onda do rádio estavam em vista, mas no infra-vermelho, e nos raios X e γ estavam ainda longe de serem atingidas. Assim, o trio que dominou o progresso nas observações astronómicas foram o aumento da sensibilidade, aumento da resolução angular e aumento da cobertura nos comprimentos de onda do espectro electromagnético.

Um aumento da sensibilidade e da resolução angular podem ser atingidos construindo telescópios maiores e detectores mais eficientes. Alguns dos primeiros detectores CCD foram desenvolvidos para captura de imagem no espaço; detectores para infra-vermelho foram desenvolvidos para fins militares, como por exemplo visão nocturna. A construção de telescópios com dimensões cada vez maiores é possível, e existe conhecimento de como o fazer, mas cada vez mais o custo é um factor limitativo. Assim, no trio atrás mencionado deveria ser adicionado mais um: a redução de custos. A história do ESO, da ESA e da astronomia na Europa em geral, ao longo dos últimos 30 anos tem sido a procura de melhores soluções e “mais económicas” face à problemática da construção de instrumentos para observação astronómica.

No ano 1976 culminou o desenvolvimento e construção do primeiro telescópio do ESO em cooperação com o CERN. O CERN foi uma forte ajuda em termos logísticos, no que diz respeito à utilização das suas instalações bem como da afectação de pessoal. O telescópio, com uma abertura de 3.57m, foi instalado em La Silla, a cerca de 500km a norte de Santiago do Chile, no Chile. Este telescópio, encontra-se hoje em dia ainda em funcionamento, no qual está instalado, por exemplo, o instrumento HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*), cujo objectivo é a descoberta de planetas extrasolares (ou exoplanetas), através da medição de velocidades radiais, com um precisão na ordem de 1m/s.

Embora, o progresso científico após a instalação e operação do telescópio de 3.57m do ESO tenha sido satisfatório, havia ainda muito do Universo que estava fora do alcance deste telescópio. Havia a necessidade de telescópios ainda maiores, que permitissem analisar problemas de uma forma mais profunda, problemas que eram vagamente perceptíveis com um telescópio de 3.57m. Tornou-se claro que a construção de um telescópio maior seria vantajoso do ponto de vista científico. [1]

1.1 O *Very Large Telescope*

Um telescópio de maiores dimensões não tem necessariamente que ser constituído por um corpo só, pode também construir-se uma série de telescópios e combinar a sua luz opticamente ou combinar as saídas dos seus detectores digitalmente, sendo que o resultado seja equivalente a um telescópio de maiores dimensões.

Já em 1977, Lodewijk Woltjer, então director geral do ESO, apresentou durante uma conferência o primeiro passo para a proposta da construção de um conjunto de telescópios, que sendo utilizados em conjunto, seriam equivalentes a um telescópio com uma abertura de 16m. As questões que foram debatidas focaram-se nas dimensões das aberturas dos telescópios e quantos seriam, ha-

vendo assim um consenso para três potenciais opções: apenas um telescópio com uma abertura de 16m, um conjunto de 16 telescópios cada um com uma abertura de 4m ou um conjunto de 4 telescópios cada um com uma abertura de 8m. Surgiu assim o conceito do *Very Large Telescope* (VLT), que após vários anos de estudo, e apenas em 1983, foi decidido que o VLT seria constituído por um conjunto de 4 telescópios cada um com uma abertura de 8.2m.

Os estudos preliminares para a construção do VLT evidenciaram alguma problemática no que diz respeito a questões de mecânica e controlo, embora o ponto mais crítico seria o desenvolvimento e construção de um espelho com 8m de diâmetro devidamente polido. Surgiram várias opções para o tipo de material em que iriam ser construídos estes espelhos, entre elas, era utilizar alumínio ou aço, mas para o primeiro a dificuldade em obter um polimento adequado tornou-o inviável, para o aço, apenas foram testados pequenos discos de 50cm, e para obter uma conclusão melhor acerca da sua viabilidade, seria necessário um prolongado programa de investigação e desenvolvimento. Entretanto havia já duas propostas por parte das empresas SCHOTT (Alemanha) e Corning (EUA), para a fabricação dos espelhos de 8m. Por parte da Corning, o material utilizado seria a sílica fundida. A SCHOTT propôs a utilização do “Zerodur”, que consiste num vidro cerâmico com um elevado grau de uniformidade, com um coeficiente de expansão térmico muito baixo e uma grande facilidade de polimento. Assim, um espelho de “Zerodur” não alteraria a sua distância focal face a variações de temperatura do telescópio. Após um período de negociações, foi escolhido o material “Zerodur” da SCHOTT. O polimento dos espelhos foi contratado à empresa REOSC (França), tendo sido preterida uma oferta da Zeiss (Alemanha).

Foi em Junho de 1993 que a SCHOTT terminou a construção do primeiro espelho, sendo que o quarto e último espelho foi concluído no fim de 1995. No total, custo dos 4 espelhos correspondeu a $\sim 35\text{M}\text{€}$. Ainda antes da finalização dos espelhos, tinha sido já feito um contrato com a REOSC de $\sim 25\text{M}\text{€}$ para estes efectuarem o polimento dos espelhos, sendo também necessário o desenvolvimento de ferramentas adequadas. Em 1999 o polimento de todos os espelhos estava concluído.

Na figura 1.1 pode evidenciar-se, na parte inferior esquerda, actuadores electro-mecânicos acoplados ao espelho, os quais são um factor determinante na qualidade óptica do espelho. A incorporação deste sistema em todos os espelhos, denominado por óptica activa (*active optics*), permite que, controlando os actuadores se possa alterar a forma do espelho, modificando a sua curvatura. Isto é possível devido à espessura muito pequena de cada espelho, sendo esta de apenas 17.5cm. Embora por outro lado o seu peso seja de 23ton. No total, o espelho incorpora cerca 150 actuadores. [1]

Cada telescópio tem um desenho óptico do tipo Ritchey-Chretien, incorporando um espelho primário hiperbólico e um espelho secundário e um espelho secundário também hiperbólico. Esta configuração é útil na eliminação de erros ópticos (como por exemplo o coma). Na figura 1.2 encontra-se uma representação do esquema óptico de cada um dos 4 telescópios.

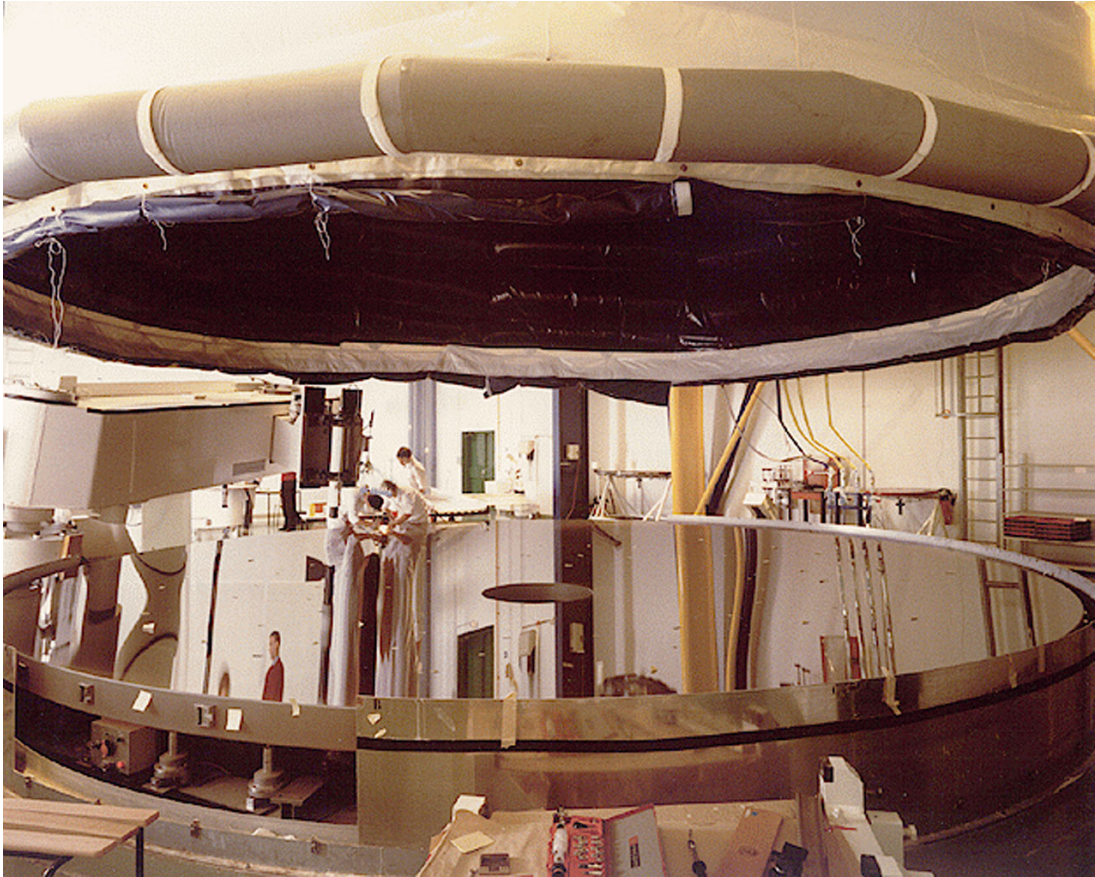


Figura 1.1: Um dos espelhos de 8m do VLT em fase de polimento na REOSC

Na figura 1.2 o percurso que a luz tem encontra-se representado pela cor amarela, balizado por linhas cor-de-rosa. Os espelhos de 8.2m que constituem os espelhos primários dos telescópios, encontram-se denominados na figura por M1. O desenho óptico permite a utilização do telescópio recorrendo a 3 tipos de pontos focais. A luz ao entrar no telescópio sofre duas reflexões, que são comuns aos 3 de focos possíveis, ou seja, uma primeira reflexão pelo espelho M1 (hiperbólico) e depois pelo espelho M2 (hiperbólico). Posteriormente, pode utilizar-se o foco Cassegrain, que advém directamente da reflexão do espelho M2. Outra alternativa é a utilização do foco Nasmyth, que após a reflexão no espelho M2, será incorporado um outro espelho M3, que após a reflexão neste, terá o foco Nasmyth. Este foco poderá existir em duas direcções opostas, dependendo da orientação do espelho M3. Por último, o foco Coudé, após as reflexões nos espelhos M1, M2 e M3 é obtido através do “transporte” da luz ao longo de várias reflexões recorrendo aos espelhos M4, M5, M6, M7 e M8.

A estrutura principal que constitui cada telescópio do VLT tem uma construção do tipo montagem *alt-azimuth*. Numa montagem deste tipo, o telescópio pode rodar em torno de um eixo horizontal, denominado por eixo de elevação, e que corresponde ao eixo x da figura 1.2. Este eixo é suportado, nas suas extre-

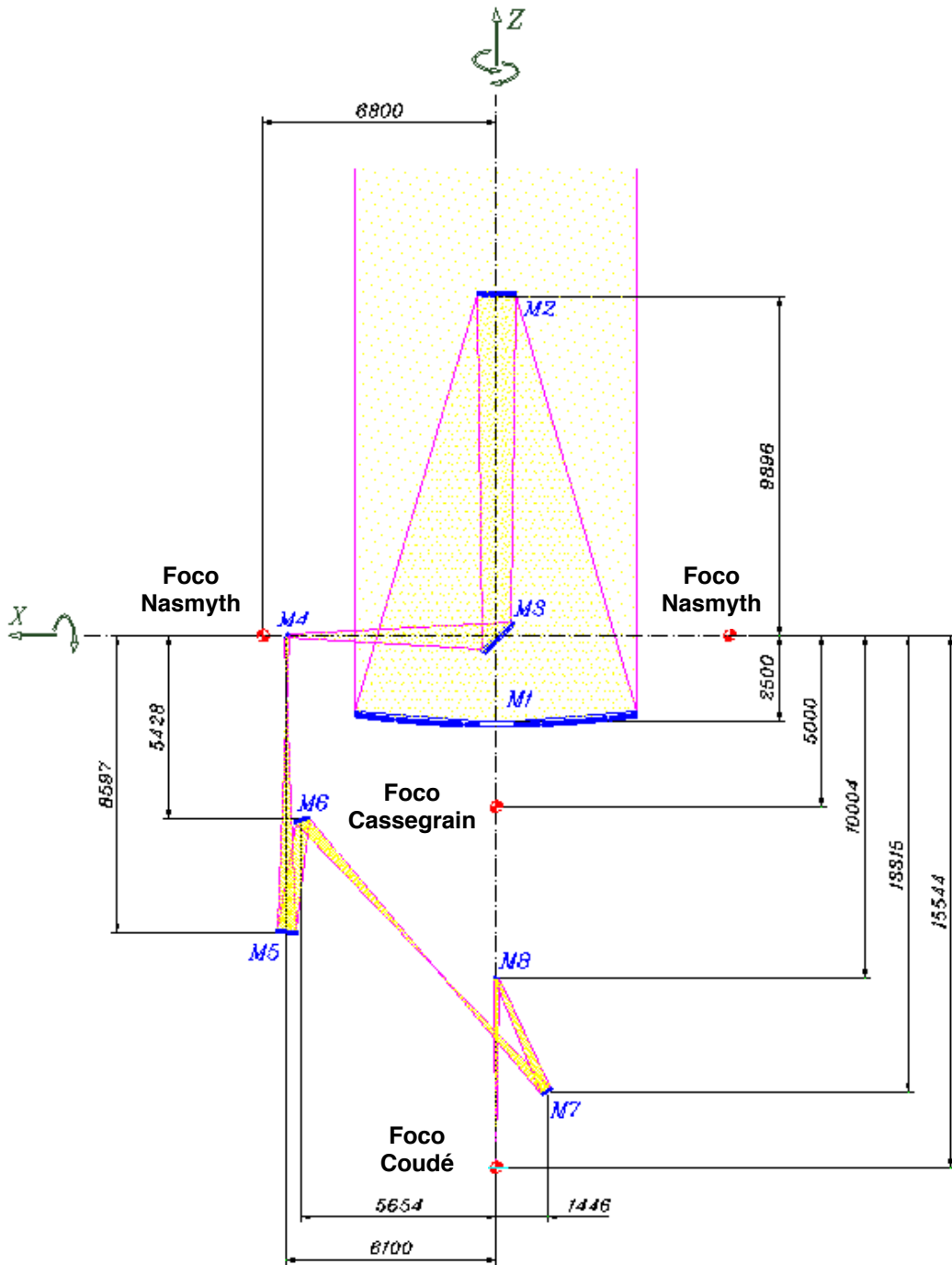


Figura 1.2: Desenho óptico de cada telescópio do VLT.

midades em duas plataformas, denominadas plataformas Nasmyth (precisamente devido a corresponder ao foco Nasmyth). A base da estrutura está suportada por um “garfo” que pode rodar em torno de um eixo vertical, denominado eixo

6 1. Introdução

azimutal, correspondendo ao eixo z da figura 1.2. Estes dois graus de liberdade, permitem apontar o telescópio ao longo de todo o céu que se encontra claramente acima do horizonte. Na figura 1.3, encontra-se uma vista em secção de toda a infra-estrutura de cada telescópio.

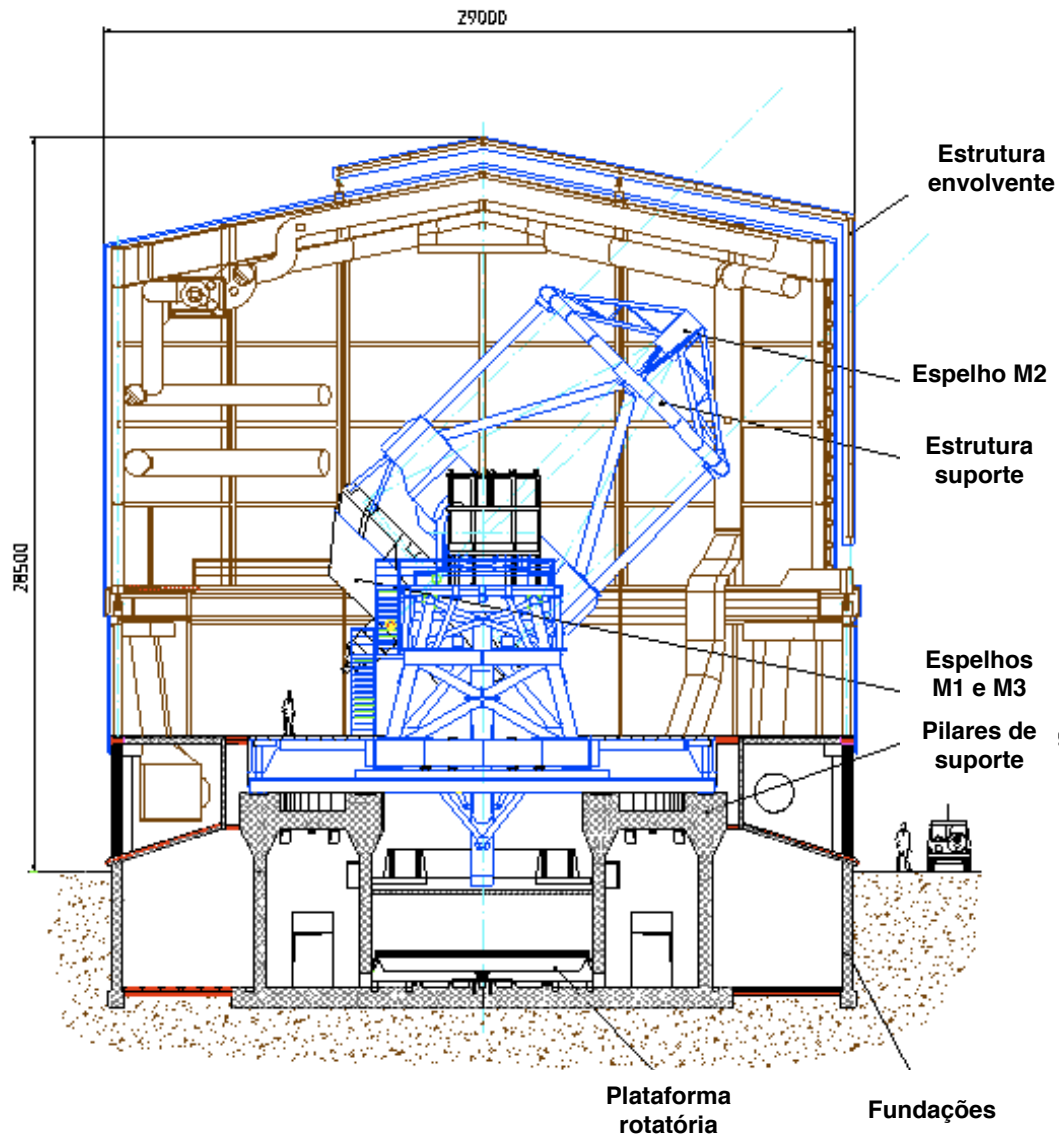


Figura 1.3: Secção lateral de toda a estrutura que constitui cada telescópio do VLT.

Na figura 1.3 pode ver-se a estrutura que na sua base suporta o espelho principal M1 e a configuração de tubos metálicos denominados por *spiders* que suportam o espelho secundário M2. A estrutura envolvente protege o telescópio das condições ambientais externas. Esta estrutura permite também acesso a áreas de manutenção do telescópio bem como uma boa protecção do vento quando o telescópio se encontra a observar.

No fim do ano 1990, e após uma investigação de potenciais locais onde os telescópios iriam ser instalados, o sítio escolhido foi Cerro Paranal que fica no Deserto de Atacama no nordeste do Chile. Subsequentemente, as actividades no Paranal foram iniciadas, sendo que em Maio de 1998 a construção do primeiro telescópio foi finalizada, e apenas em Setembro do ano 2000 se concretizou o quarto e último telescópio, completando assim o VLT.

Os quatro telescópios de 8m eram apenas uma parte do VLT. Cada telescópio foi equipado com instrumentação, da qual o ESO apenas iria construir uma pequena parte. A restante instrumentação seria feita através da contribuição de institutos dos vários estados membros do ESO, constituindo assim todo o projecto VLT um esforço comunitário. Na figura 1.4 pode ver-se um dos telescópios, já finalizados e instalados.

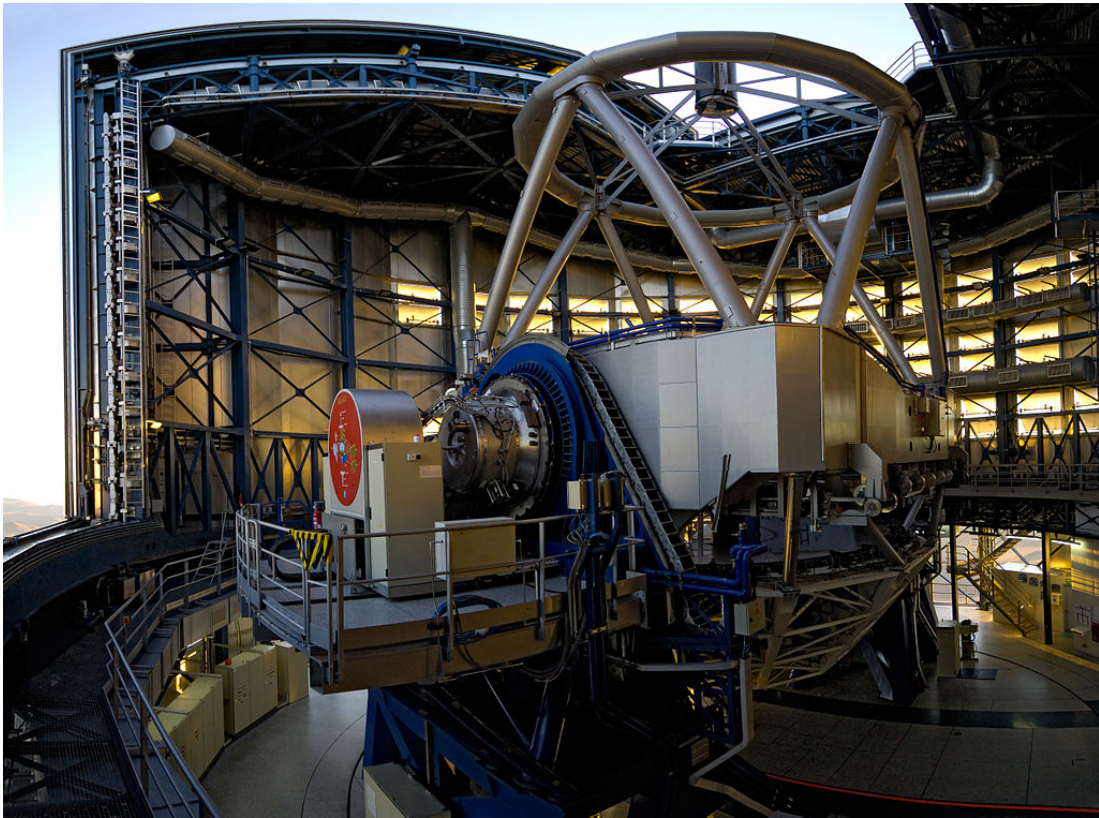


Figura 1.4: Um dos telescópios do VLT, onde se pode observar uma das plataformas Nasmyth, e na base a estrutura que sustenta o espelho principal M1.

A figura 1.5 mostra os quatro telescópios que constituem o VLT no ano de 1999, pouco antes da finalização do quarto e último telescópio. [1]

O facto de o conhecimento astronómico ter aumentado de forma significativa nas última décadas é um consequência directa do aumento do número e do tamanho dos telescópios e da eficiência com que estes são utilizados. A eficiência com que os fotões são colectados através de instrumentos modernos, revolucionaram todas as áreas da astronomia e astrofísica. Esta eficiência está directamente



Figura 1.5: Fotografia do VLT no Paranal, já na fase final da sua construção

ligada ao meio em que os fótons se propagam, que para serem recebidos por telescópios terrestres, terão que viajar pelo espaço e ao chegarem à Terra, atravessar a atmosfera.[2]

1.2 Óptica Adaptativa

A atmosfera terrestre é o meio que separa um observador do resto do Universo, e de certa forma “distorce a informação” que nos chega de objectos astronómicos. Apesar do desenvolvimento contínuo de observações feitas no espaço, as observações feitas a partir da Terra retêm vantagens consideráveis em termos de acesso e custos. Assim, a estratégia global para observações astronómicas requer que se conheça com precisão as propriedades da atmosfera da Terra. Com este conhecimento o potencial ou os limites de observações terrestres podem ser definidos.[3]

A luz proveniente de uma fonte astronómica, desloca-se no Espaço como se se

tratasse de uma onda plana¹. O índice de refração da atmosfera não é constante e irá variar ao longo da direcção no sentido do topo da atmosfera para a superfície terrestre. Outro factor que também fará variar o índice de refração serão os efeitos de turbulência que advêm das flutuações de temperatura na atmosfera. Assim, algumas partes da frente de onda atravessarão porções de ar mais quente do que a média, ou seja, menor índice de refração logo irão adiantar-se, outras atravessarão porções mais frias sendo retardadas e desta forma a frente de onda é deformada.

A determinação das correcções para restabelecer a frente de onda inicial (antes de entrar na atmosfera) podem ser efectuadas através de um instrumento denominado por sensor de frente de onda (*wavefront sensor*). Este sensor é responsável por gerar um sinal que será transmitido a um espelho deformável onde incidirá a frente de onda distorcida, que se reconfigurará por forma a efectuar as correcções necessárias para tornar a frente de onda novamente plana. Existem vários tipos de sensores de frente de onda, mas a tendência geral em aplicações de instrumentação em astronomia é utilizar um sensor de frente de onda *Shack-Hartmann*. Na figura 1.6 mostra-se modo o de funcionamento deste tipo de sensores[4].

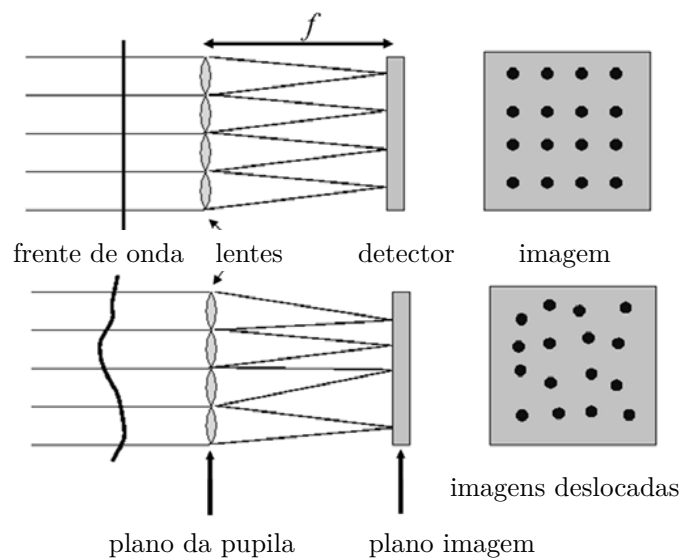


Figura 1.6: Modo de operação de um sensor Shack-Hartmann.

Estes sensores são constituídos por um conjunto de pequenas lentes (chamado *lenslet array*) colocadas perto do plano imagem da pupila do telescópio, fazendo com que cada lente foque uma porção da frente de onda incidente num detector. Assim, a imagem de cada lente será deslocada se a porção correspondente da frente de onda estiver distorcida. Determinando rapidamente o centróide correspondente a cada imagem é possível encontrar o desvio relativamente à frente de

¹Uma fonte luminosa pontual, emitirá uma onda de luz esférica, mas após esta onda percorrer distâncias astronómicas, pode considerar-se que se trata de facto de uma onda plana.

onda plana naquele instante. Esta informação será então levada até a um espelho deformável, que basicamente consiste num conjunto de actuadores electro-mecânicos ligados a uma superfície reflectora, tal como o já mencionado espelho de 8.2m de cada um dos telescópios do VLT. [1]

A detecção e compensação das distorções da frente de onda são geralmente feitas recorrendo a uma estrela de referência (*guide star*) localizada na proximidade da estrela que se pretende observar. Isto acontece porque, muitas vezes a estrela que se pretende observar é demasiado ténue, e a sua luz é insuficiente (baixa relação sinal-ruído) para se efectuar o processo de compensação, ou tratando-se de um objecto extenso, a compensação seria espúria. A eficiência da compensação das distorções diminui à medida que a distância angular entre a estrela a observar e a estrela de referência aumenta, simplesmente porque as deformações na frente de onda são diferentes. Este método é viável se a separação angular entre estes dois objectos é inferior ao ângulo isoplanático, θ_0 , definido por:

$$\theta_0 = 0.314 \frac{r_0 \cos z}{H}$$

Em que, r_0 é o parâmetro de Fried, H é a distância média até à camada de turbulência e z o ângulo de zénite, sendo este o ângulo entre a superfície da Terra e uma linha entre o observador e o objecto observado. O significado físico do parâmetro de Fried², é que este corresponderá à abertura de um sistema óptico com a mesma resolução que uma abertura apenas limitada por difracção na ausência de turbulência. Assim, pode definir-se o ângulo isoplanático como sendo o raio de um círculo na atmosfera onde as distorções que ocorrem na frente de onda são todas iguais. [5]

O conceito de óptica adaptativa é idêntico ao de óptica activa. Além de que para a óptica adaptativa seja necessário um tempo de resposta mais rápido, existe, no entanto, uma diferença fundamental, sendo que as correcções em óptica activa são válidas em todo o plano focal. Mas como o padrão de turbulência é diferente em diferentes direcções, as correcções de óptica adaptativa só são válidas na vizinhança da estrela nas quais são determinadas. O tamanho das células isoplanáticas (definidas através do ângulo isoplanático) onde as correcções serão feitas e estão correlacionadas, dependem do comprimento de onda. No espectro visível, para um comprimento de onda de $0.5\mu\text{m}$ é tipicamente cerca de 2arcsec (segundos de arco). Mas, na zona do infra-vermelho próximo para um comprimento de onda de $2.5\mu\text{m}$ seria aproximadamente 14arcsec. O número de actuadores de um espelho deformável é proporcional ao quadrado do diâmetro do espelho primário. Para o VLT, cujos telescópios têm um espelho primário de cerca de 8.2m, o número de actuadores necessários seria de 6000 para um comprimento de onda de $0.5\mu\text{m}$, mas para $2.5\mu\text{m}$ seriam apenas necessários 125. Logo, a óptica adaptativa é muito mais simples quando se observa em comprimentos de onda no infra-vermelho próximo do que no visível. [1]

²No Anexo A encontra-se uma breve abordagem ao parâmetro de Fried e a teoria de Kolmogorov para a turbulência atmosférica.

Assim, a óptica adaptativa é uma tecnologia utilizada para efectuar correcções na frente de onda distorcida pela atmosfera da Terra, sendo estas correcções efectuadas numa escala de tempo curta. A óptica activa, opera em escalas temporais maiores do que a óptica adaptativa, modificando a forma do espelho principal de maneira a prevenir deformações devidos a factores externos, tais como o vento, variações de temperatura ou tensões mecânicas. Na figura 1.7 mostra-se um esquema básico de um sistema de óptica adaptativa.

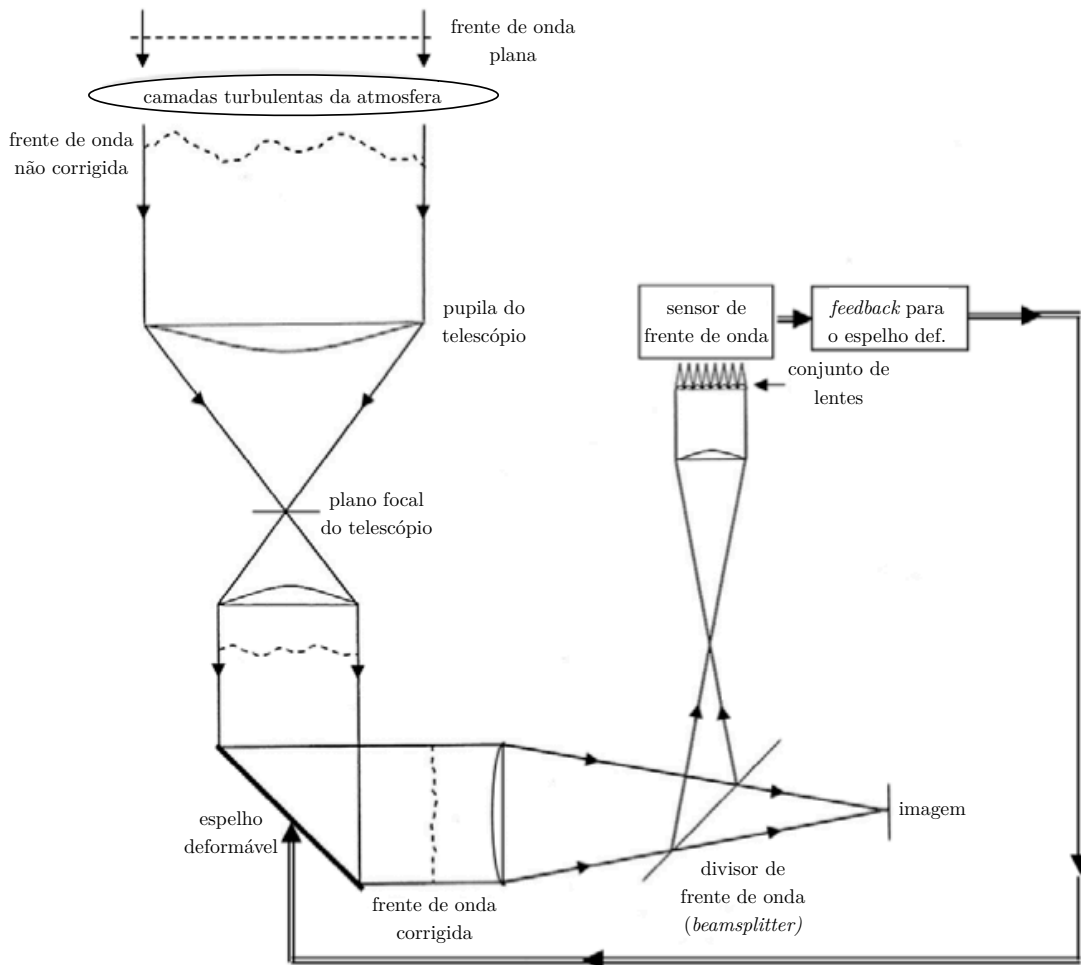


Figura 1.7: Esquema de um sistema de óptica adaptativa.

1.2.1 *Laser Guide Stars*

Tal como foi referido, para corrigir os efeitos atmosféricos é necessário medir os efeitos da turbulência, e para isso é comum utilizar a luz de uma estrela (sem ser aquela que se pretende observar). Quando a estrela a observar é muito ténue (fraca em termos de luminosidade), é necessário encontrar nas redondezas dessa estrela, isto é, dentro do ângulo isoplanático, uma outra que sirva de estrela de referência para poder efectuar as correcções necessárias à frente de onda. Uma

estrela que serve de referência, é chamada *natural guide star* (NGS). A imposição de encontrar uma estrela de referência no ângulo isoplanático³ restringe a escolha da estrela de referência a utilizar nas correções da óptica adaptativa. Neste contexto surgiu nos últimos tempos uma alternativa desafiante e, de certa forma, original. A ideia é simplesmente criar uma estrela de referência artificial, suficientemente brilhante, recorrendo à utilização de lasers, ou seja, utilizar estrelas de referência laser - *laser guide stars* (LGS).

No topo da atmosfera terrestre (na mesosfera) a uma altitude de aproximadamente 92km existe uma camada de átomos não ionizados de sódio (Na) e tem uma espessura de aproximadamente 5km. Pensa-se que esta camada é resultante de detritos provenientes de meteoritos. Em camadas inferiores o sódio surge quimicamente ligado formando componentes como o óxido de sódio (Na₂O), em camadas superiores, o sódio tende a surgir ionizado. Tipicamente, os átomos de sódio situados na dita camada de sódio podem ser excitados por um laser, emitindo radiação em comprimentos da ordem dos 589nm, correspondendo à porção amarela do espectro electromagnético. As bandas nas quais se dá esta radiação são conhecidas como as linhas D do sódio, mais concretamente, a linha D₁ situada nos 589.6nm e a linha D₂ nos 589.0nm.

Assim, os astrónomos encontraram uma maneira (original) de utilizar esta camada sódio: incidindo um laser nessa camada irá excitar os átomos de sódio para um estado de energia mais elevado, e quando estes retornem ao estado inicial irão emitir radiação, quer por emissão espontânea em todas as direcções ou emissão estimulada na direcção do laser incidente. Alguns dos fótons emitidos na direcção da superfície terrestre serão colectados pelo telescópio e assim formar-se-á uma estrela artificial, isto é, uma *laser guide star*. À medida que a potência do laser aumenta, o brilho da estrela artificial aumentará também, até um ponto em que a emissão estimulada será dominante e maior parte da luz sairá na direcção do laser[4]. O VLT incorpora já num dos seus telescópios um sistema LGS, o qual se pode observar em funcionamento na figura 1.8.

³O ângulo isoplanático pode ir desde poucos arco-segundo no visível a dezenas de arco-segundo no infravermelho.

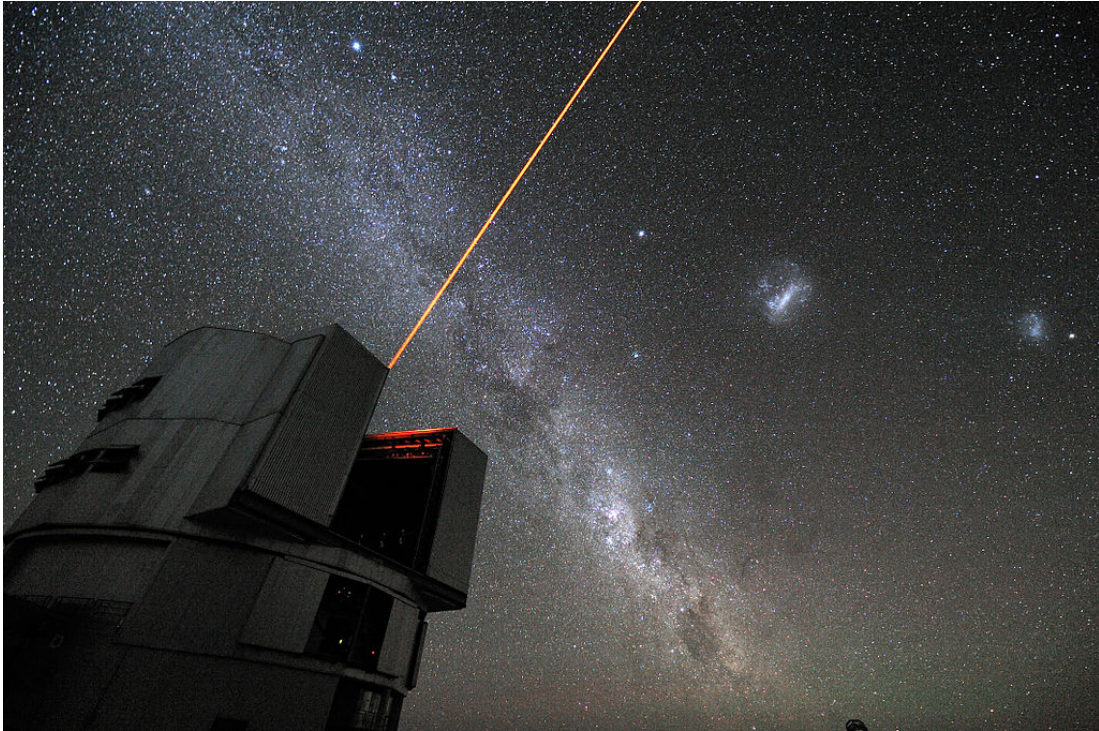


Figura 1.8: Um sistema de *laser guide star* sendo utilizado no VLT.

1.3 Interferometria: o VLTI

A construção do conjunto de 4 telescópios que constitui o VLT teve como intuito base obter uma abertura equivalente a um telescópio com aproximadamente 16m. Isto é possível tirando vantagem do fenómeno de interferência de ondas electro-magnéticas, que surge da sobreposição de duas ou mais ondas. Embora, algumas vezes o fenómeno de interferência ocorra de forma natural (tal como num fino filme de óleo numa estrada molhada), pode no entanto construir-se um instrumento que permita efectuar interferência, e assim poder medir alguma coisa. Este instrumento chama-se interferómetro. Assim, a sobreposição de ondas formará um padrão de interferência e, em cada ponto deste padrão a diferença de fase entre ondas com a mesma frequência dependerá nos diferentes percursos que cada onda seguiu. Embora se refiram duas ondas separadas, as ondas que contribuem para a interferência derivam da mesma fonte. O padrão de interferência de duas ou mais ondas caracteriza-se por um conjunto de franjas escuras e claras alternadas, as quais correspondem à sobreposição construtiva ou destrutiva de ondas. O objectivo principal de um interferómetro é obter medições através da análise do padrão de interferência resultante da sobreposição de duas ou mais ondas.

Os telescópios que constituem o VLT podem ser utilizados num modo interferométrico, sendo que neste modo é normal denominar-se por VLTI, ou seja, este acrónimo corresponderá a *Very Large Telescope Interferometer*. Assim, a luz proveniente de uma estrela irá atingir diferentes telescópios, que pelo facto

de se encontrem distanciados uns dos outros, irá fazer com que essa luz tenha percursos diferentes. A combinação da luz dos vários telescópios permitirá obter um padrão de interferência do qual se poderá obter informação sobre a estrela. A vantagem fundamental da interferometria advém do facto de que a resolução angular deixará de ser limitada pelo diâmetro de um telescópio individual e passará a ser limitada pela maior distância entre telescópios, chamada linha de base.[6]

O VLTI é neste momento constituído não só por um conjunto de 4 telescópios com 8.2m de diâmetro, sendo cada um denominado por *Unit Telescope* (UT), mas também por um conjunto de 4 telescópios auxiliares com 1.8m de diâmetro que se podem movimentar, sendo cada um destes denominado por *Auxiliary Telescope* (AT). Os AT podem ser utilizados também em conjunto com os UT e obter assim maiores linhas de base, que permitem melhores resoluções. Na figura 1.9 encontra-se uma imagem representando o VLTI.

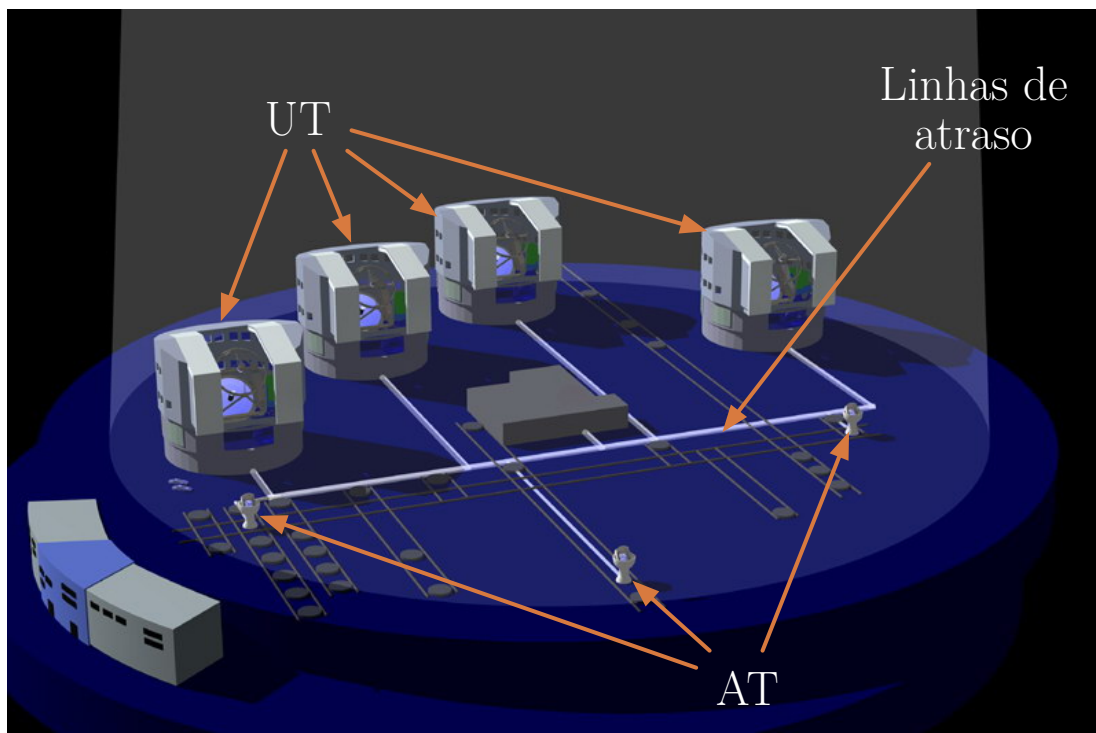


Figura 1.9: Representação esquemática dos componentes do VLTI. Mostra-se os percursos subterrâneos dos vários telescópios para a longa linha de atraso central.

Para que haja uma compensação dos diferentes percursos que a luz terá, consoante o telescópio onde é colectada, até chegar a um laboratório onde os feixes dos vários telescópios são combinados, existem sistemas opto-mecânicos móveis montados em carris, denominados por *delay lines*, isto é, linhas de atraso, e que permitem manter os diferentes percursos da luz dos diferentes telescópios constantes. Estas linhas de atraso estão montadas em túneis subterrâneos, que levam a luz até ao laboratório (também subterrâneo) do VLTI.[7]

1.4 Instrumentação para o VLT e VLTI

Cada um dos UT do VLT tem dois focos Nasmyth e um foco Cassegrain (ver figura 1.2). Em cada um destes focos pode ser instalado um instrumento, resultando um total de 12 instrumentos ($4 \text{ UT} \times 3 \text{ focos}$) que podem ser instalados no VLT durante um longo período de tempo. Cada instrumento fica permanentemente instalado até um novo instrumento ou uma actualização de um existente seja construído, sendo que desta forma a qualidade e a eficiência sejam sucessivamente melhoradas. A participação de várias instituições na construção de instrumentos desenvolveu um sentimento de cooperação no VLT por parte da comunidade, promovendo a cooperação multinacional a nível Europeu.

Os instrumentos presentemente instalados no VLT e VLTI, consistem em instrumentos para captação directa de imagem (*imagers*), espectrógrafos⁴ e combinadores de feixes (*beam combiners*). Os combinadores de feixes são utilizados no modo interferométrico, evidentemente, combinando a luz de vários telescópios. Na tabela 1.1 encontram-se os nomes dos instrumentos instalados nos vários UT, os focos em quais estão instalados bem como os instrumentos para interferometria, que são comuns a todos os UT.

Tabela 1.1: Instrumentos instalados nos vários focos dos telescópios do VLT e VLTI.

Telescópio	Foco			
	Nasmyth A	Cassegrain	Nasmyth B	Interferometria
UT1	CRIRES	FORS2	Visitante	AMBER MIDI Visitante
UT2	FLAMES	XSHOOTER	UVES	
UT3	ISAAC	VISIR	VIMOS	
UT4	HAWK-I	SINFONI	NACO	

Cada acrónimo dos instrumentos define a função destes. As funções dos instrumentos da tabela 1.1 encontram-se brevemente descritos no anexo B.

1.5 O futuro da astronomia na Europa

Poderia concluir-se que tudo está bem no contexto científico da astronomia na Europa e que se deveria continuar a este ritmo. Mas isto significaria ignorar a dinâmica da ciência. O que hoje em dia é a vanguarda científica, amanhã será história. Os resultados científicos obtidos com os equipamentos que existem no presente levarão à formulação de novos problemas que apenas poderão ser resolvidos recorrendo a novos instrumentos mais sofisticados. Por outro lado, a competição nunca pára. Um instrumento que hoje é a vanguarda da tecnologia,

⁴Um espectrógrafo é um instrumento que separa (ou dispersa) uma onda de luz nas suas várias componentes espectrais, isto é, nas suas várias frequências (ou comprimentos de onda), permitindo assim, por exemplo, realizar análises espectrais de estrelas.

poderá estar pronto para ir para o museu quando outros tiverem desenvolvido um instrumento melhor. Se não se estimular a construção de instrumentos continuamente inovadores relativamente aos seus precedentes, os melhores cientistas e engenheiros, responsáveis por essa dinâmica de desenvolvimento, irão certamente procurar novos desafios noutras lugares, ou inclusive, noutras áreas da ciência. A astronomia na Europa está em boa forma, mas não poderá perder de vista o que a rodeia, e embora sejam necessários planos a longo prazo, este planeamento deverá ser suficientemente flexível de forma a adaptar-se à competição por parte da envolvente internacional de países não europeus.

Por parte do ESO, e no sentido de não perder o ritmo competitivo com o resto das organizações científicas, foi dado um passo decisivo muito importante para toda a comunidade de astronomia mundial, sendo este a confirmação da construção de um novo telescópio, denominado por *European Extremely Large Telescope* (E-ELT), que terá um espelho primário de 39 metros, e que se encontra neste momento já numa fase avançada de estudo, desenho e concepção. Este telescópio terá uma capacidade de colectar luz, que pode ser até 15 vezes superior mais do que os telescópios ópticos actuais. Este telescópio, poderá revolucionar a nossa visão do Universo, tal como Galileu fez há 400 anos atrás.

1.6 Âmbito desta dissertação

O enquadramento descrito nas secções anteriores servem para enquadrar o âmbito do trabalho desenvolvido por mim no centro de investigação do Laboratório de Sistemas, Instrumentação e Modelação (SIM), da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Este trabalho será descrito nos próximos capítulos desta dissertação.

Resumidamente, este trabalho consistiu na construção e desenvolvimento de uma infra-estrutura de teste para um sub-sistema de um futuro instrumento do ESO: o GRAVITY (*General Relativity Analysis via VLT InTerferometrY*). Este é um instrumento que combinará os feixes dos quatro telescópios do VLTI, operando num modo interferométrico. As condições de funcionamento do GRAVITY serão em vácuo e com subsistemas a temperaturas criogénicas. O sub-sistema que terá que ser testado é a Câmara de Aquisição, que monitoriza os feixes dos telescópios, permitindo efectuar a compensação de erros nas frentes de onda. Assim, neste trabalho, será detalhado o trabalho de desenvolvimento desta infra-estrutura de teste para a Câmara de Aquisição do GRAVITY.

2. O GRAVITY

A astrometria é um ramo da astronomia que envolve medições precisas das posições e movimentos de estrelas e outros corpos celestes, sendo que a informação obtida permite efectuar medições fundamentais e assim desvendar leis da Natureza e a estrutura do Universo.

A utilização do *Very Large Telescope Interferometer* (VLTI) recorrendo a técnicas de interferometria com os quatro UT permitirá obter medições astrométricas de elevada precisão, na ordem dos 10 a 100 μ as (μ as corresponde à unidade de micro segundos de arco).

Presentemente, encontra-se em construção e desenvolvimento um novo instrumento para o VLTI, o GRAVITY, sendo que é um acrónimo para *General Relativity Analysis via VLT InTerferometrY*. O GRAVITY irá observar na zona do espectro electromagnético do infra-vermelho próximo, combinando a luz colectada pelos quatro UT. Este instrumento utilizará óptica adaptativa e fará a interferência da luz (obtendo as respectivas franjas de interferência) ao nível do instrumento.[8]

2.1 Objectivos científicos

Os objectivos científicos principais do GRAVITY são a observação de exoplanetas, a determinação dos componentes e propriedades de núcleos galácticos activos, e o mais importante, a observação do centro da nossa galáxia, a Via Láctea, por forma a estudar a sua dinâmica. Espera-se um progresso significativo nestes campos quando o GRAVITY iniciar o seu funcionamento.

2.1.1 Detecção de exoplanetas

Não só a comunidade de astrónomos, mas também o público em geral, dá especial atenção à busca de exoplanetas, sendo estes planetas que orbitam outras estrelas sem ser o Sol. A observação destes exoplanetas ajuda a compreender a evolução e processos de formação de corpos em sistemas planetários, especialmente no nosso sistema solar. A observação de exoplanetas já é feita no VLTI com o instrumento PRIMA, mas este apenas utiliza a luz de dois UT, tendo este apenas uma linha de base. O GRAVITY, combinando a luz dos quatro UT terá seis linhas de

base, permitindo inferir com menos ambiguidade a forma dos objectos a observar ou o mesmo tipo de medições que o instrumento PRIMA em apenas um quinto do tempo que este necessita. A forma mais comum de descobrir exoplanetas consiste em observar variações do efeito de Doppler da luz de uma estrela à medida que a estrela e o planeta se movimentam em torno do seu centro de massa. O GRAVITY permitirá também detectar exoplanetas transitórios. Estes exoplanetas movimentam-se em frente a uma estrela causando uma variação do centro fotométrico.

2.1.2 Estudo de núcleos galácticos activos

Uma das principais funções do GRAVITY consistirá no estudo de núcleos galácticos activos (AGNs, *Active Galactic Nuclei*). Estes são centros de galáxias muito luminosos, dominados por um buraco negro supermassivo¹ e rodeado por um toro de poeiras. Nesta parte, gases são aquecidos à medida que se dá a acrecção na direcção do buraco negro, e desta forma é emitida radiação. O GRAVITY permitirá detectar os componentes destes núcleos activos, sendo que a distância a que estes núcleos são detectáveis aumentará entre 20 a 200MPc (a unidade Pc, corresponde ao Parsec, sendo que $1\text{Pc} = 3.08568 \times 10^{16}\text{m}$). Desta forma poderão ser obtidos movimentos e acelerações de estrelas e de gás nestes núcleos galácticos activos, podendo desta forma serem estimadas as massas dos buracos negros bem como outros parâmetros.

2.1.3 Estudo do Centro Galáctico

Tal como nos AGNs, no o Centro Galáctico (o centro rotacional da nossa galáxia, a Via Láctea) existe um buraco negro supermassivo, sendo este denominado por Sgr A*, com uma massa aproximadamente de $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$. Sendo este o buraco negro gigante mais próximo da Terra, as teorias Restrita e Geral da Relatividade poderão ser testadas em condições extremas, bem como a gravidade no seu limite relativístico. Com as elevadas capacidades astrométricas do GRAVITY, as velocidades e acelerações de estrelas que orbitam o buraco negro Sgr A* (especialmente quando elas se encontram no ponto mais próximo do buraco negro) poderão agora ser determinadas com maior precisão. Outra razão para a medição das órbitas, velocidades e acelerações destas estrelas será tentar saber o que existe nas redondezas do Sgr A* além destas estrelas observáveis. Algumas teorias sugerem que o Sgr A* se encontra rodeado por remanescentes estelares, tais como estrelas de neutrões ou buracos negros estelares, significando cerca de 1 a 10% da massa central. Havendo ainda a possibilidade de haver uma porção de matéria escura no lugar dos remanescentes estelares. Com os dados de estrelas próximas do Sgr A* (órbita, velocidade, aceleração, precessão) poderão ser melhorados os modelos teóricos e estimar com melhor consistência a zona mais profunda do nosso Centro Galáctico. Estas futuras observações do Centro Galáctico resultarão num

¹Com massas da ordem de $\approx 10^7 M_{\odot}$, sendo M_{\odot} a massa do Sol

conhecimento mais detalhado sobre a estrutura e dinâmica desta região, permitindo também testar alguns fundamentos da física em condições até agora fora do nosso alcance.[9]

2.2 Descrição funcional do instrumento

O GRAVITY combinará a luz proveniente dos quatro telescópios de 8.2m do VLTI, utilizando as bandas H e K do espectro electromagnético, correspondente às gamas $1.45\mu\text{m}$ aos $1.85\mu\text{m}$ (banda H) e $2.0\mu\text{m}$ aos $2.4\mu\text{m}$ (banda K) respectivamente, na qual a transparência da atmosfera é elevada. Os efeitos atmosféricos serão corrigidos utilizando óptica adaptativa no próprio instrumento, que permitirá obter uma frente de onda plana, com fase bem definida ao longo da abertura.

O instrumento subdivide-se três subsistemas principais: os sensores de frente de onda infra-vermelhos (*IR wavefront sensors*); o combinador de feixes (*Beam combiner instrument*), que fica localizado no laboratório subterrâneo da infraestrutura do VLTI; e os sistemas de monitorização dos feixes, sendo estes o sistema de metrologia laser e a câmara de aquisição (*Laser guiding e Acquisition camera*). Na figura 2.1 pode ver-se um esquema funcional do GRAVITY, onde, por uma questão de clareza, se encontram representados apenas dois dos quatro telescópios que serão utilizados.[10], [8]

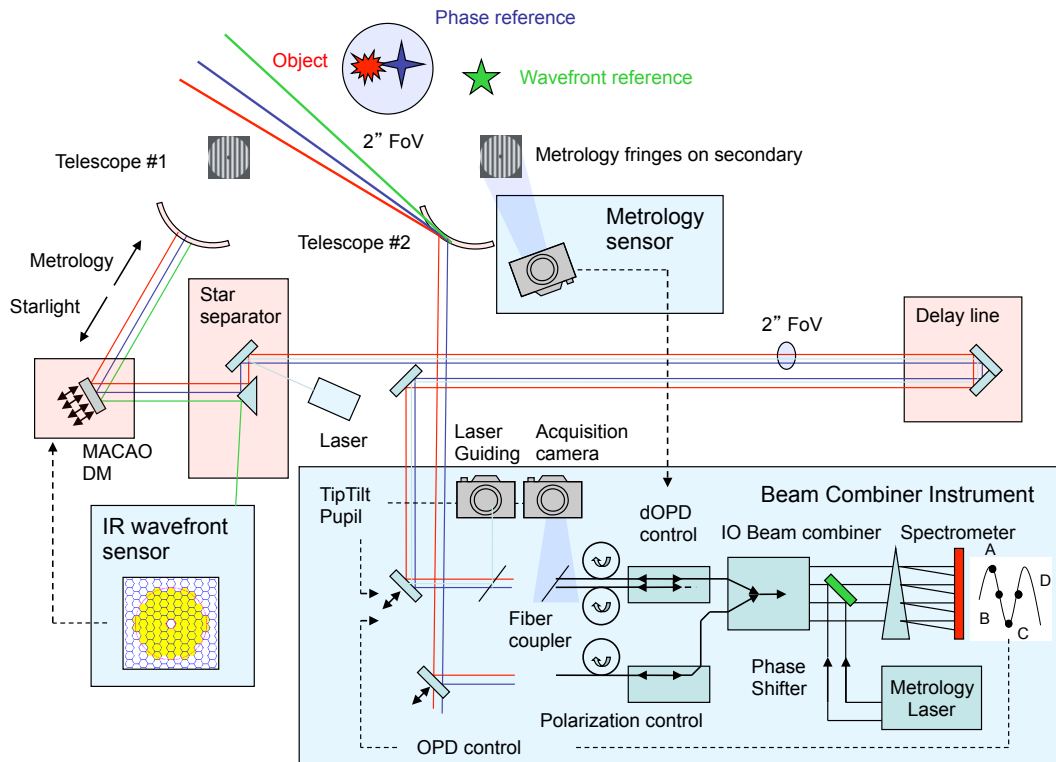


Figura 2.1: Esquema funcional do instrumento GRAVITY.

Os sensores de frente (*IR wavefront sensor*) de onda serão instalados em cada telescópio (UT) e irão comandar os seus espelhos. Como foi referido, estes espelhos são deformáveis², e através do sinal gerado pelos sensores de frente de onda, irão reconfigurar-se e efectuar as correcções necessárias para tornar a frente de onda novamente plana.

Distorções que ocorram na frente de onda do tipo *tip-tilt*³ até esta chegar ao instrumento serão corrigidas através do sistema de metrologia laser. Assim, o laser é injectado no *star separator*⁴ efectuando assim o percurso óptico até chegar ao instrumento onde está instalado um sensor (*Laser guiding sensor*) dedicado a medir as distorções deste tipo *tip-tilt*.

Existem ainda distorções que podem afectar a frente de onda até esta chegar ao instrumento, sendo estas provocadas pela própria infra-estrutura dos telescópios. Assim, a monitorização dos feixes após percorrem a infra-estrutura e os túneis subterrâneos do VLTI será feita através de uma câmara de aquisição (*Acquisition camera*).

Desta forma, a informação proveniente destes dois sistemas de monitorização dos feixes (câmara de aquisição e sistema de metrologia laser), poderá ser introduzida num sistema global de controlo que permitirá efectuar as correcções necessárias nos feixes antes de estes serem injectados num conjunto de fibras ópticas, que conduzirão a luz até ao combinador de feixes (*beam combiner*) propriamente dito.

O campo de visão do VLTI é de 2 segundos de arco, e este incorpora o objecto que se pretende observar e uma estrela de referência. Antes da luz dos dois objectos ser acoplada em fibras ópticas, separa-se a luz proveniente do objecto a observar e da estrela de referência de forma a serem e injectadas em fibras monomodo individuais. As fibras irão então guiar a luz até dois dispositivos de óptica integrada. Estes dispositivos serão responsáveis por efectuarem a combinação dos feixes, sendo propriamente denominados por combinadores de feixes.

Posteriormente, a luz proveniente do combinador de feixes chegará a dois espectrómetros que permitirão realizar medições simultâneas da visibilidade do objecto que se pretende observar e da estrela de referência. Finalmente, esta informação será utilizada para efectuar a construção de imagens.

Na figura 2.2 encontra-se um esquema geral do GRAVITY no VLTI. Na figura central pode ver-se uma imagem conceptual de todo o instrumento, e que, tal como referido anteriormente será instalado no laboratório do VLTI. Na imagem localizada à esquerda está representado um dos quatro sensores de frente de onda instalados em cada UT.[8]

²Os espelhos deformáveis denominam-se por *Multiple Application Curvature Adaptive Optics* (MACAO).

³O fenómeno de *tip-tilt* está relacionado com a descrição matemática da forma das distorções da frente de onda, dadas pelo polinómios de Zernike. Para mais detalhe ver o capítulo 2 em [9].

⁴O *star separator* faz parte de um outro instrumento já instalado na infra-estrutura do VLTI, o PRIMA

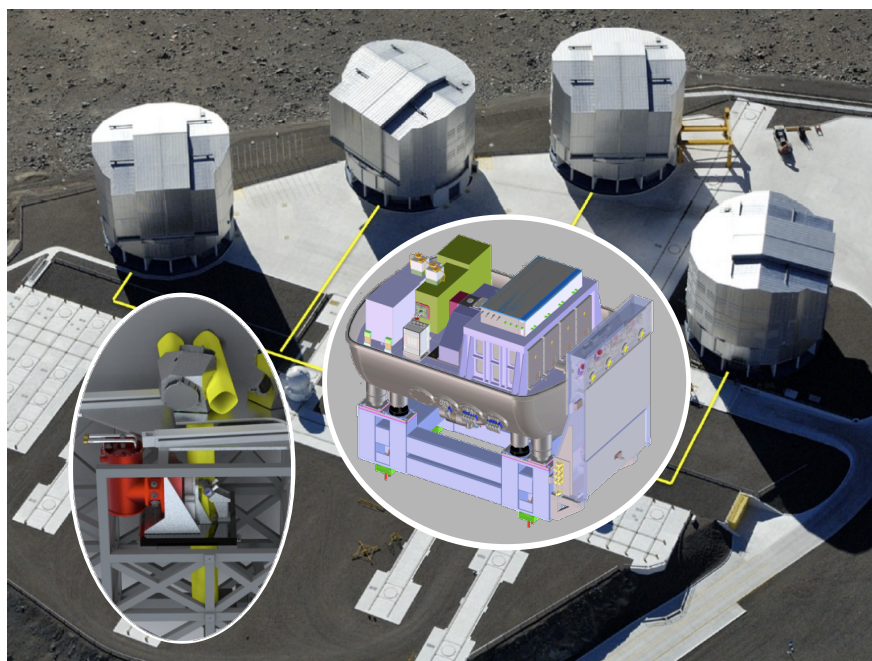


Figura 2.2: Representação esquemática do GRAVITY no VLTI.

2.3 Os subsistemas principais do GRAVITY

Todas as funções desempenhadas pelos vários subsistemas que integram o combinador de feixes são implementadas num único crióstato de forma a obter uma melhor estabilidade e supressão de fontes térmicas externas. Um crióstato é um sistema que permite manter instrumentos ou componentes a temperaturas criogénicas estáveis, utilizando, mais comumente, um banho com fluídos criogénicos, como por exemplo o Azoto Líquido (*Liquid Nitrogen*, LN_2).

O crióstato do GRAVITY fornece as várias temperaturas para os diversos subsistemas do GRAVITY, numa gama entre os 80K até aos 290K. Os vários níveis de temperaturas para cada subsistema são estabilizados utilizando resistências eléctricas. O crióstato encontra-se também em regime de alto vácuo.

2.3.1 Sensor de frente de onda

O sensor de frente de onda do GRAVITY incorpora uma parte quente onde estão instalados os elementos opto-mecânicos, e uma parte fria com o sensor de frente de onda Shack-Hartmann conjuntamente com o detector. Cada telescópio terá o seu próprio sensor de frente de onda, sendo que este será instalado de forma a efectuar ajustes ao espelho deformável de cada telescópio. Os sistemas de controlo existentes que utilizam o espelho deformável apenas funcionam na região do visível, necessitando assim deste novo sensor de frente de onda do GRAVITY para operar nas regiões do infra-vermelho. O funcionamento do sensor de frente de onda no infra-vermelho é imposto pelo requisito de observação do centro galáctico onde a elevada extinção de luz visível impede a utilização de

sistemas convencionais que funcionam com luz visível.

2.3.2 Fibras ópticas e acoplador

No GRAVITY existirá um conjunto de fibras ópticas responsáveis por transportar a luz do objecto a observar e da estrela de referência até ao combinador de feixes, com coeficiente de absorção desprezável para os comprimentos de onda da banda K.

A injeção da luz proveniente dos telescópios nas fibras é feita através de um sistema de acoplamento constituído por diversos componentes opto-mecânicos, sendo estes:

- um espelho motorizado que corrige a rotação induzida no percurso da luz ao longo do sistema de transporte óptico do próprio telescópio;
- um espelho parabólico que focará a luz num prisma denominado por *roof-prism*, que separará a luz do objecto a observar e a estrela de referência;
- dois conjuntos ópticos que injectaram a luz do objecto e da estrela de referência nas respectivas fibras ópticas.

Estas fibras ópticas serão montadas em estágios de translação de três direcções (x, y, e z) permitindo um ajuste do foco.

Neste sistema, existe ainda um divisor de feixe logo após o espelho motorizado, que separa a luz dos telescópios para as fibras ($> 1.9\mu\text{m}$) e para a câmara de aquisição ($< 1.9\mu\text{m}$).

Na saída das fibras ópticas estará instalado um sistema de controlo que ajustará o ângulo de rotação da polarização bem como o percurso óptico da luz ao longo das fibras. O percurso óptico é corrigido apertando ou distendendo as fibras que serão enroladas num cilindro piezo-cerâmico.

2.3.3 Combinador de feixes

Os dois combinadores de feixes para a estrela de referência e para o objecto a observar serão implementados, tal como já foi referido, num dispositivo de óptica integrada, cujas dimensões correspondem ao de um circuito micro-electrónico. Este dispositivo receberá a luz dos 4 telescópios. Uma imagem do protótipo destes dispositivos ópticos pode ver-se na figura 2.3.

2.3.4 Sistema de metrologia

O sistema de metrologia servirá para efectuar correcções no que diz respeito às perturbações no percurso óptico introduzido pelo sistema de guiamento da luz de cada telescópio. Desde a entrada da luz em cada telescópio, até esta chegar ao instrumento GRAVITY, a frente de onda sofrerá distorções. Assim, recorrendo à injeção de um laser na abertura de cada telescópio pode medir-se o percurso

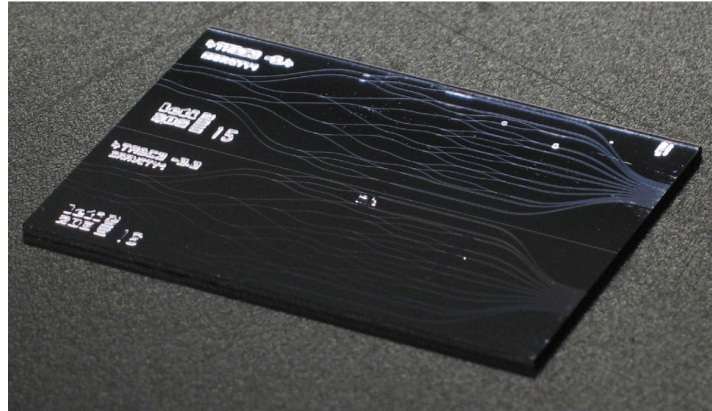


Figura 2.3: Protótipo do combinador de feixes cujas dimensões correspondem às de um circuito micro-electrónico.

óptico completo da luz. No final, este laser é injectado também no combinador de feixes permitindo correlacionar o percurso óptico do laser com o da estrela de referência e do objecto a observar, e assim efectuar as correcções necessárias.

2.3.5 Câmara de aquisição

Tal como foi referido anteriormente, a câmara de aquisição irá monitorizar as perturbações na frente de onda, nomeadamente as perturbações provocadas pela atmosfera dos túneis subterrâneos, os modos vibracionais induzidos por toda a infra-estrutura do telescópio (que podem ir até 100Hz) e as perturbações introduzidas pela movimentação das linhas de atraso. Estas perturbações irão causar deslocações laterais e longitudinais na posição da pupila dos telescópios, que terão que ser compensadas antes de os feixes serem injectados no combinador de feixes. Assim, a câmara de aquisição (*Acquisition camera*) fará imagens do plano focal, do plano da pupila e da frente de onda através de um sensor de frente de onda do tipo Shack-Hartmann. [11] Este subsistema será descrito mais detalhadamente no capítulo seguinte, sendo um dos temas centrais desta dissertação.

2.4 Considerações finais

Todo o desenvolvimento tecnológico do instrumento GRAVITY é um desafio de investigação científica. O facto de várias equipas internacionais serem responsáveis por subsistemas do instrumento, implica que a capacidade de trabalho em equipa (e também a capacidade de gestão por parte dos gestores de projecto) seja um denominador comum para todas as pessoas envolvidas no projecto. Só assim será possível que, no momento da integração final de todos os subsistemas no instrumento, tudo esteja em conformidade com as especificações. O GRAVITY possivelmente será instalado no VLTI em 2014.

3. A câmara de infra-vermelhos multi-telescópio do GRAVITY

O instrumento GRAVITY incorporará um subsistema que será responsável por monitorizar perturbações na frente de onda, sendo estas provocadas pela atmosfera dos túneis subterrâneos, as vibrações introduzidas pelos próprios telescópios e perturbações que advêm das linhas de atraso. Tendo em conta o que já foi descrito anteriormente no que diz respeito à descrição funcional do GRAVITY (secção 2.2), este subsistema será uma câmara de aquisição, desenhada para monitorizar e fornecer informações para controlo de aspectos relevantes acerca das imagens dos quatro telescópios. A câmara de aquisição será uma câmara multi-telescópio, ou seja, monitorizará a luz dos quatro telescópios que constituem o VLTI. A luz recebida corresponderá a comprimentos de onda da banda H do espectro electromagnético, e incluirá ainda a luz proveniente de um laser colocado na estrutura do telescópio, com comprimento de onda de $1.2\mu\text{m}$. A luz da banda K será dirigida ao espectrómetro. Na figura 3.1 pode ver-se a câmara de aquisição montada no instrumento GRAVITY.¹ Todo o sistema do combinador de feixes será instalado num crióstato, incluindo também a câmara de aquisição.

A câmara de aquisição tem um papel importante no instrumento GRAVITY efectuando as seguintes medições:

- Efectuar uma imagem do campo observado e fornecer as coordenadas do objecto a observar e da estrela de referência, permitindo um ajuste dos seus deslocamentos aquando da injeção destes objectos nas fibras;
- Medir a posição da pupila de cada telescópio recorrendo à observação da luz proveniente de lasers de díodo colocados na estrutura do próprio telescópio. Estes lasers serão instalados perto do espelho M2 de cada telescópio (ver figura 1.2);
- Medir as aberrações da frente de onda introduzidas pelos túneis do VLTI e da infra-estrutura das linhas de atraso, recorrendo à luz colectada pelos sensores de frente de onda (instalados em cada telescópio);

¹Nesta vista geral, a câmara de aquisição ainda não se encontrava na versão mais recente.

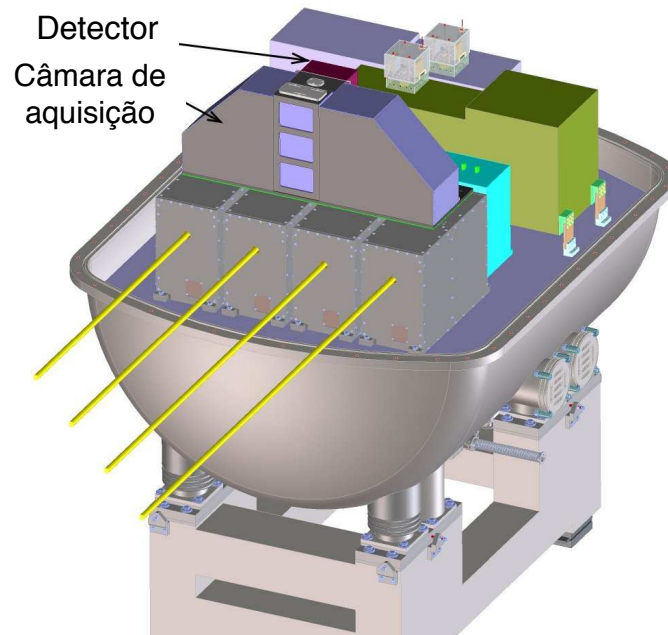


Figura 3.1: Vista da câmara de aquisição montada no combinador de feixes do GRAVITY.

- Efectuar uma imagem directa da pupila de cada um dos quatro telescópios.

Para efectuar as funções definidas, a câmara de aquisição incorpora dois estágios ópticos cuja tarefa será fazer com que os feixes atinjam um detector.

3.1 Desenho e construção do sistema óptico

O processo óptico que fará com que os feixes sejam redireccionados, e assim tenham as dimensões e distâncias entre si necessárias para que sejam compatíveis com as dimensões do detector, ocorrerá no interior da câmara de aquisição, sendo que todo este processo será dividido em dois estágios ópticos.

3.1.1 Primeiro estágio óptico

No primeiro estágio óptico, os feixes ao entrarem na câmara de aquisição irão ter um percurso óptico através de um conjunto de espelhos que fará com que estes fiquem a uma distância reduzida entre si. Na figura 3.2 encontra-se representado este primeiro estágio.

Os quatro feixes provenientes dos telescópios, entram na câmara de aquisição a uma distância entre si de 240mm. As setas a amarelo indicam os feixes de entrada. Estes feixes são dobrados para cima através de quatro espelhos planos a 45° , passando posteriormente através de um conjunto de lentes plano-convexas,

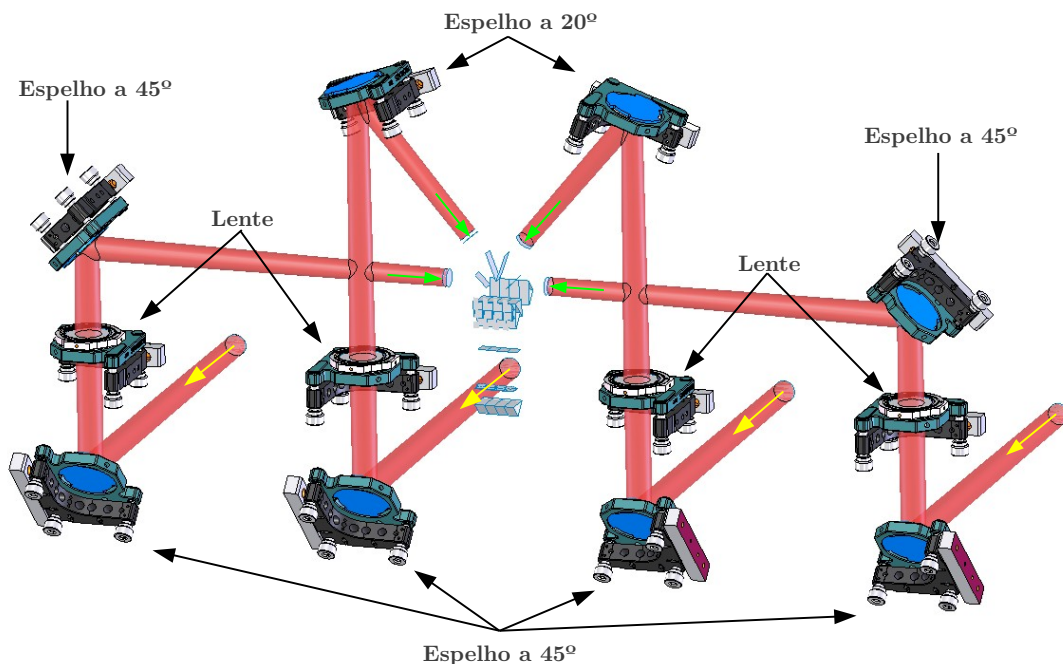


Figura 3.2: Primeiro estágio óptico da câmara de aquisição.

que definem o foco no plano do detector, e sendo dobrados para dentro através de um segundo conjunto de espelhos planos. Os dois feixes exteriores são dobrados através de espelhos planos a 45° e os dois feixes interiores são dobrados por espelhos planos a 20° . As lentes plano-convexas têm um raio de curvatura de 200mm. As setas a verde indicam a saída dos quatro feixes para o próximo estágio óptico, que será o analisador de feixes – *beam analyzer*, que se encontra representado esquematicamente no centro.

3.1.2 Segundo estágio óptico – o analisador de feixes

No segundo estágio, os quatro feixes irão chegar ao analisador de feixes, o qual será responsável por dividir cada um dos feixes em quatro modos: um localizador da pupila, uma imagem da pupila, uma imagem do campo e um localizador de aberrações. Resultando assim num conjunto de 16 feixes (4 feixes dos telescópios \times 4 modos por feixe) injectados no detector. O analisador de feixes é o componente central da câmara de aquisição, consistindo num conjunto de elementos ópticos, sendo estes prismas e lentes. O seu desenho e construção foi feito de forma a minimizar o número de elementos utilizados, recorrendo a componentes *standard* quando possível e criando quatro módulos separados, que efectuem funções diferentes. Desta forma, os módulos podem ser testados individualmente e posteriormente montados num bloco só. Na figura 3.3 pode ver-se uma representação esquemática do analisador de feixes com todos os módulos montados. A verde encontra-se representada a entrada dos quatro feixes provenientes do

primeiro estágio óptico.

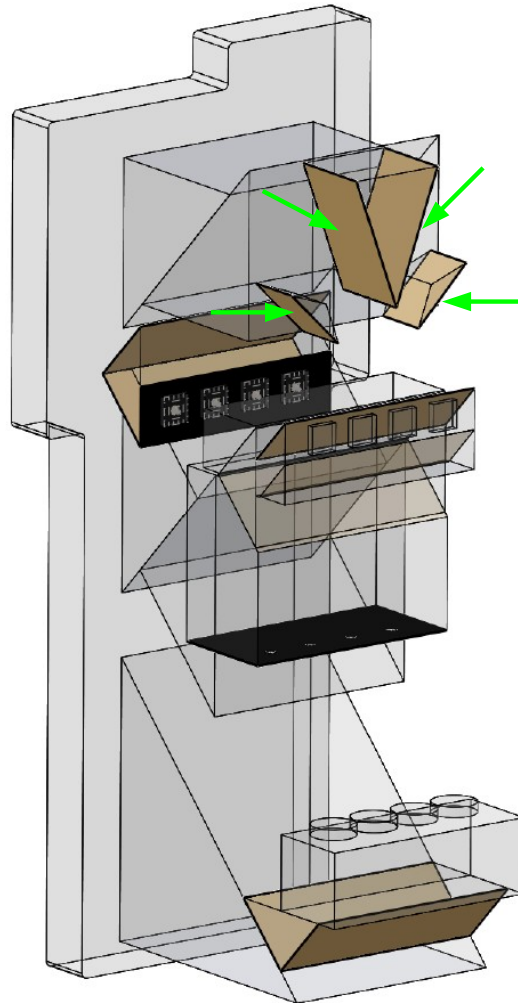


Figura 3.3: Segundo estágio óptico da câmara de aquisição – o analisador de feixes.

Todos os módulos do analisador de feixe são feitos do mesmo material, sendo este a sílica fundida do tipo Corning 7980. Como o analisador de feixes terá que ser arrefecido até uma temperatura próxima dos 100K, o facto de todos os componentes ópticos serem do mesmo material minimizará o aparecimento de tensões.

Com base na figura 3.4, seguidamente serão descritos os componentes ópticos responsáveis por efectuar a divisão e guiamento dos feixes injectados no analisador de feixes. A numeração dos módulos foi feita com base no percurso óptico dos feixes no analisador.

- **Módulo 1:** O primeiro módulo será responsável por *dobrar* os feixes injectados no analisador de feixes e conduzi-los para o módulo 2 (seta a amarelo). Este módulo consistirá num prisma que suportará três prismas de dimensões

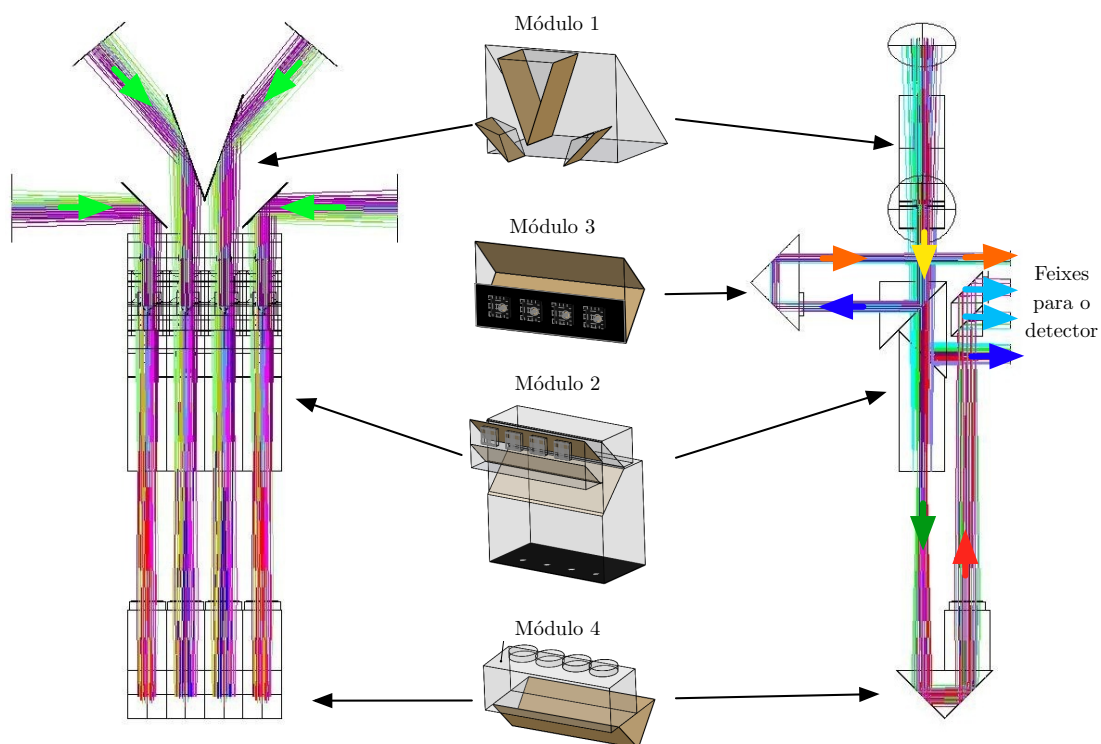


Figura 3.4: À esquerda e direita está representado um esquema óptico do analisador de feixes, visto de frente (à esquerda) e numa vista lateral (à direita). No centro estão representados os módulos individuais que constituem o analisador de feixes.

mais pequenas, fazendo estes três prismas um papel de espelho depositando um revestimento (*coating*) a ouro numa das faces em cada um;

- **Módulo 2:** Este módulo consistirá num conjunto de quatro componentes ópticos que farão, numa primeira passagem dos feixes através dele, uma divisão dos feixes em duas direcções opostas e perpendiculares ao feixe de entrada (setas a azul escuro), mais uma que continuará na direcção dos feixes injectados neste módulo (seta a verde escuro). Um dos feixes deste módulo é logo injectado no detector, constituindo a função de imagem de campo. Este módulo recebe novamente um conjunto de feixes vindos do módulo 4 (setas a azul claro), que posteriormente serão injectados no detector, efectuando duas funções: uma imagem da pupila (seta a azul claro inferior) e um sensor de aberrações (seta azul claro superior). Esta segunda passagem é feita através um conjunto de matrizes de lentes (*lenslet arrays*) em sílica fundida. Cada matriz tem dimensões de 5×5 mm, contendo lentes plano-convexas com sub-aberturas de 0.3×0.3 mm e raio de curvatura 2.2mm cada uma;
- **Módulo 3:** Neste módulo serão injectados os feixes provenientes do módulo 2 (seta a azul claro na direcção esquerda), sendo estes novamente *dobrados* e injectados no detector (seta a cor-de-laranja). Duas das faces do prisma são

revestidas também a ouro por forma a permitir a *dobragem* dos feixes. A outra face incorpora uma matriz de lentes convergentes 2×2 . Este módulo tem como função implementar a localização da pupila;

- **Módulo 4:** Os feixes serão *dobrados* e encaminhados novamente para o módulo 2 (seta a vermelho). Também neste módulo, duas das faces são revestidas com ouro. Este módulo incorpora um conjunto de quatro lentes plano convexas com diâmetro de 8mm e um raio de curvatura de 30.9mm.

A colagem dos diferentes componentes ópticos será feita através de uma cola própria para vácuo, isto é, que não sofre desgaseificação. Esta cola tem também o mesmo índice de refração que a sílica fundida utilizada, sendo que também é válida para as temperaturas a que o analisador de feixes será arrefecido. A espessura típica para a cola indicada pelo fabricante é de $10\mu\text{m}$.

O suporte que unirá todos os módulos será também fabricado no mesmo tipo de sílica fundida. Além de unir e posicionar todos os módulos, este componente servirá como interface de suporte mecânico a uma sub-estrutura da câmara de aquisição, que será apresentada mais à frente.

3.2 Desenho mecânico

Os componentes ópticos do primeiro estágio, apresentado na figura 3.2, são *standard*, fazendo com que os custos sejam reduzidos comparativamente a componentes personalizados. Foram utilizados suportes ajustáveis *standard* para ambos os conjuntos de espelhos e de lentes utilizados neste primeiro estágio óptico, estando estes representados nas figuras 3.5 e 3.6.

No que diz respeito à estrutura da câmara de aquisição, esta possibilita a montagem dos vários componentes ópticos de uma forma firme. Toda a estrutura é constituída em alumínio, tornando-a suficientemente rígida e não muito pesada ao mesmo tempo. Na figura 3.7 encontra-se uma representação da parte estrutural da câmara de aquisição onde se pode observar a montagem dos espelhos e lentes (e respectivos suportes). Na parte central do desenho, está também representado em corte o detector a azul escuro e o analisador de feixes a branco. Observa-se também as estruturas de reforço interior para que lhe confirmam uma melhor estabilidade e rigidez. Na parte de trás da câmara existem ainda estruturas extra de reforço que podem ser visualizadas na figura 3.8.

Com base na figura 3.8, as dimensões e o peso da câmara de aquisição estão definidas na tabela 3.1. Para efeitos de verificação e posicionamento são incorporados dois cantos e uma aresta de referência.

Os feixes entram na câmara de aquisição a uma distância de 150mm acima da base, orientados horizontalmente e separados entre si a 240mm. O plano onde se dá a entrada dos feixes, encontra-se a uma distância de 290mm relativamente aos cantos de referência.

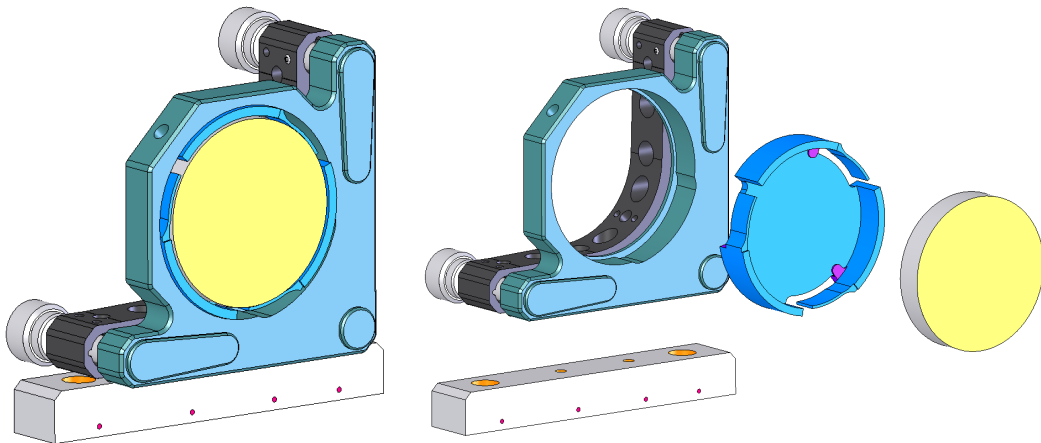


Figura 3.5: Suporte para os espelhos com ajustes de posição.

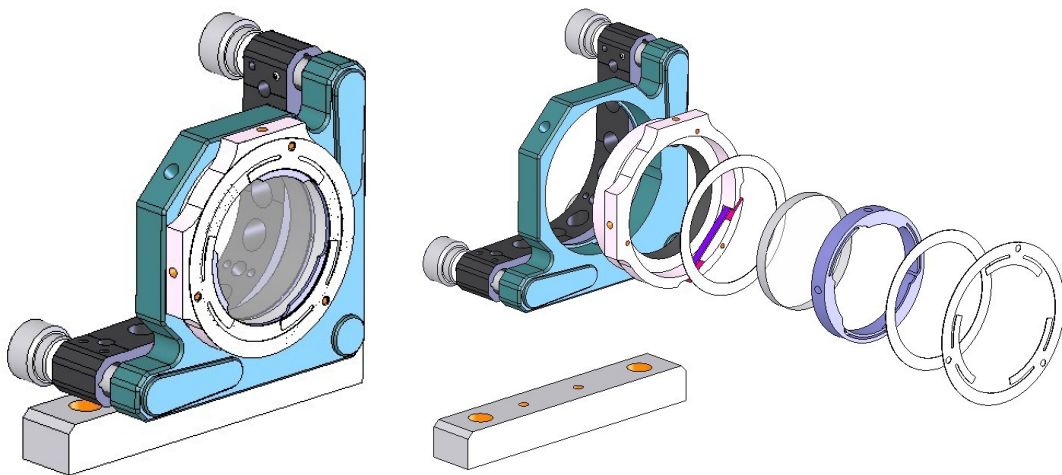


Figura 3.6: Suporte para as lentes com ajustes de posição.

Tabela 3.1: Dimensões e peso da câmara de aquisição.

	Largura (W)	Altura (H)	Comprimento (L)
Estrutura	890mm	530mm	192mm
Massa		32.9kg	

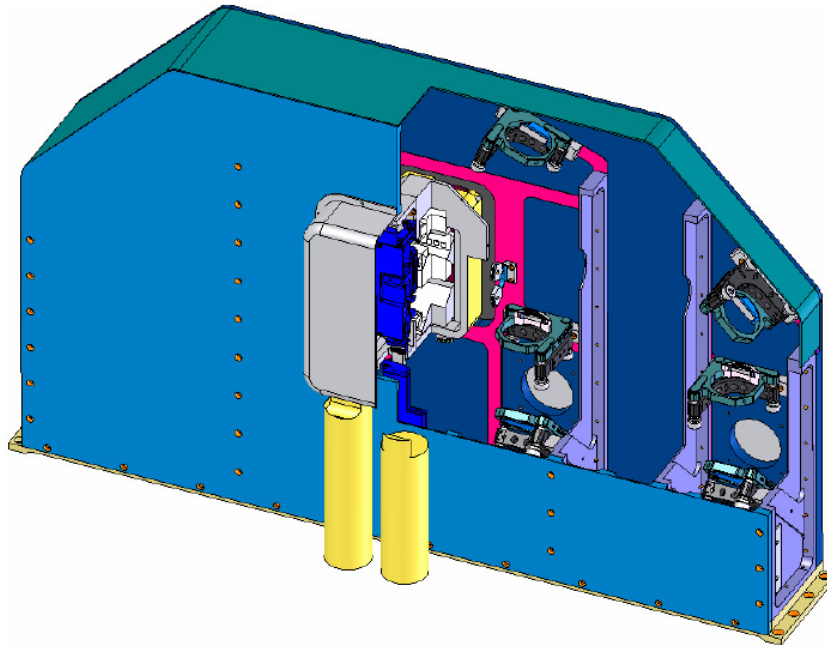


Figura 3.7: Estrutura da câmara de aquisição em corte parcial.

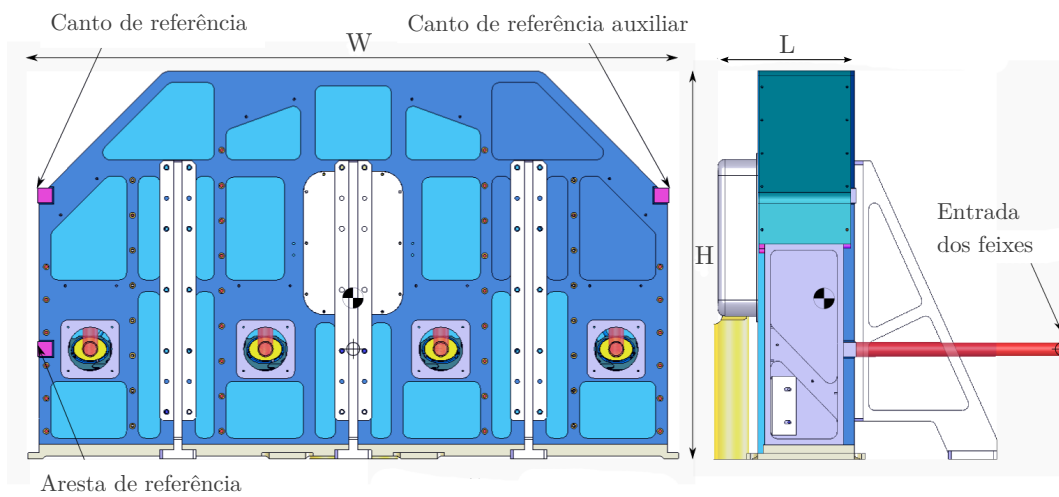


Figura 3.8: Duas vistas da câmara de aquisição e respectivas dimensões.

3.3 Considerações de criogenia

Toda a estrutura da câmara, com a excepção do analisador de feixes, incluindo os espelhos e lentes do primeiro estágio óptico, estarão a uma temperatura de 240K, a qual corresponde à temperatura que a estrutura do instrumento GRAVITY terá. No que diz respeito ao analisador de feixes e ao detector, estes terão que estar a uma temperatura de 140K e 80K, respectivamente, sendo que o detector terá que ser arrefecido com um gradiente de temperatura não superior a 2K/min. Assim, na câmara de aquisição haverá duas temperaturas de funcionamento muito diferentes, sendo necessário que os dois sub-sistemas sejam termicamente isolados e ao mesmo tempo garantir que as posições relativas entre eles estejam bem definidas e sejam reprodutíveis. Na figura 3.9 encontra-se representado com mais detalhe a implementação da estrutura que incorpora o analisador de feixes e o detector, bem como os restantes componentes do primeiro estágio óptico.

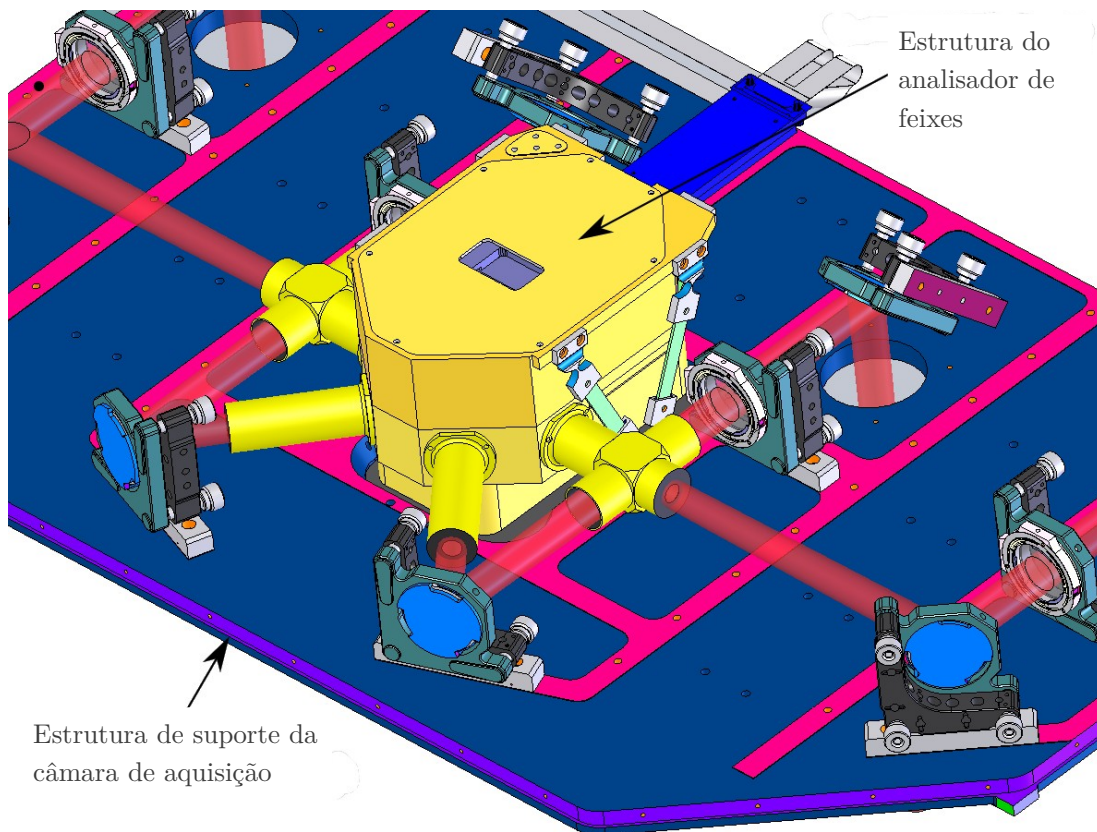


Figura 3.9: Estrutura que incorpora o analisador de feixes e o detector.

A estrutura de suporte do analisador de feixes e do detector incorpora filtros ópticos de frio bem como deflectores de frio por forma a poderem ser controladas as trocas de calor radiativo entre o analisador de feixes (a 140K) e a estrutura da câmara (a 240K). Na figura 3.10 pode ver-se em pormenor o interior da estrutura de suporte do analisador de feixes e o detector, onde se observam os filtros e os bloqueadores de luz infra-vermelha.

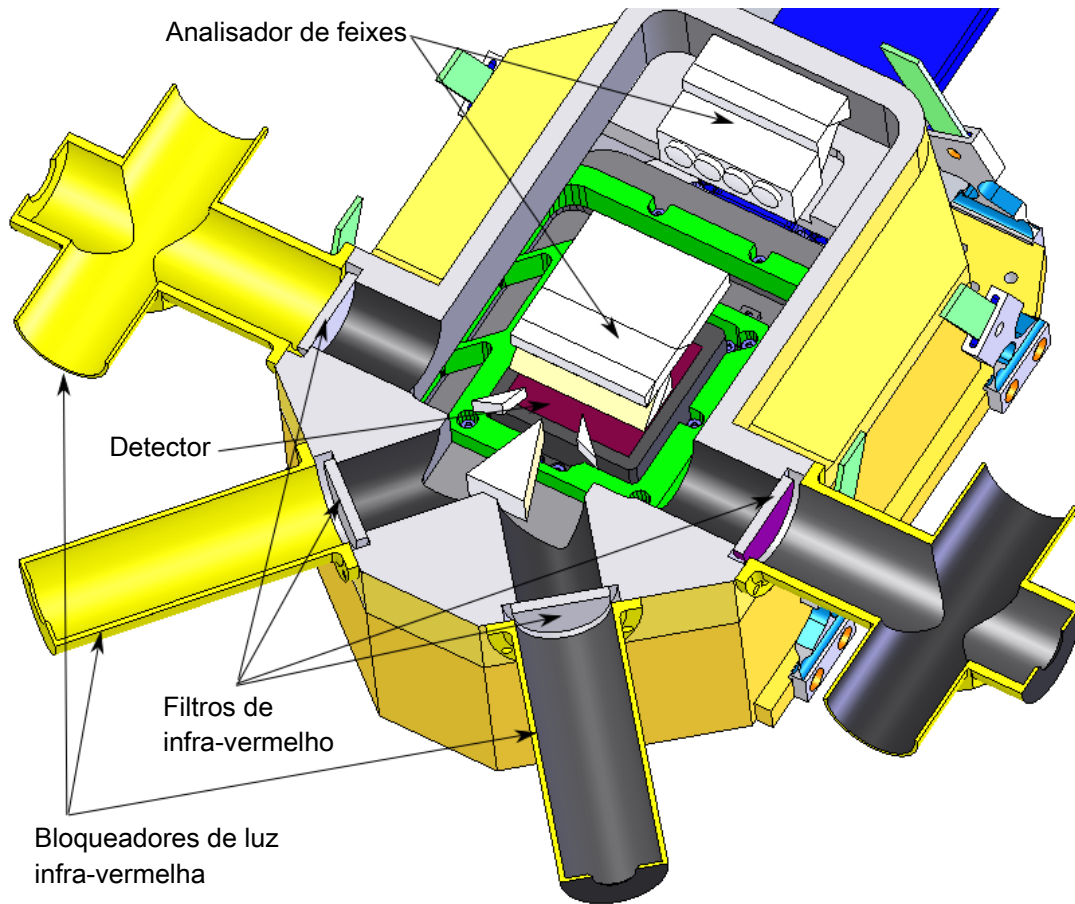


Figura 3.10: Estrutura que incorpora o analisador de feixes e o detector.

Na parte lateral desta estrutura de suporte podem ver-se (a verde claro) os elementos de fixação à estrutura principal da câmara de aquisição. Estes elementos consistem em lâminas finas construídas em epoxis reforçadas com fibra de vidro (denominadas por G10). Este material é um excelente isolante térmico possuindo um coeficiente de condutividade térmica muito baixo, aproximadamente $0.284 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à temperatura de 80K, sendo que para o alumínio tem um valor cerca de $85.561 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (ver anexo C)

Tal como foi referido, apenas o detector e o analisador de feixes terão que estar a temperaturas abaixo dos 100K para que a radiação térmica não chegue ao detector. O detector terá que funcionar a uma temperatura estável em torno dos 80K para minimizar o aparecimento de corrente escura e otimizar a eficiência fotónica². Para este efeito o detector será termicamente isolado e blindado do resto da câmara. É necessário uma boa ligação térmica entre o dissipador de

²Corrente escura consiste em corrente eléctrica que flui através de dispositivos foto-sensíveis, tais como um CCD de um detector, que se deve ao aparecimento aleatório de electrões e buracos, que são arrastadas pelo campo eléctrico. A intensidade desta corrente aumenta com a temperatura. Assim, quanto menor for a intensidade da corrente escura, maior será a sensibilidade do detector.

calor do detector e a fonte fria. A fonte fria é alimentada por Azoto líquido (LN_2).

No anexo C encontra-se descrita a variação com a temperatura, numa gama dos $[4, 300]\text{K}$ de várias propriedades de materiais, sendo estes o aço inoxidável, o alumínio, o teflon (politetrafluoretileno) e a epoxi reforçada com fibra de vidro (G10), sendo estes muito usados em aplicações de criogenia. As propriedades analisadas são a condutividade térmica e o coeficiente de expansão linear térmica. Um outro material crucial no desenvolvimento da câmara de aquisição é a sílica fundida, na qual todos os elementos do analisador de feixes são construídos. Assim, ainda no anexo C encontra-se também uma descrição de como varia o índice de refração e o coeficiente de expansão linear térmica com a temperatura para a sílica fundida.

4. A infra-estrutura de teste da câmara de infra-vermelhos do GRAVITY

As condições de funcionamento da câmara de aquisição após ser integrada no instrumento GRAVITY será, como já foi referido, em dois patamares de temperaturas: em torno dos 80K e dos 240K, correspondente aos dois estágios ópticos e num regime de alto vácuo, correspondente a uma pressão de cerca de 10^{-6} mbar. Neste contexto, antes da integração final no instrumento será necessário testar e validar o funcionamento da câmara de aquisição dentro das especificações indicadas. Para efectuar esta validação da performance da câmara de aquisição nas condições de funcionamento, foi desenhada e construída uma infra-estrutura de teste nos laboratórios do centro SIM na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Assim, a infra-estrutura de teste para a câmara de aquisição multi-telescópio do GRAVITY consistirá num crióstato¹. Este desenho e construção é o tema central desta dissertação, e serão descritas o mais rigorosamente possível as escolhas e soluções encontradas.

Além de recriar as condições de funcionamento, esta infra-estrutura de teste terá que permitir a entrada de feixes de luz para validar também todo o sistema óptico integrado na câmara de aquisição. Por outro lado é necessário uma série de interfaces para diversos tipos de instrumentação, tais como acoplamento de bombas de vácuo, sistema criogénico, sensores de temperatura e de vácuo e conectores para monitorização e regulação da temperatura do detector.

4.1 Materiais utilizados para a construção

Em aplicações de vácuo e criogenia os materiais que se utilizam regularmente, devido a possuírem propriedades adequadas para estas aplicações, são: o aço inoxidável do tipo 304, o alumínio do tipo 6061-T6, o teflon (também conhecido por PTFE - Politetrafluoretileno) e a epoxi reforçada com fibra de vidro do tipo G10. A escolha de um material não foi apenas determinada pelas suas proprie-

¹Um crióstato é um dispositivo que permite manter amostras ou outros dispositivos a temperaturas muito baixas, ditas criogénicas. As temperaturas criogénicas dentro de um crióstato são atingidas utilizando mais vulgarmente um fluido criogénico, como por exemplo o azoto líquido. O crióstato é geralmente mantido em vácuo.

dades mas também pelo o seu custo, disponibilidade, capacidades das oficinas de mecânica existentes, etc.

Tal como foi referido anteriormente, para um descrição das propriedades criogénicas dos materiais referidos, sendo estes: o coeficiente de expansão térmica linear, a condutividade térmica dos materiais referidos e ainda a variação do índice de refracção da sílica fundida, pode ser consultado o anexo C.

4.1.1 Aço inoxidável do tipo 304

O material seleccionado para a construção da infra-estrutura de teste foi o aço inoxidável do tipo 304 (que é um aço inoxidável austenítico). Este tipo de aço é utilizado em aplicações de vácuo e de baixas temperaturas, pois este possui características favoráveis nestas condições, tais como: uma elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, boa maquinabilidade e boa ductilidade².

O aço inoxidável 304 possui uma elevada resistência à corrosão, pois na superfície destes de aços forma-se uma fina camada constituída principalmente por óxido de cromo, a qual lhe confere um carácter impermeável e insolúvel na maioria dos meios corrosivos. Caso esta camada seja danificada, ela auto-regenera-se na presença de agentes oxidantes. Os aços inoxidáveis possuem uma percentagem de cromo acima de 13% e uma percentagem acima de 8% de Níquel, a qual melhora a sua resistência à corrosão em ambientes neutros ou com baixas quantidades de agentes oxidantes. A superfície do aço inoxidável 304 é inerte e passiva, tornando-o uma excelente escolha para aplicações em vácuo. [12]

4.1.2 Teflon (Politetrafluoretileno)

O Teflon é uma marca registada da empresa DuPont, sendo este um polímero cujo nome é Politetrafluoretileno. O Teflon é feito por polimerização de clorofórmio e ácido fluorídrico sob pressão elevada. A sinterização e moldagem de pós deste material é feita à temperatura de 370°C. Este polímero possui um coeficiente de fricção muito baixo com outros sólidos (incluindo ele próprio), é muito resiliente, conseguindo retornar à sua forma original mesmo após uma deformação de 300% e tem uma boa maquinabilidade. Electricamente, o Teflon é um excelente isolante, possuindo elevada resistividade. Quimicamente, é extremamente inerte, resistindo a diversos ácidos e a todas as condições atmosféricas, não absorve água e não é inflamável nem tóxico. [13]

4.1.3 Epóxi reforçada com fibra de vidro

Tal como o nome indica, uma epóxi reforçada com fibra de vidro é material compósito, composto da aglomeração de finíssimos filamentos de vidro que não são rígidos e são altamente flexíveis aos quais é adicionada uma resina epóxi, sendo este um plástico termoendurecido (plástico cuja rigidez não se altera com

²A ductilidade é a propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até ao momento da sua fractura.

a temperatura), e que constitui a matriz do próprio material. De uma forma geral, este material inclui-se na família de Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV). A designação comercial para a epóxi reforçada com fibra de vidro é normalmente designada por G10 (ou FR4), sendo a sua aplicação principal na produção de circuitos impressos. No âmbito desta tese, refira-se que o G10 é muito utilizado em aplicações de criogenia, pois este material apresenta boa resistência mecânica e uma condutividade térmica muito baixa, mesmo a temperaturas perto dos 0K. [14] [15]

4.2 Desenho conceptual da infra-estrutura de teste

No laboratório do SIM existia já um crióstato utilizado anteriormente noutra tipo de experiências, mais concretamente na área da física atómica. A utilização deste crióstato não foi viável devido às suas reduzidas dimensões, comparativamente com as dimensões da câmara de aquisição do GRAVITY. Este crióstato tem uma forma cilíndrica, e embora a altura do cilindro seja insuficiente, as suas tampas têm um diâmetro de cerca de 750mm. Todos os seus componentes são em aço inoxidável do tipo 304.

Para a definição das dimensões da estrutura cilíndrica, que constitui o corpo central da infra-estrutura de teste, foi tido em conta as dimensões da câmara de aquisição, indicadas na tabela 3.1, e também as dimensões das tampas existentes (750mm).

Assim, para efectuar os testes necessários, e recriar as condições de funcionamento da câmara de aquisição, a infra-estrutura de teste terá que permitir efectuar um bom vácuo e também permitir arrefecer a câmara a temperaturas muito baixas através da injeção de Azoto líquido para um tanque no seu interior.

4.2.1 Cilindro base da infra-estrutura de teste

Esta estrutura cilíndrica necessitou de ser fabricada, tendo sido feita uma procura junto de potenciais fornecedores, sendo que a oferta mais adequada correspondeu a uma chapa de aço inoxidável do tipo 304, cujas dimensões têm 2000mm×1000mm. Optou-se por enrolar a chapa segundo o lado de maior comprimento, resultando num cilindro com um diâmetro de aproximadamente $2000/\pi \approx 637$ mm com uma altura de 1 metro. Estas dimensões são suficientes para incorporar no seu interior a câmara de aquisição, cuja secção é de 530mm×192mm e comprimento 890mm, bem como outros elementos necessários para a instrumentação extra necessária.

Tal como foi referido, a câmara de aquisição incorpora quatro entradas para os quatro feixes do VLTI, assim, a infra-estrutura de teste terá também que permitir a entrada de feixes para teste dos componentes ópticos. A distância entre estas entradas é a correspondente à distância entre feixes de entrada no primeiro estágio óptico da câmara de aquisição, ou seja, 240mm. Estas quatro entradas de feixes na infra-estrutura de teste foram colocadas a uma distância de um plano que

passa pelo centro do cilindro de 210mm, para permitir que a câmara de aquisição seja apoiada numa mesa óptica no seu interior. As entradas dos feixes têm um diâmetro de 100mm, tendo uma margem relativamente ao diâmetro dos feixes de entrada, que possuem aproximadamente 80mm.

Na figura 4.1 encontra-se uma representação do cilindro que constitui o corpo base da infra-estrutura de teste já com as entradas necessárias. Note-se que foi adicionada uma entrada extra num lado oposto com o objectivo de permitir a saída dos feixes.

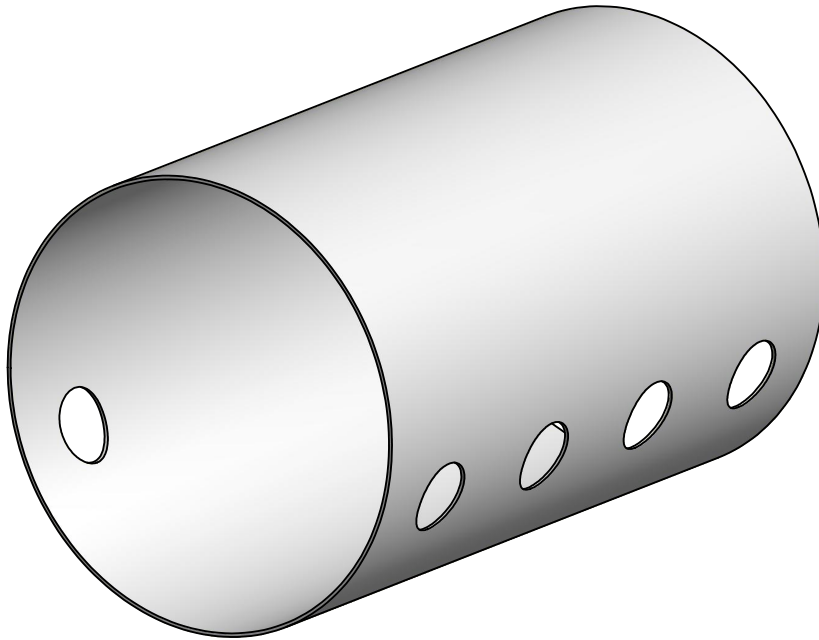


Figura 4.1: Representação 3D do cilindro base da infra-estrutura de teste.

4.2.1.1 Dimensionamento da espessura: a pressão de colapso

No que diz respeito à espessura do cilindro, a chapa fornecida possui 5mm. A infra-estrutura de teste tem que suportar um nível de vácuo da ordem dos 10^{-6} mbar, correspondendo a um nível de Alto-vácuo. O total das forças envolvidas numa estrutura destas dimensões são consideráveis, por isso tem que assegurar-se que os materiais utilizados possuem a resistência mecânica adequada. Assim, a pressão a que o cilindro estará sujeito, corresponderá à diferença entre a pressão no exterior, isto é, a pressão atmosférica, p_{atm} , e a pressão no interior, $\Delta p = p_{atm} - 10^{-6}$. No exterior teremos a pressão atmosférica, sendo esta de $p_{atm} = 101325\text{Pa} = 1013.25\text{mbar}$, sendo que $\Delta p \approx p_{atm}$.

Para verificar se a espessura de 5mm do cilindro suportará a diferença de

pressão, determinou-se, qual a pressão de colapso correspondente a um cilindro com estas dimensões. Os seguintes cálculos para determinação da pressão de colapso assumem que: o cilindro é perfeitamente redondo e de espessura constante, que obedece à lei de Hooke para a elasticidade dos corpos, que as tensões radiais são desprezáveis e que a distribuição das tensões normais é uniforme.

Utilizando a teoria da elasticidade e algoritmos de estabilidade/colapso, a pressão de colapso, p_c , para um cilindro de paredes finas, é dada por:

$$p_c = KE \left(\frac{t}{D} \right)^3$$

Sendo, E o módulo de Young, t a espessura do cilindro, D o diâmetro do cilindro e K um factor numérico que depende dos rácios L/D e D/t , cujos valores podem ser obtidos através de tabelas fornecidas pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME). O parâmetro L corresponde ao comprimento do cilindro. No entanto, considera-se que se trata de um cilindro de comprimento curto, quando:

$$\frac{L}{D} < 1.14(1 - \mu^2)^{1/4} \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (4.1)$$

Em que μ corresponde ao coeficiente de Poisson para um dado material. Neste caso, o rácio será $L/D = 1/0.637 \approx 1.57$. Para o aço inoxidável, temos que $E = 193\text{GPa}$ e $\mu = 0.29$. Assim, para a espessura de $t = 5\text{mm}$ o lado direito da condição (4.1) corresponderá a aproximadamente 12.59. Ou seja, pode concluir-se que, de facto, se trata de um cilindro de comprimento curto, pois $1.57 < 12.59$. Assim, para os cilindros curtos, a pressão de colapso pode ser estimada por:³

$$p_c = \frac{2.42E(t/D)^{5/2}}{(1 - \mu^2)^{3/4}[L/D - 0.45(t/D)^{1/2}]} \quad (4.2)$$

Substituindo em (4.2) os valores que definem as dimensões do cilindro e também as propriedades do seu material, a pressão de colapso será:

$$p_c \approx 1779813 \text{ Pa}$$

Comparando este valor com a pressão atmosférica resulta que $p_c \approx 17.56p_{atm}$. Isto indica que a infra-estrutura de teste se encontra num patamar de muito boa segurança no que diz respeito a riscos de colapso devido à pressão externa. [16] Resumindo, o cilindro que constitui a base da infra-estrutura de teste possui as propriedades referidas na tabela 4.1.

³No caso de cilindro longos, como por exemplo tubos de ligação para troca de fluídos, em que a condição (4.1) não se verifica, a pressão de colapso pode determinar-se através da expressão:

$$p_c = \frac{2E(t/D)^3}{1 - \mu^2}$$

Tabela 4.1: Propriedades do cilindro base da infra-estrutura de teste.

Diâmetro	637mm
Comprimento	1000mm
Espessura	5mm
Material	Aço Inoxidável do tipo 304
Peso	$\approx 77\text{kg}$

4.2.2 Desenho e fabrico dos componentes da infra-estrutura de teste

O desenho e construção dos restantes componentes que constituem a infra-estrutura de teste foram definidos com base nas tampas já existentes, pois estas já tinham diversos furos bem como outras flanges acopladas.

Tal como para a construção do cilindro base, aqui também se recorreu a uma chapa em aço inoxidável com dimensões 2000mm×1000mm na qual foram desenhadas as formas *brutas* para as flanges necessárias. Neste caso a chapa possui 20mm de espessura. Após a definição das quantidades de flanges necessárias o corte destas foi efectuado numa máquina de corte a laser. Na figura 4.2 encontra-se um esquema da chapa, já com as formas desejadas desenhadas. Nesta chapa podem ver-se diversos componentes:

- Flanges que servem de suporte às tampas da infra-estrutura de teste - com diâmetro externo 750mm e diâmetro interno de 636mm;
- Flanges para suportar as tampas que incorporam as janelas de entrada dos feixes - com diâmetro externo de 166mm e diâmetro interno 90mm;
- Tampas para fechar determinada janela de entrada - com diâmetro externo de 166mm;
- Tampas para acoplamento da alimentação de Azoto Líquido e conector para medidores de temperatura - com diâmetro externo de 350mm;
- Suportes para colocar na estrutura cilíndrica da infra-estrutura de teste. Estes suportes consistem em dois semi-arcs, com um raio equivalente ao do cilindro base, com dois furos de 100mm para aliviar um pouco o peso destes.

Este trabalho foi levado a cabo por uma empresa especializada em corte laser de chapas em aço inoxidável, tendo sido esta também responsável por enrolar a chapa com espessura de 5mm, dando a forma ao cilindro base. Após o corte, as peças foram levadas para um metalomecânica, a qual foi responsável por realizar os trabalhos de mecânica de precisão necessários para a transformação dos componentes *brutos* nos componentes finais.

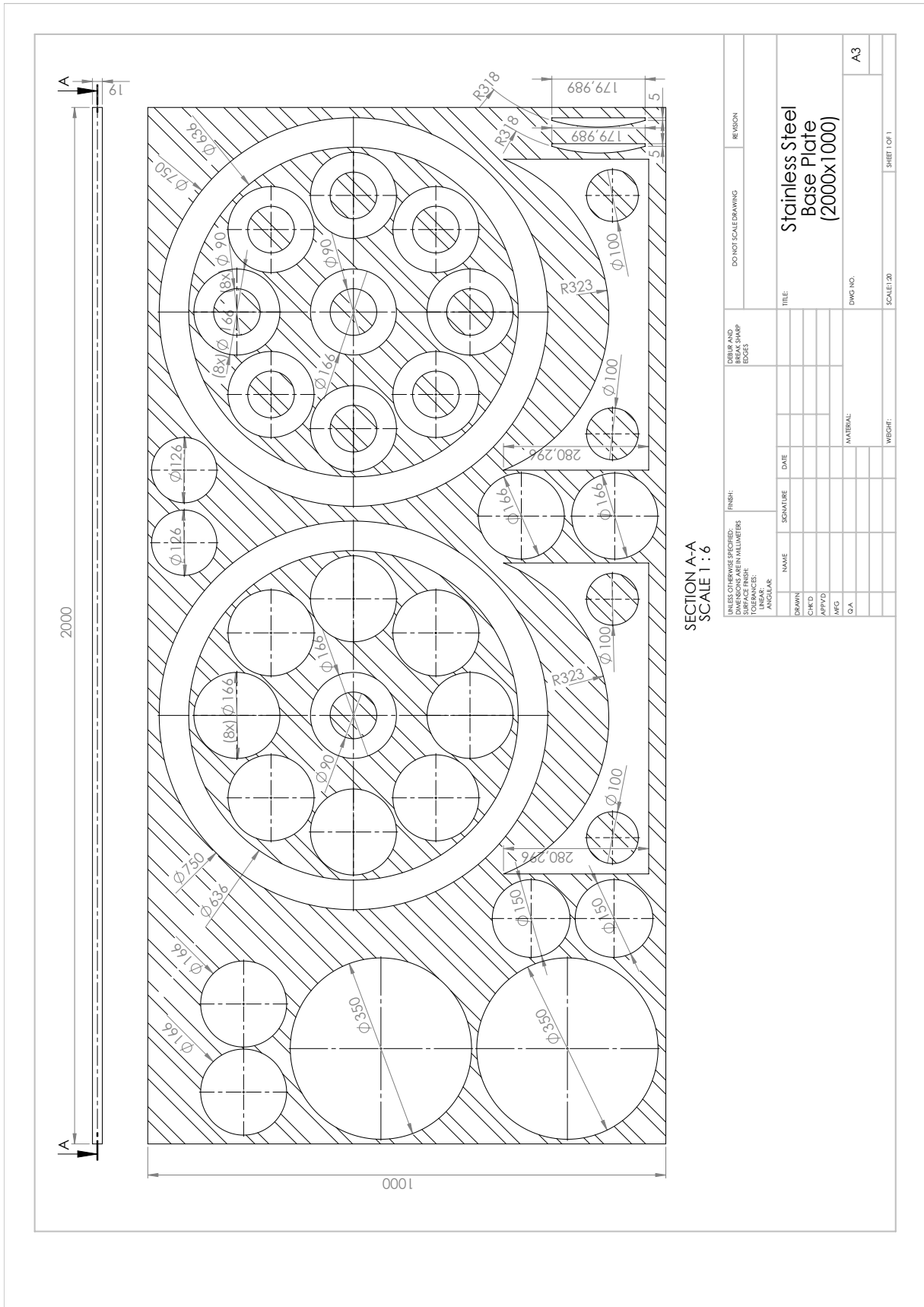


Figura 4.2: Chapa para corte a laser dos componentes da infra-estrutura de teste

4.2.3 Interfaces de acesso ao interior localizadas no cilindro

Como já foi visto, o cilindro base da infra-estrutura de teste possui quatro entradas para os feixes de luz e uma saída (ou também entrada) no lado oposto, sendo que dispõe de 5 interfaces de acesso similares. Além destas interfaces, o cilindro incorpora também duas flanges soldadas nos seus topos, que servem para acoplar as tampas já existentes no laboratório do SIM.

4.2.3.1 Portas de entrada dos feixes

As portas por onde os feixes são injectados no interior da infra-estrutura de teste, e conseqüentemente na câmara de aquisição, são compostas por um tubo soldado no cilindro base, uma flange soldada no tubo e uma tampa que incorpora uma abertura na qual está incorporada uma janela por onde passam os feixes.

O tubo soldado no cilindro base tem dimensões *standard* e foi adquirido num fornecedor de aços, sendo posteriormente maquinado e soldado no cilindro. Na figura 4.3 encontra-se o desenho técnico do tubo.

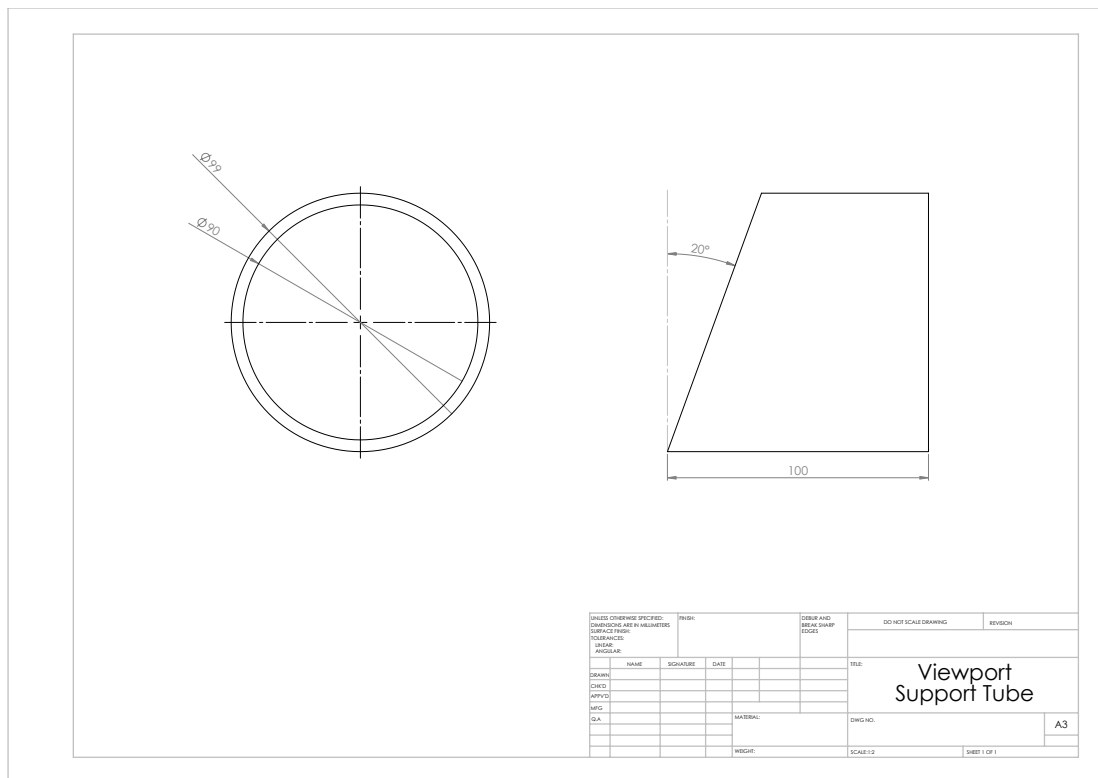


Figura 4.3: Tubo da porta de entrada do feixe.

No tubo está soldada também uma flange que incorpora 8 furos passantes não roscados e uma reentrância de 7mm que guia o tubo permitindo também uma soldadura adequada. Esta flange encontra-se representada na figura 4.4.

Estas flanges foram maquinadas a partir dos componentes cortados a laser da chapa acima referida, tendo estes um diâmetro externo de 166mm e interno de

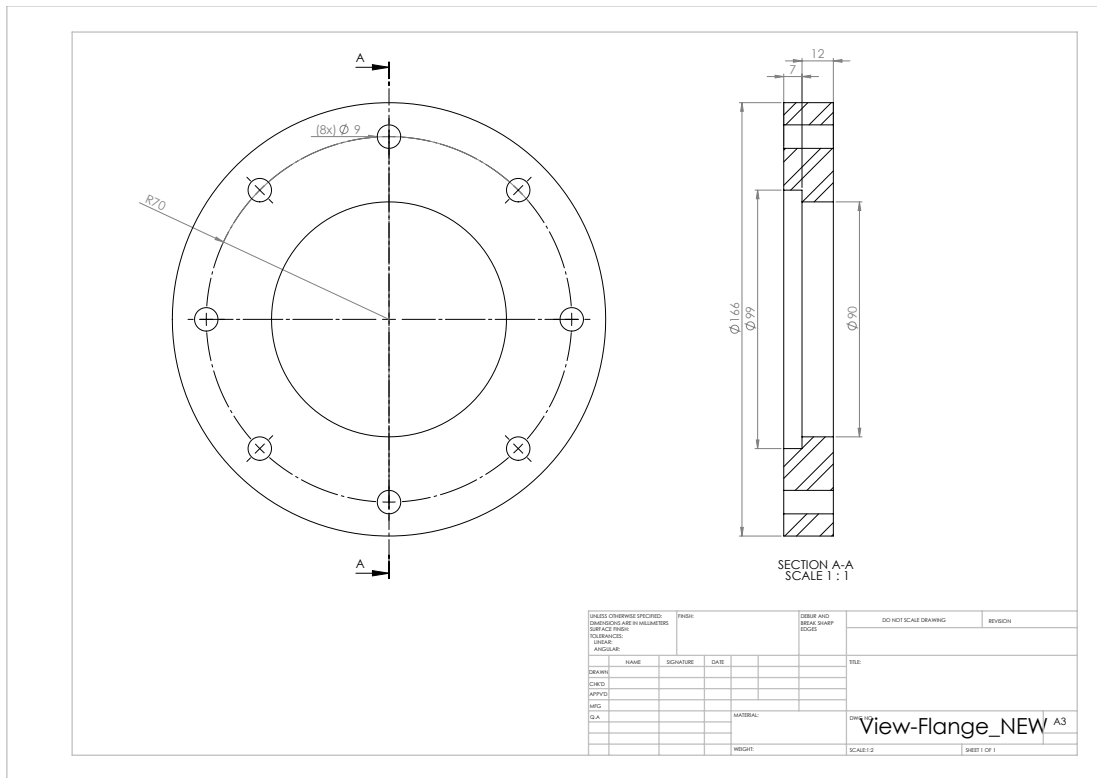


Figura 4.4: Flange suporte para a janela de entrada.

90mm. Nestas flanges poderão ser instaladas tampas que incorporam uma janela, ou então simplesmente tampas sem qualquer abertura.

A tampa que acomoda a janela de entrada dos feixes encontra-se representada na figura 4.5.

Também esta tampa foi maquinada partindo dos componentes com diâmetro de 166mm. Tal como se pode ver, uma das faces possui uma cava para a instalação de um vedante inscrita num raio de 57.435mm (correspondendo no desenho ao raio maior da tampa com $166/2 = 83\text{mm}$ subtraído à distância 25.565mm), sendo que este se pode ver ao pormenor no Detalhe M (*Detail M*). Esta é aparafusada à flange da figura 4.4 fazendo com que a vedação seja feita através da compressão do *O-Ring* através da face da flange para o interior da cava.

Do outro lado da tampa que incorpora a janela de entrada, encontra-se uma reentrância onde está instalada a janela de entrada. Tal como na outra face, esta reentrância possui uma cava para um *O-Ring*, que veda o sistema quando a janela (cujo material será o Fluoreto de Cálcio) for colocada. Os detalhes da reentrância para a janela de entrada podem ser visualizados no Detalhe B, e a sua cava no Detalhe C. A tampa, tal como a flange incorpora 8 furos passantes não roscados, que permitem a sua fixação à flange através de um conjunto de parafuso e porca.

O tipo de vedantes, que em toda a infra-estrutura de teste se tratam de *O-Rings*, e as suas cavas serão tratados na secção 4.6.

Finalmente a janela é fixada através de uma anilha com 8 furos passantes,

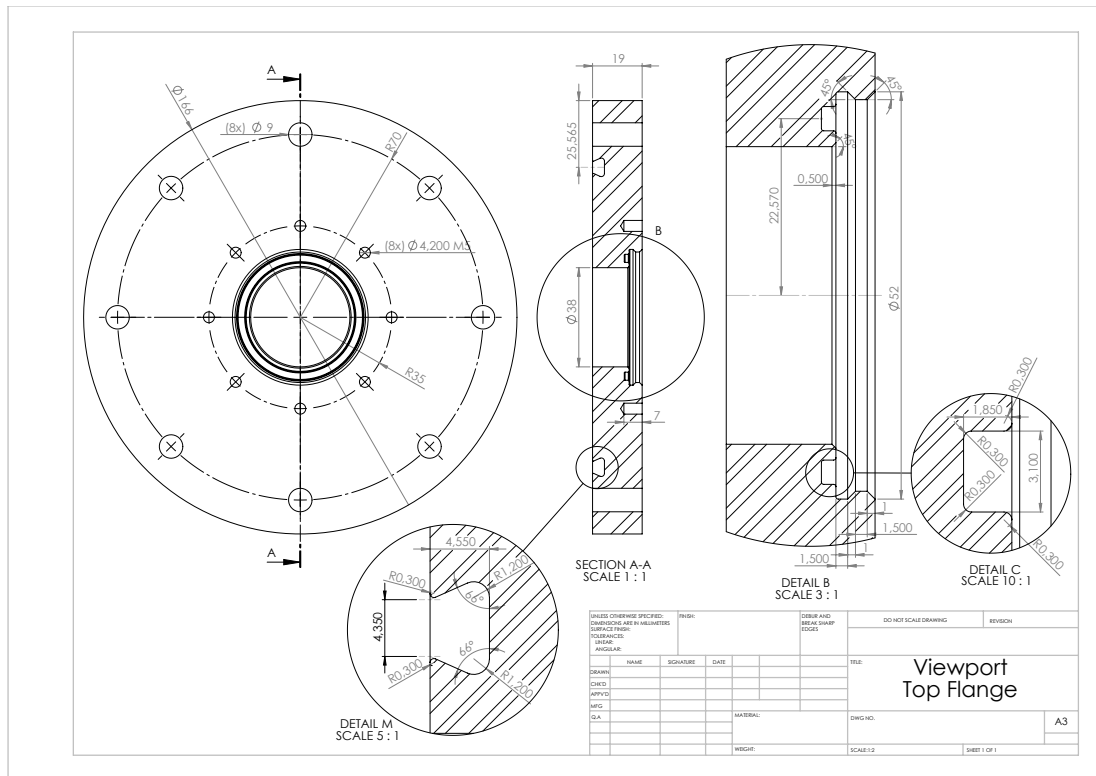


Figura 4.5: Tampa que acomoda a janela de entrada do feixe.

que faz a janela comprimir o *O-Ring* na sua cava quando a anilha é aparafusada contra a tampa, pois, tal como se pode ver na figura 4.5, inclui 8 furos cegos roscados.

Assim, na figura 4.6 pode ver-se uma representação geral 3D da porta de entrada do feixe com todos os componentes acoplados.

4.2.3.2 Flanges para suporte das tampas

As tampas serão acopladas ao cilindro base através de flanges que serão soldadas nos seus topos. Na figura 4.7 encontra-se o desenho técnico de uma destas flanges.

Esta flange tem um diâmetro externo de 750mm, equivalente ao das tampas já existentes e foi maquinada a partir das flanges da chapa acima referida, que tinham um diâmetro externo de 750mm e interno de 636mm. Também os furos efectuados são consistentes com os que já existem nas tampas. Assim, para efectuar a soldadura e o guiamento do cilindro base da flange, tal como no caso do tubo da janela de entrada, aquela possui uma reentrância de 7mm numa das faces. A outra face possui uma cava para um *O-Ring*, cujas dimensões estão especificadas no Detalhe E da figura 4.7. Para a ligação à tampa, a flange tem 16 furos equidistantes ao longo de um raio de 360mm, passantes e não roscados, com diâmetro de 12.5mm.

Na figura 4.8 encontra-se uma representação em 3D do cilindro base, com

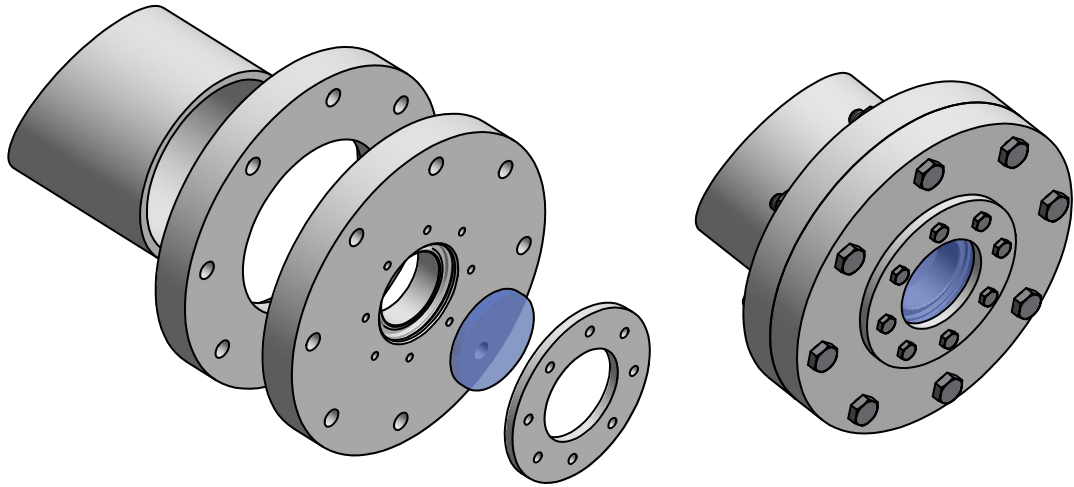


Figura 4.6: Representação 3D da porta de entrada de um feixe.

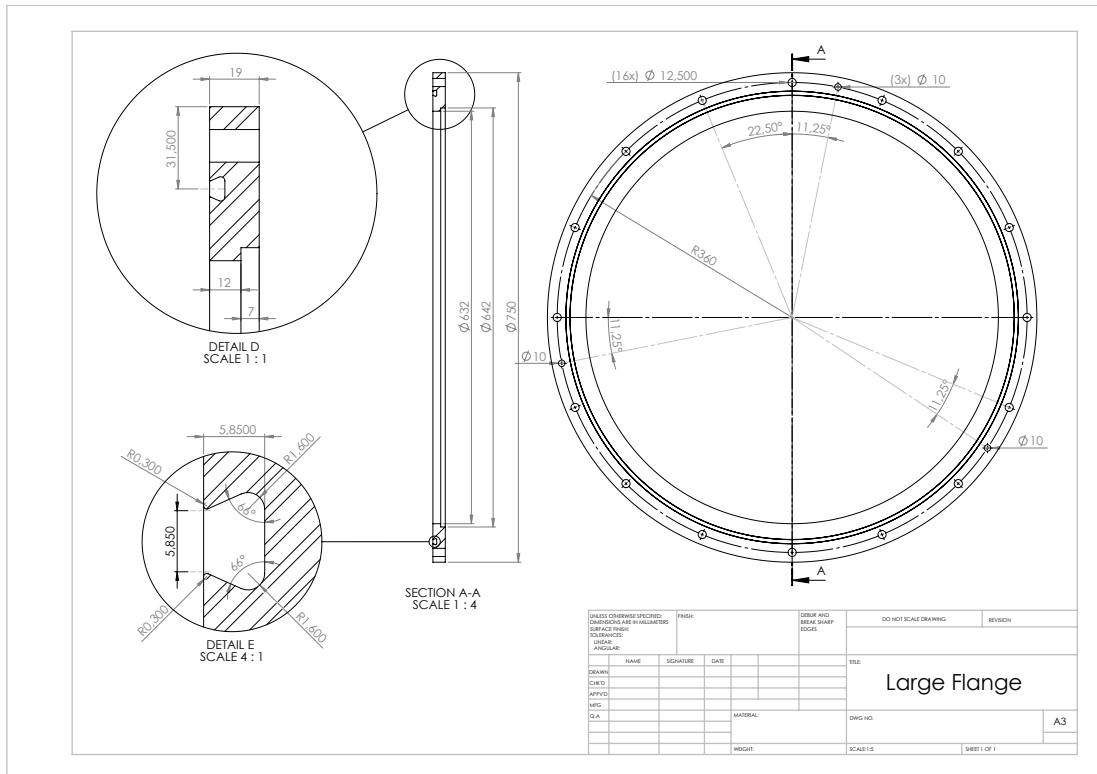


Figura 4.7: Flange que liga o cilindro base às tampas já existentes no SIM.

as portas de entrada acopladas, bem como as flanges para ligação às tampas e também os semi-arcos (soldados no cilindro base) que constituem a base de apoio de todo o sistema.

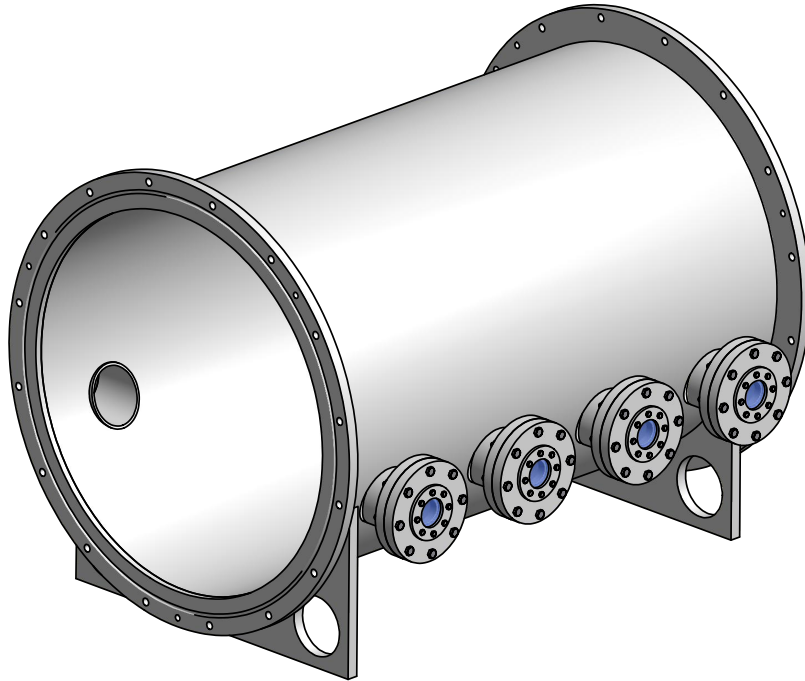


Figura 4.8: Representação 3D da infra-estrutura de teste com as janelas de entrada e flanges acopladas.

Na figura 4.9 encontra-se ainda uma imagem do corpo base da infra-estrutura de teste antes de se proceder ao fecho desta com todas as tampas.

4.2.4 Interfaces de acesso ao interior localizadas nas tampas

Cada tampa tem um diâmetro externo de 750mm, tendo cada uma diferentes aberturas já efectuadas anteriormente, com furações incluídas. Na figura 4.10 encontra-se uma representação 3D das tampas.

No caso da tampa da esquerda, na figura 4.10, esta foi utilizada para a implementação do sistema de injeção de Azoto líquido para um tanque que, como se verá mais adiante, está acoplado a esta tampa também, mas no lado oposto. Nesta tampa terá também um conector que permite medir temperaturas no interior da infra-estrutura de teste.

A tampa da direita na figura 4.10 foi utilizada para acoplar a bomba de vácuo, o medidor de pressão e permitirá ainda conectar um detector de fugas.

4.2.5 Alimentação de Azoto líquido

O arrefecimento da câmara de aquisição é feito recorrendo a Azoto líquido como intermediário para efectuar a troca de calor necessária. Para este efeito, na tampa



Figura 4.9: Corpo base da infra-estrutura de teste.

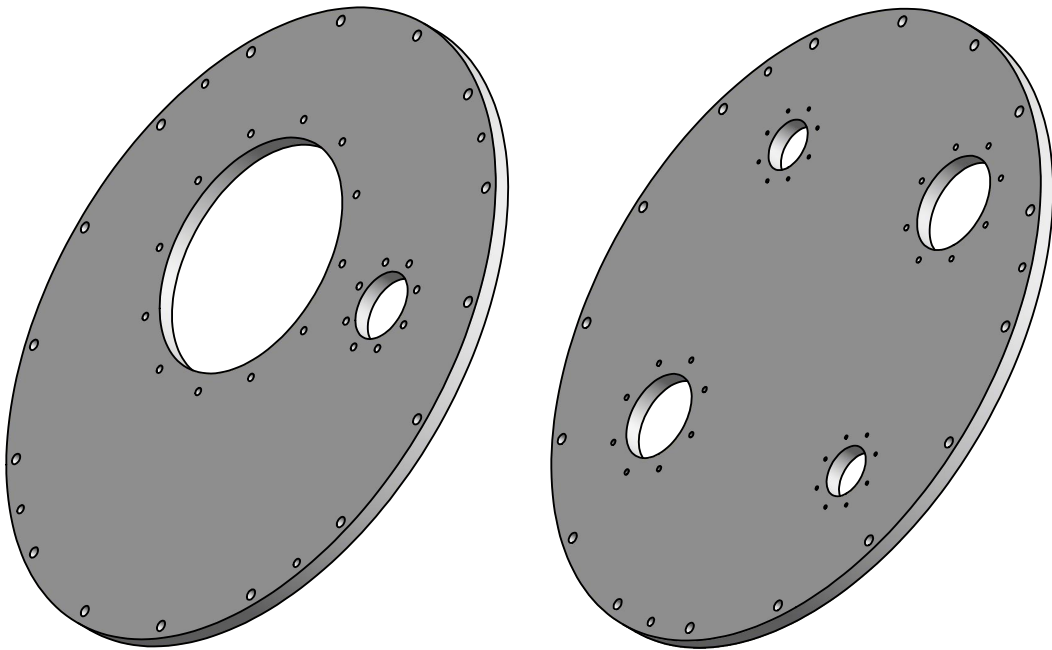


Figura 4.10: Representação 3D das tampas. À esquerda: tampa utilizada para alimentação de Azoto líquido e ligação do conector para medição de temperaturas. À direita: tampa utilizada para acoplamento da bomba de vácuo, ligação do medidor de pressão e conexão do detector de fugas.

da esquerda na figura 4.10 foi instalada uma outra tampa que permitirá alimentar o Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste. Esta tampa incorpora um tubo que efectua a ligação a um tanque, que está também suportado pela tampa.

Na figura 4.11 encontra-se uma representação geral da tampa da infra-estrutura de teste com a tampa para alimentação de Azoto líquido.

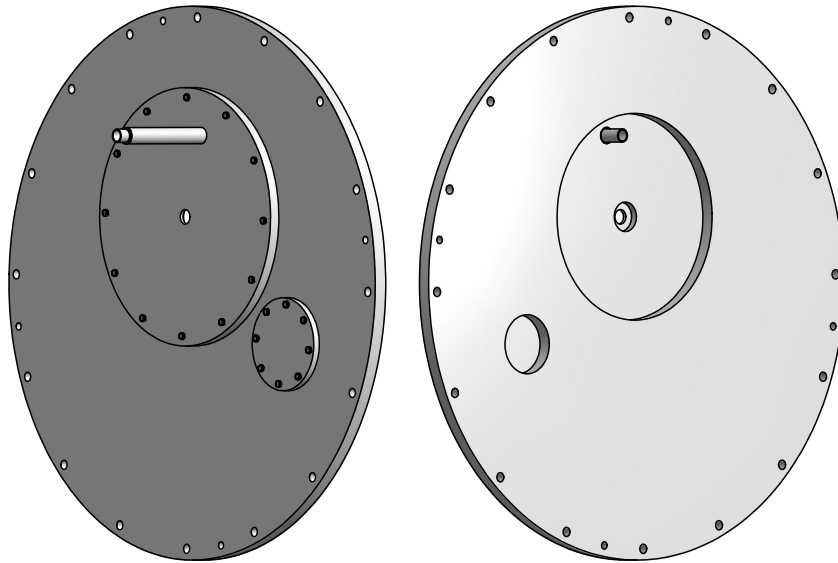


Figura 4.11: Tampa da infra-estrutura de teste com a tampa de alimentação de Azoto líquido incorporada. Na esquerda a parte de fora, e no lado direito a parte que ficará para o interior da infra-estrutura de teste.

Como se pode ver, o tubo por onde o Azoto líquido será injectado encontra-se soldado à tampa. Sendo que este consiste num tubo com duas paredes, tal como se pode ver no desenho técnico do tubo na figura 4.12.

O tubo consiste em três partes soldadas: o tubo por o Azoto passará propriamente, outro tubo que ficará ligado à tampa e uma anilha que serve de união entre os dois tubos. Ambos os tubos são soldados na anilha, sendo que não estarão em contacto, apenas no local onde a anilha os une. Estes ficam uma distância entre eles de aproximadamente 1.3mm. A ligação entre a tampa e o tubo de alimentação de Azoto líquido pode ver-se no desenho técnico da figura 4.13.

O tubo foi soldado à tampa de forma a que a transferência de calor, entre o tubo interno, no qual passa Azoto líquido a uma temperatura de cerca de 80K, e o tubo que fica soldado à tampa, seja feita através do maior percurso possível, permitindo desta forma que parte do calor seja dissipado antes de chegar à tampa.

No interior da infra-estrutura de teste existe um tanque que servirá para armazenar o Azoto líquido, e que por sua vez servirá de fonte fria para arrefecer a câmara de aquisição. Este tanque está suportado na mesma tampa na qual se efectua a injeção do Azoto líquido. O tanque consiste num recipiente cilíndrico,

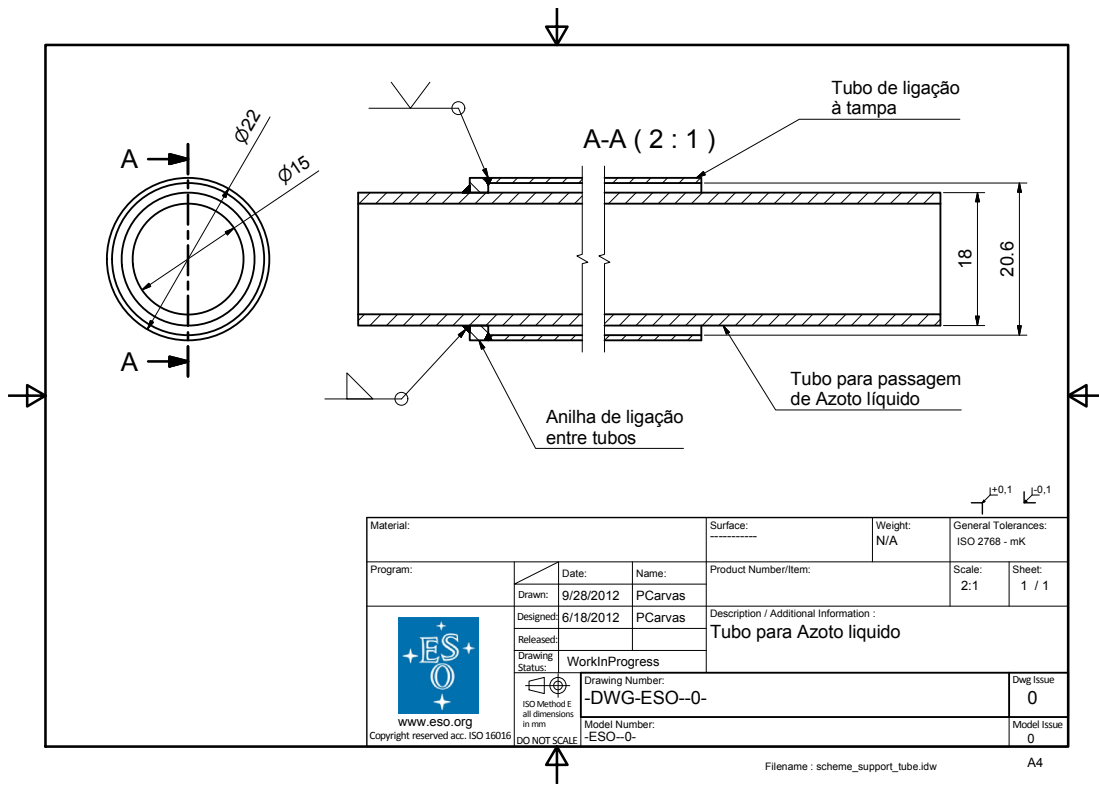


Figura 4.12: Tubo para alimentação de Azoto líquido.

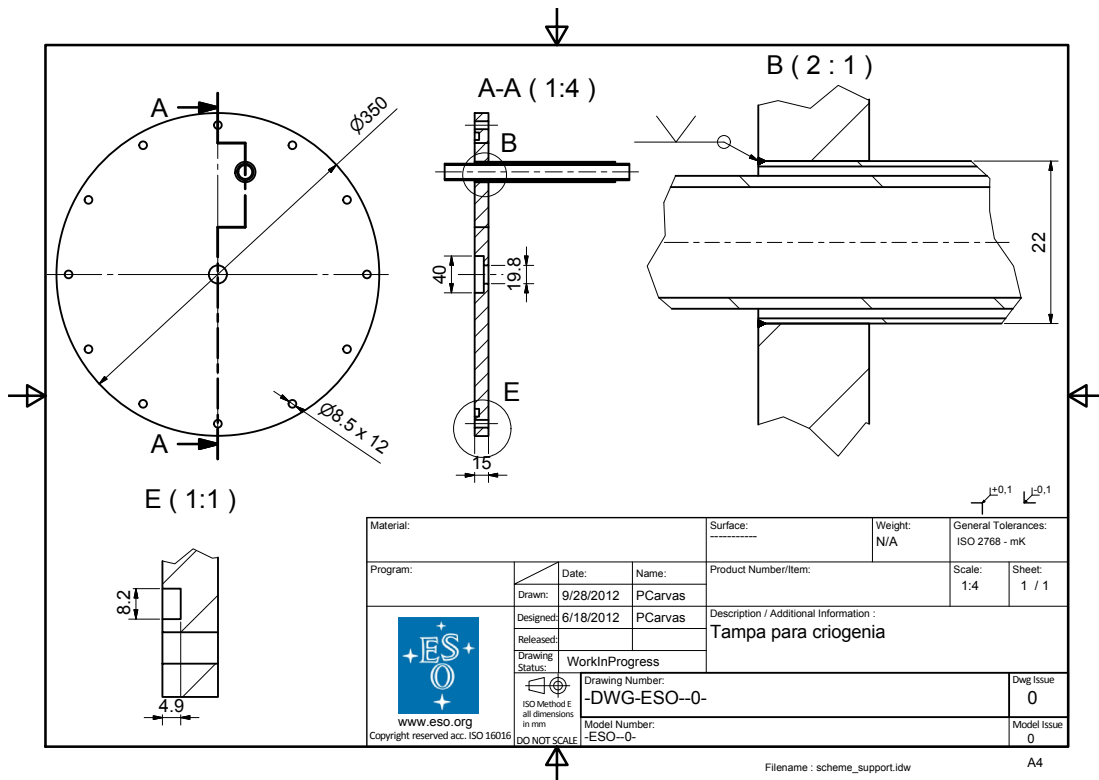


Figura 4.13: Tampa de alimentação de Azoto líquido.

incorporando nos seus topos duas tampas soldadas que possuem furações com rosca. Na figura 4.14 pode ver-se uma representação 3D em corte do tanque de Azoto líquido. Na figura 4.15 encontra-se o desenho técnico do tanque.

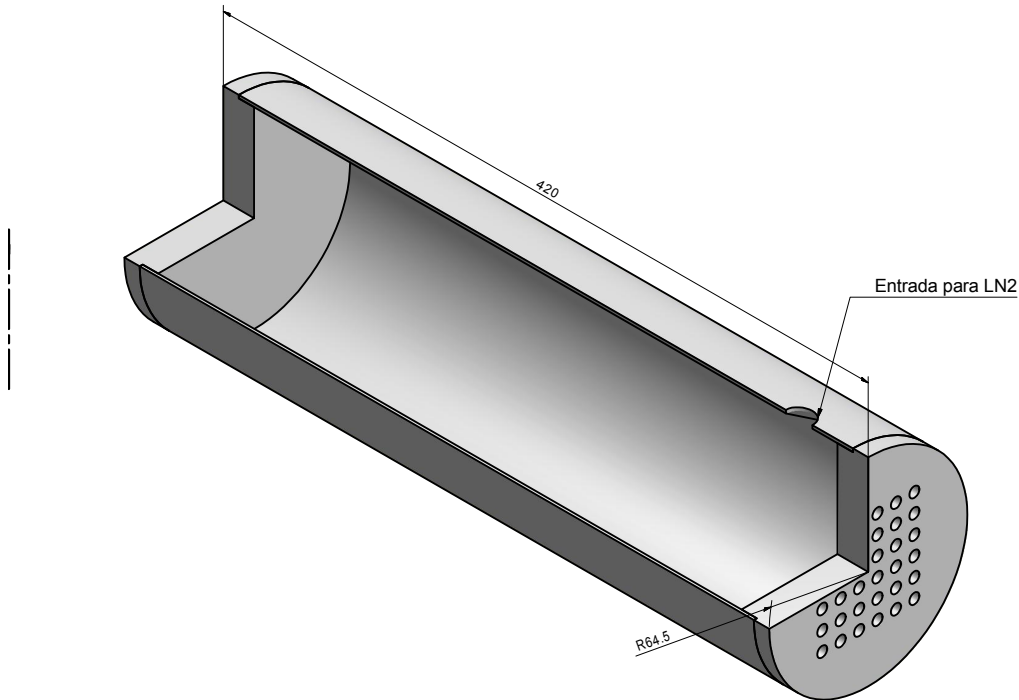


Figura 4.14: Representação 3D em corte do tanque de Azoto líquido.

O suporte para o tanque de Azoto líquido, consiste simplesmente num apoio com uma forma em “L” construído através de um conjunto de calhas também em “L”. O tanque encontrar-se-á a uma temperatura muito baixa, e será necessário minimizar as perdas de calor que este terá. Assim, como a infra-estrutura de teste no seu interior estará em vácuo, a transferência de calor por convecção térmica será minimizada, fazendo com que a maior perda de calor ocorra sob a forma de condução térmica. Para minimizar a condução térmica o tanque de azoto ficará ligado à estrutura que o suportará através de duas placas de epóxi, que tal como referido anteriormente, possui uma condutividade térmica muito baixa, e assim servirá para isolar o tanque de Azoto líquido do resto da estrutura. Na figura 4.16 pode ver-se uma representação da estrutura de suporte com as duas epóxis que suportam o tanque de Azoto líquido.

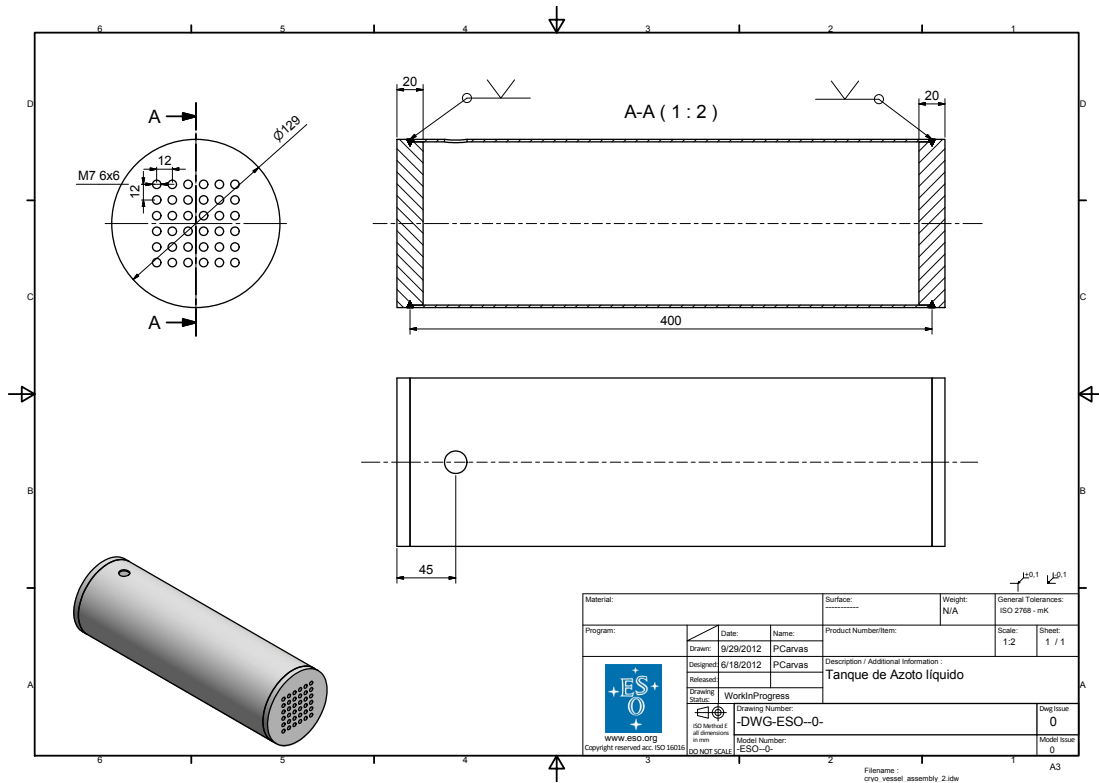


Figura 4.15: Desenho técnico do tanque de Azoto líquido.

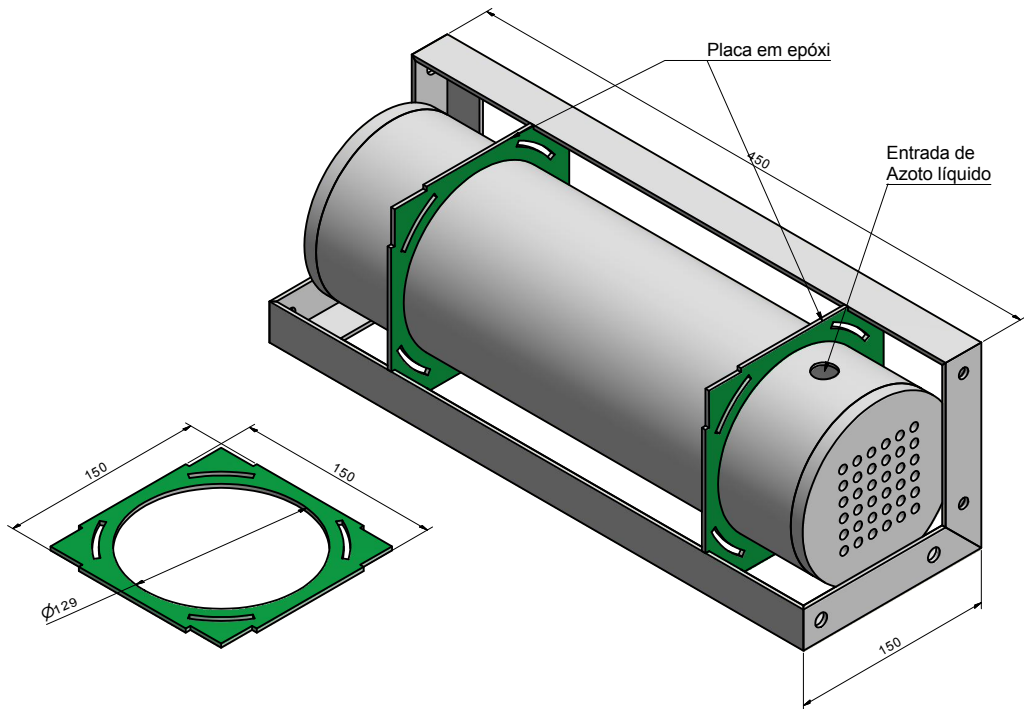


Figura 4.16: Representação 3D do suporte do tanque de Azoto e as epóxis para fixação.

Para efectuar a alimentação do Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste, é conectada no exterior, uma garrafa própria para armazenamento de Azoto líquido, ao tubo que se encontra na tampa atrás referida. Regulando a pressão do recipiente poderá ser injectado o Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste através de um tubo que está conectado ao tubo da tampa.

No interior da infra-estrutura de teste há um tubo flexível que liga o tubo de alimentação de Azoto líquido da tampa ao tanque. Assim, no interior destes tubos passa um outro tubo proveniente da garrafa de Azoto líquido que se encontra no exterior. Um esquema da alimentação do Azoto líquido encontra-se exemplificado na figura 4.17.

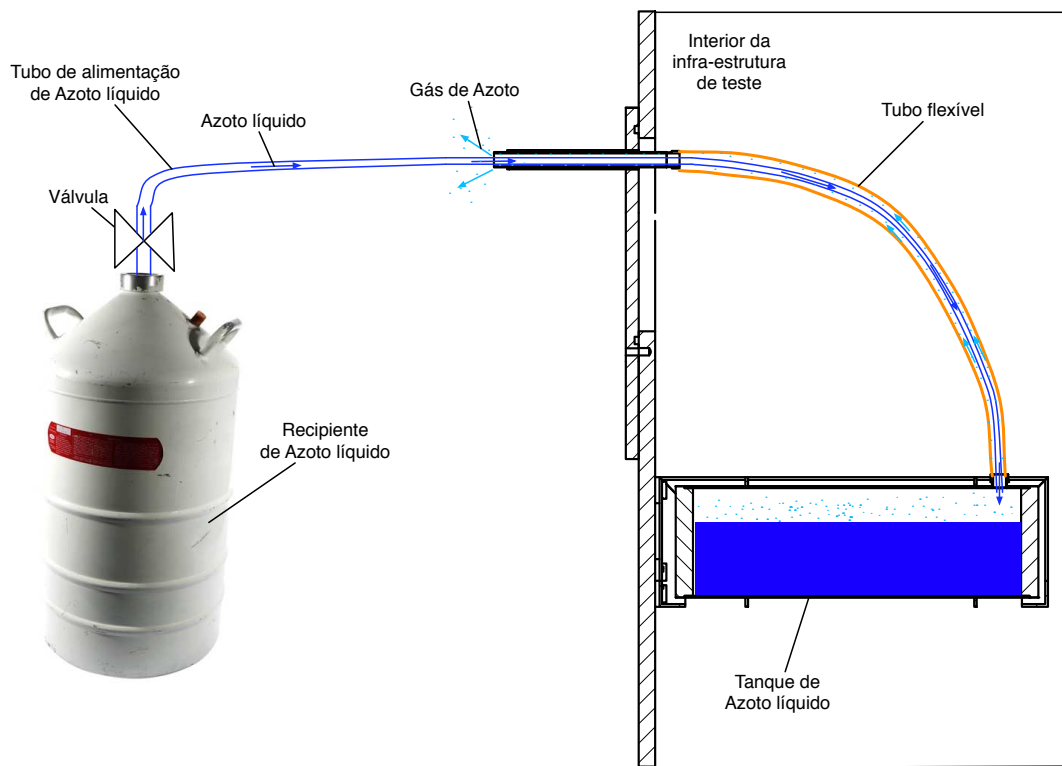


Figura 4.17: Esquema de alimentação do Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.

O tubo ligado ao recipiente de Azoto líquido possui um diâmetro inferior ao tubo da tampa e ao tubo flexível, permitindo passar o Azoto líquido evaporado dentro do tanque de Azoto líquido para o exterior, propagando-se em redor do tubo de alimentação e para o exterior.

Na figura 4.18 pode ver-se o sistema completo para a alimentação e armazenamento de Azoto líquido no interior da infra-estrutura de teste.

A estrutura de suporte do tanque de Azoto líquido não se encontra directamente fixada à tampa, na interface entre as duas colocou-se um sistema de anilhas

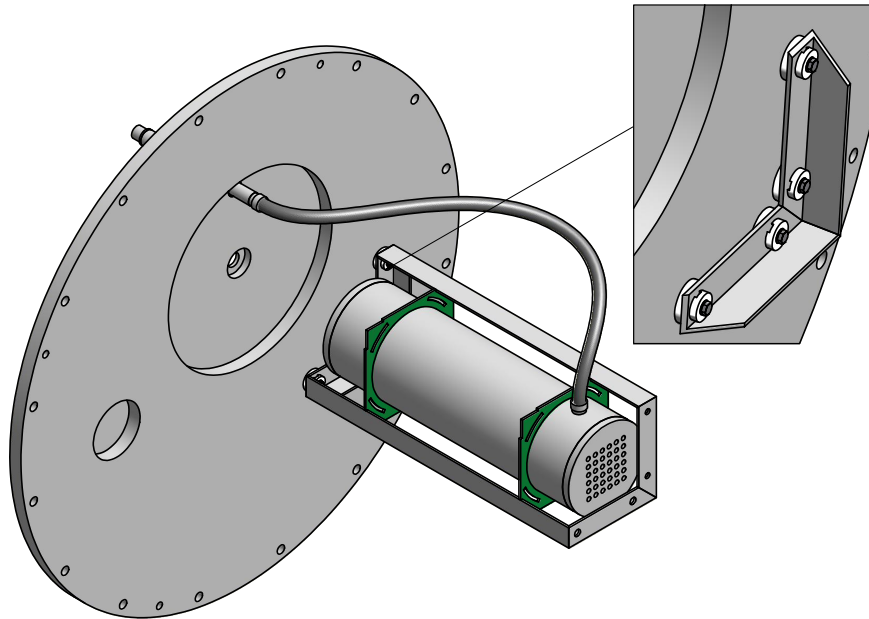


Figura 4.18: Representação 3D do sistema de alimentação de Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.

em Teflon de forma a reduzir a transferência de calor por condução, pois tal como no caso das epóxis, também o Teflon possui uma baixa condutividade térmica.

Note-se que no centro da tampa que incorpora o sistema de injeção de Azoto líquido existe um espaço para a instalação de um conector que permite utilizar sensores de temperatura no interior da infra-estrutura de teste. Na figura 4.19 encontra-se uma representação 3D deste conector.



Figura 4.19: Representação 3D do conector para instalação de sensores de temperatura.

4.2.6 Vácuo: acoplamento de bombas de vácuo, medição de pressão e detecção de fugas

O interior da infra-estrutura de teste encontrar-se-á em regime de vácuo. A necessidade de obter um bom vácuo advém principalmente de dois motivos: a necessidade de minimizar trocas de calor e minimizar a dispersão da luz. Assim, para uma melhor compreensão física sobre o que é um sistema em vácuo, deverá consultar-se o anexo D, no qual se encontra uma breve abordagem à descrição teórica de vácuo residual.

Embora a radiação represente geralmente o principal mecanismo através do qual o calor é transmitido através do vácuo e sendo a condução térmica através dos suportes considerada separadamente, a condução através de moléculas de gás presentes no interior da infra-estrutura de teste podem também contribuir para a carga térmica do sistema. Assim, o isolamento recorrendo a um regime de vácuo minimiza a transferência de calor por convecção. Quando a radiação emitida de uma superfície quente para uma superfície fria é o modo principal de transferência de calor, deverá ainda incorporar-se, entre as duas superfícies, um escudo de radiação. Este escudo possui superfícies de muito baixa emissividade e permitirá reduzir de forma significativa a transferência de calor por radiação.

Quando existe condução molecular, o fluxo de calor por unidade de superfície varia linearmente com a pressão. Para determinar se a condução nestes termos é significativa num sistema criogénico e em vácuo, é necessário comparar as distâncias que limitam o sistema em vácuo com o livre percurso médio das moléculas residuais do gás. Para avaliar a condução de calor através das moléculas do gás rarefeito, bastará recorrer à teoria cinética dos gases (abordada no anexoD) e à lei dos gases ideais.

4.2.6.1 Bombas de vácuo: acoplamento e montagem

Para se atingir um nível de vácuo entre 1 a 10^{-3} mbar (médio vácuo), recorre-se normalmente a bombas de vácuo rotatórias com vedação a óleo ou membrana. Estas são, fundamentalmente, compressores que extraem os gases de um sistema. O gás ao fluir para a entrada da bomba é comprimido entre um rotor e o corpo da bomba, sendo posteriormente libertado para a atmosfera. A vedação é feita por meio de óleo (prevenindo que o gás entre novamente no sistema em vácuo) que também serve como lubrificante dos componentes móveis e como dissipador de calor. Estas bombas são utilizadas como um primeiro estágio de bombeamento de um sistema de vácuo, partindo da pressão atmosférica. Quando se utilizam bombas rotatórias com vedação a óleo deve ligar-se sempre uma conduta para escape dos gases bombardeados para o exterior da sala de trabalho porque, associada com os gases, há sempre uma percentagem de vapor de óleo que não deve ser respirado.

À medida que a pressão vai baixando dos 10^{-3} mbar, a distância que uma molécula de gás viaja antes de colidir com outra molécula aumenta. O livre percurso médio das moléculas começa a exceder as dimensões da infra-estrutura

de teste, e as moléculas terão maior probabilidade de atingir as suas paredes do que atingir outras moléculas. Nesta fase, o gás no seu interior deixa de comportar-se como um fluido, e a bomba rotatória deixa de ser eficiente.

Para reduzir mais a pressão, é necessário uma bomba que opera de uma maneira diferente, e uma opção é a utilização de bombas turbo-moleculares. Estas bombas baseiam-se na transferência de momento linear de um rotor com um grande número de pás a grande velocidade, para as moléculas situadas entre o rotor e o estator. Às moléculas é comunicado movimento de modo a que estas saiam do sistema a evacuar. Para estas bombas, em regime de fluxo molecular, a razão de compressão é proporcional à velocidade de rotação pelo que são necessárias velocidades de rotação muito altas, entre os 20000 e 90000rpm.

Nos laboratórios do SIM existem já duas bombas de vácuo, uma rotatória e uma turbo-molecular. Na figura 4.20 encontra-se uma fotografia de ambas as bombas.



Figura 4.20: Esquerda: bomba turbo-molecular. Direita: bomba rotatória com vedação a óleo.

A montagem das bombas de vácuo foi feita na outra tampa da infra-estrutura de teste, isto é, a tampa da direita na figura 4.10. Tal como evidenciado na figura 4.21, a bomba turbo-molecular tem uma flange de ligação do tipo CF-DN100. Sendo que a tampa da infra-estrutura atrás referida, incorpora já uma abertura compatível com esta, optou-se por efectuar um acoplamento directo da bomba turbo-molecular na tampa, pois desta forma, aumentará a probabilidade de que uma molécula no interior da infra-estrutura de teste possa encontrar a porta de entrada da bomba.

Para ligar a bomba à tampa, recorreu-se a um sistema de fixação que consiste numa espécie de ganchos com parafusos integrados que prendem a bomba à tampa. Entre a flange da bomba e a tampa existe ainda um *O-Ring* para vedação. Na figura 4.21 pode ver-se a flange da bomba turbo-molecular e os ganchos que a prendem à tampa.

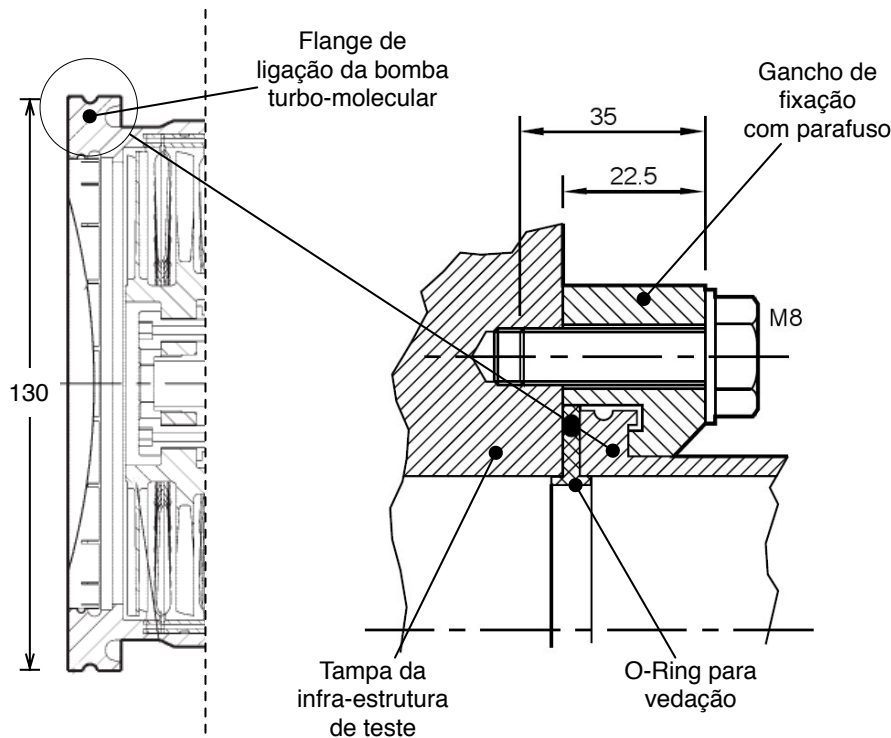


Figura 4.21: À direita: representação em corte da flange de ligação da bomba turbo-molecular. À esquerda: esquema de fixação da bomba turbo-molecular na tampa da infra-estrutura de teste.

A montagem final das bombas, foi feita ligando um tubo flexível à porta de entrada da bomba rotatória à porta de saída da bomba turbo-molecular. A bomba turbo-molecular apenas pode iniciar o seu funcionamento após a pressão no interior da infra-estrutura de teste se encontrar abaixo dos já referidos 10^{-3} mbar. Para verificar isto, ambas as bombas são controladas através de um controlador próprio que, além de gerir a activação e desactivação da bomba turbo-molecular, incorpora também duas ligações que permitem a ligação de medidores de pressão e um manómetro analógico.

Pode ver-se na figura 4.22 uma fotografia da infra-estrutura de teste com a bomba turbo molecular já fixa na tampa, o controlador das bombas de vácuo, e a bomba rotatória.

A bomba turbo-molecular não necessita de nenhum controlo manual, pois este é feito através do controlador existente. No que diz respeito à bomba rotatória, esta pode ser controlada manualmente consoante o estado da bomba e do próprio sistema a evacuar.

4.2.6.2 Controlo da bomba rotatória

A bomba rotatória permite um ajuste do seu funcionamento através do ajuste de dois botões ajustáveis, um para a selecção do modo de funcionamento e outro

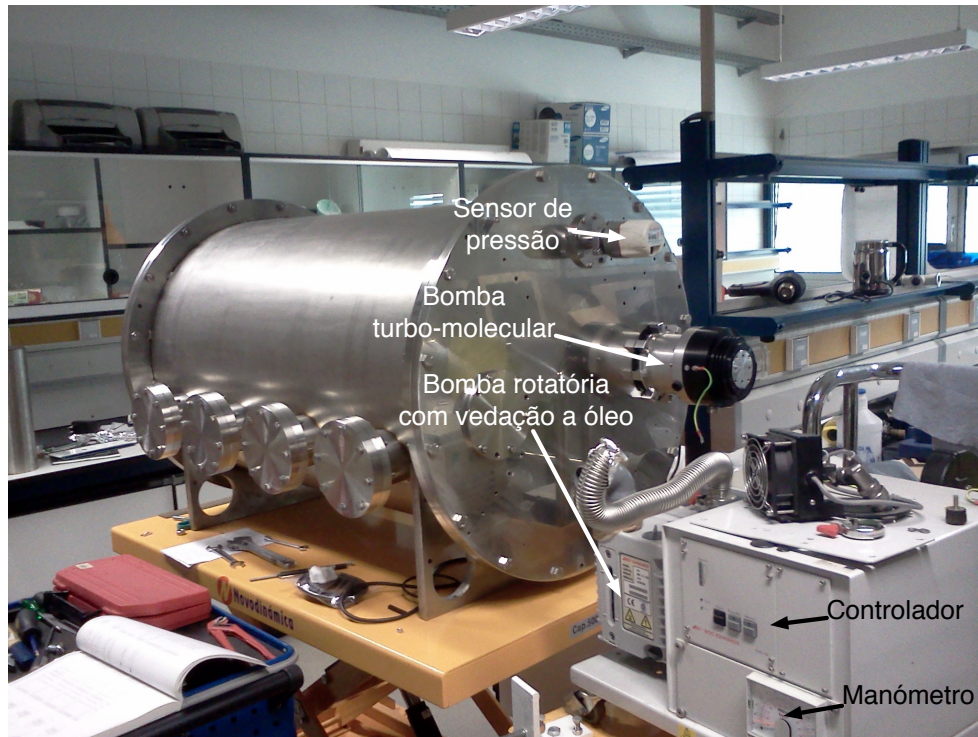


Figura 4.22: Implementação das bombas turbo-molecular e rotatória.

para regulação do balastro. Estes botões podem visualizar-se na figura 4.23.

Para melhorar o bombeamento quando existem vapores, as bombas estão geralmente equipadas com um balastro, que consiste numa pequena válvula de entrada de ar, regulável. Para exemplificar a sua utilização, tome-se como exemplo o vapor de água cuja pressão à temperatura do óleo da bomba (cerca de 60°C) é de 200mbar. Se a pressão do vapor de água no sistema a evacuar for 10mbar, este vapor não pode ser comprimido mais de vinte vezes, senão condensa. É portanto necessário que, pelo balastro, se introduza ar em quantidade suficiente para que a pressão do gás à saída não se torne maior do que vinte vezes a pressão total de gás dentro da bomba.

Nesta bomba, o botão de ajuste do balastro, possui três posições:

- Fechado - posição 0;
- Baixo Fluxo - posição I;
- Elevado Fluxo - posição II.

O botão ajustável para selecção de modo possui duas posições, relativamente à figura 4.23:

- Rodado para a direita: modo de Alto Vácuo. Neste modo a bomba poderá atingir o vácuo mais elevado que ela pode proporcionar.



Figura 4.23: Botões ajustáveis para controlo do funcionamento da bomba rotatória.

- Rodado para a esquerda: modo de Elevado Caudal. Neste modo a bomba pode aguentar pressões elevadas (> 50 mbar) na sua entrada durante um longo período de tempo.

Caso a bomba não atinja o vácuo especificado pelo fabricante para esta bomba (cerca de 2×10^{-3} mbar), deverá proceder-se da seguinte forma:

- Isolar a bomba do sistema ao qual será a evacuar;
- Colocar o botão de selecção de modo em Elevado Caudal e ajustar o balastro para a posição de Baixo Fluxo (posição I) e deixar a bomba ligada durante pelo menos uma hora (ou mesmo durante toda a noite) por forma a que o óleo seja purgado completamente de contaminantes;
- Colocar o botão de selecção de modo em Alto Vácuo e fechar o balastro (posição 0);
- Abrir novamente o sistema a evacuar.

4.3 Sistema de abertura das tampas

A câmara de aquisição tem que ser colocada no interior da infra-estrutura de teste de maneira a que possa ser removida posteriormente. Para isso, o SIM adquiriu um porta-paletes, cuja imagem pode ver-se na figura 4.24.



Figura 4.24: Porta-paletes ajustado para movimentação das tampas da infra-estrutura de teste.

Este porta-paletes foi modificado através da instalação de suportes em “L” aparafusados à base elevatória, os suportes horizontais, e uma barra lateral para fixação da tampa na vertical, o suporte vertical.

Para uma melhor visualização da forma como a tampa é suportada, na figura 4.25 encontra-se uma representação esquemática em 3D.

Os suportes horizontais permitem fixar a tampa horizontalmente através de dois parafusos longos (os suportes horizontais da figura 4.25) inseridos em dois furos já existentes na tampa. Para que a tampa não oscile na vertical, instalou-se ainda um tubo com as pontas planas (tendo sido feitas as pontas planas através de um achatamento no torno) e perfuradas. Este tubo está fixo num furo na base elevatória numa ponta, e na outra, fixo na tampa.

Para colocar a tampa na infra-estrutura de teste, basta movimentar o carro porta-paletes para a posição desejada. O porta-paletes possui um sistema de elevação que permite o posicionamento vertical para instalação da tampa. Por forma a efectuar um ajuste vertical mais preciso, instalou-se ainda dois parafusos em cada suporte em “L”, representados na figura 4.25 pelos parafusos de ajuste. Aparafusando estes parafusos contra a base elevatória permite elevar de forma

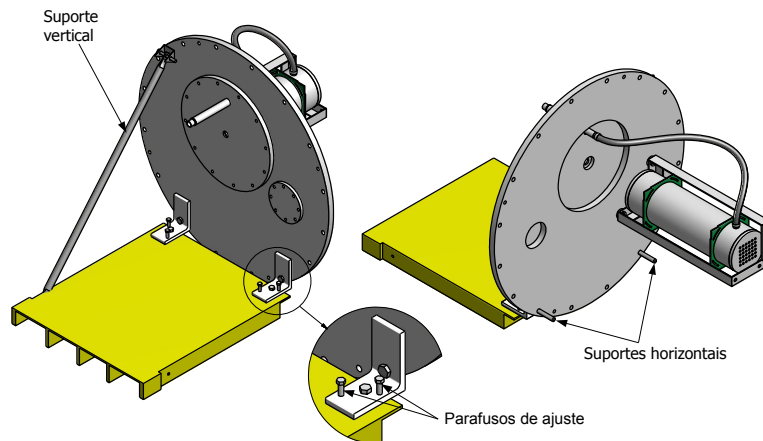


Figura 4.25: Representação 3D do sistema de movimentação das tampas da infra-estrutura de teste.

mais precisa a tampa e assim alinhá-la com a infra-estrutura de teste para o seu correcto posicionamento e instalação.

Na figura 4.26 encontra-se ainda uma imagem da mesa elevatória adquirida também pelo SIM para suportar toda a infra-estrutura de teste, e desta forma poder movimentá-la para outro local caso seja necessário.



Figura 4.26: Mesa elevatória para movimentação da infra-estrutura de teste.

4.4 Mesa de suporte para a câmara de aquisição

Para colocar e posicionar a câmara de aquisição no interior da infra-estrutura de teste o SIM adquiriu uma mesa óptica, na qual a câmara de aquisição assenta. Esta mesa é suportada, num dos lados pela tampa que possui também o sistema de criogenia atrás referido. O suporte de ligação da mesa à tampa foi concebido recorrendo a dois blocos de teflon e duas calhas em “L”. Na figura 4.27 encontra-se uma representação 3D deste sistema.

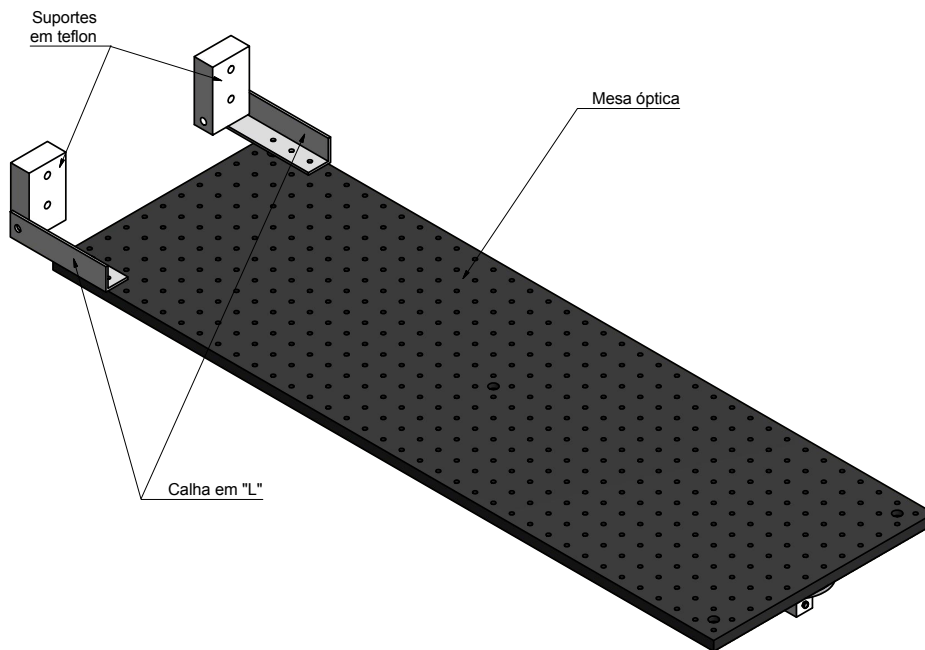


Figura 4.27: Mesa óptica para suporte da câmara de aquisição com suportes de fixação à tampa.

Fixando os blocos de teflon à tampa, a mesa óptica fica suportada por duas calhas com furações equivalentes à da mesa, que por sua vez também estão fixas aos blocos de teflon. Esta ligação entre as calhas e os blocos de teflon faz-se através de um parafuso que permite que a mesa possa rodar em torno do eixo definido pelos parafusos.

Para se inserir a mesa, e a câmara de aquisição no interior da infra-estrutura de teste instalou-se uma calha com um perfil em “U” no seu interior, ao longo da qual, a mesa suportada pela tampa e o carro porta-paletes, poderá deslizar através de um suporte. Este suporte, é constituído por duas partes: uma base em teflon e um elemento em aço inoxidável acoplado à base em teflon e à mesa óptica. Na figura 4.28 pode ver-se uma representação 3D deste suporte, e também o mesmo acoplado à mesa óptica. Ainda nas figuras 4.29 e 4.30 podem ver-se os suportes em teflon e as calhas em “L”, e o suporte e acoplado à mesa óptica.

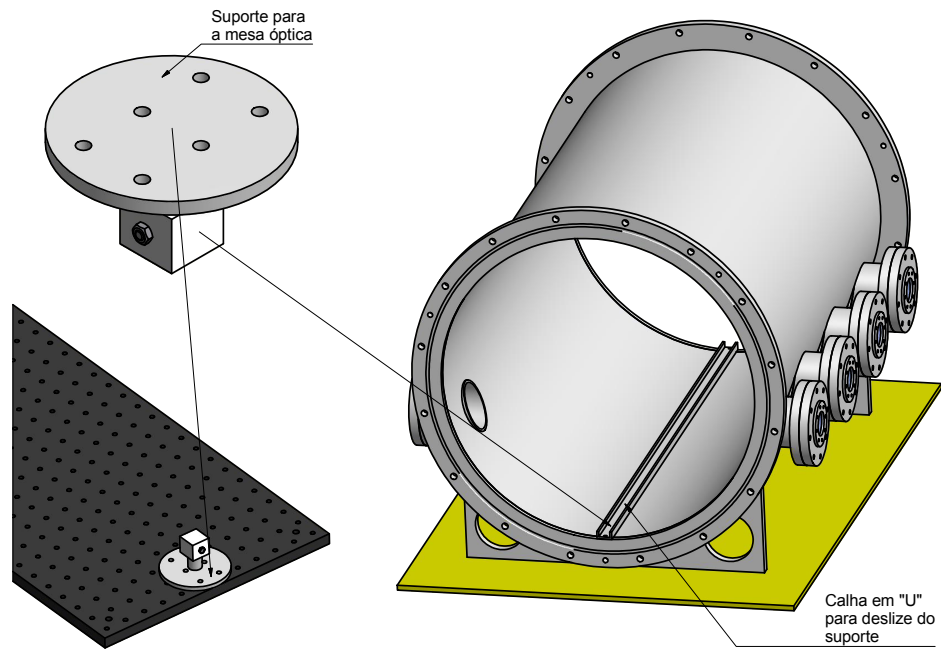


Figura 4.28: Mesa óptica para suporte da câmara de aquisição com suportes de fixação à tampa.

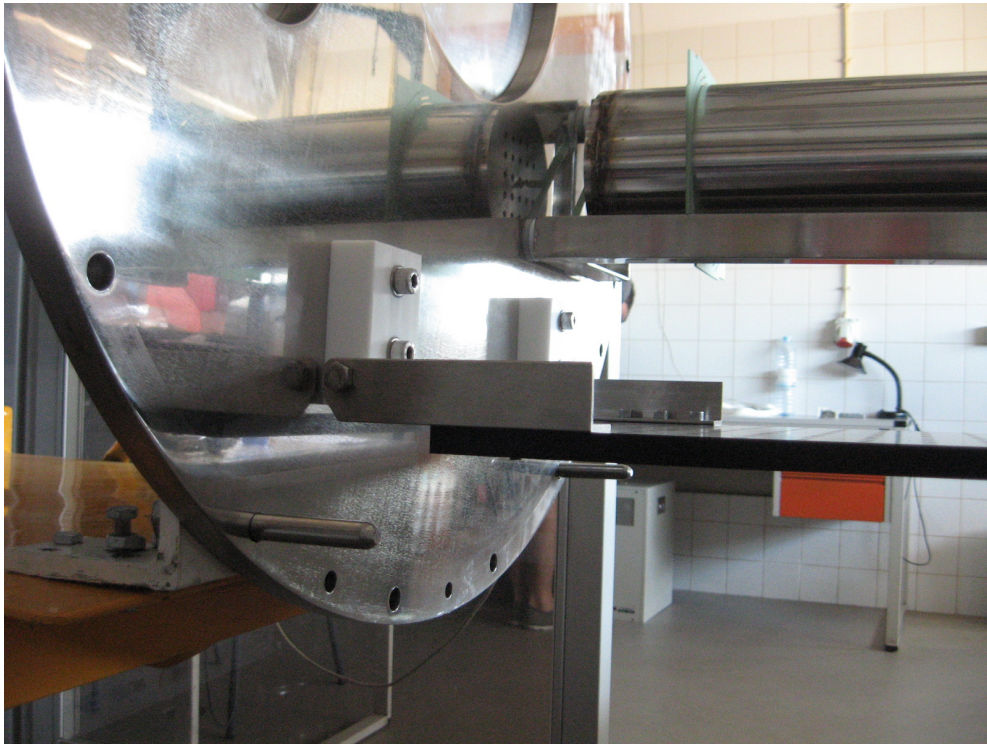


Figura 4.29: Imagem do suporte da mesa óptica.

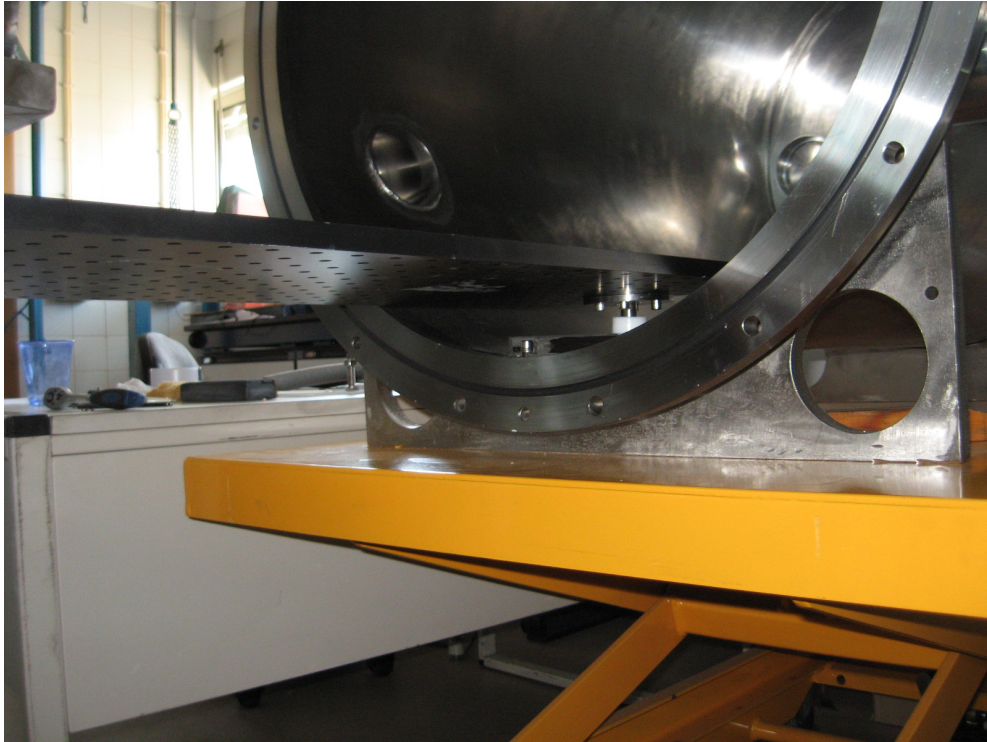


Figura 4.30: Imagem do suporte da mesa óptica.

4.5 Desenho final e imagens da implementação

Finalmente, na figura 4.31 pode visualizar-se o desenho final da infra-estrutura de teste numa representação 3D incluindo a mesa óptica com a câmara de aquisição acoplada, estando a mesa apoiada na calha em “U” da infra-estrutura de teste.

Nas figuras 4.32 e 4.33 estão duas imagens da implementação no laboratório, mas sem a câmara de aquisição.

Em 4.32 tem-se uma vista geral de toda a infra-estrutura de teste, na qual pode visualizar-se a calha ao longo da qual a mesa óptica deslizará.

Em 4.33 pode ver-se o tanque de Azoto líquido e o porta-paletes segurando a tampa.

Todos os elementos que compõem a infra-estrutura de teste estão agora definidos e construídos, e a sua integração também está feita, faltando apenas efectuar testes de validação do seu funcionamento.

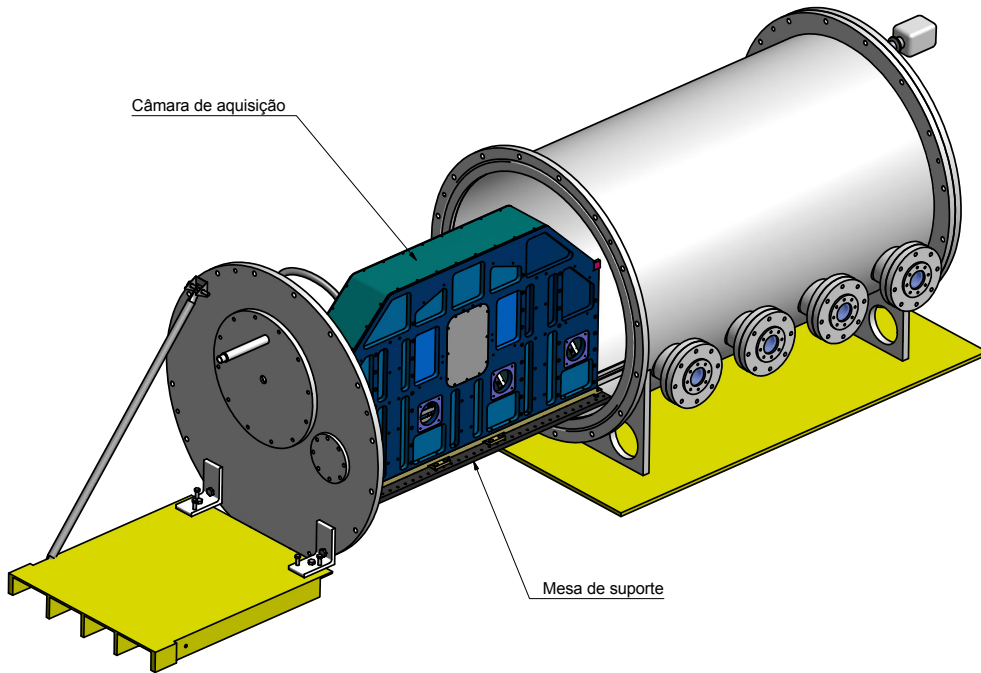


Figura 4.31: Representação 3D da infra-estrutura de teste com a câmara de aquisição.

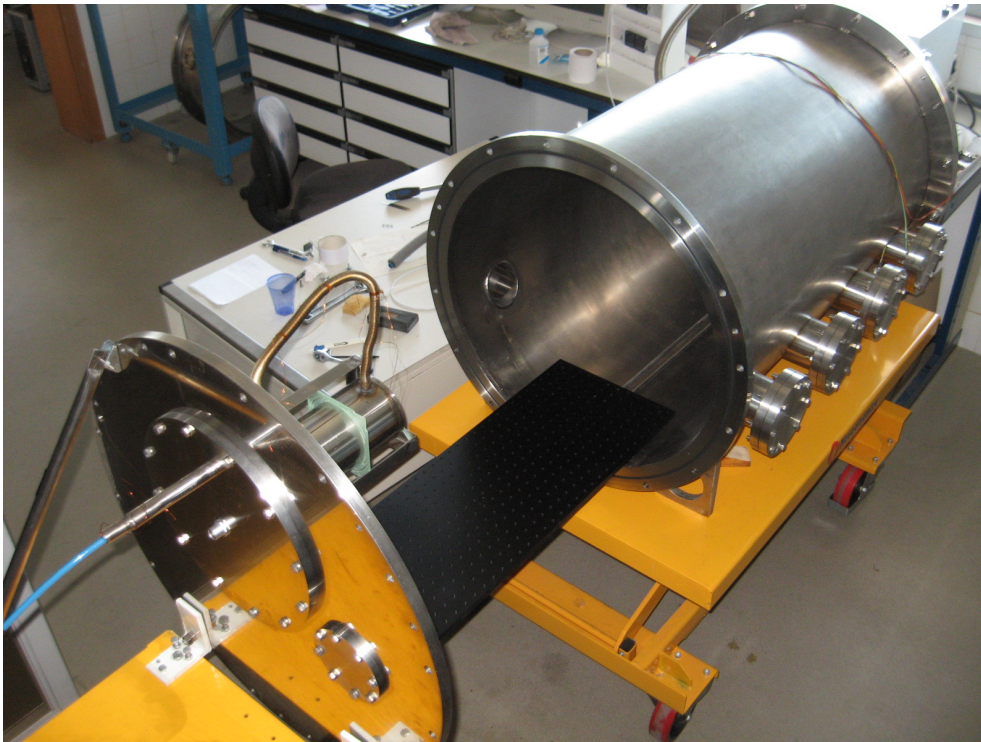


Figura 4.32: Imagem mostrando o interior da infra-estrutura de teste onde se pode ver a calha onde a mesa óptica desliza.



Figura 4.33: Imagem evidenciando o porta-paletes acoplado à tampa que incorpora o tanque de azoto e a mesa óptica.

4.6 Vedação, polimento e limpeza do interior da infra-estrutura de teste

Numa aplicação de vácuo deste tipo, dois dos principais factores que contribuem para a obtenção de um bom nível de vácuo são a escolha dos vedantes e o estado das superfícies no interior do volume em vácuo. Desta forma a definição da forma das cavidades onde os vedantes foram instalados e também do nível de acabamento da superfície serão descritos seguidamente.

4.6.1 Vedantes e cavidades para vedantes

As dimensões das tampas da infra-estrutura de teste são consideráveis (diâmetro de aproximadamente 750mm), e a instalação de vedantes do tipo *O-Rings* poderia ser difícil caso estes não estivessem fixos na própria tampa.

Um *O-Ring* consiste num anel fabricado num elastómero⁴ cujo perfil pode variar dependendo da sua aplicação. Neste caso, os *O-Rings* utilizados possuem secção circular. Um *O-Ring* é um vedante desenhado para assentar numa cavidade de uma dada superfície e quando se põe em contacto esta superfície com outra, o vedante é comprimido entre as superfícies criando um isolamento na in-

⁴Polímero que apresenta propriedades elásticas, suportando grandes deformações antes da ruptura

terface, evitando, por exemplo, a perda de um fluido ou gás. Os *O-Rings* podem ser utilizados em aplicações estáticas ou dinâmicas.



Figura 4.34: Um *O-Ring* genérico para vedação.

Os *O-Rings* utilizados na vedação da infra-estrutura de teste são feitos num material denominado por *Viton*. O *Viton* é um fluoroelastómero consistindo numa grande cadeia de polímeros tendo este uma permeabilidade muito baixa, sendo resistente à contaminação por óleos, lubrificantes, oxigénio e entre outros solventes. Entre todos os elastómeros utilizados para vedação este é o que permite obter pressões mais baixas, na ordem dos 10^{-9} mbar. Ao fim de um longo tempo este tipo de vedantes perdem as suas propriedades de vedação, readquirindo-as por aquecimento em vácuo. Todos os *O-Rings* instalados na infra-estrutura de teste foram ligeiramente embebidos numa gordura especial para alto-vácuo⁵. Em tecnologia de vácuo as gorduras são utilizadas essencialmente para lubrificação e vedação. Devem usar-se em quantidades mínimas para evitar uma desgaseificação muito elevada.

4.6.1.1 Perfil das cavidades para *O-Rings*

Como a tampa, e a flange onde esta encosta, se encontram na vertical, ao fechar a infra-estrutura de teste (deslizando o porta-paletes) o vedante poderia mover-se e cair. Para que isso não aconteça utilizou-se uma cavidade com uma forma especial de forma a que o *O-Ring* quando instalado fique fixo. O nome deste tipo de cavidades denomina-se por “cauda de pomba” (em inglês *dovetail*), e a sua secção e dimensões estão a apresentadas na figura 4.35 e tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores para as dimensões de cavidades em “cauda de pomba” para *O-Rings* de secção circular.

ϕd [mm]	h [mm]	$b^{+0.1}$ [mm]	$r2$ [mm]	$r1$ [mm]
1.80	$1.25 + 0.05$	1.40	0.10	0.40
2.65	$2.05 + 0.05$	2.10		
3.55	$2.80 + 0.05$	2.85	até	até
5.30	$4.55 + 0.05$	4.35		
7.00	$5.85 + 0.05$	5.85	0.30	1.60

⁵Esta gorduras consistem em Hidrocarbonetos de alto peso molecular e existem no mercado tanto para uso em alto vácuo como em baixo vácuo, consoante a sua pressão de vapor. As variantes são indicadas por uma letra a que correspondem determinadas características, entre as quais a pressão de vapor.

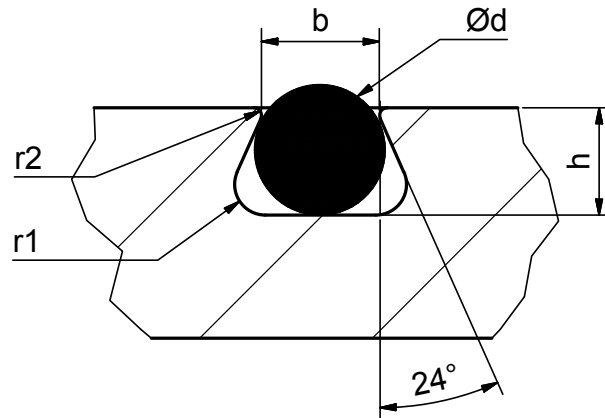


Figura 4.35: Secção e dimensões de cavidades em “cauda de pomba” para *O-Rings*.

O diâmetro ϕd corresponde ao diâmetro da secção do *O-Ring*. Em geral, um *O-Ring* é caracterizado pelo seu material, o seu diâmetro e o diâmetro interno, que corresponde ao menor diâmetro do anel.

Este tipo de cavidade foram aplicadas nas flanges para acoplamento das tampas da infra-estrutura de teste (tal como se pode evidenciar na figura 4.7) para a qual foi utilizado um *O-Ring* em *Viton* cujo diâmetro é de 7mm e o diâmetro interno dele de aproximadamente 680mm.

Para as flanges que são responsáveis por acomodar as janelas para entrada dos feixes, também se utilizou cavidades em “cauda de pomba”, sendo neste caso o diâmetro do *O-Ring* de 5.30mm e diâmetro interno de aproximadamente 110mm. Veja-se a figura 4.5.

Para as restantes tampas também fabricadas, utilizaram-se cavidades regulares com secção rectangular, mas com dimensões definidas para utilização em aplicações de Alto-vácuo. A secção e a tabela com as dimensões para este tipo de cavidades encontram-se na figura 4.36 e tabela 4.3, respectivamente.

Tabela 4.3: Valores para as dimensões de cavidades com secção rectangular para *O-Rings* de secção circular.

ϕd [mm]	h [mm]	$b^{+0.1}$ [mm]	$r1$ e $r2$ [mm]
1.80	$1.25 + 0.05$	2.10	0.20
2.65	$1.85 + 0.05$	3.10	
3.55	$2.50 + 0.05$	4.15	até
5.30	$3.70 + 0.05$	6.30	
7.00	$4.90 + 0.05$	8.20	0.40

As dimensões para estas cavidades rectangulares correspondem a uma deformação de cerca de 30% do diâmetro do *O-Ring*, isto é, o rácio de $h/\phi d \approx 30\%$.

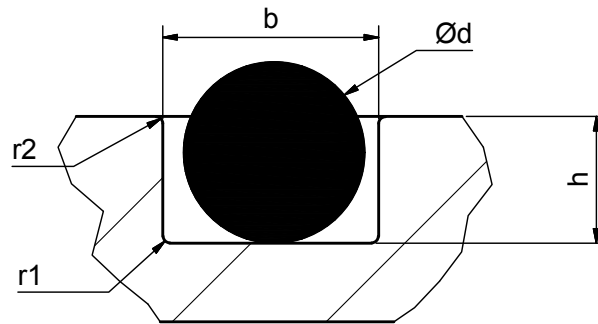


Figura 4.36: Secção e dimensões de cavidades com secção rectangular para *O-Rings*.

4.6.2 Polimento do interior da infra-estrutura de teste

Outro factor muito importante para se obter um bom nível de vácuo num determinado volume é o estado das superfícies que o compõem. Há um processo físico denominado por desgaseificação, que consiste na lenta libertação de gases quando presos (através de absorção, adsorção ou contaminação) e cuja minimização é muito importante nas aplicações de vácuo. Uma superfície rugosa terá uma maior probabilidade de aprisionar moléculas do que uma superfície com menos rugosidade, pois do ponto de vista de uma molécula, uma superfície rugosa pode ser comparada a uma região montanhosa, cuja área é muito maior do que uma região plana, implicando assim uma maior capacidade de aprisionamento de moléculas, quer por absorção ou adsorção.

Para minimizar este efeito, geralmente procede-se ao polimento das superfícies que envolvem a região em vácuo, criando desta forma superfícies lisas, ou seja, a nível microscópico, as montanhas são reduzidas a pequenas colinas. O polimento foi feito recorrendo a uma máquina que incorpora um abrasivo instalado num tambor rotativo. A máquina utilizada encontra-se na figura 4.37.

Para efectuar o polimento, utilizaram-se vários abrasivos com diferentes granulometrias, sendo que a sequência iniciava-se com o abrasivo com maior grão para o menor. Na figura 4.38 pode ver-se um exemplo de uma superfície de uma das tampas da infra-estrutura de teste com um polimento parcial para contrastar com as partes não polidas.

4.6.3 Fitas de aquecimento

Por outro lado, pode maximizar-se também o efeito de desgaseificação, instalando-se fitas de aquecimento, no exterior, em torno da do corpo central da infra-estrutura de teste. Estas fitas de aquecimento irão aquecer as paredes exteriores, que através de efeitos de condução térmica irão por sua vez aquecer as paredes interiores da infra-estrutura de teste. Assim, moléculas que estejam presas às pa-



Figura 4.37: Máquina para polimento das superfícies.



Figura 4.38: Polimento da superfície de uma das tampas da infra-estrutura de teste.

redes da região em vácuo irão, eventualmente, adquirir energia cinética suficiente para se libertarem das forças de ligação às paredes.

Assim, interessa maximizar a desgaseificação porque deste forma, as moléculas presas nas paredes serão libertadas, e assim, após as fitas serem desligadas, haverá uma menor desgaseificação no interior da infra-estrutura de teste. Com as bombas de vácuo em operação, e as fitas de aquecimento ligadas, as moléculas antes presas às paredes, serão mais rapidamente evacuadas, melhorando assim o nível de vácuo. Na figura 4.39 podem ver-se essas fitas de aquecimento instaladas na infra-estrutura de teste.

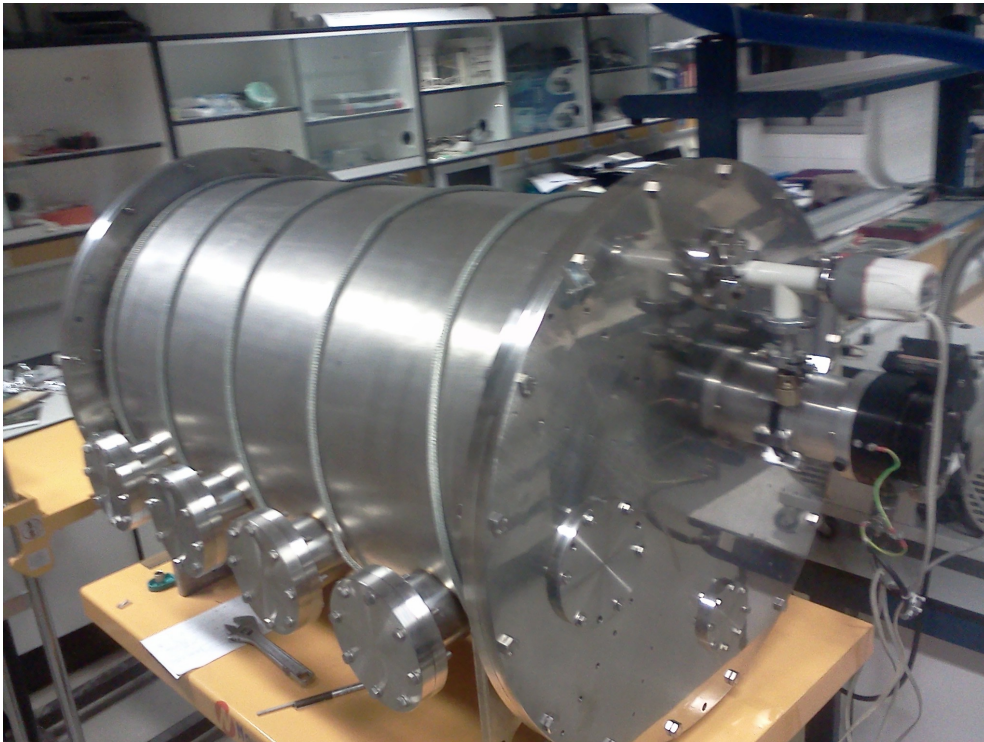


Figura 4.39: Fitas de aquecimento para aumento da desgaseificação da infra-estrutura de teste.

4.6.4 Limpeza do interior da infra-estrutura de teste

Todas as peças que formam o sistema de vácuo foram escrupulosamente limpas. Em geral, após uma primeira lavagem com um detergente industrial, as peças foram passadas por água e por um solvente orgânico para facilitar a secagem. O recurso ao solvente orgânico feito também para desengordurar os componentes do sistema de vácuo, porque as películas de gordura prejudicam o vácuo final. Os solventes mais utilizados são o álcool e a acetona, sendo estes embebidos num pano para efectuar a limpeza adequadamente. Assim, a limpeza de todos os componentes que ficam no interior da infra-estrutura de teste foi feita desta forma.

4.7 Instrumentação da infra-estrutura de teste

Para avaliar o correcto funcionamento da infra-estrutura de teste após a sua implementação final, foi necessário instalar dois tipos de sensores, um de pressão e de temperatura, pois num sistema deste tipo, estes são os parâmetros mais importantes para avaliar o seu funcionamento.

4.7.1 Medidor de pressão

O medidor de pressão foi instalado na tampa que contém também a bomba turbomolecular. Este sensor pode visualizar-se na figura 4.40.

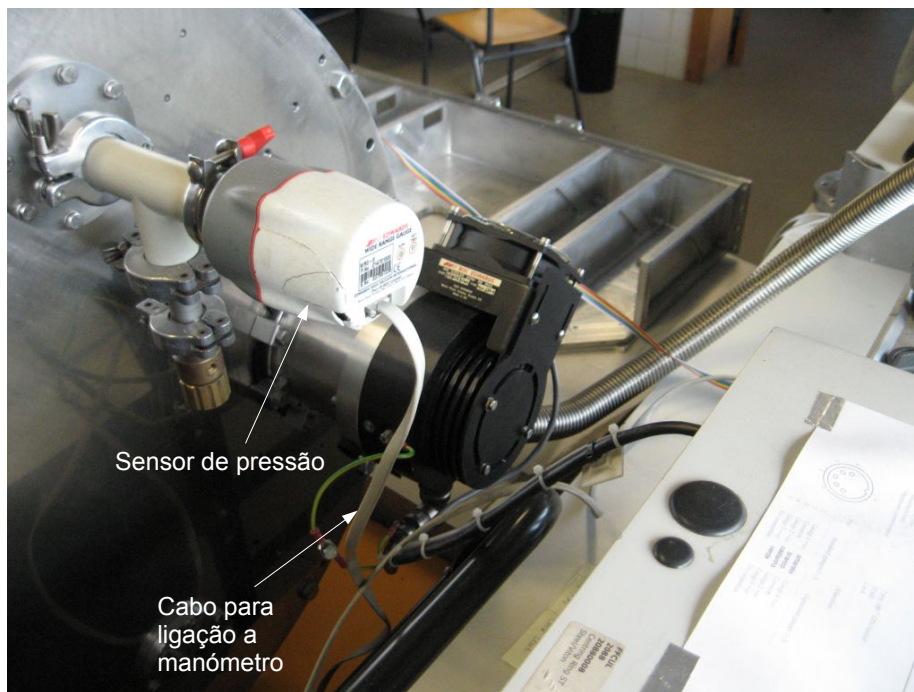


Figura 4.40: Sensor de pressão acoplado à tampa da infra-estrutura de teste.

Para visualizar o valor da pressão o sensor está conectado a um manómetro analógico que se encontra instalado no controlador das bombas de vácuo. Este manómetro pode ver-se na figura 4.41.

4.7.2 Sensores de temperatura

A temperatura que será mais importante monitorizar é a do tanque de Azoto que será utilizado para arrefecer a câmara de aquisição. Recorreu-se assim a sensores do tipo Pt100 para efectuar a medição da temperatura.

O sensor Pt100 consiste numa termo-resistência de platina, que à temperatura de 273K (0°C) apresenta uma resistência de 100Ω e que tem uma dependência



Figura 4.41: Sensor de pressão acoplado à tampa da infra-estrutura de teste.

linear com a temperatura. Uma imagem deste tipo de sensores pode ver-se na figura 4.42.

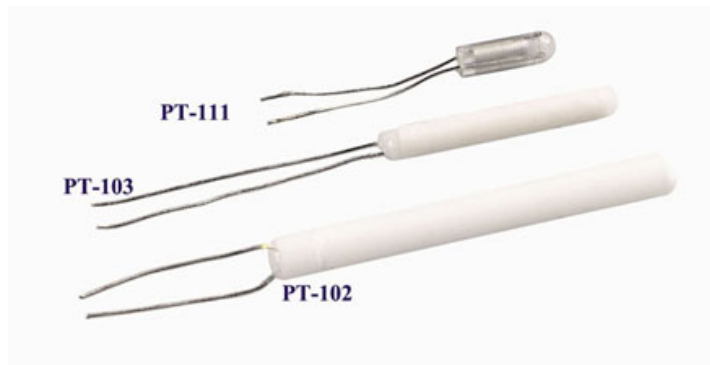


Figura 4.42: Sensores de temperatura PT100.

Os sensores do tipo Pt100 possuem uma cabeça em platina, que é o elemento que irá realmente efectuar a medição, sendo que a platina é o metal mais estável electronicamente e por isso, utilizá-la permitirá obter medições mais precisas. Possui ainda um tubo protector e os fios para ligação ao conector. Na figura 4.42 podem ver-se estes fios em torno do tubo flexível que liga o tubo de alimentação de azoto ao tanque.

Tal como foi referido anteriormente, a tampa que incorpora o tanque de Azoto,

possui um conector (ver figura 4.19) que permite a ligação destes sensores e posteriormente fazer a ligação a uma interface de monitorização da temperatura. Assim, os sensores foram cuidadosamente soldados ao lado do conector que se encontra no interior da infra-estrutura de teste. Na figura 4.43 pode visualizar-se a forma como estes sensores foram instalados no interior da infra-estrutura de teste.

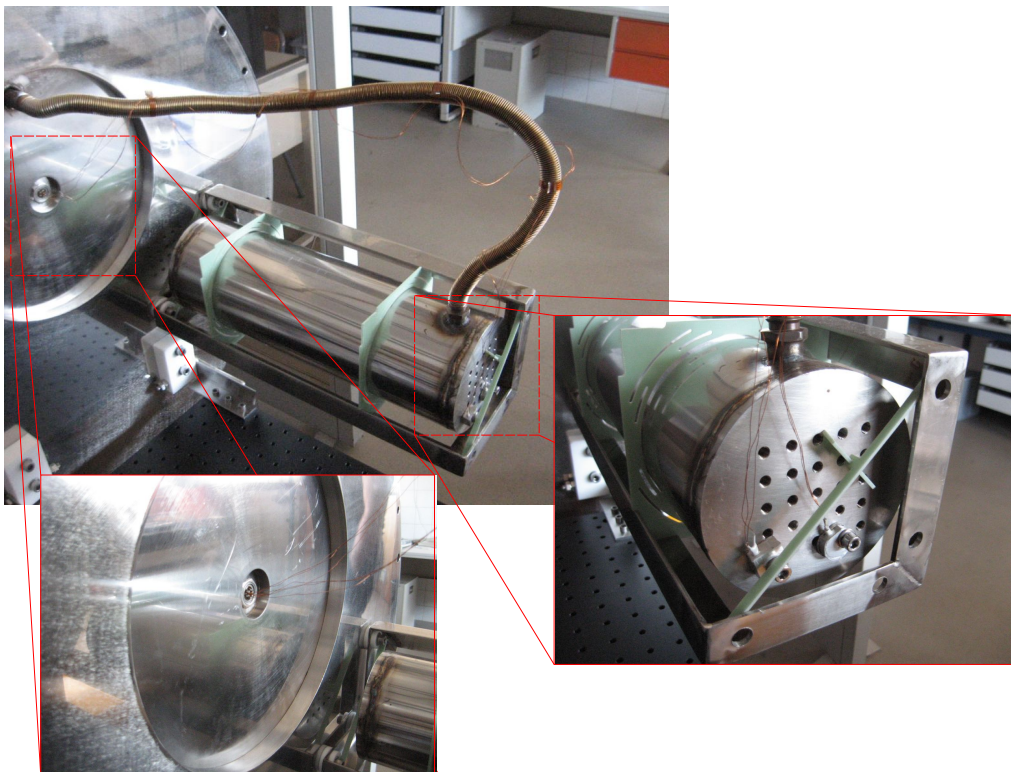


Figura 4.43: Sensores de temperatura no interior da infra-estrutura de teste. Em baixo à esquerda: sensores soldados ao conector. Em baixo à direita: ligação dos sensores ao tanque de Azoto líquido.

A ligação ao conector foi feita através de um processo de soldadura normal, utilizando um pouco de estanho para soldar as pontas finas dos sensores às ligações disponíveis no conector. No outro extremo, onde se encontra as pontas de medição dos sensores Pt100, estas foram ligadas a pedaços de metal, que por sua vez estão em contacto, através de parafusos, a um dos lados do tanque de Azoto.

Na figura 4.44 pode ver-se o monitor (lado esquerdo) ao qual o cabo de conexão que vem do conector (lado direito) se encontra ligado.

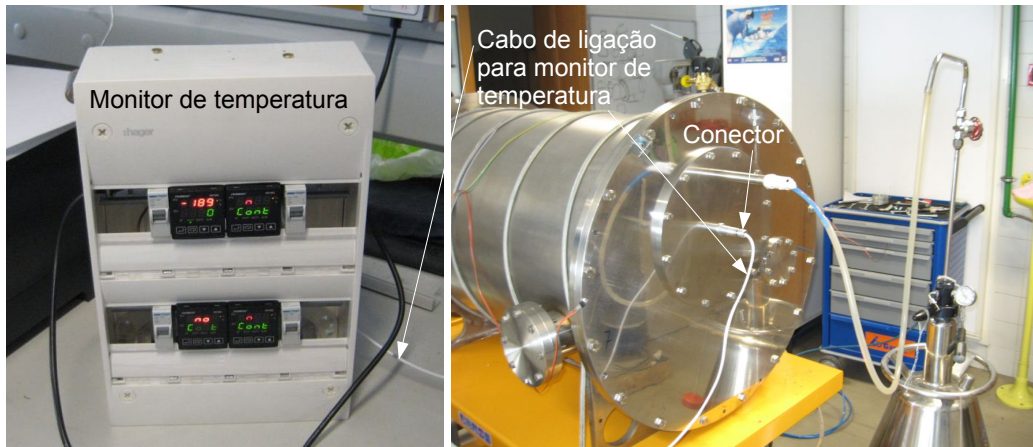


Figura 4.44: À esquerda: monitor de temperatura. À direita: conector e cabo para ligação ao monitor de temperatura.

4.8 Considerações finais

Todo o processo de implementação da infra-estrutura de teste, foi desenhado de base, excluindo o desenho das tampas que já existiam nos laboratórios do SIM. Este processo, além de todo o trabalho técnico de desenho e dimensionamento de todos os sistemas que constituem a infra-estrutura de teste, incluiu a componente de interação com a indústria que fabricava as diversas peças que foram necessárias. Esta dimensão revelou-se extremamente gratificante, pois a interação com as empresas abre portas a um conjunto de mais valias a nível pessoal e profissional, como por exemplo a interação com as pessoas da empresa, que nem sempre utilizam os mesmos termos técnicos, mas que até sugerem formas mais fáceis e outras perspectivas para a resolução de determinado problema, fruto da enorme experiência que estas possuem. Por outro lado, o processo de aquisição ou encomenda de determinado componente nem sempre flui da mesma forma, devido a variações nos prazos de entrega ou rupturas de stock, o que muitas vezes tornou o processo mais moroso.

De forma geral, toda a construção e implementação da infra-estrutura de teste foi uma experiência gratificante, que além de ter contribuído para uma melhor compreensão de como construir um crióstato, contribui imenso para o conhecimento da dinâmica da interação, neste caso, universidade-empresa, que são, muitas vezes, universos com escalas temporais bastante diferentes.

5. Testes e resultados nas condições de funcionamento

Estando todo o processo de montagem e instrumentação da infra-estrutura de teste efectuado, o próximo passo será testar se de facto esta está de acordo com as especificações iniciais.

Foi feito um teste de pressão, para verificação que a infra-estrutura de teste atinge o nível de vácuo pretendido (10^{-6} mbar), tendo sendo feito também um teste fugas. E verificou-se se o depósito de Azoto líquido seria capaz de atingir a temperatura pretendida (cerca de 80K).

5.1 Teste de pressão e detecção de fugas

Toda a infra-estrutura de teste foi fechada e devidamente selada com a instalação dos *O-Rings*. Após isso, e com as bombas devidamente conectadas, estas foram ligadas e o processo de evacuação iniciou-se.

Foram feitos vários testes de pressão, deixando as bombas ligadas durante vários dias, monitorizando a evolução ao longo do tempo através de uma ligação a um computador, por sua vez, ligado ao controlador da bomba. Devido a uma falha num dos discos rígidos do computador, os dados relativos à evolução da pressão no interior da infra-estrutura de teste ao longo do tempo de evacuação foram perdidos e não foi possível, dentro do tempo de escrita desta dissertação, voltar a efectuar esta medição, nestas condições.

Na construção de um sistema de vácuo, ou sempre que um sistema não atinja a pressão para que foi calculado, é necessário detectar fugas. As fugas aparecem, com mais facilidade, em soldaduras e em todos os pontos onde haja ligações desmontáveis, mas podem também surgir devido a fracturas ou porosidades nas paredes do sistema. Sucede também que, embora o sistema aparente ter fugas, não as tenha. Poderão ser defeitos de construção, como bolsas de ar nas soldaduras ou poros no material, comunicando por orifícios muito pequenos com o sistema de vácuo. Estes defeitos vão aumentar o tempo de bombeamento e originar as chamadas fugas virtuais.

Para calcular a fuga de um sistema cujo volume é V (em litros, l), observa-se a evolução da pressão ao longo do tempo depois de o isolar do sistema de

bombeamento. Se a pressão subiu de dp (em milibar, mbar) no intervalo de tempo dt (em segundos, s), então a fuga f será:

$$f = \frac{dp}{dt} V \text{ [mbar l s}^{-1}\text{]}$$

Na prática o valor máximo de uma fuga é, em geral, fixado em 10% do débito do sistema à pressão de trabalho, o qual é definido pelo produto da capacidade de bombeamento, S (com unidades l s^{-1}), da bomba de vácuo, pela pressão máxima admissível para o sistema, p_{max} . Ou seja, a fuga máxima, f_{max} será definida por:

$$f_{max} = 0.1 S p_{max} \text{ [mbar l s}^{-1}\text{]}$$

A baixas pressões a velocidade de desgaseificação das paredes e juntas de vedação começa a ser importante em comparação com as fugas. Um sistema que possua uma fuga grande, a sua evolução de pressão no tempo pode ser visualizado na curva a tracejado da figura 5.1. Ou seja, a partir de determinado instante de tempo, o efeito da desgaseificação passa a ser inferior à fuga. Caso as fugas sejam pequenas, ao longo do tempo ver-se-á uma curva que irá nivelar-se, ou inclusive baixar, estando representado na linha a cheio da figura 5.1.[17]

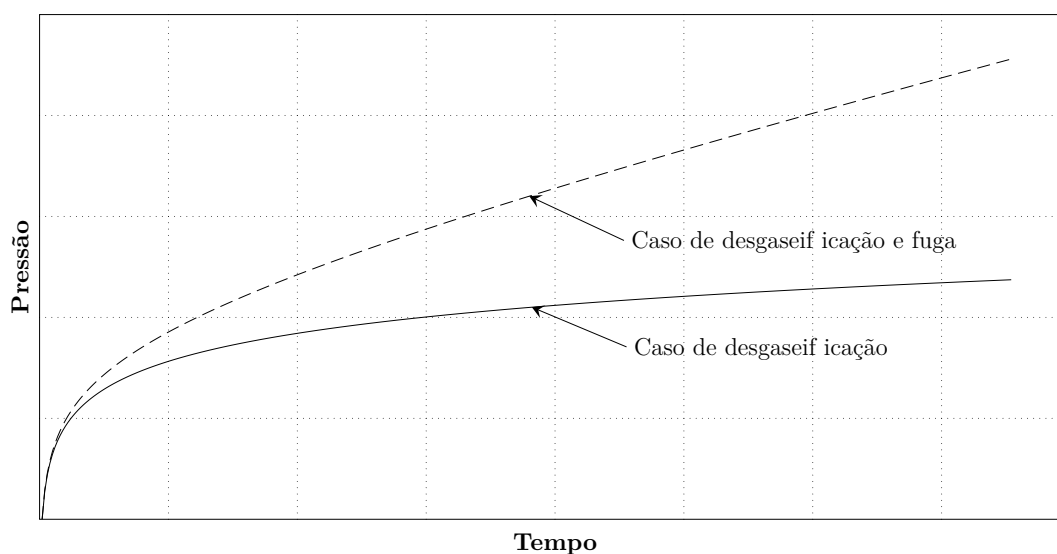


Figura 5.1: Evolução da pressão no tempo para um sistema com fuga: linha a tracejado, e um sistema sem fuga significativa.

No caso da infra-estrutura de teste, na primeira tentativa, verificou-se que a pressão não baixou dos 10^{-4} mbar, assumindo-se que deveria existir uma fuga no sistema. Para identificar o local onde a fuga existe, recorreu-se a um aparelho próprio denominado por detector de fugas.

No domínio do alto vácuo é necessário recorrer à maneira mais sensível de detectar fugas, isto é, à utilização de um espectrómetro de massa, sintonizado sobre uma dada massa, observando-se a variação de intensidade do pico corres-

pondente. Este detector de fugas utiliza o hélio, sendo que este gás é muito conveniente, porque sendo um gás raro na atmosfera não tem um valor elevado no espectro de fundo. Além disso, o hélio não é explosivo nem tóxico, nem contamina o detector e sendo um dos gases que se difunde mais facilmente, é óptimo para detectar fugas.

O detector de fugas foi instalado num tubo em “T” (no qual também está instalado o sensor de pressão) através de um tubo flexível. Na figura 5.2 não se encontra instalado o detector de fugas, mas mostra-se onde este foi conectado.

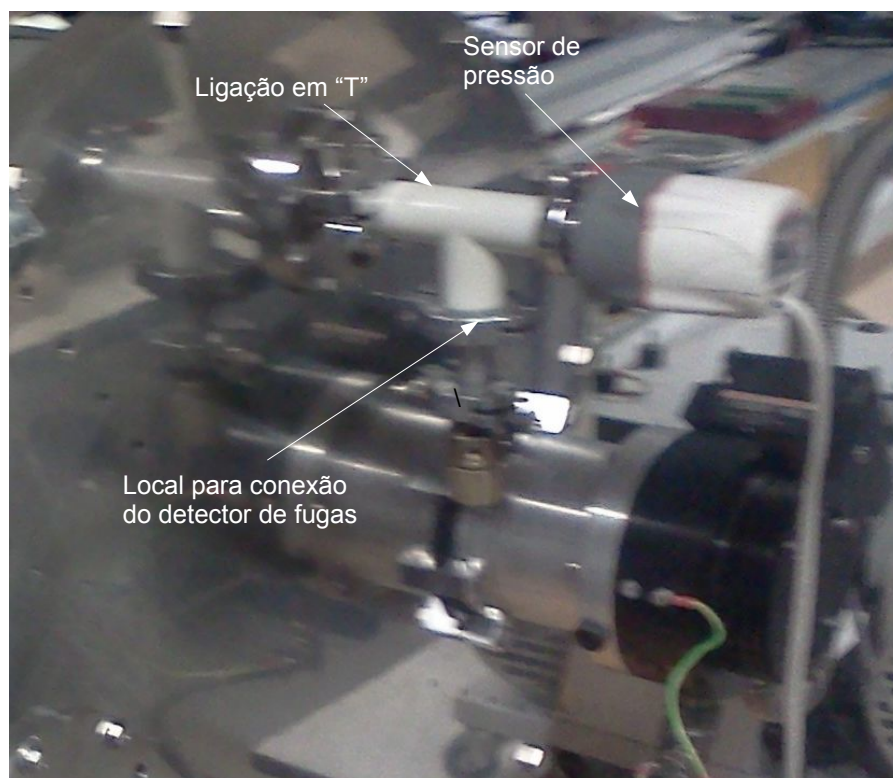


Figura 5.2: Local onde o detector de fugas foi conectado.

O detector de fugas incorpora no seu interior uma bomba de vácuo que permite atingir o nível de vácuo necessário para que as fugas possam ser detectadas, que no caso deste detector é de 18mbar. Este aparelho consegue detectar fugas de Hélio entre os 10^{-12} mbar $l s^{-1}$ aos 1 mbar $l s^{-1}$.

De forma a compreender-se melhor o processo de detecção de fugas, este encontra-se esquematizado na figura 5.3.

Estando o detector de fugas conectado com a infra-estrutura de teste, e num regime de vácuo adequado para a detecção de Hélio, utilizou-se uma pistola, conectada a uma garrafa com Hélio, que permite lançar pequenas quantidades de Hélio. Assim, para se detectarem fugas dispararam-se pequenas quantidades de Hélio nas juntas de vedação. Caso exista uma fuga, o Hélio penetrará na infra-estrutura de teste, que por sua vez, estando conectada ao detector de fugas, irá

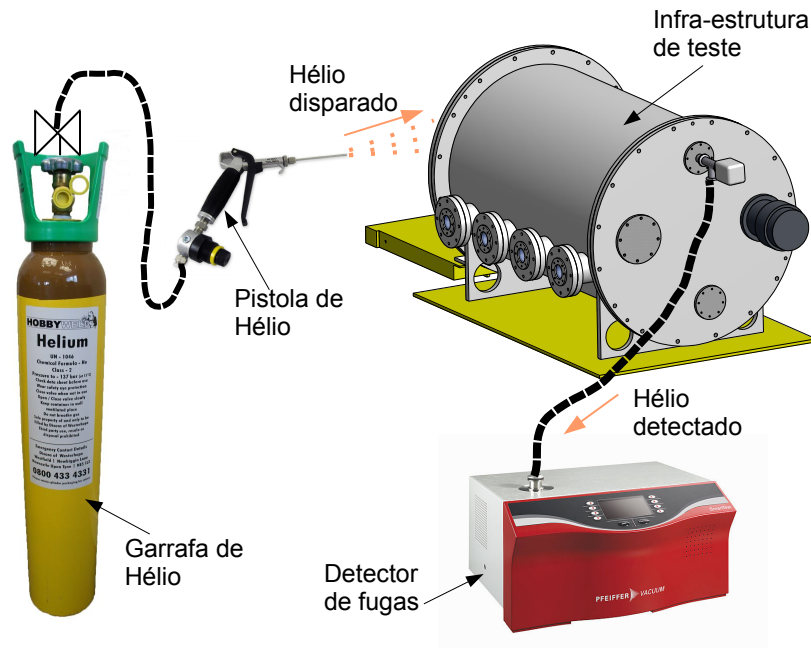


Figura 5.3: Esquematização do processo de detecção de fugas.

activar neste um alarme que indicará que foi detectado Hélio.

No teste de fugas efectuado na infra-estrutura de teste detectou-se uma fuga no tubo que efectua a alimentação do Azoto para o tanque de Azoto no interior da infra-estrutura de teste (ver figura 4.12). Este componente foi re-soldado, sendo que posteriormente não houve mais detecção de fugas aqui, nem em qualquer outro local da infra-estrutura de teste.

No que diz respeito a testes de pressão, foi então evacuada mais uma vez a infra-estrutura de teste, sendo que ao fim de 1 dia de bombeamento, e com as fitas de aquecimento ligadas, se obteve um nível de vácuo aceitável, na ordem dos 2×10^{-6} mbar.

5.2 Teste do sistema de criogenia

Finalmente, para validar o funcionamento da infra-estrutura de teste foi necessário testar a capacidade de arrefecimento do tanque de Azoto líquido, o qual é responsável pelo arrefecimento do detector e do analisador de feixes da câmara de aquisição.

O Azoto líquido é injectado no tanque através de um tubo numa das tampas da infra-estrutura de teste. Assim, por forma a verificar que o tanque de Azoto é capaz de atingir a temperatura desejada, injectou-se Azoto líquido para o seu interior recorrendo a uma garrafa de Azoto, a qual possui um regulador de pressão permitindo assim o fluxo do líquido para o interior da infra-estrutura de teste. Na figura 5.4 pode ver-se uma imagem desta montagem.

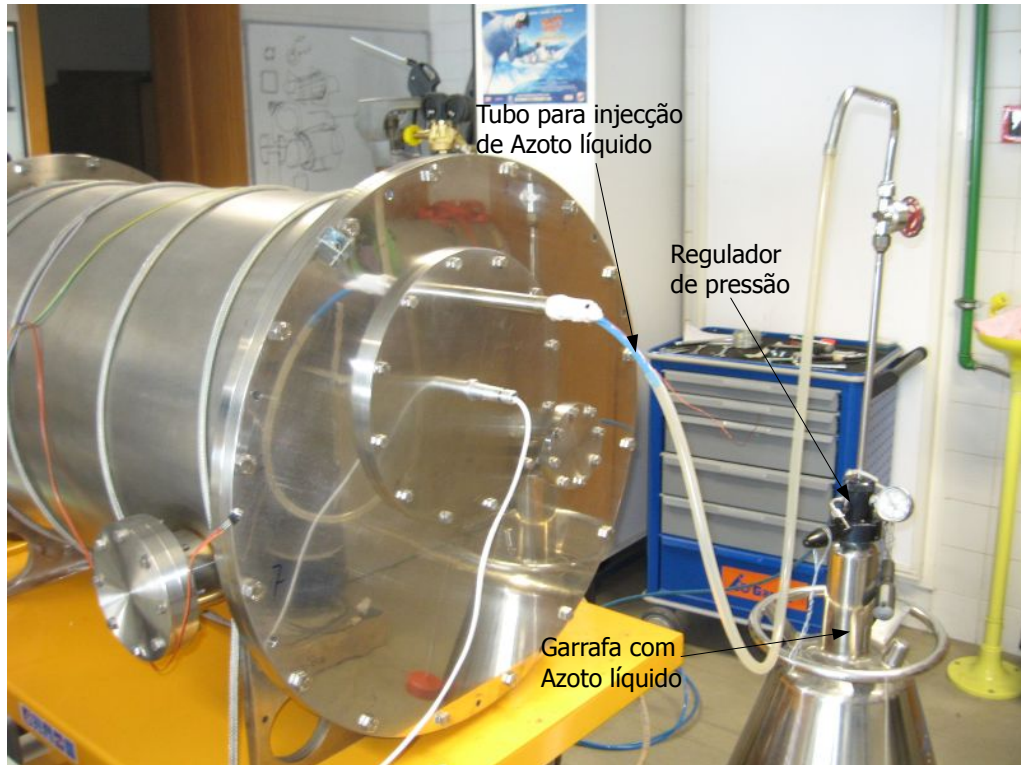


Figura 5.4: Imagem exemplificando a montagem para alimentação de Azoto líquido para o interior da infra-estrutura de teste.

Na figura 5.5 encontra-se a variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de injeção de Azoto líquido e conseqüente arrefecimento do tanque de Azoto, sendo que existe um sensor de temperatura numa das suas tampas.

Do gráfico da figura 5.5 podemos inferir a taxa de arrefecimento média partindo da regressão linear. Esta taxa de arrefecimento será dada simplesmente por dT/dt , ou seja, a variação da temperatura T ao longo do tempo t . Assim, neste caso, considerando o tempo em segundos, temos que $dT/dt \approx 0.0109\text{K s}^{-1}$ o que corresponde a uma taxa de arrefecimento de cerca de $1.82 \times 10^{-4}\text{K min}^{-1}$. Embora este número esteja abaixo da especificação para o gradiente máximo para arrefecimento da câmara de aquisição (2K min^{-1}), é bastante baixo e poderá ser otimizado caso se determine o caudal adequado.

5.2.1 Determinação do caudal para injeção de Azoto líquido

A capacidade térmica de um dado material, C , define a quantidade de calor, Q , que lhe é necessária fornecer para produzir neste uma determinada variação de temperatura ΔT , ou seja, $C = Q/\Delta T$, com unidades J K^{-1} .

Em contextos mais experimentais, é conveniente utilizar o calor específico de

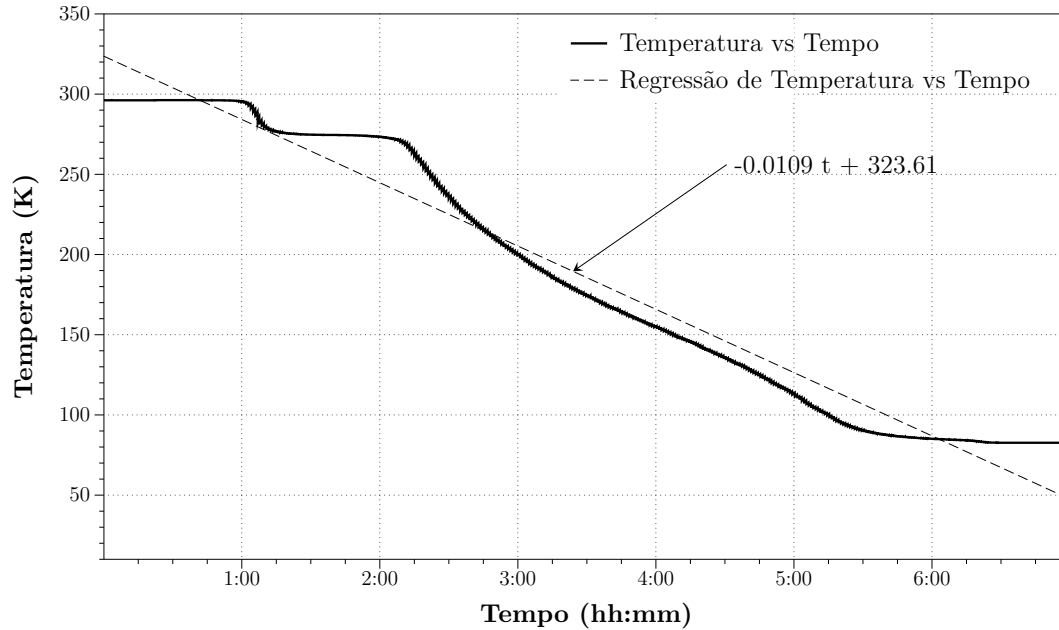


Figura 5.5: Variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de arrefecimento.

um determinado material, c , que exprime a capacidade térmica em relação à massa de um material específico, m , isto é, $c = C/m$, com unidades $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Assim, o calor Q (em Joules, J) que é necessário remover de um material com uma massa m , e calor específico c , sendo, por exemplo, arrefecido da temperatura T_1 até T_2 , com $\Delta T = T_1 - T_2$, é dado por:

$$Q = mc\Delta T$$

No caso do tanque de Azoto líquido, este tem um volume interior no qual será injectado o Azoto, V_i , de aproximadamente $V_i = 4.66\text{l}$. No que diz respeito à sua massa, m_t , o tanque tem aproximadamente $m_t = 6.35\text{kg}$. O calor específico do Aço Inoxidável é de aproximadamente $c = 510 \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Logo, a variação desde a temperatura ambiente $T_1 = 293\text{K}$ até à temperatura $T_2 = 80\text{K}$ corresponderá a uma necessidade calorífica de arrefecimento, Q_a , de:

$$Q_a = m_t c \Delta T = 6.35 \cdot 510 \cdot (293 - 80) \approx 689800.5 \text{ J}$$

Considerando que se pretende arrefecer o tanque a uma taxa máxima de 2K min^{-1} , baixar dos 293K até aos 80K demorará cerca de $(293 - 80)/2 = 106.5\text{min}$. A potência, P , define-se como sendo a quantidade de energia por unidade de tempo, isto é, $P = Q/\Delta t$, em que Δt é o intervalo de tempo durante o qual ocorre, neste caso, o arrefecimento. A potência é de geralmente expressa em unidades J s^{-1} , que corresponde à unidade Watt (W), logo, a potência que será necessária para arrefecer o tanque, P_a , será:

$$P_a = \frac{Q_a}{\Delta t} = \frac{689800.5}{60 \cdot 106.5} \approx 107.95 \text{ W}$$

O tanque terá também perdas para o exterior, sendo estas sob a forma de transferência de calor através dos fenômenos de condução e de radiação. Para serem contabilizadas estas perdas, arrefeceu-se o tanque até à temperatura de 80K e seguidamente retirou-se a alimentação de Azoto líquido. Desta forma, a temperatura do tanque subiu, desde os 80K até à temperatura ambiente 293K devido à evaporação continua do Azoto bem como do calor recebido por condução e radiação. Na figura 5.6 encontra-se a variação da temperatura ao longo do tempo durante este processo de aquecimento.

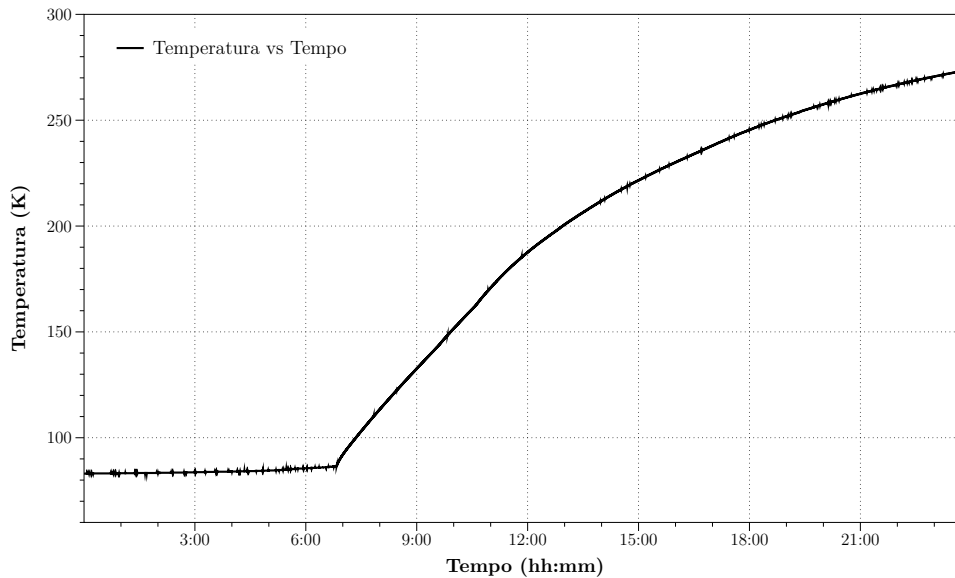


Figura 5.6: Variação da temperatura ao longo do tempo durante o processo de aquecimento (desde os 80K até à temperatura ambiente) do tanque de Azoto líquido.

Tal como se pode ver na figura 5.6, o tanque tardou cerca de 24 horas para restabelecer a temperatura ambiente. Do gráfico pode ver-se um patamar inicial com cerca de 7 horas no qual a temperatura se manteve em torno dos 80K, sendo que após este tempo, a temperatura começou a aumentar significativamente. Uma interpretação possível será que, durante estas 7 horas ocorreu a evaporação do Azoto líquido, sendo que posteriormente, irá ocorrer um balanço térmico gradual ao longo do tempo, no qual a inércia térmica do tanque de Azoto irá ser contrariada por efeitos de radiação e condução térmica provenientes da envolvente do tanque (desprezando-se efeitos de convecção pois o sistema encontra-se em vácuo).

A energia que o tanque irá receber para aquecer desde os 80K aos 293K, Q_p , será a mesma que cedeu ao arrefecer, ou seja, $Q_p = 689800.5\text{J}$. Mas neste caso, esta energia apenas será incorporada, tal como se pode ver no gráfico da figura 5.6, ao fim de 24 horas. Assim, a potência associada às perdas, P_p será:

$$P_p = \frac{Q_p}{\Delta t} = \frac{689800.5}{24 \cdot 60 \cdot 60} \approx 7.98 \text{ W}$$

Assim, a potência total que será necessária fornecer ao tanque de Azoto, P_t para ele arrefecer a uma taxa de 2K min^{-1} será a soma de P_a com P_p , ou seja:

$$P_t = P_a + P_p = 115.93 \text{ W}$$

Para líquidos criogénicos, a sua capacidade de arrefecer exprime-se pelo produto da sua densidade ρ e o seu calor latente de vaporização L_v , ou seja (ρL_v) , sendo que para o caso do Azoto líquido, este produto vem dado por: [4]

$$(\rho L_v)_{LN_2} = 44.7 \text{ W h l}^{-1}$$

O calor latente de vaporização é uma grandeza física que relaciona a quantidade de energia que, neste caso, o Azoto líquido receberá para mudar para o estado gasoso, e cujas unidades são J kg^{-1} .

Assim, para a potência $P_t = 115.93\text{W}$ associada ao tanque de Azoto, o caudal de Azoto líquido que irá evaporar, e que por sua vez será a quantidade necessária a introduzir no tanque de Azoto, \dot{m}_i , por forma a manter um arrefecimento à taxa de 2K min^{-1} será dado por:

$$\dot{m}_i = \frac{P_t}{(\rho L_v)_{LN_2}} = \frac{115.93}{44.7} \approx 2.61 \text{ l h}^{-1}$$

5.3 Considerações finais

Para uma melhor caracterização das condições de funcionamento da infra-estrutura de teste deveriam ter sido realizados testes adicionais.

Aquando da realização dos testes atrás descritos, a câmara de aquisição ainda não se encontrava construída. No que diz respeito a testes de vácuo, seria interessante avaliar o nível de desgaseificação que a câmara de aquisição iria introduzir ao sistema. Por outro lado, no que diz respeito a testes de criogenia, faltou definir a forma como o tanque de Azoto líquido estaria conectado à câmara de aquisição, ou seja, a forma como efectivamente seria arrefecida. A ideia inicial para efectuar esta transmissão de calor seria através de um componente metálico, por exemplo em aço inoxidável, alumínio ou cobre, que estará conectado ao tanque de Azoto líquido, numa das suas faces laterais, as quais contêm furações para este efeito.

5.3.1 Tempo de arrefecimento da câmara de aquisição

Recorrendo a um componente que liga o tanque de Azoto líquido à câmara de aquisição para o seu arrefecimento, comumente denominado na língua inglesa por *Cold-Finger*, seria necessário considerar efeitos térmicos extra, tais como o calor transmitido por condução e o calor transmitido por radiação.

A potência transmitida por condução P_{Cond} (em Watt) ao longo de um material com secção constante A e com um gradiente de temperatura dT/dx , é dado por:

$$P_{Cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Sendo k a condutividade térmica de um dado material com unidades $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, sendo esta aproximadamente 240 para o Alumínio e 400 para o Cobre. Considerando que o gradiente de temperaturas é uniforme pode escrever-se dT/dx sob a forma $\Delta T/L$, sendo L o comprimento do material condutor, ficando então:

$$P_{Cond} = -kA \frac{\Delta T}{L}$$

Note-se que a condutividade térmica varia com a temperatura, ou seja, $k = k(T)$.

Grande parte da transferência de calor será feita por radiação térmica, sendo que a potência irradiada P_{Rad} por um corpo com uma área A a uma temperatura absoluta T é dada por:

$$P_{Rad} = \epsilon \sigma AT^4$$

Em que $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzman e ϵ e a emissividade da superfície do material, sendo $\epsilon = 1$ para uma superfície perfeitamente negra e inferior a 0.1 para superfícies metálicas polidas.

Considere-se que se pretende arrefecer uma massa m , com calor específico c desde uma temperatura inicial T_i até à temperatura T_f . O calor necessário para o arrefecer, Q_a , será, tal como visto anteriormente, $Q_a = mc(T_i - T_f)$. Assim o tempo de arrefecimento Δt , será o rácio entre o calor que é necessário remover (Q_a) e a capacidade efectiva de arrefecimento, a qual é definida pela diferença entre a potência de condução ao longo do *Cold-Finger*, P_{Cond} e a potência recebida de volta ao corpo a arrefecer, P_r . Logo, o tempo de arrefecimento será:

$$\Delta t = \frac{Q_a}{P_{Cond} - P_r} = \frac{mc(T_i - T_f)}{(A/L)k(T_i - T_t) - P_r} \quad (5.1)$$

Sendo T_t a temperatura do tanque de Azoto líquido. A potência recebida P_r representa a radiação das paredes envolventes do sistema de vácuo bem como a potência recebida por condução através de outras ligações que possam existir.[4]

No caso da câmara de aquisição, tal como referido, o detector deverá ser arrefecido à taxa de 2K min^{-1} . Considerando $\Delta T = T_i - T_f$, então da equação (5.1) pode inferir-se que a taxa de arrefecimento $\Delta T/\Delta t$ será:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(A/L)k(T_i - T_t) - P_r}{mc} \quad (5.2)$$

Da equação (5.2) pode concluir-se que o calor removido por condução é governado por (A/L) e a condutividade k . Desta forma o dimensionamento destes

três parâmetros irá definir também a taxa com que o arrefecimento ao longo do tempo ocorrerá.

O arrefecimento não é uma função linear do tempo. Inicialmente o arrefecimento ocorre rapidamente, abrandando posteriormente devido ao calor proveniente por condução e radiação que se balança com o calor retirado.

5.3.2 Outros testes a realizar

5.3.2.1 Escudos de radiação

Para minimizar os efeitos da transmissão de calor por radiação pode reduzir-se a área das superfícies envolvidas e utilizar materiais cujas superfícies possuam emissividade muito baixas. Também é possível utilizar escudos de radiação que consistem em materiais que minimizam os efeitos de radiação, sendo estes colocados entre os elementos a arrefecer e a superfície interior do sistema em vácuo. Seria necessário testar ainda a instalação deste tipo de escudos no interior da infra-estrutura de teste de forma a minimizar as trocas de calor por radiação e assim tornar o arrefecimento um processo mais controlável, ou seja, mais independente do estado das superfícies que envolvem os elementos a arrefecer.

5.3.2.2 Sistema óptico de injeção para feixes

O principal objectivo da câmara de aquisição é analisar os feixes provenientes dos quatro telescópios do VLT. Logo, o teste mais importante a realizar com a câmara de aquisição será a verificação do correcto funcionamento de todo o sistema óptico. Para isso, como já referido anteriormente, existem quatro portas de entrada para injeção de feixes de luz. No momento da escrita desta dissertação a câmara de aquisição ainda não se encontrava completamente implementada, e por outro lado, seria ainda necessário definir ainda um sistema óptico para instalação na infra-estrutura de teste que permitisse injectar feixes que pudessem simular a luz proveniente dos telescópios.

Anexos

A. O parâmetro de Fried e a turbulência atmosférica

Uma onda proveniente de uma fonte distante penetra na Terra através da atmosfera, e a sua frente de onda é distorcida aleatoriamente por células de turbulência constituintes da atmosfera, cada uma com índices de refração ligeiramente diferentes. As propriedades de um campo de turbulência são descritas estatisticamente em termos de uma função chamada função de estrutura, $D_n(r)$, sendo o modelo mais adoptado o de Kolmogorov, o qual define a variância do índice de refração entre dois pontos, r_1 e r_2 da frente de onda, separados de uma distância $r = (r_1 - r_2)$. Assim esta função define-se por:[4]

$$D_n(r) = \langle |n(r_1) - n(r_2)|^2 \rangle = C_n^2(h) r^{2/3}$$

Sendo que os símbolos $\langle \rangle$ indicam a média do quadrado da diferença entre os índices de refração entre dois pontos. A resultante é que esta média é proporcional a r elevado à potência de $2/3$. O factor $C_n^2(h)$ é uma medida da intensidade da turbulência em função da altura h , e o seu valor pode variar entre $10^{-14}\text{m}^{-2/3}$ perto da superfície até $10^{-18}\text{m}^{-2/3}$ a uma altitude de aproximadamente 10km. A dependência de $C_n^2(h)$ com a altitude chama-se perfil de turbulência.

Pode caracterizar-se o tamanho de uma célula de turbulência através de um comprimento denominado por parâmetro de Fried, r_0 , sendo este a distância ao longo da qual a frente de onda não será significativamente perturbada. A expressão que define este parâmetro, foi deduzida por David L. Fried, e é dada por:

$$r_0(\lambda, z, h) = 0.185 \lambda^{6/5} (\cos z)^{3/5} \left[\int_0^{H_{max}} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}$$

Sendo, λ o comprimento de onda e z o ângulo de zénite. O factor $C_n^2(h)$ é integrado desde a superfície terrestre até à altura máxima pretendida, H_{max} . O significado físico do parâmetro de Fried, r_0 , é que este corresponderá à abertura de um sistema óptico com a mesma resolução que uma abertura apenas limitada por difracção na ausência de turbulência.

A não homogeneidade do índice de refração é essencialmente devida aos efei-

tos do vento. Se toda a atmosfera turbulenta se propagasse à mesma velocidade, então a distorção da frente de onda também se propagaria a essa velocidade. No entanto, a maior parte das vezes a frente de onda é afectada por mais do que uma camada de turbulência, sendo que cada uma destas se propaga a diferentes velocidades, e em diferentes direcções. No entanto, assume-se uma velocidade \bar{v} , sendo esta uma média pesada das velocidades nas várias camadas de turbulência.

A.1 Outros parâmetros importantes para óptica adaptativa

O conhecimento de r_0 por si só é insuficiente para determinar as correcções necessários para restabelecer a frente de onda original. O erro quadrático médio da distorção da frente de onda σ_1^2 , quando esta atravessa uma abertura com diâmetro d é dado por:

$$\sigma_1^2 = 1.03 \left(\frac{d}{r_0} \right)^{5/3}$$

Logo, uma propriedade importante de r_0 é que o erro quadrático médio associado à distorção da frente de onda, através de uma abertura circular de diâmetro $d = r_0$ é aproximadamente 1 radiano.

Por outro lado, o erro quadrático médio associado a um atraso τ , definido por σ_t^2 , no qual a fase da frente de onda é medida no tempo t mas a correcção é feita no tempo $t + \tau$, é dado por:

$$\sigma_t^2 = 6.88 \left(\frac{\bar{v}\tau}{r_0} \right)^{5/3} \quad (\text{A.1})$$

Podemos assim, utilizar a expressão (A.1) para se determinar um valor aceitável para o atraso τ_0 , o qual será um parâmetro importante, por exemplo, na definição do sistema de controlo que determinará as correcções a efectuar. Para um erro quadrático médio associado a um atraso da frente de onda de 1 radiano ($\sigma_t^2 = 1$), então poderá definir-se τ_0 por:

$$\tau_0 = (6.88)^{-3/5} \frac{r_0}{\bar{v}} = 0.314 \frac{r_0}{\bar{v}}$$

Este parâmetro também é conhecido como a constante temporal atmosférica. Normalmente, o seu valor ronda os milissegundos, por isso os efeitos de turbulência ocorrem numa escala de tempo muito rápida. Associado a este tempo, surge o tempo de exposição que um detector pode estar a captar a luz de uma estrela. Na figura A.1 mostra-se um esboço de possíveis imagens que seriam tiradas de um sensor variando o tempo de exposição e desenhando os perfis de irradiância no centro da imagem.

Se o tempo de exposição for inferior a τ_0 então irão surgir pequenas imagens, ou *speckles* (grãos claros e escuros criando um granulado) e o tamanho de

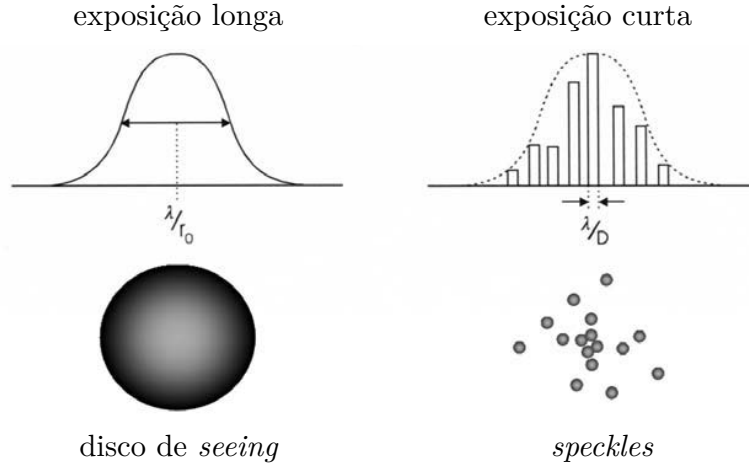


Figura A.1: Ilustração da imagem esperada num sensor variando o tempo de exposição, e definido os perfis de irradiância.

cada *speckle* será aproximadamente o tamanho de difracção λ/D . Fazendo outra exposição curta, surgirão novamente *speckles* aleatoriamente, diferindo da primeira exposição. Fazendo uma exposição temporal longa, todas as *speckles* irão combinar-se e formar um disco de *seeing* amplo com comprimento próximo de λ/r_0 .

Em astronomia, a observação de uma estrela ténue implica a utilização de uma estrela de referência para efectuar as medições e correcções das distorções causadas pela turbulência atmosférica na frente de onda. Assim, estas correcções só serão válidas se ambas as estrelas (a observar e a de referência) se encontrarem a uma distância adequada entre elas. À medida que a distância angular θ entre elas aumenta, a qualidade das correcções diminui. Neste caso, o erro quadrático médio associado a uma distância angular σ_θ^2 é dado por:

$$\sigma_\theta^2 = 6.88 \left(\frac{\theta H}{r_0 \cos z} \right)^{5/3}$$

Em que H é a distância média da camada de turbulência. Considerando, novamente, um erro quadrático médio para a distância angular de 1 radiano, isto é, $\sigma_\theta^2 = 1$ então teremos um parâmetro, commumente denominado por ângulo isoplanático θ_0 , dado por:

$$\theta_0 = (6.88)^{-3/5} \frac{r_0 \cos z}{H} = 0.314 \frac{r_0 \cos z}{H}$$

Ambos os parâmetros τ_0 e θ_0 dependem linearmente de r_0 , no entanto este tem uma dependência com comprimento de onda na ordem de $r_0 \sim \lambda^{6/5}$, o que significa que, para comprimentos de onda maiores, ambos estes parâmetros são maiores. [5] [4] [2]

B. Instrumentos instalados no VLT e VLTI

Cada UT incorpora três focos (dois focos Nasmyth e um Cassegrain), sendo que em cada um destes focos se encontram instalados vários instrumentos. Como os quatro UT (e AT) podem funcionar em modo interferométrico, também no laboratório subterrâneo se encontram instalados instrumentos que tiram partido destas capacidades do VLTI. Na tabela 1.1 encontram-se especificados quais os locais onde os vários instrumentos se encontram instalados, sendo que cada acrónimo dos instrumentos define a função destes. De forma breve, cada instrumento tem as seguintes funções:

- FORS2 (*F*Ocal *R*educer and *S*pectrograph): realiza espectroscopia de baixa resolução e pode efectuar captação de imagem na região do espectro electromagnético do visível;
- ISAAC (*I*nfrared *S*pectrometer And *A*rray *C*amera): sistema de captação de imagem e de espectrometria, que observa na gama de comprimentos de onda 1 a $5\mu\text{m}$;
- UVES (*U*ltra-violet and *V*isible *E*chelle *S*pectrograph): espectrografo de elevada dispersão, observando na gama de comprimentos de onda entre 300 a 1100nm;
- NACO: sistema de óptica adaptativa que produz imagens tão nítidas como se fossem tiradas no espaço;
- VIMOS (*V*isible *M*ulti-*O*bject *S*pectrograph): espectrógrafo multi-objecto e sistema de captação de imagem, que permite obter espectros de baixa resolução;
- FLAMES (*F*ibre *L*arge *A*rray *M*ulti-*E*lement *S*pectrograph): espectrógrafo com elevada resolução espectral, permitindo estudar simultaneamente centenas de estrelas em galáxias próximas;

- VISIR (*VLT Imager and Spectrometer for the mid-InfraRed*): permite efectuar captação de imagem com elevada sensibilidade em duas gamas de comprimentos de onda, de 8 a $13\mu\text{m}$ e de 16.5 a $24.5\mu\text{m}$;
- SINFONI: espectrógrafo que opera na gama de comprimentos de onda 1 a $2.5\mu\text{m}$, incorporando um módulo para óptica adaptativa;
- CRIRES (*CRyogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph*): possui uma elevada resolução espectral operando na gama de comprimentos de onda 1 a $5\mu\text{m}$;
- HAWK-I (*High Acuity Wide field K-band Imager*): é um sistema de captação de imagem na zona do infra-vermelho próximo, possuindo um elevado campo de visão;
- XSHOOTER: espectrógrafo com uma elevada gama de comprimentos de onda, desde o ultra-violeta até ao infra-vermelho próximo, desenhado para explorar as propriedades de fontes de luz raras, pouco usuais ou por identificar;
- MIDI (*MID-infrared Interferometric instrument*): instrumento interferométrico que opera no infra-vermelho próximo permitindo realizar fotometria e espectroscopia;
- AMBER (*Astronomical Multi-Beam combineR*): instrumento interferométrico que opera no infra-vermelho próximo para estudos fotométricos e espectroscópicos, combinando a luz de três telescópios.

C. Propriedades criogénicas dos materiais

Propriedades dos materiais como a condutividade térmica e o coeficiente de expansão térmica variam significativamente com a temperatura. Assim, é necessário fazer uma escolha adequada dos materiais no caso de estes serem utilizados em condições criogénicas. Materiais utilizados neste tipo de aplicações são por exemplo: o aço inoxidável do tipo 304, o alumínio do tipo 6061-T6, o teflon, também conhecido por politetrafluoretileno e o G10, o qual corresponde a uma epoxi reforçada com fibra de vidro. As propriedades referidas são então analisadas para estes materiais. Além destes materiais também se analisa algumas propriedades da sílica fundida, sendo esta um elemento crucial em aplicações ópticas.

C.1 Coeficiente de expansão térmica linear

O coeficiente de expansão térmica linear, $\alpha_L(T)$, descreve a variação das dimensões lineares de um dado material devido a variações na temperatura. Este pode ser descrito por:

$$\alpha_L(T) = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (\text{C.1})$$

Em que L é a dimensão linear (por exemplo o comprimento) e dL/dT corresponde à variação linear da dimensão por unidade de temperatura. Assim, a variação da dimensão linear pode ser estimada por:

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \alpha_L \Delta T \quad (\text{C.2})$$

A expressão (C.2) será válida se o coeficiente de expansão térmica não variar muito com a variação de temperatura ΔT . Caso este varie, então a equação (C.1) terá que ser integrada.

A maioria da literatura disponibiliza o coeficiente de expansão linear térmica integrado, definido pela percentagem da variação de uma dada dimensão em relação à dimensão original medida à temperatura ambiente, por exemplo, a 293K. Este pode ser definido por:

$$\frac{L_T - L_{293}}{L_{293}}$$

Sendo L_T a dimensão a uma dada temperatura T e L_{293} a dimensão à temperatura ambiente de 293K. O *National Institute of Standards and Technology* (NIST), publicou no ano 2000 uma base de dados de propriedades criogénicas de diversos tipos de materiais que definem os seus comportamentos quando arrefecidos a temperaturas criogénicas. Os resultados são baseados em testes feitos balizados por quatro gamas de temperaturas: abaixo dos 4K; de 4K a 77K; de 77K a 300K e de 300K até ao ponto de fusão.

Os resultados experimentais obtidos pelo NIST permitiram escrever uma equação geral para o coeficiente de expansão linear térmica integrado $(L_T - L_{293})/L_{293}$, expresso em percentagem, é dada por:

$$\frac{L_T - L_{293}}{L_{293}} = \left(\sum_{n=0}^4 c_n T^n \right) \times 10^{-8}$$

Em que os coeficientes c_n , com $n = 0, \dots, 4$, se encontram na tabela C.1. Estes coeficientes foram determinados para uma gama de temperaturas entre os 4K e os 300K.

Tabela C.1: Coeficientes c_n para o coeficiente de expansão linear térmica integrado.

c_n	Aço inox. 304	Alumínio	Teflon	G10
c_0	-2.9546×10^2	-4.1272×10^2	-2.165×10^3	-7.180×10^2
c_1	-4.0518×10^{-1}	-3.0640×10^{-1}	3.278×10^0	3.741×10^{-1}
c_2	9.4014×10^{-3}	8.7960×10^{-3}	-8.218×10^{-3}	8.183×10^{-3}
c_3	-2.1098×10^{-5}	-1.0055×10^{-5}	7.244×10^{-5}	-3.948×10^{-6}
c_4	1.8780×10^{-8}	0	0	0

Na figura C.1 encontra-se representado graficamente a variação do coeficiente de expansão linear térmica com a temperatura.

C.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica, k , de um material exprime a capacidade deste conduzir calor. A transferência de calor em materiais com condutividade térmica elevada ocorre a uma taxa mais elevada do que num material com condutividade térmica baixa. A expressão geral utilizada para o cálculo da condutividade térmica é:

$$\log(k) = \sum_{n=0}^8 c_n (\log T)^n$$

Em que os coeficientes c_n , com $n = 0, \dots, 8$, se encontram na tabela C.2. Estes

coeficientes foram determinados para uma gama de temperaturas entre os 4K e os 300K. Na figura C.2 representa-se a variação de k com a temperatura. [18]

Tabela C.2: Coeficientes c_n para o coeficiente de condutividade térmica.

c_n	Aço inox. 304	Alumínio	Teflon	G10
c_0	-1.4087	0.07918	2.7380	-4.1236
c_1	1.3982	1.09570	-30.677	13.788
c_2	0.2543	-0.07277	89.430	-26.068
c_3	-0.6260	0.08084	-136.99	26.272
c_4	0.2334	0.02803	124.69	-14.663
c_5	0.4256	-0.09464	-69.556	4.4954
c_6	-0.4658	0.04179	23.320	-0.6905
c_7	0.1650	-0.00571	-4.3135	0.0397
c_8	-0.0199	0	0.33829	0

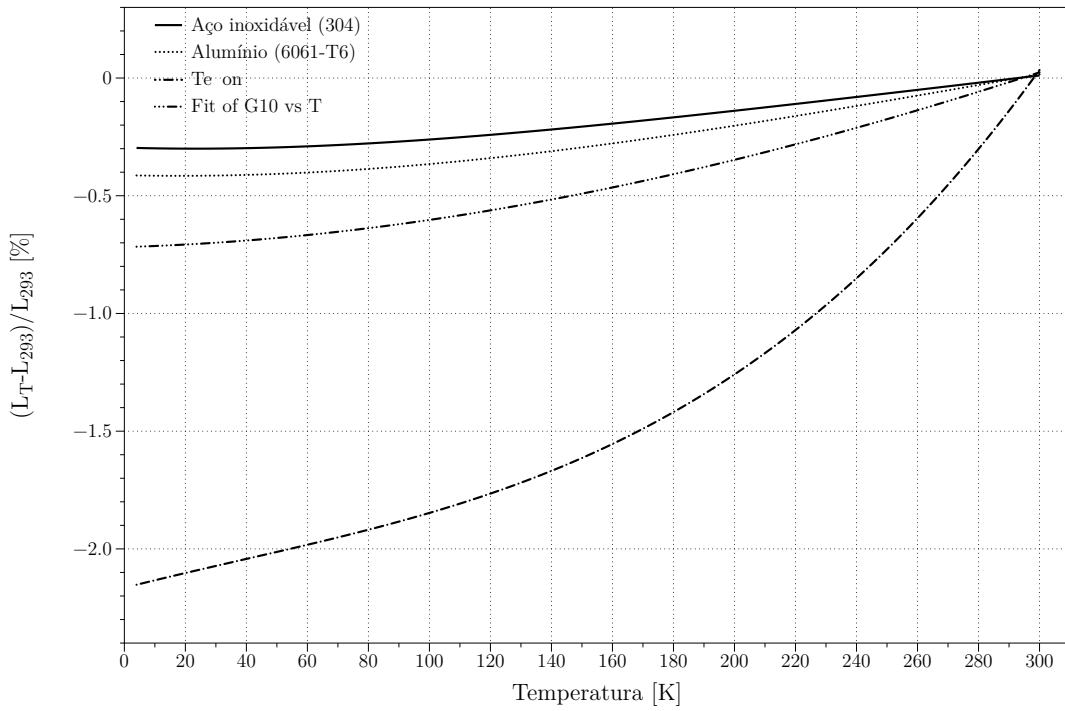


Figura C.1: Variação do coeficiente de expansão linear térmica integrado com a temperatura.

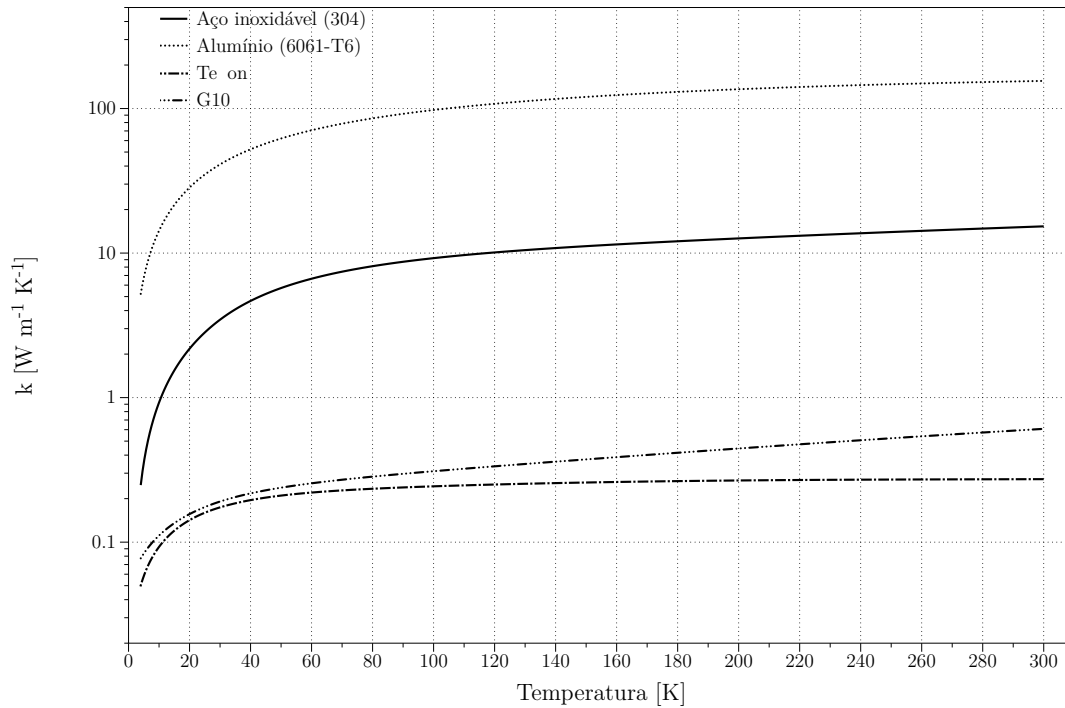


Figura C.2: Variação do coeficiente de condutividade térmica com a temperatura.

C.3 Variação das propriedades da sílica fundida com a temperatura

C.3.1 Variação do índice de refração com a temperatura

Um dos aspectos mais importantes para componentes ópticos é o índice de refração e a sua variação com o comprimento de onda, isto é, a sua dispersão. A sílica fundida quando se encontra a temperaturas criogénicas irá sofrer uma variação no seu índice de refração, em função do comprimento de onda e também da temperatura. A relação empírica entre o índice de refração, n , de um dado meio transparente (como a sílica fundida), com o comprimento de onda, λ , e a temperatura, T , é dada pela equação de Sellmeier dependente da temperatura. Esta relação fornece-nos a dispersão da luz num dado meio, e para um modelo de 4ª ordem para as temperaturas, sendo esta será dada por:

$$n^2(\lambda, T) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i(T) \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \quad (\text{C.3})$$

Em que:

$$S_i(T) = \sum_{j=0}^4 S_{ij} \cdot T^j \quad (C.4)$$

$$\lambda_i(T) = \sum_{j=0}^4 \lambda_{ij} \cdot T^j \quad (C.5)$$

Em que S_{ij} e λ_{ij} são os coeficientes de Sellmeier, que para a sílica fundida do tipo Corning 7980 se encontram especificados na tabela C.3. [19]

Tabela C.3: Coeficientes para a equação de Sellmeier dependente da temperatura para a sílica fundida do tipo Corning 7980.

T^j	S_1	S_2	S_3	λ_1	λ_2	λ_3
T^0	1.10127E+00	1.78752E-05	7.93552E-01	-8.90600E-02	2.97562E-01	9.34454E+00
T^1	-4.94251E-05	4.76391E-05	-1.27815E-03	9.08730E-06	-8.59578E-04	-7.09788E-03
T^2	5.27414E-07	-4.49019E-07	1.84595E-05	-6.53638E-08	6.59069E-06	1.01968E-04
T^3	-1.59700E-09	1.44546E-09	-9.20275E-08	7.77072E-11	-1.09482E-08	-5.07660E-07
T^4	1.75949E-12	-1.57223E-12	1.48829E-10	6.84605E-14	7.85145E-13	8.21348E-10

C.3.2 Coeficiente de expansão linear térmica

O coeficiente de expansão linear, $\alpha_L(T)$, para a sílica fundida pode ser determinado através da expressão empírica seguinte:

$$\frac{\alpha_L(T)}{10^{-6}} = a \left(\frac{b}{T} \right)^c \frac{\exp(b/T)}{(\exp(b/T) + 1)^2} + d \left(\frac{e}{T} \right)^2 \frac{\exp(e/T)}{(\exp(e/T) - 1)^2}$$

Sendo: $a = -4.22 \pm 0.07$, $b = 35.5 \pm 0.8$, $c = 0.335 \pm 0.015$, $d = 1.253 \pm 0.022$ e $e = 535 \pm 9$. Na figura C.3 encontra-se o gráfico que mostra a variação de $\alpha(T)$ com a temperatura. [20]

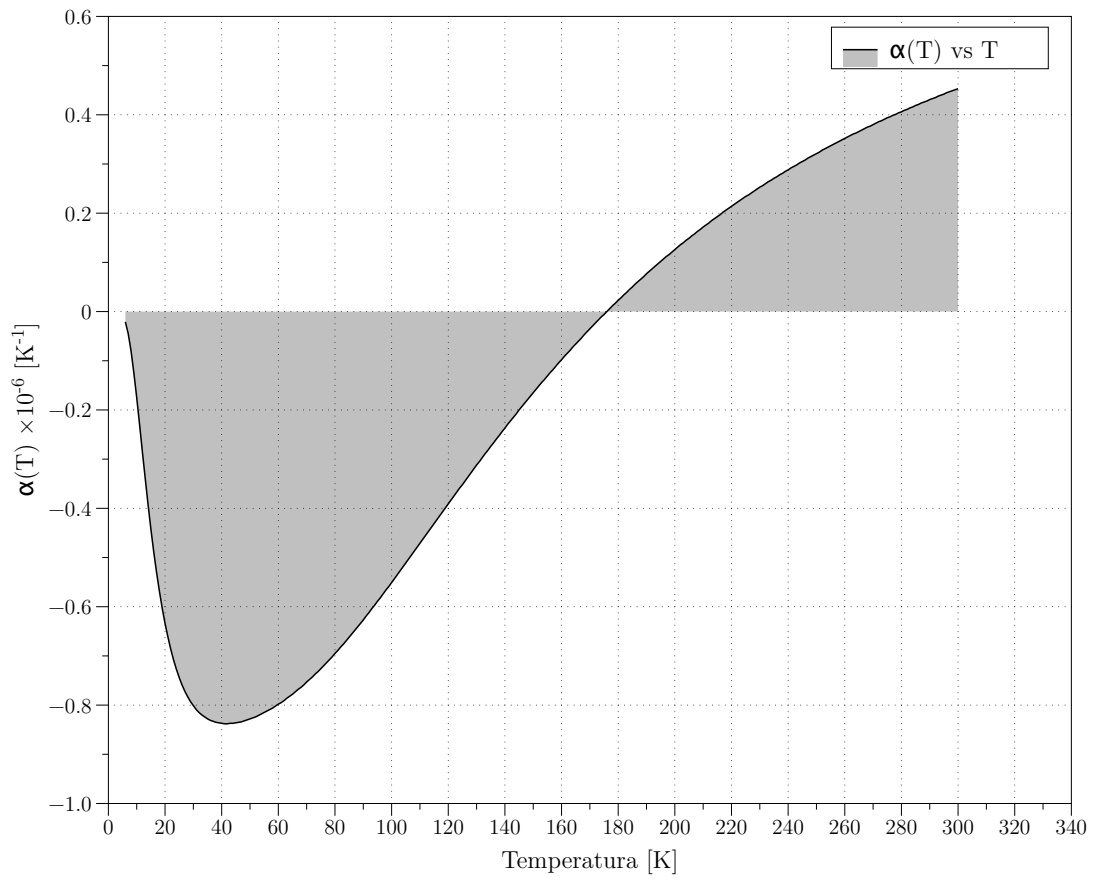


Figura C.3: Variação do coeficiente de expansão linear térmica da sílica fundida com a temperatura.

D. Descrição teórica de vázio residual

Um determinado volume diz-se em vácuo quando a densidade de moléculas nele existente é inferior à que se encontra na atmosfera a pressões e temperaturas normais. Assim, para se medir o grau de vácuo utiliza-se a pressão p , que no Sistema Internacional (SI) é definido pelo *Pascal* (Pa), sendo este igual à força de $1 N/m^2$.

Em algumas aplicações (que não envolvam uma força), a particularidade que torna o vácuo adequado não é principalmente o seu nível de pressão, a qual é causada pelos impactos das moléculas de um gás nas superfícies que as rodeiam, mas o estado de rarefacção do gás, sendo este medido pelo número de moléculas que existem num dado volume, e especificado pelo número de moléculas por unidade de volume, n . Logo, é este parâmetro n que determina quão longe um feixe de electrões ou átomos neutros poderão movimentar-se através do gás (que se encontra a baixa pressão) sem serem seriamente atenuados, ou quão rápido uma superfície limpa é contaminada por bombardeamento molecular. No entanto, a medição da pressão, p , de um sistema de vácuo e a determinação da quantidade de moléculas por unidade de volume n , estão relacionadas pela equação fundamental $p = nkT$, na qual k é a constante de Boltzmann¹ e T a temperatura, logo p é directamente proporcional a n , fornecendo uma medida adequada para a medição do vácuo.

Os sistemas de vácuo são, actualmente, fundamentais em diversos processos industriais, como por exemplo na produção de ligas metálicas de elevada pureza, fármacos, *coatings* ópticos, etc. Estes sistemas têm também um papel fundamental ao nível da investigação científica, pois muitos dos progressos em diversas áreas, tais como em física de partículas, fusão nuclear, nanotecnologias, etc.², dependem da criação e controlo de condições de vácuo.[21]

¹ $k = 1.381 \times 10^{-23} J K^{-1}$

²Os sistemas de vácuo tornaram-se mais conhecidos aquando da sua utilização para fabricar a lâmpada incandescente, com o objectivo de proteger o filamento eléctrico da degradação química.

D.1 Teoria cinética dos gases

Os diferentes estados de agregação da matéria correspondem ao maior ou menor grau de liberdade das moléculas. Assim, no estado sólido as moléculas encontram-se muito próximas umas das outras formando com frequência estruturas ordenadas - redes cristalinas. As forças entre as moléculas são, neste caso, de tal modo intensas que elas pouco se afastam da posição de equilíbrio. As oscilações à volta da posição de equilíbrio estão relacionadas com a temperatura do sólido e serão tanto maiores quanto mais alta for essa temperatura.

Aumentando a temperatura, isto é, comunicando mais energia às moléculas estas podem mesmo afastar-se das posições fixas destruindo-se então a estrutura sólida. Se se mantiverem forças de coesão entre elas, diz-se que a substância se encontra no estado líquido. Elevando ainda mais a temperatura, as moléculas podem adquirir energia cinética suficiente para abandonar a superfície do líquido passando assim para o estado gasoso. As substâncias que à temperatura e pressão normais estão no estado gasoso chamam-se gases. Nas substâncias no estado sólido ou líquido existem sempre alguns átomos ou moléculas com energia suficiente para se libertarem para o estado gasoso. Por outro lado, no seu movimento aleatório no estado gasoso, algumas destas moléculas voltarão a chocar com a massa sólida ou líquida sendo recapturadas. Os átomos ou moléculas no estado gasoso constituem o vapor da substância. Aumentando a temperatura, o número de moléculas no estado gasoso aumenta também.

No estado gasoso as forças entre as moléculas são mais fracas e tornam-se mais importantes as interações por meio de colisões. O número de colisões depende do número médio de moléculas presentes por unidade de volume, isto é, da densidade numérica e da energia das moléculas. Esta energia está relacionada com a temperatura do gás.[17]

A teoria cinética dos gases ideais, que descreve os fenómenos anteriores, foi desenvolvida primeiramente por Clausius, Maxwell e Boltzmann, sendo que vários resultados daquela teoria são de elevada importância para a descrição física de um estado de vácuo.

D.1.1 Distribuição de Maxwell-Boltzmann para velocidades moleculares

Considerando-se um gás ideal do qual N moléculas deste estão contidas num volume V , então a densidade de moléculas num dado volume será $n = N/V$. Neste contexto, a teoria cinética dos gases tem por base as seguintes considerações:

- i) O número de moléculas é suficientemente grande para que, num volume infinitesimal dV do gás, o número de moléculas constitui um conjunto típico do gás como um todo. Deste modo todas as direcções de movimento são igualmente prováveis, e toda a gama de velocidades encontradas no gás como um todo encontra-se representada;

- ii) As moléculas comportam-se como esferas com superfície lisa e dura, e quando colidem umas com as outras seguem as leis da mecânica clássica para colisões elásticas;
- iii) Não existem outras forças envolvidas na interacção entre as moléculas, logo, após uma colisão, estas movimentam-se em linha recta a uma velocidade constante resultante do processo de colisão (constante até ocorrer outra colisão);
- iv) As colisões com superfícies ou outras regiões delimitadoras são também elásticas, sendo as superfícies também consideradas lisas;
- v) Não existe distinção entre as três direcções para as velocidades, ou seja, pode considerar-se uma isotropia no que diz respeito às velocidades.[21]

A distribuição de Maxwell-Boltzmann descreve a probabilidade de as moléculas de um gás terem um dado valor de velocidade, em função da temperatura a que se encontram e da massa das moléculas. Esta distribuição (que possui uma forma Gaussiana) é definida pela função $f(v_i)$, que numa dada direcção de velocidade v_i , com $i = x, y, z$, será dada por:

$$f(v_i) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{m}{2kT}v_i^2}$$

Uma ideia base da teoria de probabilidades é que para acontecimentos independentes, a probabilidade será a multiplicação das probabilidades individuais desses acontecimentos. Considerando as três direcções independentes para o vector velocidade dadas por v_x , v_y e v_z , teremos então que:

$$f(v_x, v_y, v_z) = f(v_x)f(v_y)f(v_z)$$

Logo, para todas as direcções a distribuição para o vector das velocidades será:

$$f(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{m}{2kT}(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}$$

Definindo o elemento infinitesimal $d^3v = dv_x dv_y dv_z$ então, pode afirmar-se que a quantidade $f(v_x, v_y, v_z) d^3v$ irá corresponder à probabilidade de uma molécula ter velocidade entre v_x e $v_x + dv_x$, v_y e $v_y + dv_y$ e v_z e $v_z + dv_z$.

Escrevendo a velocidade em coordenadas esféricas (isto é convertendo de (v_x, v_y, v_z) para (v, θ, ϕ)), e considerando que $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$, então o elemento d^3v passa a ser[22]:

$$d^3v = v^2 \sin \theta dv d\theta d\phi \quad (\text{D.1})$$

Tal como foi referido anteriormente, considera-se o caso isotrópico para as velocidades, logo pode definir-se a função distribuição do módulo da velocidade por $f(v)$, ou seja, para $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$. Assim, $f(v)$ será:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{m}{2kT}v^2} \quad (\text{D.2})$$

A probabilidade de encontrar uma partícula com o módulo da velocidade entre v e dv será então dado por $f(v)d^3v$, que considerando (D.1), ficará:

$$f(v)d^3v = f(v)v^2 \sin\theta d\theta d\phi dv \quad (\text{D.3})$$

Assim, integrando d^3v em todo o ângulo sólido³ virá::

$$f(v)d^3v = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m}{2kT}v^2} dv$$

A soma feita através da integração de todas as coordenadas angulares resultará na área de uma esfera, cujo elemento radial dv será a espessura da casca esférica. Assim, resultará numa nova distribuição que é apenas função da velocidade radial v , e que considera todas as direcções espaciais. A nova função distribuição para o módulo da velocidade, $F(v)$, é definida por forma a que $F(v)dv$ forneça a probabilidade de uma molécula ter o módulo da velocidade entre v e $v + dv$, ou seja:

$$F(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m}{2kT}v^2} \quad (\text{D.4})$$

O valor máximo de $F(v)$, determinado através da solução de $dF(v)/dv = 0$, corresponderá à velocidade mais provável de uma molécula, v_p , dado por:

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (\text{D.5})$$

Na figura D.1 encontra-se representada a distribuição $F(v)$ para moléculas de ar a temperaturas de $273^\circ K$, $298^\circ K$ e $673^\circ K$. Tal como se pode ver, a curva de probabilidade aumenta desde zero até ao máximo, correspondendo à velocidade mais provável, v_p , decaindo depois à medida que o termo v^2 da exponencial se torna dominante.[23]

Pode também, com base na função distribuição de velocidades, determinar-se a velocidade média das moléculas, \bar{v} , sendo esta dada por:

$$\bar{v} = \int_0^\infty vF(v)dv = \frac{2}{\sqrt{\pi}}v_p = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (\text{D.6})$$

Outra quantidade útil será a velocidade quadrática média, $\overline{v^2}$, que de forma análoga ao cálculo anterior, virá:

³Na expressão do elemento d^3v surge a definição de ângulo sólido $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, que integrando será $\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi$

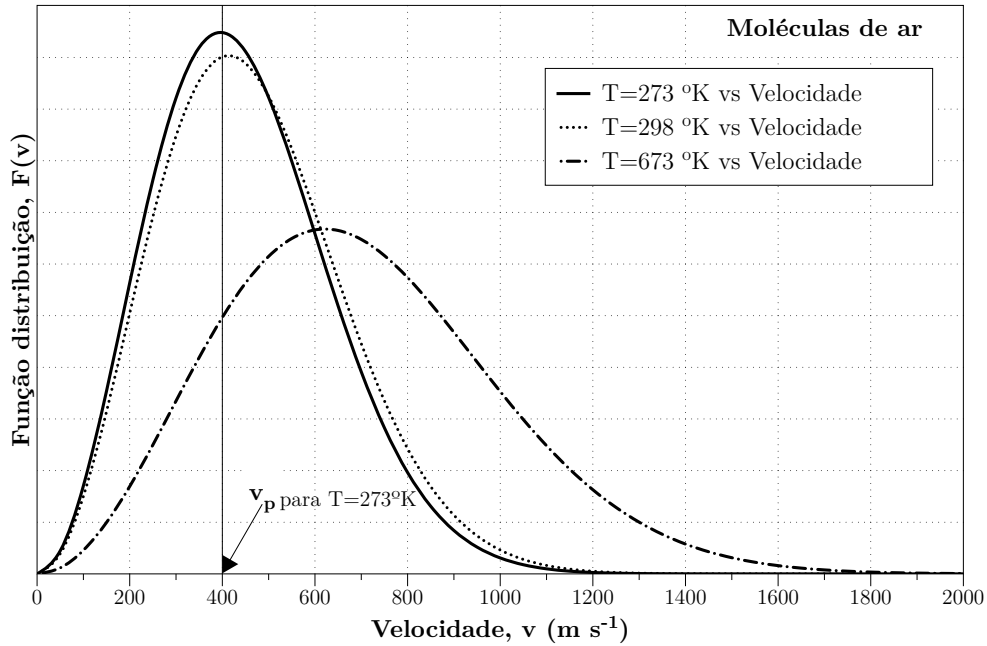


Figura D.1: Distribuição de velocidades para moléculas de ar a temperaturas para várias temperaturas.

$$\overline{v^2} = \int_0^\infty v^2 F(v) dv = \frac{3}{2} v_p^2 = \frac{3kT}{m} \tag{D.7}$$

D.1.2 Taxa de impacto molecular

Do número total de moléculas N , e tendo em conta todas as direcções, uma fracção dN/N de moléculas irá ter velocidades entre v e $v + dv$, ou seja, teremos que $dN = N f(v) dv$. Dividindo N pelo volume total V , por forma a ter um número por unidade de volume, teremos então $N/V = n$ - número de moléculas por unidade de volume.[21]

Analisando a figura D.2, considera-se que a taxa de impacto molecular será o número de moléculas por unidade de área e por unidade de tempo que atravessam um elemento de superfície dS , perpendicular, neste caso, ao eixo dos zz .

O volume do cilindro representado na figura D.2 será dado por $dS \times v dt \cos \theta$, sendo que contém muitas moléculas, mas apenas as que possuem a direcção de θ e com velocidades entre v e $v + dv$ é que irão atingir dS no instante dt . [23]

Define-se taxa de impacto molecular, J , como sendo o número de moléculas por unidade de área, por unidade tempo, ou seja, com unidades $[\#mol m^2 s^{-1}]$, em que $[\#mol]$ é o número total de moléculas, ou seja, N . Através de uma análise dimensional, pode escrever-se a taxa de impacto molecular como sendo [24],[22]:

$$J = \frac{1}{V} \int_0^\infty v_z dN \tag{D.8}$$

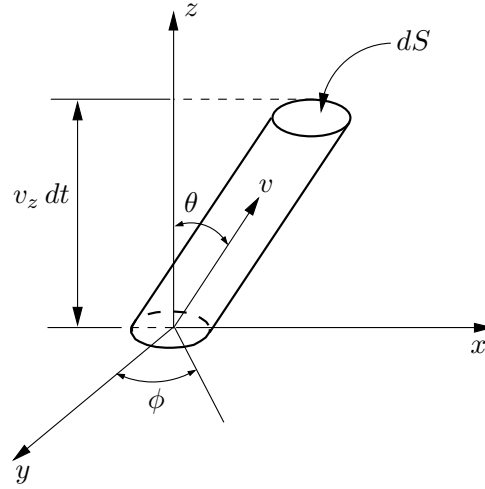


Figura D.2: Taxa de impacto molecular através da superfície dS .

Em que V é o volume total em consideração. Tal como se referiu, o número de moléculas, dN , com velocidade numa dada direcção entre v e $v + dv$ pode ser escrito como:

$$dN = N f(v) d^3v \quad (\text{D.9})$$

Anteriormente definiu-se que o número total de moléculas por unidade de volume é $n = N/V$ e que $d^3v = v^2 \sin \theta d\theta d\phi dv$. Substituindo $f(v)$ pela expressão (D.2), e sabendo que $v_z = v \cos \theta$, integrando resulta:

$$J = \pi n \int_0^\infty \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^3 e^{-\frac{m}{2kT}v^2} dv = \frac{n}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

Que comparando com a expressão (D.6) para a velocidade média, \bar{v} , resultará finalmente que a taxa de impacto molecular será:

$$J = \frac{n}{4} \bar{v} \quad (\text{D.10})$$

D.1.3 Pressão e densidade molecular

A pressão exercida por um gás, por exemplo, dentro de um recipiente nas suas paredes, é causada pela transferência de momento linear das moléculas (com massa m e velocidade v) para as paredes. Considerando colisões elásticas das moléculas com as paredes, o módulo da velocidade antes e após as colisões permanece inalterado. Enquanto que a componente tangencial à superfície da parede permanece também inalterada, a componente normal inverte o seu sinal, por exemplo, de v_z para $-v_z$. Assim, a variação de momento linear, $\Delta\mu$, será neste caso será dada por[23]:

$$\Delta\mu = \mu_i - \mu_f = mv_z - (-mv_z) = 2mv_z \quad (\text{D.11})$$

Sendo μ_i e μ_f os momentos lineares inicial e final, respectivamente. As unidades de pressão serão as de força por unidade de área, isto é, $[N m^{-2} = kg m s^{-2}]$, e efectuando, uma análise dimensional pode definir-se que o elemento diferencial de pressão dp se define por:

$$dp = \Delta\mu dJ \quad (\text{D.12})$$

Em que, $dJ = (1/V) v_z dN$ é o elemento diferencial da taxa de impacto molecular, determinado anteriormente. A pressão pode então ser entendida como a transferência de momento por unidade área e de tempo de todas as moléculas que se encontram num cilindro de base dS e altura $v_z dt$ (ver figura D.2). Substituindo dJ , (D.11) e (D.9) em (D.12) teremos então que:

$$p = 2nm \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} v^4 e^{-\frac{m}{2kT}v^2} \sin\theta \cos^2\theta d\theta d\phi dv \quad (\text{D.13})$$

Considerando uma solução em função da velocidade média quadrática de cada molécula, $\overline{v^2}$, o integral em (D.13) resultará em:

$$p = \frac{1}{3}nm\overline{v^2} \quad (\text{D.14})$$

De notar que a quantidade nm é apenas a densidade do gás ρ .

A quantidade $\overline{v^2}$ relaciona-se com a energia cinética por molécula. Da equação (D.7) temos uma expressão para $\overline{v^2}$ em função da temperatura T e da constante de Boltzmann, que substituindo em (D.14) levará a:

$$p = nkT \quad (\text{D.15})$$

Evidentemente, da equação (D.14) e (D.15) teremos que:

$$\frac{1}{3}nm\overline{v^2} = nkT$$

Logo, cancelando n e re-arranjando a expressão anterior, virá finalmente que:

$$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \quad (\text{D.16})$$

A energia cinética média por molécula é de $(3/2)kT$, e a energia $(1/2)kT$ pode ser associada a cada um dos três graus de liberdade para movimento de uma molécula. Demonstrou-se desta forma que a pressão de um gás é directamente proporcional à temperatura absoluta e à densidade de moléculas.[21]

D.1.4 Livre percurso médio

O último resultado a ser derivado será o livre percurso médio de uma molécula, λ , o qual define a distância média percorrida por uma molécula entre sucessivas colisões com outras. Focando apenas uma das moléculas sob a forma de *esfera rígida* com um diâmetro d pode construir-se um disco imaginário de raio d , consequentemente com uma área $\sigma = \pi d^2$. Este disco contém o centro da molécula e é perpendicular à direcção de movimento da molécula. Tendo em conta a figura D.3, imagine-se que a molécula ao movimentar-se uma distância l , irá *desenhar* um cilindro de volume σl ao longo do espaço, e o número de moléculas cujos centros estejam contidos neste cilindro será o equivalente ao número de colisões que a molécula em movimento irá sofrer.

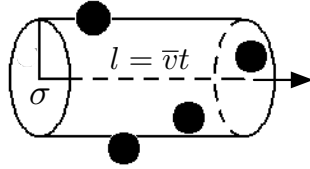


Figura D.3: Geometria considerada para determinação do livre percurso médio de uma molécula.

Cada colisão irá, evidentemente, alterar a direcção do movimento e a velocidade, logo a sua trajectória seria um conjunto complexo de secções lineares não alinhadas. Considerando que a distância percorrida pela molécula é $\bar{v}t$, que o volume do cilindro *desenhado* é $\pi d^2 \bar{v}t$ e que n é o número de moléculas por unidade de volume, então livre percurso médio pode definir-se por[21]:

$$\lambda \approx \frac{\bar{v}t}{n\pi d^2 \bar{v}t} = \frac{1}{n\pi d^2}$$

Este resultado exprime-se como aproximado porque este argumento incorpora uma falha: ignora o movimento das outras moléculas. A frequência das colisões irá depender da velocidade relativa aleatória das moléculas em movimento. Assim, será necessário incorporar esta modificação, substituindo a velocidade média \bar{v} introduzida no cálculo do cilindro *desenhado* pelo movimento da molécula, pela velocidade média relativa entre moléculas, \bar{v}_r . Considere-se os vectores velocidade \vec{v}_1 e \vec{v}_2 correspondentes respectivamente às moléculas 1 e 2. O vector de velocidade relativa entre eles, \vec{v}_r , será:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad (\text{D.17})$$

Logo, magnitude de \vec{v}_r pode ser expressa por:

$$v_r = \sqrt{\vec{v}_r \cdot \vec{v}_r}$$

Substituindo (D.17) virá que:

$$\begin{aligned} v_r &= \sqrt{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)} \\ &= \sqrt{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1 - 2\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2 + \vec{v}_2 \cdot \vec{v}_2} \end{aligned}$$

Fazendo a média de todos os termos envolvidos, teremos então que:

$$\overline{v_r} = \sqrt{\overline{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1} - 2\overline{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2} + \overline{\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_2}}$$

Considerando que as velocidades \vec{v}_1 e \vec{v}_2 são aleatórias e não estão correlacionadas, então o valor médio do seu produto interno será nulo, $\overline{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2} = 0$, resultando que $\overline{v_r} = \sqrt{\overline{v_1^2} + \overline{v_2^2}}$. Como a mesma velocidade média, \overline{v} , é associada a cada molécula, então teremos finalmente que a velocidade média relativa entre moléculas será apenas:

$$\overline{v_r} = \sqrt{2}\overline{v}$$

Logo, o valor do volume do cilindro *desenhado* será agora $\pi d^2 \sqrt{2}\overline{v}t$, resultando que o livre percurso médio venha dado por:

$$\lambda = \frac{1}{n\sqrt{2}\pi d^2} \quad (\text{D.18})$$

Como foi demonstrado anteriormente, o número de moléculas por unidade de volume relaciona-se com a pressão e a temperatura através da expressão (D.15), podendo também escrever-se (D.18) como[25]:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi p d^2} \quad (\text{D.19})$$

D.1.5 Resumo dos resultados obtidos

Os três resultados obtidos para J , p e λ expressos em função de n são fundamentos básicos para a compreensão e análise de fenómenos em várias gamas de vácuo. Na tabela D.1 encontram-se valores numéricos de J , n e λ para moléculas de N_2 a várias pressões e à temperatura de 295K. Na tabela encontram-se também as designações para os vários tipos de pressão, onde por exemplo, as pressões correspondentes a 10^{-6} mbar e 10^{-10} mbar correspondem, respectivamente, a condições de Alto vácuo e de Ultra-alto vácuo (que em inglês se denominam por “High Vacuum” (HV) e “Ultra High Vacuum” (UHV)).

À medida que um gás se torna mais rarefeito, quantificado pela redução na sua densidade molecular n , o impacto na taxa de impacto molecular, J , diminui, e o livre percurso médio, λ , aumenta.

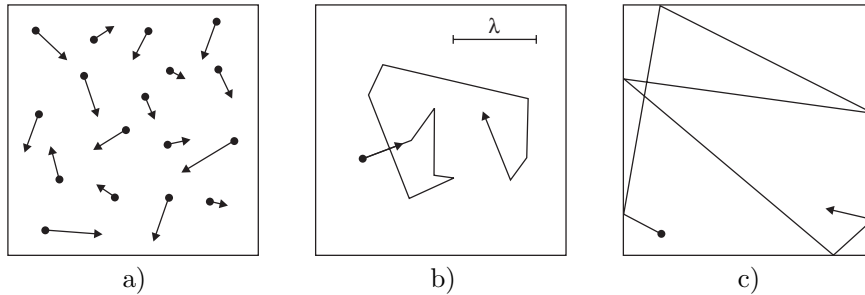
O retrato do panorama molecular que a teoria cinética dos gases oferece é o de um número muito elevado de moléculas, cada uma delas muito pequena e a propagar-se a velocidades muito elevadas, ocorrendo muitas colisões por segundo

Tabela D.1: Valores de J , n e λ para moléculas de N_2 a várias pressões e à temperatura de 295K e designações do tipo de vácuo.

	p [mbar]	n [m^{-3}]	λ	J [$cm^{-2} s^{-1}$]
Pressão atmosférica	10^3	2.5×10^{25}	64nm	2.9×10^{23}
Baixo vácuo	1	2.5×10^{22}	0.064nm	2.9×10^{20}
Médio vácuo	10^{-3}	2.5×10^{19}	64mm	2.9×10^{17}
Alto vácuo	10^{-6}	2.5×10^{16}	64m	2.9×10^{14}
Ultra-alto vácuo	10^{-10}	2.5×10^{12}	64km	2.9×10^{10}

entre as quais as moléculas apenas se propagam ao longo de curtas distâncias, e que em cada colisão a sua direcção se altera bem como a velocidade. É um retrato de um completo caos molecular, no qual movimentos individuais não podem ser seguidos, mas para os quais existem valores médios adequados.

A figura D.4 a) representa, num dado instante, o caos molecular descrito, em que as setas sugerem a direcção e magnitude das velocidades individuais. Na figura D.4 b) e c) segue-se o movimento típico de uma molécula ao longo do seu percurso em *zigue-zague*, mas para λ diferentes.

**Figura D.4:** Trajectórias moleculares num gás. a) Caos molecular num gás, b) trajectória típica de uma molécula, c) trajectória num gás rarefeito, em que λ é superior às dimensões do recipiente.

Finalmente, pode escrever-se novamente a taxa de impacto molecular, J , sob uma forma que é mais comumente utilizada, substituindo n a partir de $p = nkT$, e também a velocidade média, \bar{v} da equação (D.6), resultando:

$$J = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

Considerando ainda que a constante de Boltzmann é a fracção entre a constante dos gases perfeitos $R_0 \approx 8.314 JK^{-1}mol^{-1}$ e o número de Avodgrado $N_A \approx 6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$, $k = R/N_A$ e ainda que a massa de uma molécula, m , se pode também escrever como a fracção entre a massa molar, M , e N_A , ou seja, $m = M/N_A$, então pode ainda redefinir-se J como[21]:

$$J = \frac{pN_A}{\sqrt{2\pi MR_0T}} \quad (\text{D.20})$$

D.1.6 Evaporação e condensação

Na superfície de uma substância sólida ou líquida as moléculas encontram-se menos restringidas. Tal como foi referido na introdução, algumas moléculas poderão, por acaso, ter colisões favoráveis com moléculas vizinhas, adquirindo energia suficiente para quebrar as suas ligações e abandonar a superfície e passar para a fase gasosa e, colectivamente formar um fluxo contínuo de evaporação. O ritmo a que isto acontece depende da temperatura e das forças de ligação à superfície, que dependem do material.

Considere-se um líquido (ou sólido) em equilíbrio com o seu vapor num volume fechado, mantido a temperatura constante, tal como se encontra representado na figura D.5.

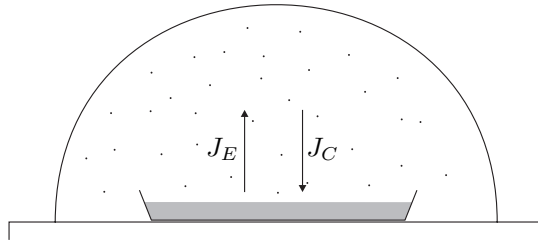


Figura D.5: Fluxos de evaporação e condensação da superfície de um líquido num volume fechado.

Imagine-se que apenas existe líquido no recipiente fechado, uma pressão de alto vácuo, e não existe vapor. À medida que as moléculas escapam da superfície do líquido forma-se vapor. Algumas das moléculas irão voltar de novo para a superfície do líquido e condensar, podendo considerar-se que irá haver uma taxa de impacto molecular, J (determinado anteriormente), na superfície líquido. Assim, existe um fluxo constante de evaporação, J_E , partindo do líquido e um fluxo de condensação, J_C , que surge na parte do vapor. Quando o fluxo de condensação atinge um valor igual em magnitude ao de evaporação, existe um estado de equilíbrio, ou seja, teremos que $J_E = J_C$. Pode considerar-se então que surgirá desta forma uma densidade molecular de vapor que irá exercer uma pressão p_E , ou seja, uma pressão de vapor. Instalando um manómetro de pressão no recipiente, iria medir-se uma variação da pressão de alto vácuo para pressão de vapor p_E .

Numa condição de não equilíbrio de evaporação e condensação, por exemplo, quando o vapor é bombeado para fora do recipiente, é importante determinar a perda quantitativa que existe, medida em massa por metro quadrado por segundo de uma substância com massa molar M e à temperatura T . Assumindo que as moléculas que evaporam são directamente bombeadas ou capturadas por forma a

não haver um fluxo de condensação, o fluxo de perda de massa, ϕ , pela superfície do líquido será então[21]:

$$\phi = m \times J_E = \frac{m p_E N_A}{\sqrt{2\pi M R_0 T}} = \frac{p_E}{7.23} \sqrt{\frac{M}{T}} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

D.1.7 Número de Knudsen

Na figura D.4 a), onde as colisões molécula-molécula são o processo característico que determina o comportamento desse gás, considera-se que nestas circunstâncias, por exemplo à pressão atmosférica, o ar se comporta como um fluido. Neste caso, o livre percurso médio no gás será muito inferior à dimensão característica do recipiente no qual está encerrado, que para uma caixa cúbica será a dimensão do seu lado, ou para um tubo o seu diâmetro.

Para baixas pressões, o livre percurso médio será comparável com a dimensão característica do recipiente, sendo que neste caso, as colisões molécula-superfície irão dominar o comportamento do gás, e as colisões molécula-molécula serão mais raras. Este cenário está representado na figura D.4 c).

O número de Knudsen, Kn , define o rácio entre o livre percurso médio, λ , e a dimensão característica do recipiente, D , ou seja, $\text{Kn} = \lambda/D$. Assim, teremos três regimes diferentes:

- $\text{Kn} < 0.01$: regime contínuo; predominam as colisões molécula-molécula e o gás comporta-se como um fluido;
- $\text{Kn} > 1$: regime molecular; predominam as colisões molécula-superfície;
- $0.01 < \text{Kn} < 1$: regime transitório; comportamento intermédio entre os dois regimes anteriores.

Não existe uma transição evidente ou acentuada entre os regimes contínuo e molecular, mas sim uma transição gradual entre eles, sendo que o número Kn (adimensional) incorpora imediatamente informação acerca do gás em relação às dimensões do recipiente que o contém.[21]

Bibliografia

- [1] L. Woltjer, *Europe's quest for the universe: ESO and the VLT, ESA and other projects*. L'Editeur: EDP Sciences, 2006.
- [2] D. Schroeder, *Astronomical optics*. Academic Pr, 2000.
- [3] P. Lena, *Observational Astrophysics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [4] I. McLean, *Electronic imaging in astronomy: detectors and instrumentation*. Springer Verlag, 2008.
- [5] F. Roddier *et al.*, *Adaptive optics in astronomy*. Cambridge university press New York:, 1999.
- [6] H. Pain, *The physics of vibrations and waves*. Wiley, 2005.
- [7] M. Schöller, *The Very Large Telescope Interferometer: current facility and prospects*. European Southern Observatory, 2007.
- [8] F. Eisenhauer *et al.*, "Gravity - a second generation vlti instrument," *The Messenger*, no. 143, 2011.
- [9] J. Kolmeder, *Development and Characterization of a Tip-Tilt System for Astronomical Interferometry*. PhD thesis, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, 2008.
- [10] A. Amorim *et al.*, "The gravity acquisition and guiding system," *Optical and Infrared Interferometry II. Edited by Danchi*, vol. 7734, p. 33, Jul 2010. (c) 2010: American Institute of Physics.
- [11] S. Gillessen *et al.*, "Gravity: a four-telescope beam combiner instrument for the vlti," *arXiv*, vol. astro-ph.IM, Jul 2010.
- [12] C. Geyari, "Design considerations in the use of stainless steel for vacuum and cryogenic equipment," *Vacuum*, vol. 26, no. 7, pp. 287 – 297, 1976.
- [13] C. M. L. Marton, *Methods of Experimental Physics - Vacuum Physics and Technology*, vol. 14. Academic Press, 1979.

- [14] Wikipedia, “Wikipedia,” 2010.
- [15] ISOVOLTA, “Technical information of glass epoxy laminates,” tech. rep., ISOVOLTA Group, 2012.
- [16] T. M. Flynn, *Cryogenic Engineering*. Marcel Dekker, Inc., 1996.
- [17] A. M. Moutinho, *Tecnologia de Vácuo*. Universidade Nova de Lisboa, 1980.
- [18] E. Marquardt, J. Le, and R. Radebaugh, “Cryogenic material properties database,” *Cryocoolers 11*, pp. 681–687, 2002.
- [19] D. B. Leviton and B. J. Frey, “Temperature-dependet asbolute refractive index measurements of synthetic fused silica,” *Optomechanical Technologies for Astronomy, Proceedings Vol. 6273*, 2006.
- [20] M. Okaji, N. Yamada, K. Nara, and H. Kato, “Laser interferometric dilatorimeter at low temperatures: application to fused silica srm 739,” *Cryogenics*, vol. 35, no. 12, pp. 887–891, 1995.
- [21] A. Chambers, *Modern vacuum physics*. Masters series in physics and astronomy, Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [22] W. Pauli, “Pauli lectures on physics, vol. 3,” *Thermodynamics and the Kinetic Theory of Gases*, 1973.
- [23] G. Kremer, *An Introduction to the Boltzmann Equation and Transport Processes in Gases*. Springer Verlag, 2010.
- [24] K. Gloos, “Basic vacuum physics,” September 2008.
- [25] C. Nave, “Hyperphysics,” 2011.