

2 – MANUFACTURA DE ESPELHOS

Um espelho não aparece assim na Natureza. É obtido por desbaste de material não reflexivo (bom candidato a sê-lo), recorrendo no final a uma cobertura reflectora (metalizada). Chamaremos “peça” ao material em bruto (em inglês: “blank”).

2.1 A “peça”

Desde há 150 anos que se prefere actuar sobre vidro, em detrimento do metal, para construir espelhos em telescópios reflectores: desde que se controla a técnica para pratear o vidro quimicamente. Uma das vantagens dos materiais vítreos é a sua transparência, o que permite efectuar testes à sua superfície. Outra é a possibilidade de construir a peça parabólica derretendo o material e rodando-o enquanto arrefece (o efeito gravitacional gera uma forma parabolóide). O primeiro problema que surgiu foi a necessidade de frequentes repolimentos. Este problema resolveu-se com técnicas mais recentes e coberturas de acabamento mais eficientes.

Em meados do séc.XX, o [quartzo fundido](#) e o [pirex](#) (*vidro de borossilicato*) eram os preferidos, especialmente devido a sofrerem [metade](#) da expansão térmica do vidro “clássico”.

O clímax da utilização do pirex foi nos maiores telescópios do mundo da altura: o Hale de 5m (Monte Palomar, Califórnia) e o russo de 6m (Crimeia). Desde há 30 anos que o quartzo fundido voltou ao “combate” devido a ser dez vezes mais estável termicamente que o pirex – mas este é óptimo para a construção de peças leves (tipo favo-de-mel). O vidro cerâmico (*e.g. Zerodur*) entrou na “corrida” pois virtualmente não expande.

Segue uma tabela com as características de vários materiais (incluindo metais): insensibilidade térmica (q_t) e difusividade térmica (a_t) ou “seeing” do espelho. Ambas devem ser o maior possível.

Material	q_t	a_t
SiC	40.2	8.4
quartzo fundido ULE	25.7	0.8
Zerodur 1	15.8	0.8
Berílio	7.3	88
Alumínio (não puro)	3.1	69
quartzo fundido	2.0	0.8
Ferro	1.5	18
Níquel	1.1	14
Aço	0.3 - 0.6	5 - 7
Pirex (borossilicato)	0.2	0.6

ULE – Ultra Low Expansion

SiC é o material “campeão” e o pirex o pior, de longe. O que vale a este é que existem formas de compensar os problemas técnicos relacionados com baixos valores de q_t ou a_t . O alumínio, pela leveza e baixo preço, acaba por ser o único metal que pode competir com os materiais vítreos. Espelha-se quimicamente com Canigen (91% níquel) – pode ser construído como menisco (pequeníssima espessura em relação ao diâmetro: elevada razão-de-aspecto).

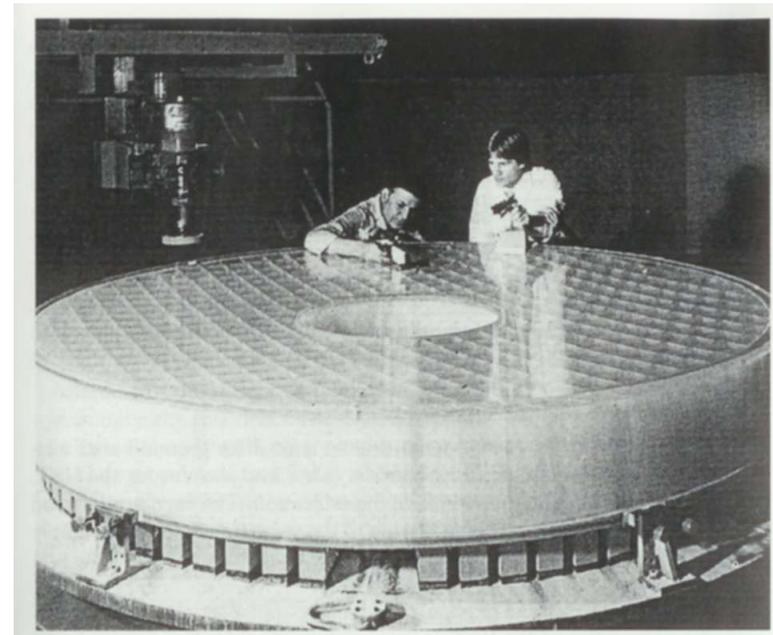
2.1.1 Vidro Cerâmico

Sendo excelente para polir, neste momento há apenas três fábricas no mundo de peças para telescópios neste material: na Alemanha (de nome Zerodur), na Rússia e na China. As peças da **Zerodur** têm sido as mais populares para os telescópios na classe 4–8m (e.g. Keck, VLT; até no Chandra).

2.1.2 Quartzo fundido

O processo de manufactura começa na produção de várias peças hexagonais finas (ex: para peça de 3m de diâmetro, as sub-peças hexagonais têm 1.2m de diâmetro e 5cm de espessura; se de 8m de diâmetro, as sub-peças têm 1.4m de diâmetro). Juntam-se depois a peças triangulares de forma a formar um disco. Funde-se o conjunto a 1500°C e arrefece-se depois de forma controlada. Finalmente, a peça resultante é trabalhada até uma espessura mínima de 3.5cm e ao diâmetro requerido.

A peça para o HST, por exemplo, foi feita de quartzo fundido ULE. Três telescópios de classe 8m (Subaru e Gemini) foram construídos com a técnica acima e quartzo fundido.



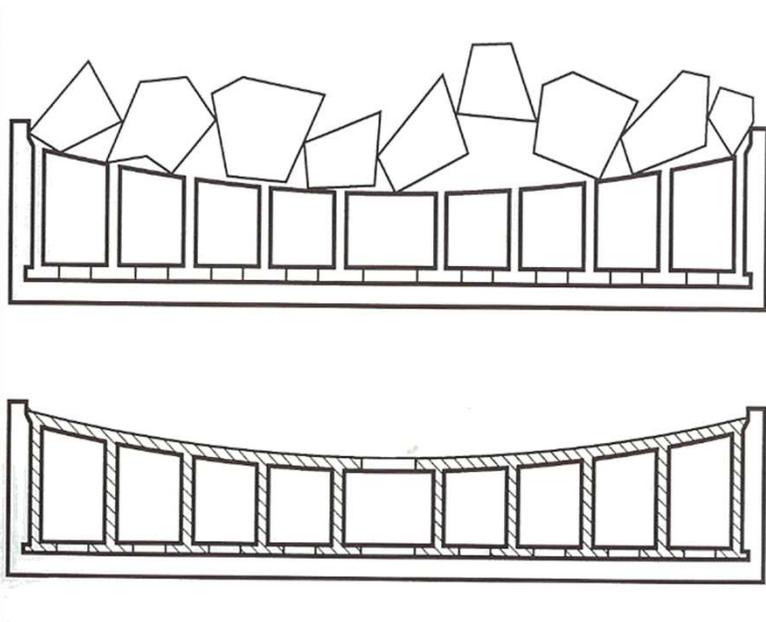
A peça leve (estrutura de favo-de-mel) de quartzo fundido do HST

2.1.3 Pirex (borossilicato)

Recorrendo a uma sofisticada **ventilação**, os problemas térmicos do pirex quase desaparecem.

Aproveita-se, então, a enorme facilidade com que se constroem leves peças de 8m de diâmetro com este material:

- a) ou se juntam muitos hexágonos de pirex como num favo-de-mel, derretendo o conjunto;
- b) ou se derrete o pirex para os espaços vazios de uma estrutura cerâmica com os favos-de-mel já em molde.



2.1.4 Metais

A) Alumínio

Principalmente devido ao seu baixo peso e custo e às propriedades da Tabela na pág.13, o **alumínio** é o melhor candidato a peça entre os metais. A única desvantagem é o astigmatismo que surge no espelho ao fim de alguns anos, facilmente corrigível com óptica activa. O processo de fabrico é bem mais barato que para os materiais vítreos, competindo o alumínio directamente com o vidro cerâmico, por exemplo.

A peça de alumínio é usualmente construída recorrendo à simples soldagem de peças mais pequenas (ex: quatro quartos-de-círculo). No final leva uma camada reflectora de níquel depositado quimicamente – Canigen – ou por electrólise. O único senão está neste passo final pois interacções entre o níquel e o alumínio podem levar à degradação do espelho, a prazo.

B) Aço inox

A grande vantagem do aço inox é não precisar de um acabamento reflector (pode ser polido directamente), não tendo os problemas, por exemplo, do acabamento níquel-alumínio. Além disso, é 10 vezes **mais barato** que o Zerodur.

Infelizmente, tem valores muito mais baixos de q_t e a_t em relação ao alumínio e é metalurgicamente mais complexo que este; mas, quanto mais ferro tiver o aço maiores os valores de q_t e a_t .

O seu elevado peso limita a sua utilização a espelhos de 2m de diâmetro.

A melhor combinação para produzir um telescópio barato de grande qualidade é começar com uma peça em aço inox flexível ($ar \gg 1$), poli-la segundo 2.3.1B e usar óptica activa na sua superfície ($D > 1.5m$). 16

C) Berílio

Da Tabela vemos que o berílio é, de todos os metais listados, o que apresenta melhores valores (q_t, a_t), mesmo melhores que os do alumínio. O problema é ser muito caro e perigoso (venenoso).

Como o alumínio, deve ser coberto por um material reflexivo (Canigen, por ex.). A mais importante aplicação é, para já, no espelho principal do Spitzer Space Telescope (0.85m) e como espelho secundário (1m) em cada um dos quatro telescópios do VLT. Mas já estão feitos os 18 segmentos de berílio do espelho primário de 6m do James Webb Space Telescope (JWST).

2.1.5 SiC (“silicon carbide”)

Este composto é o “campeão” da Tabela. Foi estudada (mas nunca consumada) a sua aplicação, por exemplo nos espelhos secundários do VLT. Existem dois processos para construir peças deste material e espelhá-las:

- i) **Depósito químico de vapor**: numa câmara de vácuo a 1300°C consegue-se uma pureza de ~100%. Depois, deposita-se uma camada de alguns mm de espessura sobre uma base de grafite, por sua vez apoiada numa “caixa de ovos” de grafite. A peça final permite um polimento até $< 1 \text{ \AA}$ rms.
- ii) **Siliconização**: começa-se por construir uma base de SiC. Liquefaz-se depois silício e infiltra-se este no SiC.

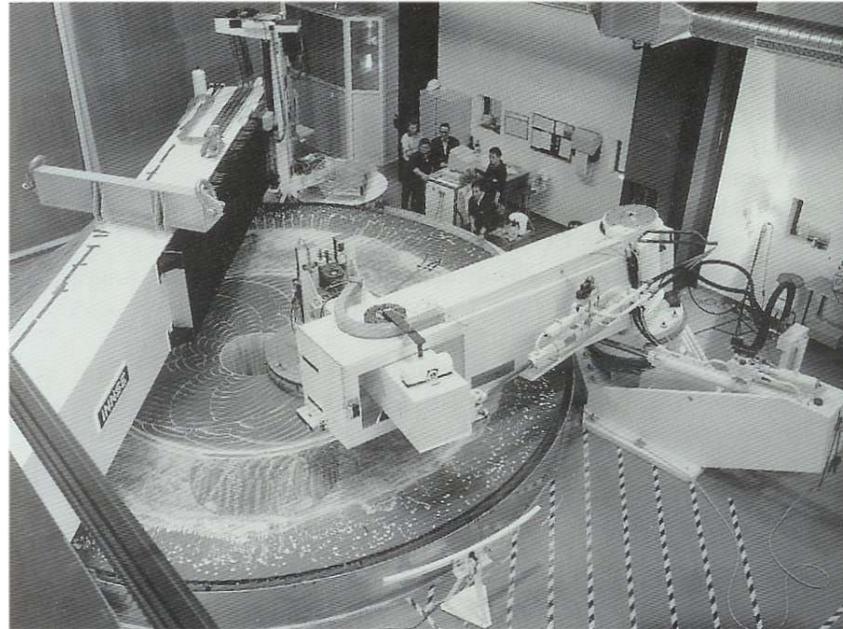
2.2 Desbaste

O desbaste de uma superfície óptica com uma **ferramenta** e **abrasivo** é tão antigo quanto o monóculo. A razão porque, na essência, a técnica se mantém hoje é devido à eficiência do ângulo de ataque no desbaste que faz surgir sempre uma superfície aproximadamente esférica.

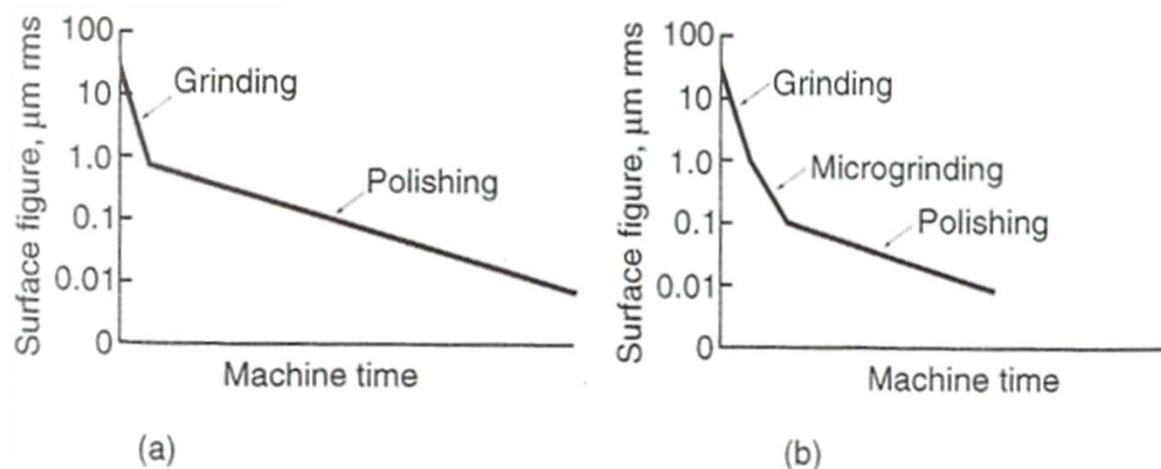
Profissionalmente, transformar o material bruto (*ex: pirex – borossilicato, quartzo*) num espelho, por desbaste, segue os seguintes passos (*ii a iv* para espelhos até 5m):

- i) **Máquina moedora de diamante**: com quase o diâmetro do espelho, remove grandes quantidades de vidro para dar ao material bruto uma forma esférica.
- ii) **Limagem grosseira**: efectuada com superfícies de vidro, apenas se necessário.
- iii) **Limagem fina**: **a)** ou efectuada com “carborundum” (“silicon carbide”), um abrasivo de 10 μ m; a ferramenta utilizada tem, tipicamente, a forma de uma pétala com tamanho \geq metade do do espelho (que, por sua vez, é ainda um mosaico de cerâmica).
b) ou recorrendo a um micro-desbaste com abrasivos diamante-latão de 1–3 μ m.
- iv) **Alisamento**: efectuado com aloxite – óxido de alumínio.

Recorre-se a ferramentas de ferro específicas (raio adequado, etc.) para os passos ii a iv. Sob controlo computadorizado circulam pela peça sem rodar sobre si. O disco rígido que desbasta a peça vai-se adaptando às alterações da curvatura da mesma.



A imagem fina de uma peça do VLT



As curvas típicas de “tempo de máquina” para concluir o desbaste e polimento de um espelho. a) só desbaste; b) micro-desbaste também.

2.3 Polimento

Colocam-se polidores (lapidadores de pez – substância resinosa) nas ferramentas de ferro utilizadas no desbaste (espelhos até 4m) e pronto! A ideia é polir até obter uma superfície reflectora de alta qualidade (<0.5nm). O abrasivo hoje em dia utilizado é Cerrox (óxido de cério).

Há três métodos teóricos de polir, com resultados semelhantes:

- i) **mecânico**: o processo principal é a remoção lenta de material vítreo com um abrasivo fino, junto com um polidor de diamante (por ex.) e água;
- ii) **químico**: utilizam-se processos químicos complexos que envolvem água, o abrasivo e várias cristalizações;
- iii) **fluxo dinâmico**: recorre a efeitos locais de fluxo calorífico, após aquecimento intenso.

No que segue desenvolve-se um pouco mais o método **mecânico**.

A **Lei de Preston** estabelece a remoção de material por um processo de lapidação óptico (“optical lapping”):

$$U = A p v$$

onde: U é o desgaste por unidade de tempo,

A é a constante de Preston (*que só depende dos parâmetros físicos do processo*),

p é a pressão da ferramenta sobre a superfície da peça,

v é a velocidade relativa da ferramenta em relação à peça.

É relevante a questão do suporte do espelho enquanto está ser polido. As técnicas/materiais utilizados dependem apenas do seu diâmetro:

D (m)	suporte no polimento
< 0.5	vários discos elásticos comprimidos
~ 0.7 *	ex: 12 borrachas esponjosas (espessura 2.5cm)
≤ 2 (flexíveis)	especial: têm de compensar a pressão do polimento de forma a não deformar o espelho irremediavelmente

*Até 2-3m se a parte de trás do espelho **rígido** é plana

Com o objectivo de otimizar o tempo t de polimento, existem quatro formas (teóricas) de controlar a sua eficiência:

- i) para uma ferramenta de **área fixa**, **direccionar** os seus movimentos (aproximadamente planares);
- ii) **variar a área** da ferramenta;
- iii) **variar a pressão** da ferramenta sobre diferentes pontos;
- iv) **variar a velocidade relativa** da ferramenta em relação aos pontos da superfície.

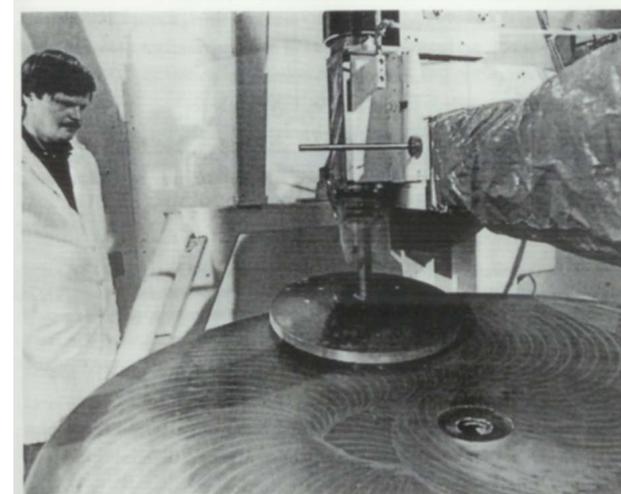
Dadas estas formas de controlo (teórico), surgem formas práticas que vamos explicar nas subsecções seguintes.

2.3.1 Ferramentas de diâmetro total (<5m)

A) Guiadas

Este método é especialmente adequado para **espelhos rápidos** (ex: $f/1.0$), de elevada curvatura. Para que a ferramenta se adapte bem à superfície significativamente “inclinada” do espelho, usam-se molas.

Como exemplo, o caso do telescópio do Vaticano (1.8m, $f/1.0$), para o qual se usou uma ferramenta adaptável (com molas) de 0.6m de diâmetro: cada passagem durava uns segundos, enquanto as molas e os adaptadores respondiam em mseg. Para a lixagem fina usaram-se ferramentas semelhantes mas mais pequenas.

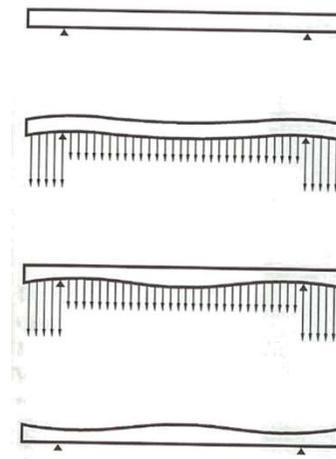


B) Polimento de tensão (*óptica activa*)

Este método: i) deforma a peça com tensões aplicadas em vários pontos (por molas/actuadores); ii) trabalha-a para uma superfície esférica ou plana (*neste último caso a ferramenta pode ser plana*); iii) solta as tensões de forma a obter a forma **asférica** desejada.

Exemplos de aplicação deste método em superfícies planas são os espelhos de Schmidt.

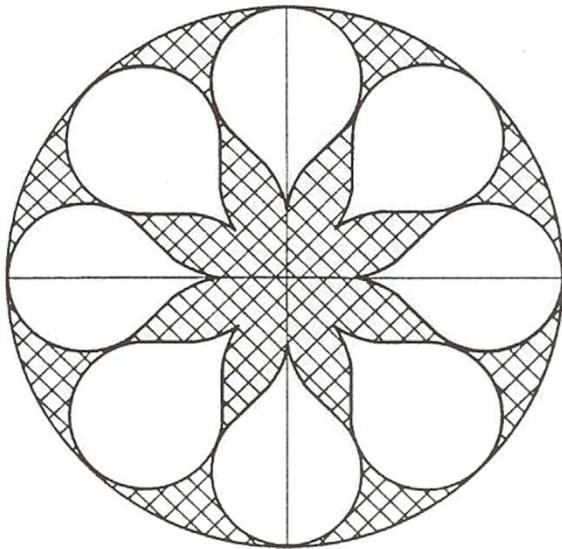
Entre outros exemplos contam-se os hexágonos dos Keck (segmentos de parabolóide; 1.8m) – vários graus de excentricidade, conforme a sua colocação final.



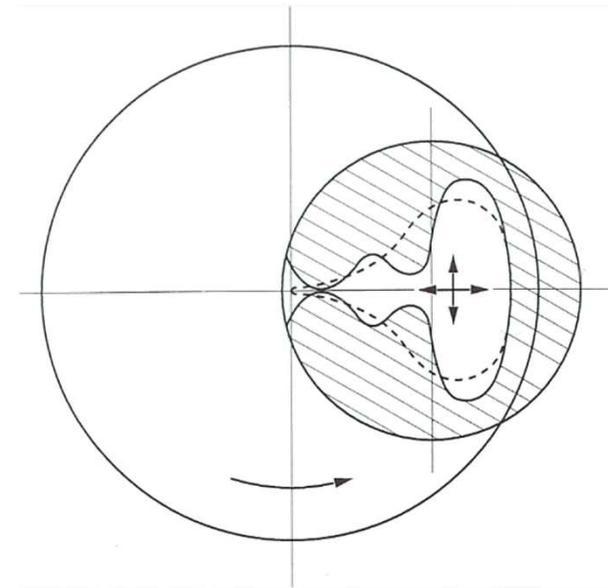
2.3.2 Ferramentas de diâmetro total (especialmente $<1m$)

Usualmente são ferramentas em que se varia a área. Além disso, também a forma da superfície a polir se altera, de forma a acelerar e otimizar o processo. Ambas as variações são controladas por computador de uma forma eficiente.

A **lapidação em pétalas** é a técnica mais comum. Esta ferramenta permite a fácil alteração da sua forma/área para otimizar o polimento.



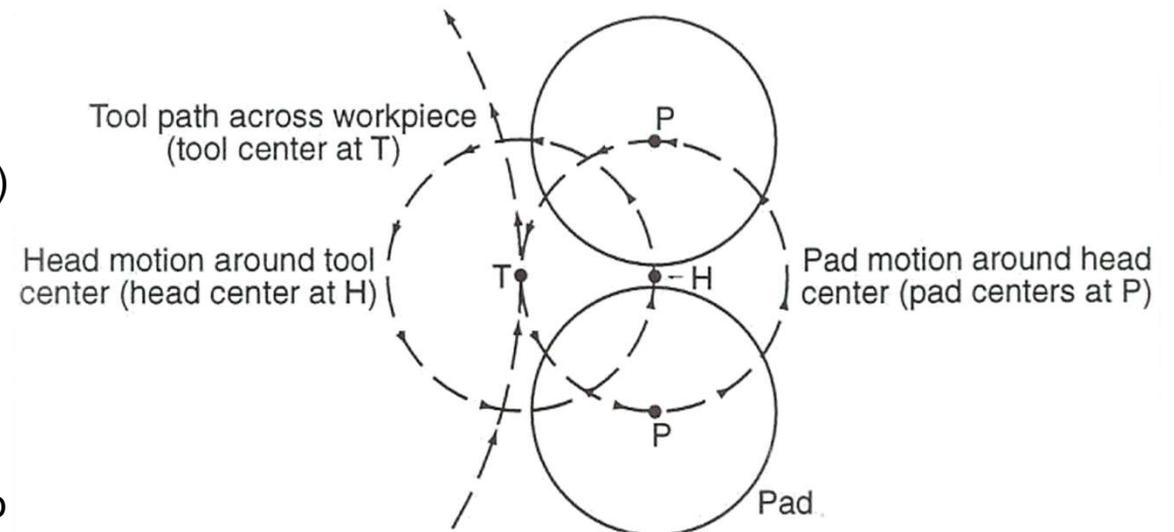
A ferramenta de pétalas típica.



Polimento de um espelho de 8.2m do VLT com uma ferramenta em pétala de forma/área variável.

2.3.3 Ferramentas sub-diâmetro (telescópios <1m)

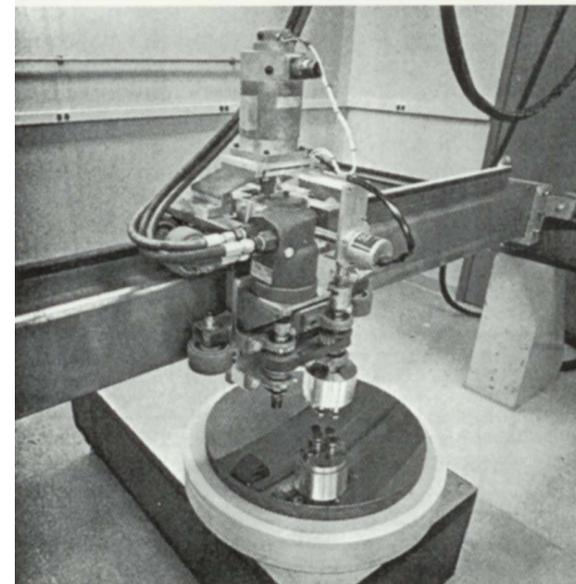
O **controle computacional** é especialmente importante para que a ferramenta (neste caso chamada de “controlo do movimento”) se adapte muito bem a uma superfície esférica, “inclinando-se” facilmente; ainda, para compensar a perda de simetria rotacional conseguida com as ferramentas de diâmetro total. O movimento encontrado como mais eficiente foi o **epicíclico**.



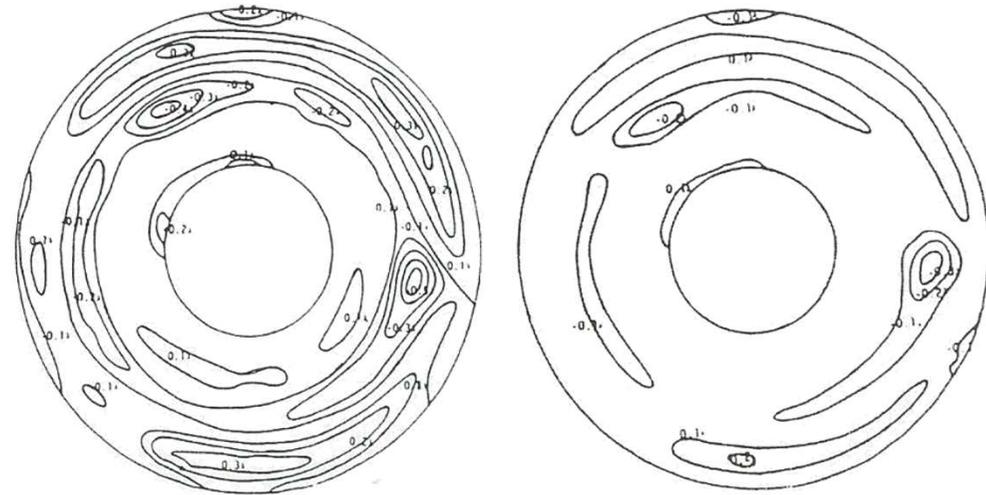
Ferramenta de controlo do movimento típica: utiliza dois discos de polimento em movimentos epicíclicos.

Exemplos

Em 4 horas um espelho de 38cm (erro inicial >100nm) foi polido com erro de 6nm. Utilizou-se uma cabeça com quatro discos de polimento.



Usando um movimento em espiral, em seis passagens (duração de 23 horas), melhorou-se a superfície de um espelho esférico de 1.8m de diâmetro.



Como parte dos testes para o polimento dos espelhos do VLT, um espelho de 60 cm melhorou a superfície num factor de dez em 14 passagens de polimento.

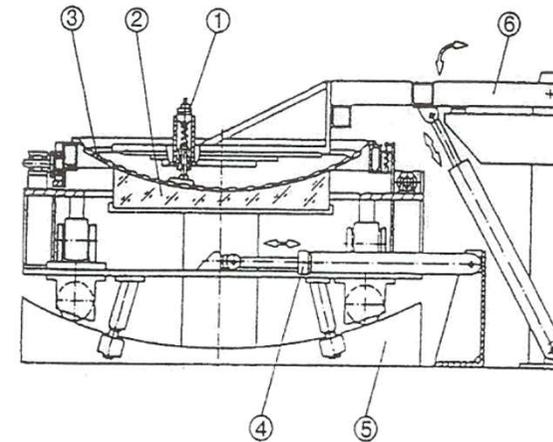
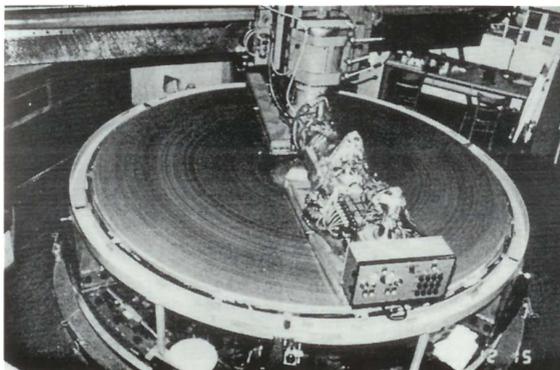


2.3.4 Ferramentas de membrana

Esta ferramenta combina todas as variações descritas na pág.21, sendo única. Usualmente consiste numa **membrana** de alumínio ou plástico com a flexibilidade otimizada (nem demais, nem de menos). Na membrana encontra-se acoplado o material de polimento, que se desloca sobre o espelho à velocidade v . Actuadores na “parte de trás” da membrana variam a pressão p sobre o espelho.

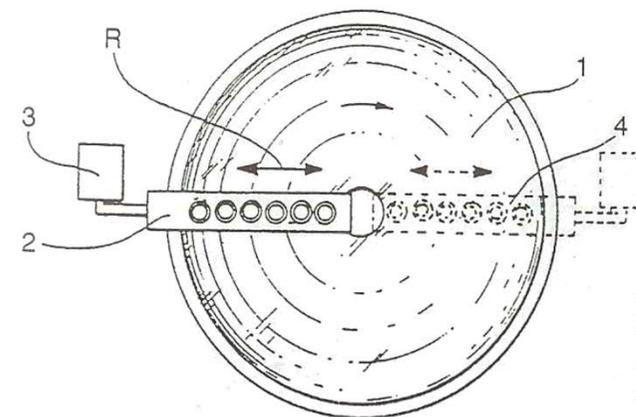
Tipicamente, a membrana tem uma espessura de 10-30cm e um diâmetro superior ao do espelho.

Para espelhos rápidos a membrana é, usualmente, transformada num **rectângulo** com um comprimento igual ao raio ou ao diâmetro do espelho. Actua deslocando-se em vaivém radial, enquanto o espelho roda por baixo.



- 1 actuator
- 2 mirror
- 3 membrane
- 4 hydraulic piston drive
- 5 "rails" guiding drive motion
- 6 lift-off arm

Membrane tool polishing machine



- 1 mirror
- 2 membrane tool
- 3 drive system
- 4 optional second lap
- R direction of stroke

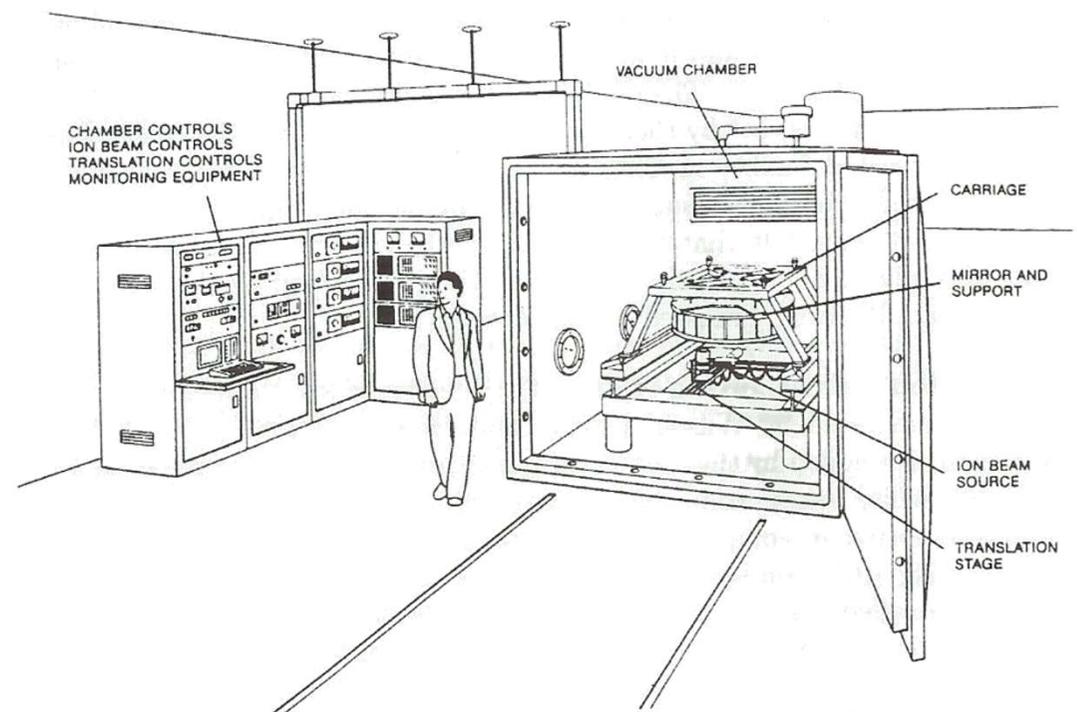
O exemplo do NTT 3.5m (membrana diametral rectangular).

2.4 Geometrizar e cobrir a superfície

Este é a última fase que, quando os dois processos anteriores (desbaste e polimento) funcionarem de forma quase perfeita, até pode ser desnecessária. É a geometrização que garante que o espelho vai ter, no telescópio, a performance desejada. Existem vários métodos para **geometrizar** e/ou **cobrir** a superfície, em jeito de “acabamento”.

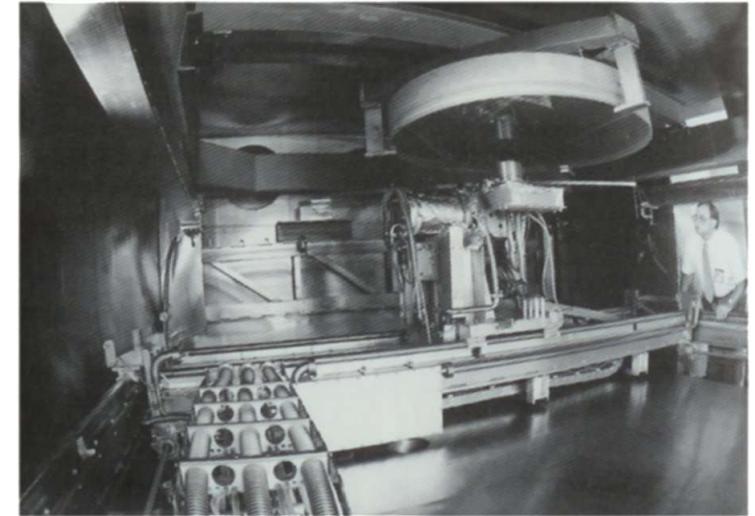
2.4.1 Geometrização por feixe iónico

Com esta técnica pode-se atingir (e medir) a forma geométrica pretendida com tanta precisão quanto se desejar. Com um **feixe iónico de argon** trabalha-se o material a nível **atómico**, quase ajustando a superfície átomo a átomo (melhor é impossível!). Coloca-se o espelho **virado para baixo** numa câmara de vácuo e bombardeia-se o mesmo com iões que se deslocam de baixo para cima – o espelho nunca ultrapassa os 100°C de aquecimento, pelo que não advém qualquer prejuízo na execução desta técnica.



A primeira versão construída para geometrização por feixe iónico permitia trabalhar espelhos até 2.5m de diâmetro.

O exemplo mais famoso de aplicação desta técnica foi no melhoramento dos segmentos do Keck: após o polimento de 2.3.1B o erro da superfície era de 726nm. Em duas iterações (14 + 6 dias) a geometrização por feixe iónico baixou-o para 90nm (oito vezes melhor).

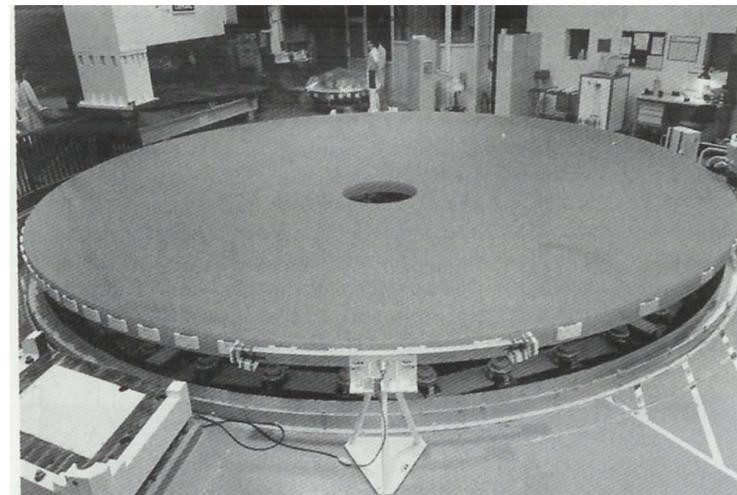


2.4.2 Geometrização “in situ” (óptica activa)

Numa versão simplificada da aplicação de óptica activa (a estudar em detalhe no Capítulo 3) pode-se geometrizar a superfície recorrendo a um número adequado de actuadores pneumáticos. No entanto, o espelho tem de ter flexibilidade para tal actuação activa.

Um exemplo de aplicação foram os flexíveis espelhos de 8.2m do VLT (17.5cm espessura => $ar \approx 47$). Após utilizados para um polimento de tensão (ver 2.3.1B), 150 actuadores geometrizam a superfície com grande precisão.

A peça do VLT com $ar \approx 47$ e apenas 23 toneladas é feita de Zerodur e tem acabamento a $f/1.8$.



Alguns dos 150 actuadores de um espelho do VLT.

2.4.3 Cobertura do espelho

A) Alumínio evaporado

Desde 1935 e até há pouco tempo que a solução preferida para cobrir espelhos grandes (“acabamento” para uma reflexão quase perfeita) era um **filme de alumínio evaporado**. O método (ideal) para o fazer segue os seguintes passos:

- i) Limpeza química do espelho polido;
- ii) em espelhos de vidro: colocação de uma camada protectora de SiO (na forma Si_2O_3);
- iii) limpeza por bombardeamento iónico ou electrónico;
- iv) evaporação do alumínio em vácuo ($p \sim 10^{-8} - 10^{-5}$ atm), depositando-se no espelho polido.

A **reflectividade (R)** de um material (usualmente metal) de **condutividade κ** é dada para $\lambda > 10\mu\text{m}$, teoricamente, por (quanto menor o valor, mais reflexivo):

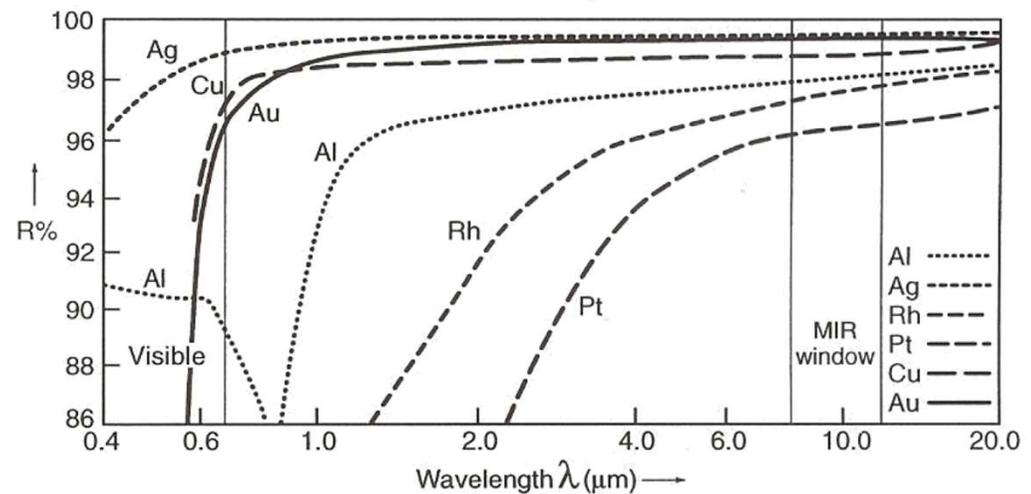
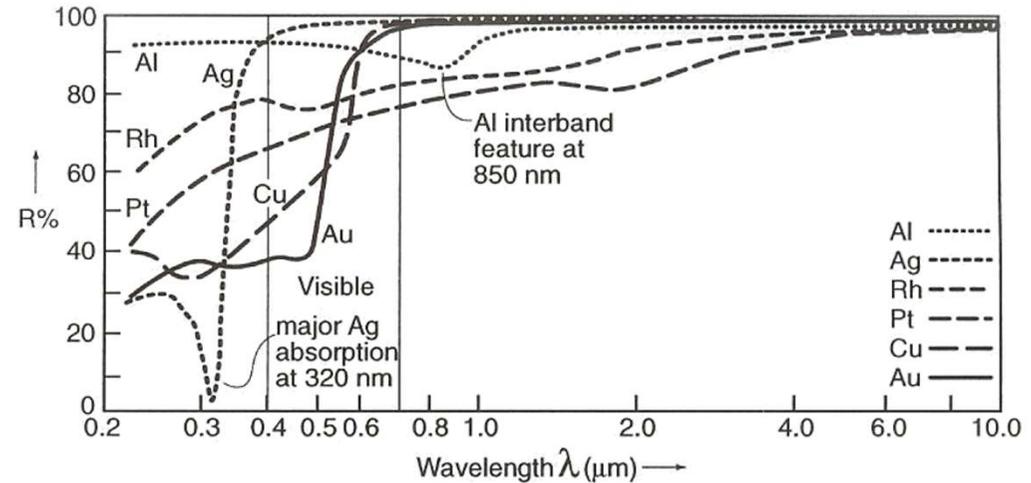
$$R \approx 1.5 (c/\lambda\kappa)^{0.5}$$



A condutividade térmica de metais e outros materiais a 0°C (273 K).

Metal	κ (W/m/K)
Prata	410
Cobre	385
Ouro	314
Alumínio	202
Níquel	93
Ferro	73
Platina	69
Aço (1% C)	43
Chumbo	35
Mercúrio	8.2
Outros materiais	κ (W/m/K)
Diamante	1000
Quartzo	42
Vidro	0.8
Água	0.6
H ₂	0.17
He	0.14
ar	0.024

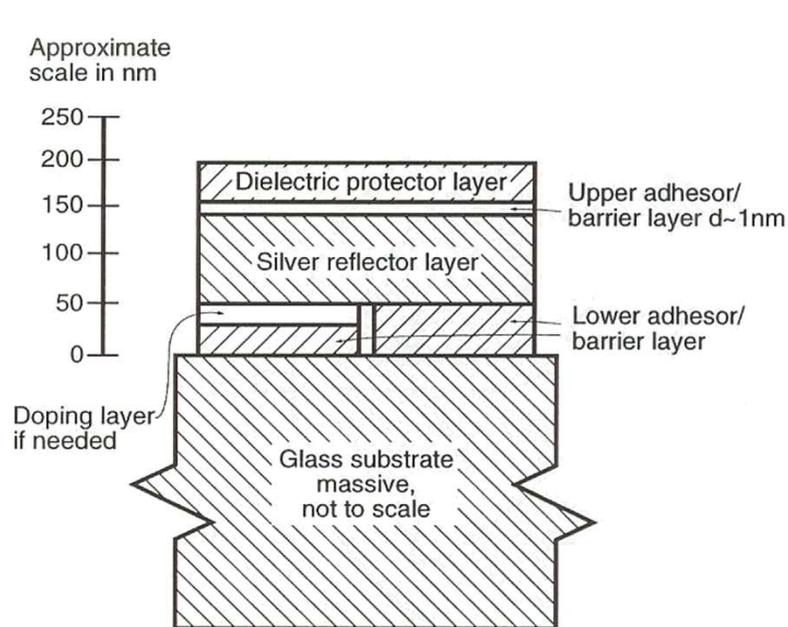
Nos gráficos em baixo comparam-se os valores da reflectividade para espelhos cobertos por seis tipos diferentes de metais evaporados em vácuo ($p \sim 10^{-8}$ atm). O gráfico do fundo é apenas um “zoom” de parte do de cima.



Até há poucos anos preferia-se o alumínio à prata devido à sua bem mais elevada **resistência à oxidação**.

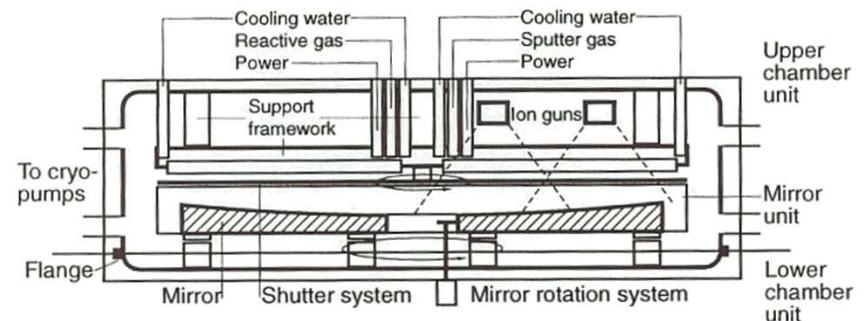
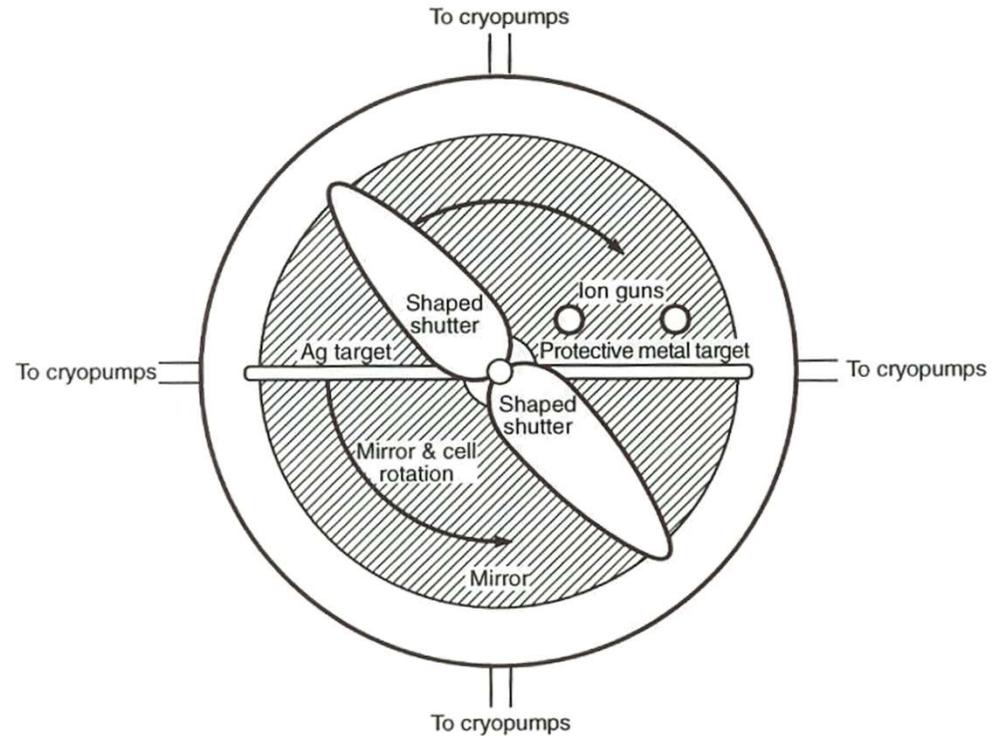
B) Prata evaporada

Nos anos mais recentes a prata começa a surgir como uma boa alternativa ao alumínio (e.g. *Gemini*).



As camadas típicas de uma cobertura a prata evaporada. O protector dieléctrico é, normalmente, ou Si_3N_4 ou HfO_2 .

As pressões de deposição são agora $< 10^{-7}$ atm (idealmente 10^{-9} atm) e usa-se o **impacto iónico** para “deslocar” (evaporar) os átomos de prata. A distância entre o espelho e a fonte de gás de prata deve ser pequena.



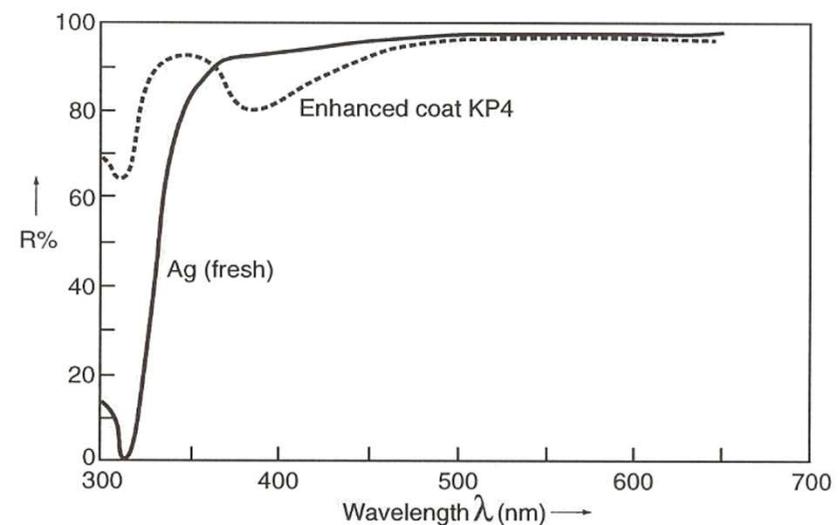
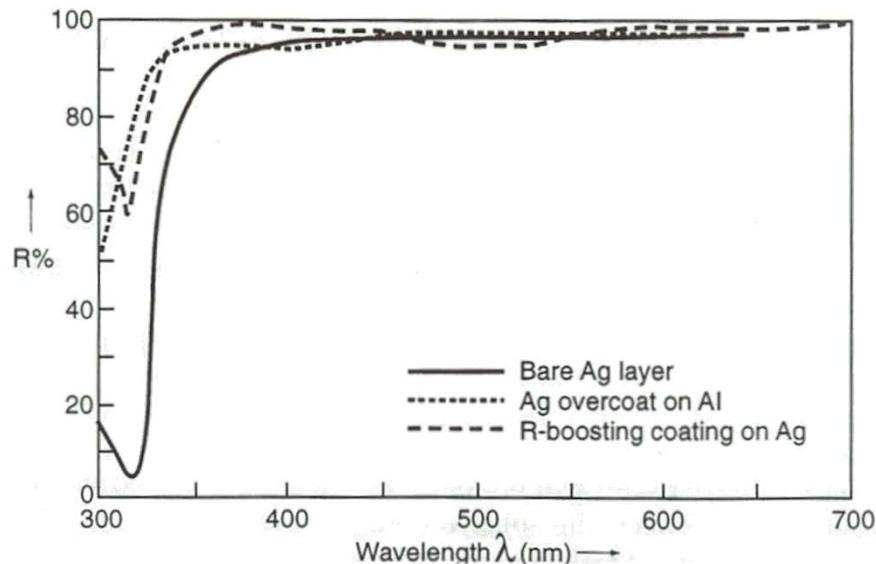
C) Técnicas de futuro

Já se pensa em aproveitar a camada dielétrica de protecção para melhorar a reflectividade do espelho. Esta poderia compensar **mínimos de reflectividade** (como o do alumínio a $0.85\mu\text{m}$). Tal pode ser conseguido dividindo a camada de protecção em duas (*por ex:* $\text{MgF}_2 + \text{CeO}_2$).

No caso da cobertura em prata, há várias combinações de compostos para utilizar como camadas dielétricas que têm estado em estudo, algumas delas já com aplicação. No que segue descrevem-se, da camada mais exterior à mais interior:

i) **R-boosting**: ar, $\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{TaO}_5^*$, SiO_2^* ,
 $\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{TaO}_5^*$, $\text{Al}_2\text{O}_3^{**}$, Ag
 *espessura $\lambda/4$; **espessura $\lambda/5$.

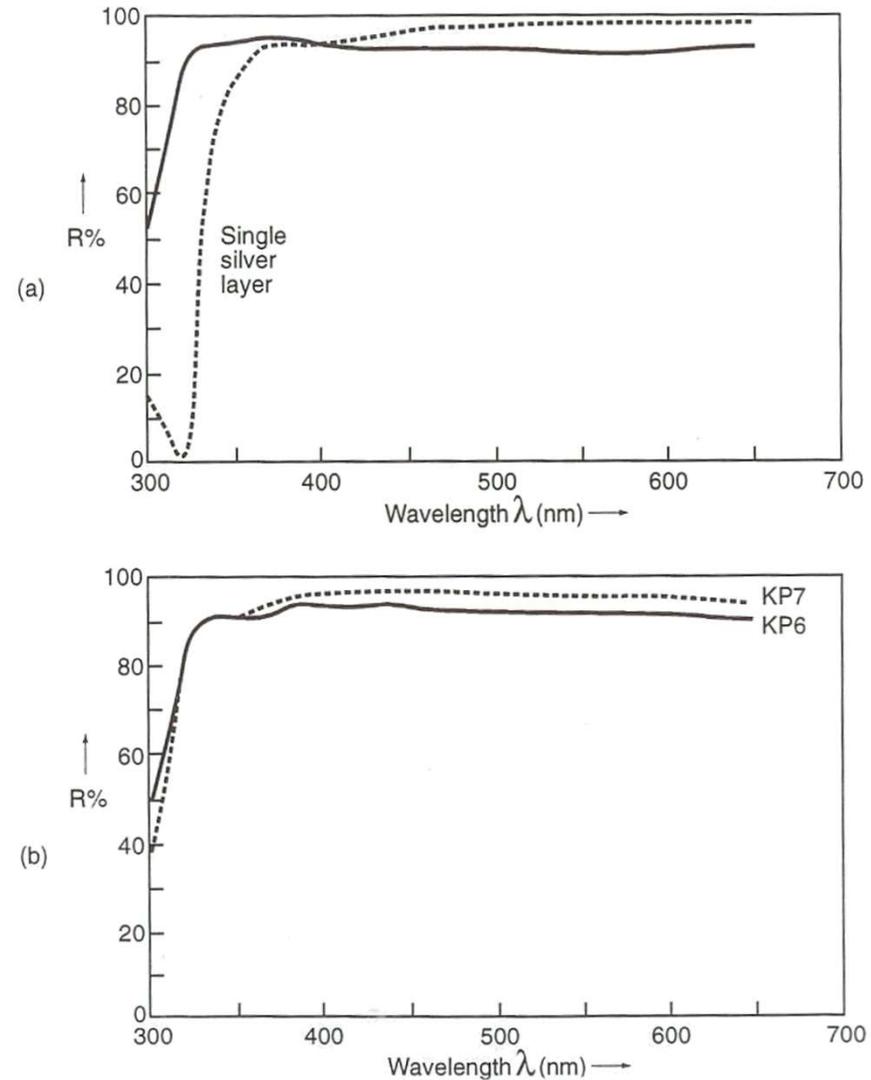
ii) **KP4**: ar, SbO_3 , Na_3AlF_6 , Sb_2O_3 , Si_2O_3 , Ag



iii) **KP6**: ar, $\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5^*$, $\text{Al}_2\text{O}_3^{**}$, Ag^{***} , $\text{Al}_2\text{O}_3^{****}$, Al

*espessura $\lambda/4$; **espessura $\lambda/5$; ***espessura 25nm; ****espessura $\lambda/40$.

*KP7 tem um pouco mais de prata do que KP6.
Ambas as camadas combinam alumínio e prata.*



2.5 O apoio do primário

2.5.1 Distorções axissimétricas

O “**factor de forma**” de um espelho é dado por:

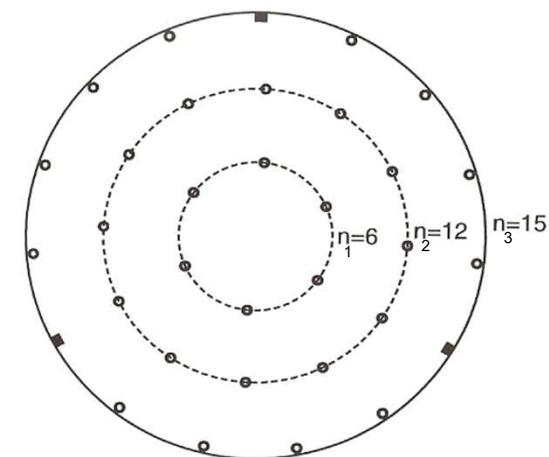
$$k = e f_1 / (16D^2)$$

Um espelho “**distorce**” sobre o seu próprio peso segundo o seu eixo (*axissimetria*) da forma ($ar = D/e \gg 1$):

$$w = V(n)/e^2 (D/n)^4$$

onde $V(n)$ é uma constante de proporcionalidade a determinar empiricamente e n é o número de pontos de apoio do espelho ao longo da sua circunferência (anel de raio $D/2$).

É mais comum o recurso a **vários anéis** com pontos de apoio sob o espelho. Nesse caso, cada um terá associado um valor de w que se pode classificar como w_1, w_2 , etc, utilizando-se na fórmula acima os valores parciais D_1, D_2 , etc. Historicamente, a primeira situação em que tal foi aplicado foi para um espelho de 1.9m, recorrendo a três anéis, com $n_1=6, n_2=12$ e $n_3=15$ pontos de apoio (*de dentro para fora*).



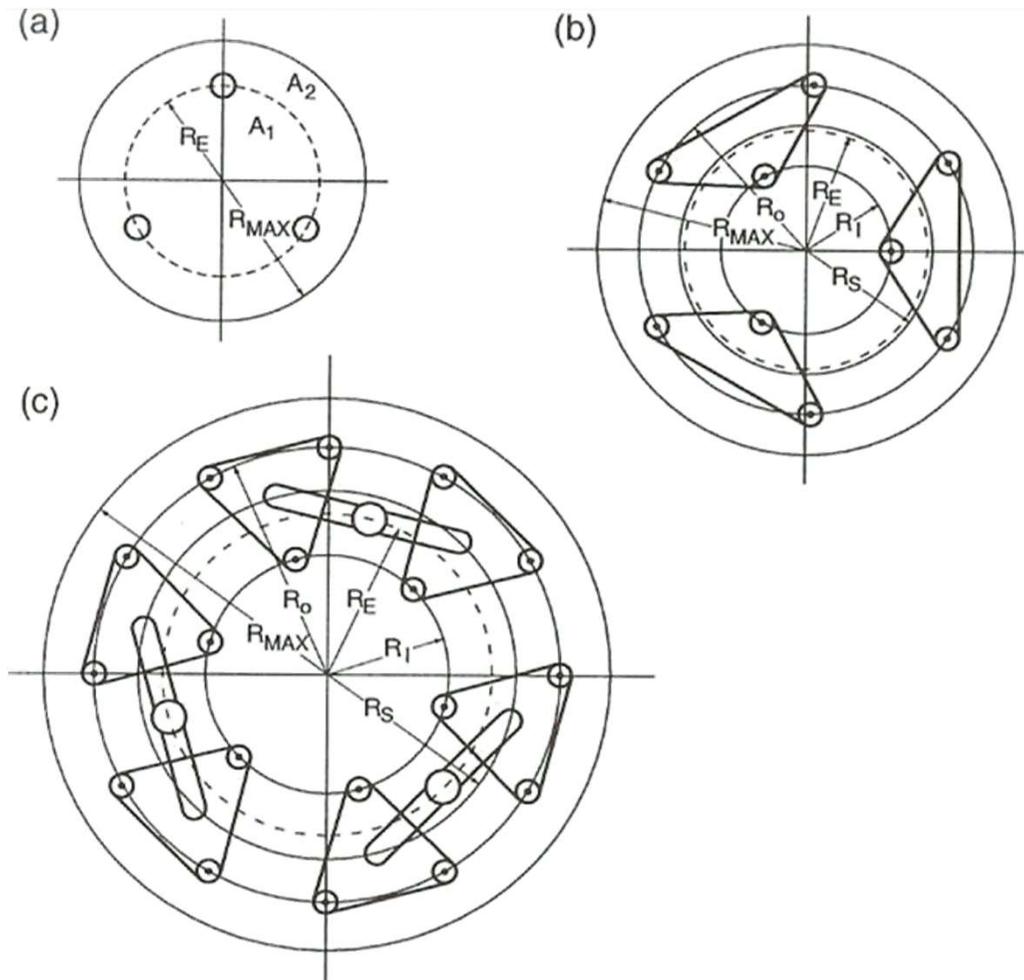
No caso dos espelhos do VLT, cada um tem **seis** anéis de suporte (e 150 actuadores).

No caso de espelhos grossos ($ar = D/e \sim 1$) pode bastar **um** anel de suporte (especialmente para $D < 2m$).

Há exemplos em que se utilizam **dois** anéis para espelhos de 4m e **quatro** para espelhos de 6m.

Os pontos de apoio nos anéis podem ser de tipo: i) **mecânico**; ii) **pneumático**; iii) **hidráulico**.

Existem, ainda, as “**árvores Whiffle**” (“cabeçalho” ou “timão”) que unem três pontos de apoio de cada vez, em triângulos isósceles na forma de placas. Estas sim é que ligam directamente ao espelho (e não os pontos individuais). Desta forma optimiza-se o apoio, controlando ainda melhor as distorções.



A colocação clássica de anéis de pontos de apoio em espelhos e a união de pontos de apoio por “árvores de Whiffle”. Na prática, apenas três pontos de apoio ligam ao telescópio em todos os casos.

a) no caso de se usar apenas um anel (usualmente espelhos com $D=2R_{MAX} < 1m$) o anel de três pontos coloca-se a um raio $R_E = 0.28868D$;

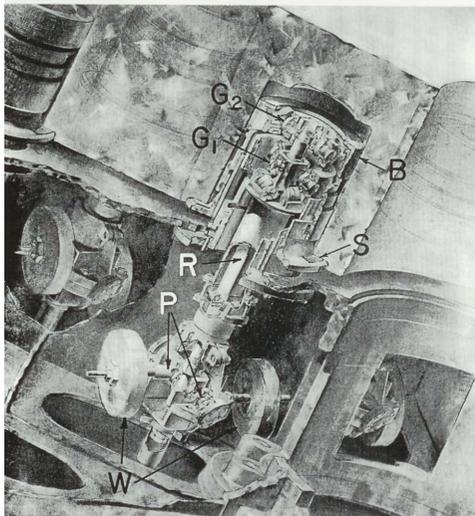
b) quando se utilizam dois anéis (com $n_1=3$ ($R_I = 0.21133D$) e $n_2=6$ ($R_O = 0.40825D$)), o mais eficiente é unir todos os pontos por “árvores de Whiffle” (que ligam ao espelho por três pontos à distância radial $R_S \sim R_E$); esta configuração é usual em espelhos de $\sim 2m$;

c) uma versão melhorada do caso anterior, para espelhos ainda maiores, é usar $n_1=6$ (a R_I) e $n_2=12$ (a R_O) e, ainda, unir as “árvores de Whiffle” (com centros a $R_S = 0.33333D$) duas a duas por barras – estas ligam ao espelho por três pontos a R_E .

2.5.2 Distorções radiais

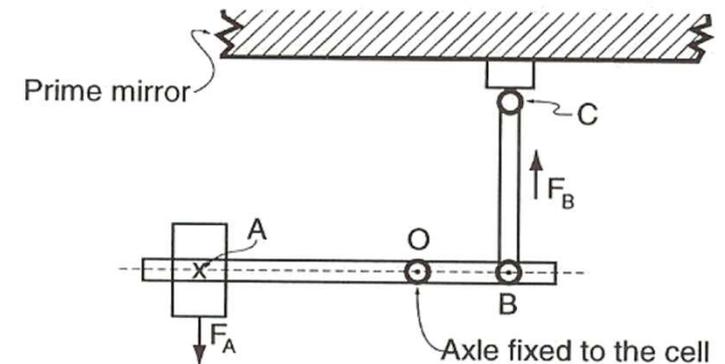
A) Montagens equatoriais

Há um problema adicional óbvio que tem a ver com a distorção sofrida pelos espelhos quando em operação, devido ao efeito da gravidade – **distorção “lateral” ou “radial”**. Numa montagem altazimutal o problema não é significativo (mas existe, em todas as posições que não apontam para o zénite).



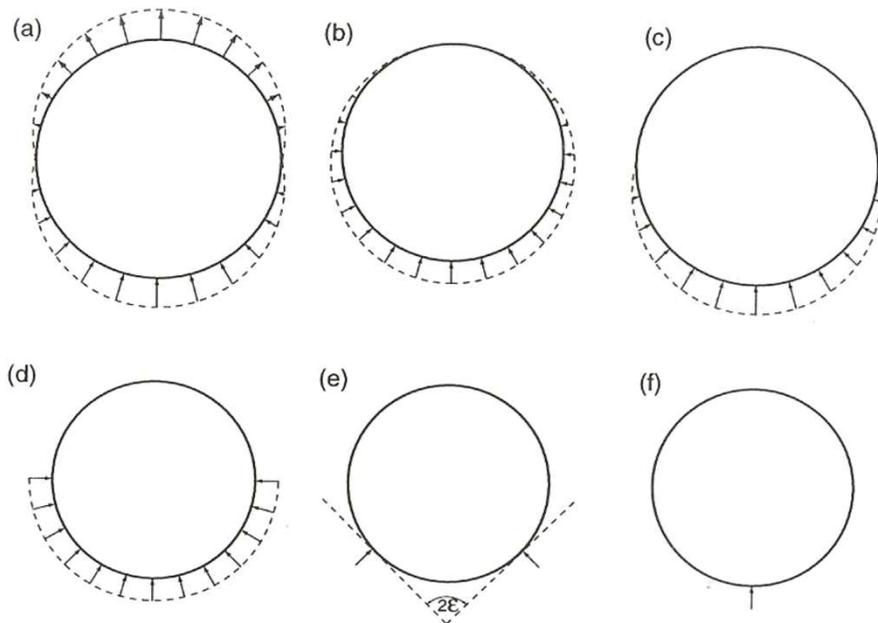
Um exemplo de uma das mais antigas formas para compensar distorções radiais ainda em uso (de tipo mecânico). Neste caso o telescópio é o Hale 5m (Monte Palomar, Califórnia). Os contrapesos W compensam a distorção gravítica em B , após transmissão da sua força pelo engenhoso sistema.

Uma forma de compensar a distorção lateral automaticamente, é recorrer a uma **alavanca**, um importante tipo de apoio mecânico. Utiliza um contrapeso (\vec{F}_A) que implica uma força $\vec{F}_B = \vec{p}_C$ (peso do espelho “localizado” em C). Quando o telescópio aponta com ângulo zenital ξ a força \vec{F}_B reduz de $\cos \xi$ automaticamente (a alavanca roda em torno de O).



A resolução da distorção radial para elevados valores de ângulo zenital, em particular para $\xi = 90^\circ$, deve ser feita com uma das seis seguintes técnicas:

- Suporte lateral**: a intensidade das forças a aplicar varia com $\cos \xi$;
- Linhas elásticas**: aplica-se uma distribuição óptima de forças laterais (só compressivas);
- Linhas elásticas $\frac{1}{2}$** : aplicação do caso anterior a apenas metade do espelho (pouco eficiente);
- Homogeneidade $\frac{1}{2}$** : distribuição de forças de igual intensidade em apenas metade do espelho;
(melhor que o caso anterior)
- Suporte em V**: apenas duas forças, afastadas do ângulo de abertura 2ε ;
- Suporte em baixo**: apenas uma força, aplicada no ponto mais baixo (nada eficiente).



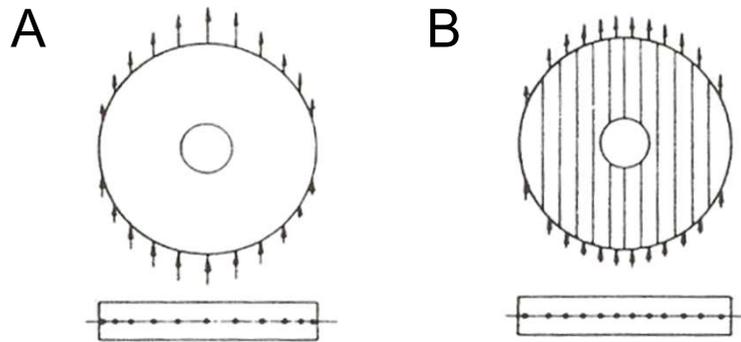
Distorção w em função do factor de forma k de vários espelhos e do tipo de suporte utilizado para a compensar.

Tipo de suporte	$k = 0$	$k = 0.1$	$k = 0.2$	$k = 0.3$
a	0	0.0018	0.0036	0.0055
b	0	0.0132	0.0289	0.0464
c	0.0092	0.0508	0.0926	0.1350
d	0.0074	0.0182	0.0301	0.0421
e ($\varepsilon = 45^\circ$)	0.0548	0.0832	0.1152	0.1480
f	0.0673	0.1480	0.2460	0.3460

Modelos numéricos dos efeitos de aplicação das forças (casos a, b, d e f) num espelho de 4m de diâmetro com um buraco central.

B) Montagens altazimutais

Agora a distribuição de forças é diferente. Não se utilizam componentes horizontais para as mesmas. Os dois métodos mais comuns (**A** e **B** – *uniforme; preferido*) estão ilustrados abaixo (esboça-se também o espelho visto de lado).



Como exemplos: a montagem altazimutal do NTT 3.5m tem um sistema de óptica activa lateral de 24 suportes (aplicação **B**); no caso do VLT são 48 os suportes.

