

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO Y MANUFACTURA ÓPTICA DEL OBJETIVO DE UN
TELESCOPIO ASTRONÓMICO REFRACTOR**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

AUTOR:

Alejandro Manuel Montoya Janampa

ASESOR:

Franco Alejandro Gonzales Niño

Lima, julio, 2020

RESUMEN

El tema de este trabajo de investigación es el diseño y la manufactura óptica del objetivo de un telescopio astronómico refractor orientado a la observación lunar. El objetivo corresponde a un doblete acromático cementado de longitud focal efectiva 450 mm y diámetro de apertura 50 mm. La finalidad de este trabajo es que pueda servir como una guía básica para el diseño de sistemas ópticos y la manufactura de lentes, las cuales son muy útiles en la enseñanza de la Óptica Clásica. Dentro del grupo de investigación de Óptica Aplicada de la PUCP, se ha logrado desarrollar instrumentos tecnológicos avanzados como un par de binoculares, un telescopio reflector Newtoniano y un telescopio terrestre, por lo que hay bastante conocimiento que uno puede adquirir y transmitir a cualquiera interesado en la Ingeniería Óptica. El procedimiento para el desarrollo del objetivo consiste primero en el diseño óptico. Como punto de partida para el cálculo numérico de los parámetros, se toman en cuenta las ecuaciones de aberraciones y luego, se utiliza el software OSLO®, el cual es una herramienta digital de gran utilidad para realizar la simulación y la optimización del objetivo. Después se da paso a la manufactura óptica que es posible de realizar dentro del Laboratorio de Diseño y Manufactura Óptica, y el Taller de Tecnología Óptica de la PUCP. Los resultados logrados son primero el diseño de un doblete acromático cementado que se encuentra limitado con respecto a la difracción. Esto se comprueba en el diagrama de manchas, por lo que se cumple el criterio de difracción. Además, está la manufactura casi completa del objetivo refractor (corte de vidrio, generado de curvatura, esmerilado y la parte inicial de pulido). En conclusión, dentro del grupo de Óptica Aplicada de la PUCP, es posible aprender a desarrollar cada parte de un telescopio astronómico refractor como es el objetivo.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Telescopio astronómico refractor a primer orden.....	1
Figura 2 Doblete acromático cementado.....	3
Figura 3 Refracción del rayo axial en un objetivo	14
Figura 4 Datos iniciales ingresados en OSLO.....	15
Figura 5 Valores optimizados para los dos primeros radios de curvatura.....	16
Figura 6 Coeficientes de las aberraciones de primer y tercer orden.....	16
Figura 7 Gráficos de las aberraciones	17
Figura 8 Diagrama de manchas junto con el disco de Airy.....	18
Figura 9 Información sobre la difracción.....	19
Figura 10 <i>RMS Spot Size</i> (mm) & <i>RMS OPD</i> (mm) vs Fracción de Campo.....	19
Figura 11 Modulación vs Frecuencia (ciclos/mm).....	20
Figura 12 Análisis del frente de onda.....	20
Figura 13 Sistema de corte, y cortes logrados con los vidrios BK7 y SF2	21
Figura 14 Máquina generadora de curvatura en los vidrios y sujetador utilizado.....	22
Figura 15 Arreglos para el generado de una superficie convexa y cóncava	23
Figura 16 Esferómetro y plano de calibración	24
Figura 17 Instrumento para medir espesores.....	26
Figura 18 Máquina de pulido	26
Figura 19 Posiciones para controlar la curvatura	27
Figura 20 Proceso de esmerilado de superficies	28
Figura 21 Reducción de la rugosidad	28
Figura 22 Herramientas adicionales utilizadas.....	29
Figura 23 Arreglo útil en el esmerilado.....	29
Figura 24 Diseño mecánico de herramienta	35
Figura A1 Esquema del trazo de rayos ynu en una lente	40
Figura C1 Plano mecánico de la lente convergente	45
Figura C2 Plano mecánico de la lente divergente	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Referencias para el diseño inicial.....	2
Tabla 2 Parámetros iniciales de diseño	2
Tabla 3 Aberraciones a tomar en cuenta para un objetivo refractor.....	4
Tabla 4 Vidrios <i>crown</i> disponibles para utilizar en la fabricación.....	9
Tabla 5 Vidrios <i>flint</i> disponibles para utilizar en la fabricación	10
Tabla 6 Resultados numéricos para los radios de curvatura.....	10
Tabla 7 Resultados numéricos para las sagitas y espesores centrales	11
Tabla 8 Coeficientes de aberraciones	13
Tabla 9 Cambio de los espesores centrales	14
Tabla 10 Modificación realizada para obtener la longitud focal efectiva correcta.....	15
Tabla 11 Información previa al generado.....	23
Tabla 12 Radios de curvatura generados para cada superficie.....	25
Tabla 13 Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 25 μm	30
Tabla 14 Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 15 μm	31
Tabla 15 Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 5 μm	31
Tabla 16 Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio SF2 con abrasivo de 25 μm	32
Tabla 17 Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio SF2 con abrasivo de 15 μm	32
Tabla 18 Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio SF2 con abrasivo de 5 μm	33
Tabla 19 Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 25 μm	33
Tabla 20 Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 15 μm	34
Tabla 21 Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 5 μm	34

ÍNDICE

	Pág.
1. Introducción.....	1
2. Diseño óptico del doblete acromático cementado.....	2
2.1 Parámetros iniciales	2
2.2 Ecuaciones de aberraciones	2
2.3 Cálculo de los radios de curvatura y los espesores centrales.....	9
2.4 Análisis de las aberraciones.....	11
2.5 Optimización del objetivo.....	13
2.6 Análisis del objetivo optimizado en el software OSLO.....	14
3. Manufactura óptica del doblete acromático cementado.....	21
3.1 Corte del vidrio	21
3.2 Generado de curvatura.....	22
3.3 Esmerilado.....	26
3.4 Pulido.....	34
4. Conclusiones	36
5. Recomendaciones.....	37
6. Bibliografía.....	38
7. Anexos.....	40
A. Trazo de rayos ynu.....	40
B. Cálculo de parámetros.....	42
C. Planos mecánicos	45

1. Introducción

Un telescopio astronómico es un sistema óptico afocal que permite observar, directamente y con un determinado aumento, objetos muy lejanos. Este instrumento está conformado principalmente de un objetivo y un ocular. Los rayos que ingresan al sistema óptico, provenientes de una fuente bastante alejada, son reflejados o refractados (dependiendo del tipo) por el objetivo formando así una imagen real intermedia, la cual es luego ampliada en el infinito por el ocular [17] (mostrado en la figura 1 a un primer orden). Un tipo de telescopio astronómico orientado a la observación lunar es el refractor, el cual está compuesto de puras lentes en su estructura óptica. Entonces en este caso, el objetivo puede tratarse de un singlete, un doblete acromático o un triplete acromático (cementado o no cementado). Para este trabajo de investigación, se escoge el objetivo tipo doblete acromático cementado, ya que la combinación adecuada de una lente convergente y una lente divergente puede resultar suficiente y útil para reducir la aberración cromática axial, la aberración esférica y la coma [16]. Además, su proceso de fabricación es menos complejo [11], por ejemplo, con respecto al de un objetivo tipo triplete acromático pues este último cuenta con una mayor cantidad de elementos en su diseño [18].

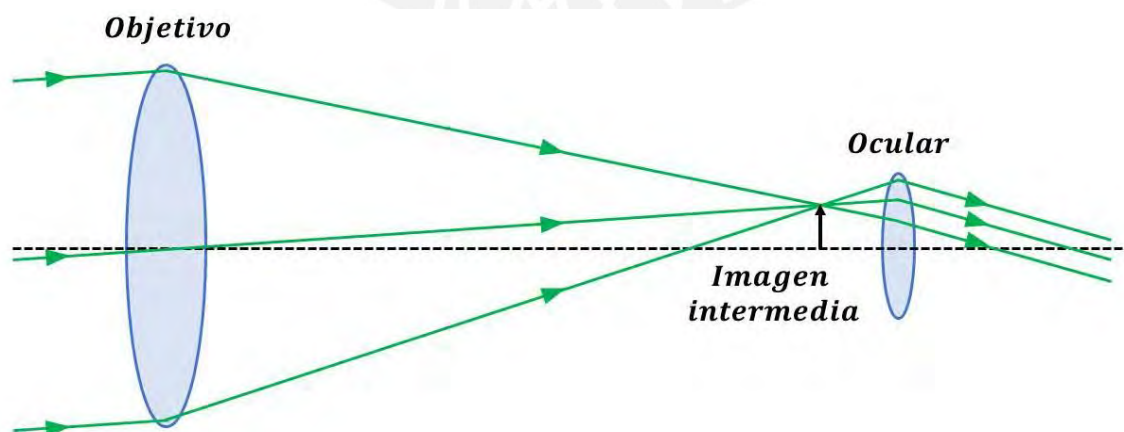


Figura 1. Telescopio astronómico refractor a primer orden [17]

2. Diseño óptico del doblete acromático cementado

2.1 Parámetros iniciales

La longitud focal efectiva del objetivo es 450 mm y el diámetro es 50 mm. Entonces el número f ($f/\#$) es 9. Para decidir estos valores, se ha tomado como referencia un conjunto de telescopios astronómicos refractores de marcas conocidas. Para los dos primeros instrumentos indicados en la tabla 1, el número f es cercano, y para el tercero, el diámetro óptico es el mismo.

Tabla 1. Referencias para el diseño inicial [15]

Nombre del instrumento	Referencia
<i>Celestron Inspire 70 mm Refractor Telescope</i>	$f/10$
<i>Orion Starblast 62 mm Compact Travel refractor Telescope</i>	$f/8.4$
<i>Meade Infinity 50 mm Refractor Telescope</i>	Diámetro óptico 50 mm

Las características a primer orden se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros iniciales de diseño

Parámetro	Valor
Primer Orden	
Distancia objeto	Infinito
Longitud focal efectiva	450 mm
Diámetro de la apertura	50 mm
Número f ($f/\#$)	9
Ángulo de visión	1°

2.2 Ecuaciones de aberraciones

Como ocurre en un doblete acromático cementado (figura 2), el objetivo está compuesto de dos vidrios. El primero (a) es vidrio *crown* y el segundo (b) es vidrio *flint*. El

vidrio *crown* se caracteriza por su baja dispersión y el vidrio *flint* se caracteriza por su alta dispersión. El número de Abbe del vidrio *crown* es mayor a 50 mientras que, para el vidrio *flint*, el número de Abbe es menor a 50 [16]. La combinación adecuada de estos vidrios permite que la posición de enfoque sea la misma para pares de longitudes de ondas distintas. Cabe mencionar que no es posible lograr con vidrios ópticos que el enfoque sea el mismo para todas las longitudes de onda del rango visible [17]. La razón es que el índice de refracción de un vidrio varía de acuerdo a la longitud de onda, no es fijo [9].

Como convención de signos, se considera que las superficies cuyos centros de curvatura se encuentran a su derecha, tienen curvatura y radio de curvatura positivos, y son negativos en el caso contrario, centro de curvatura a la izquierda. Además, se asume que la luz se propaga de izquierda a derecha y que los rayos inicialmente son paralelos al eje óptico, ya que provienen de un objeto en una posición muy lejana, en el infinito. Los rayos son refractados primero por la lente convergente (fabricado con vidrio crown a) y luego por la lente divergente (fabricado con vidrio flint b) [5].

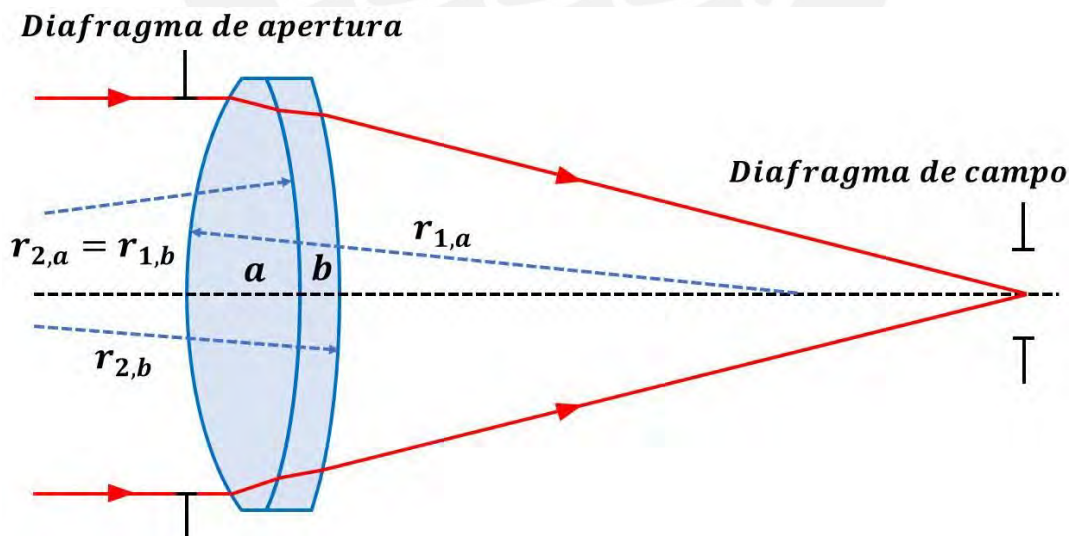


Figura 2. Doblete acromático cementado [14]

Para los cálculos, es necesario definir ciertas variables:

- n = índice de refracción de un vidrio óptico para la línea d (0,588 μm)

- V = número de Abbe de un vidrio óptico para la línea d ($0,588 \mu\text{m}$)
- f = longitud focal o longitud focal efectiva
- r_j = radio de curvatura de una superficie esférica j -ésima
- C_j = curvatura de una superficie esférica j -ésima ($C_j = 1/r_j$)

Además, se deben tomar en cuenta las aberraciones, ya que siempre están presentes en los sistemas ópticos. Las aberraciones aparecen, debido a que la óptica de primer orden es un caso ideal. Todos los órdenes son los que existen [17]. Por lo tanto, las aberraciones deben ser reducidas. Lo que no se puede lograr es anularlas completamente.

Adicionalmente, una ventaja en el diseño del objetivo es que el semi ángulo de visión es pequeño ($0,5^\circ$). Esto reduce bastante la distorsión y el color lateral.

Tabla 3. Aberraciones a tomar en cuenta para un objetivo refractor [14]

Definición	Objetivo
Aberración esférica	Debe ser corregido
Coma	Debe ser corregido
Astigmatismo	Incorregible pero pequeño, ya que $1/f$ es pequeño
Curvatura de campo o curvatura Petzval	Incorregible pero pequeño, ya que $1/f$ es pequeño
Distorsión	Automáticamente pequeño
Color axial	Debe ser corregido
Color lateral	Automáticamente pequeño

Tomado de “Diseño óptico y prototipo de un telescopio terrestre para observación de aves”, por Miranda, 2019. Se utilizan las ecuaciones de óptica geométrica y las ecuaciones de aberraciones del color axial primario, aberración esférica de tercer orden y coma de tercer orden con la finalidad de hallar los radios de curvatura de cada superficie del objetivo refractor [14]. Se considera que

las lentes que componen al acromático son delgadas y también que la posición del diafragma de apertura es pegada a la primera superficie del objetivo [17].

- Acromatismo

La longitud focal del objetivo se puede determinar a partir de la longitud focal de cada lente que lo compone, como se indica en la ecuación (2.1) para lentes delgadas juntas [9]. Estas lentes son en total dos (a y b de la figura 2).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_a} + \frac{1}{f_b} \dots (2.1)$$

La ecuación del color axial primario (2.2), aberración de primer orden, debe ser cero [17].

$$\sum T_{AchC} = \frac{y_a^2}{V_a f_a u'_k} + \frac{y_b^2}{V_b f_b u'_k} = 0 \dots (2.2)$$

u'_k es la última inclinación del rayo axial con respecto al eje. Se trata del caso cementado, por lo que se cumple que entre los vidrios *crown* y *flint* no hay espacio de separación [16]. Así la altura del rayo axial en la primera lente es igual a la altura del mismo rayo en la segunda lente ($y_a = y_b$). Reemplazo esto y simplificando, se obtiene la ecuación(2.3).

$$\frac{1}{V_a f_a} + \frac{1}{V_b f_b} = 0 \dots (2.3)$$

Entonces también se puede calcular la longitud focal de cada lente partiendo de la longitud focal efectiva del objetivo refractor. Es decir, combinando las ecuaciones (2.1) y (2.3).

$$f_a = f \left(\frac{V_a - V_b}{V_a} \right) \dots (2.4)$$

$$f_b = f \left(\frac{V_b - V_a}{V_b} \right) \dots (2.5)$$

Para lentes delgadas, el espesor central es igual a cero. Esto se realiza para facilitar los cálculos. Las ecuaciones (2.8) y (2.9) son obtenidas a partir de la longitud focal de una lente delgada considerando las curvaturas -ecuaciones (2.6) y (2.7)- y el índice de refracción [9].

$$C_a = C_{1a} - C_{2a} \dots (2.6)$$

$$1/f_a = (n_a - 1)C_a \dots (2.8)$$

$$C_b = C_{1b} - C_{2b} \dots (2.7)$$

$$1/f_b = (n_b - 1)C_b \dots (2.9)$$

Se pueden deducir dos relaciones útiles (2.10) y (2.11) al reemplazar la ecuación (2.4) en (2.8), y la ecuación (2.5) en (2.9).

$$C_a = \frac{V_a}{(n_a - 1) f (V_a - V_b)} \dots (2.10) \quad C_b = \frac{V_b}{(n_b - 1) f (V_b - V_a)} \dots (2.11)$$

Se definen las funciones G, las cuales están dadas en función del índice de refracción de un determinado vidrio óptico [17].

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{n^2(n-1)}{2} & G_5 &= \frac{2(n+1)(n-1)}{n} \\ G_2 &= \frac{(2n+1)(n-1)}{2} & G_6 &= \frac{(3n+2)(n-1)}{2n} \\ G_3 &= \frac{(3n+1)(n-1)}{2} & G_7 &= \frac{(2n+1)(n-1)}{2n} \\ G_4 &= \frac{(n+2)(n-1)}{2n} & G_8 &= \frac{n(n-1)}{2} \end{aligned}$$

- Aberración esférica de tercer orden

Esta aberración del doblete acromático cementado es expresada en la ecuación (2.12) [17].

$$\begin{aligned} \sum TSC &= \frac{y_a^4}{u_k^4} (G_{1a} C_a^3 - G_{2a} C_a^2 C_{1a} - G_{3a} C_a^2 v_a + G_{4a} C_a C_{1a}^2 + G_{5a} C_a C_{1a} v_a + \\ &G_{6a} C_a v_a^2) + \frac{y_b^4}{u_k^4} (G_{1b} C_b^3 - G_{2b} C_b^2 C_{1b} - G_{3b} C_b^2 v_b + G_{4b} C_b C_{1b}^2 + G_{5b} C_b C_{1b} v_b + \\ &G_{6b} C_b v_b^2) \\ &\dots (2.12) \end{aligned}$$

$$v = u/y \dots (2.13)$$

El rayo axial proviene de un objeto en el infinito (ver figura 2). Por lo tanto se considera en la ecuaciones (2.12) y (2.13) que la inclinación inicial del rayo $u_a = 0$ así $v_a = 0$, y la ecuación (2.12) debe ser igual a cero. También es simplificada la última inclinación u'_k .

$$y_a^4(G_{1a}C_a^3 - G_{2a}C_a^2C_{1a} + G_{4a}C_aC_{1a}^2) + y_b^4(G_{1b}C_b^3 - G_{2b}C_b^2C_{1b} - G_{3b}C_b^2v_b + G_{4b}C_bC_{1b}^2 + G_{5b}C_bC_{1b}v_b + G_{6b}C_bv_b^2) = 0$$

... (2.14)

- Coma de tercer orden

Esta aberración del doblete acromático cementado es expresada en la ecuación (2.15) [17].

$$\sum CC = -hy_a^2(0.25G_{5a}C_aC_{1a} + G_{7a}C_av_a - G_{8a}C_a^2) - hy_b^2(0.25G_{5b}C_bC_{1b} + G_{7b}C_bv_b - G_{8b}C_b^2)$$

... (2.15)

En donde h es la altura de la imagen. Se mencionó anteriormente que $v_a = 0$ y la ecuación de la coma de tercer orden (2.15) debe ser igual a cero.

$$y_a^2(0.25G_{5a}C_aC_{1a} - G_{8a}C_a^2) + y_b^2(0.25G_{5b}C_bC_{1b} + G_{7b}C_bv_b - G_{8b}C_b^2) = 0$$

... (2.16)

Se utiliza nuevamente que $y_a = y_b$ en la ecuación (2.14) para así simplificar estos 2 valores.

$$G_{4a}C_aC_{1a}^2 + G_{4b}C_bC_{1b}^2 - G_{2a}C_a^2C_{1a} + [G_{5b}C_bv_b - G_{2b}C_b^2]C_{1b} + G_{1a}C_a^3 + G_{1b}C_b^3 - G_{3b}C_b^2v_b + G_{6b}C_bv_b^2 = 0$$

... (2.17)

Mismo procedimiento para la ecuación (2.16)

$$0.25G_{5a}C_aC_{1a} + 0.25G_{5b}C_bC_{1b} - G_{8a}C_a^2 + G_{7b}C_bv_b - G_{8b}C_b^2 = 0$$

... (2.18)

Las ecuaciones (2.17) y (2.18) deben ser combinadas para obtener solo una ecuación final que ayude a determinar la curvatura de la primera superficie del objetivo C_{1a} .

Entonces para trabajar con expresiones más amigables, son definidas las funciones J.

$$\begin{aligned}
 J_1 &= G_{4a} C_a & J_2 &= G_{4b} C_b \\
 J_3 &= -G_{2a} C_a^2 & J_4 &= G_{5b} C_b v_b - G_{2b} C_b^2 \\
 J_5 &= G_{1a} C_a^3 + G_{1b} C_b^3 - G_{3b} C_b^2 v_b + G_{6b} C_b v_b^2 & J_6 &= 0.25 G_{5a} C_a \\
 J_7 &= 0.25 G_{5b} C_b & J_8 &= -G_{8a} C_a^2 + G_{7b} C_b v_b - G_{8b} C_b^2
 \end{aligned}$$

De las ecuaciones de rayos ynu en óptica paraxial (más detallado en el anexo A), se obtiene el valor de la inclinación del rayo axial u_b luego de la primera refracción con la lente convergente. Esto es útil para calcular v_b agregando la ecuación (2.13) y $u_a = 0$.

$$\begin{aligned}
 u_b &= u_a - \frac{y_a}{f_a} = 0 - \frac{y_b}{f_a} \\
 v_b &= -1/f_a \quad \dots (2.19)
 \end{aligned}$$

El valor de C_{1a} se determina con los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 de la ecuación de segundo orden (2.20), la cual se obtiene combinando las ecuaciones (2.17) y (2.18), y las funciones J.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= J_1 + \frac{J_2 J_6^2}{J_7^2} \\
 a_2 &= J_3 + \frac{2J_8 J_6 J_2}{J_7^2} - \frac{J_6 J_4}{J_7} \\
 a_3 &= J_5 + \frac{J_8^2 J_2}{J_7^2} - \frac{J_8 J_4}{J_7} \\
 a_1 C_{1a}^2 + a_2 C_{1a} + a_3 &= 0 \quad \dots (2.20) \\
 C_{1a} &= \frac{-a_2 + \sqrt{(a_2)^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1} \quad \dots (2.21)
 \end{aligned}$$

Se escoge la solución positiva de la ecuación cuadrática (2.20) como se muestra en la ecuación (2.21). En caso de que la discriminante sea menor a cero, se descarta la combinación de vidrios. Además, las superficies interiores se encuentran en completo contacto, entonces se impone la condición de que las curvaturas internas son iguales.

$$C_{1b} = C_{2a} \dots (2.22)$$

Luego se puede conocer la última curvatura combinando las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.22).

$$C_{2b} = C_{1a} - C_a - C_b \dots (2.23)$$

Finalmente, para una superficie esférica j -ésima, el radio de curvatura es la inversa de la curvatura [5], como se muestra en la ecuación (2.24).

$$r_j = 1/C_j \dots (2.24)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23) en (2.24), se obtienen las ecuaciones (2.25), (2.26) y (2.27) para determinar los radios de curvatura de cada superficie.

$$r_{1a} = 1/C_{1a} = \frac{2a_1}{-a_2 + \sqrt{(a_2)^2 - 4a_1 a_3}} \dots (2.25)$$

$$r_{2a} = r_{1b} = 1/(C_{1a} - C_a) \dots (2.26) \quad r_{2b} = 1/(C_{1a} - C_a - C_b) \dots (2.27)$$

2.3 Cálculo de los radios de curvatura y los espesores centrales:

Estas operaciones para hallar los radios de curvatura deben ser realizadas con los vidrios ópticos que se disponen en el Taller de Manufactura Óptica de la PUCP (tablas 4 y 5) para asegurar que se cuentan con los elementos para la manufactura del objetivo diseñado.

Tabla 4. Vidrios *crow*n disponibles para utilizar en la fabricación

Vidrio <i>crow</i> n	Índice de refracción	Número de Abbe
BAK4	1,56883	56,13
BK7	1,51680	64,17
K5	1,52249	59,48

Tabla 5. Vidrios *flint* disponibles para utilizar en la fabricación

Vidrio <i>flint</i>	Índice de refracción	Número de Abbe
F2	1,62004	36,37
SF2	1,64769	33,85
SF10	1,72825	28,41

En la tabla siguiente 6, se muestran los radios de curvatura calculados para la longitud focal efectiva de 450 mm.

Tabla 6. Resultados numéricos para los radios de curvatura

Substrato	r1 (mm)	r2 = r3 (mm)	r4 (mm)
K5 - F2	274,970	-136,801	-598,998
K5 - SF2	274,283	-160,657	-590,640
K5 - SF10	273,997	-222,595	-587,453
BK7 - F2	272,871	-159,725	-636,171
BK7 - SF2	272,818	-183,989	-623,187
BK7 - SF10	273,297	-246,481	-612,432
BAK4 - F2	285,514	-131,670	-1001,930
BAK4 - SF2	285,785	-157,657	-884,812
BAK4 - SF10	285,914	-226,603	-777,855

En todos los casos, la última superficie 4 presenta en magnitud el mayor radio de curvatura, lo cual es importante para minimizar la aberración esférica [17].

Dado un radio de curvatura r y el diámetro físico del elemento D , se puede calcular por medio de la ecuación (2.28), el valor de la sagita z del arco [1].

$$z = \frac{0.25D^2/r}{1 + \sqrt{1 - (0.5D/r)^2}} \dots (2.28)$$

Para la lente positiva, el espesor central depende del diámetro del elemento y los radios de curvatura. Este es indicado en la ecuación (2.29) [1].

$$TH_a = \frac{D}{30} + \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{|r_{1a}|} + \frac{1}{|r_{2a}|} \right) + z_{1a} - z_{2a} \quad \dots (2.29)$$

En la lente negativa, la relación es similar para obtener la ecuación (2.30) [1].

$$TH_b = \frac{D}{30} + \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{|r_{1b}|} + \frac{1}{|r_{2b}|} \right) + z_{1b} - z_{2b} \quad \dots (2.30)$$

Se utilizan los resultados obtenidos de la tabla 6 para calcular las sagitas y los espesores centrales (tabla 7). El diámetro óptico es 50 m para todas las combinaciones.

Tabla 7. Resultados numéricos para las sagitas y espesores centrales

Substrato	z1 (mm)	z2 = z3 (mm)	z4 (mm)	THa (mm)	THb (mm)
K5 - F2	1,139	-2,304	-0,522	8,530	2,691
K5 - SF2	1,142	-1,957	-0,529	7,850	2,713
K5 - SF10	1,143	-1,408	-0,532	6,762	2,726
BK7 - F2	1,148	-1,969	-0,491	7,885	2,637
BK7 - SF2	1,148	-1,706	-0,502	7,365	2,662
BK7 - SF10	1,146	-1,271	-0,510	6,495	2,684
BAK4 - F2	1,097	-2,395	-0,312	8,626	2,269
BAK4 - SF2	1,096	-1,995	-0,353	7,833	2,361
BAK4 - SF10	1,095	-1,383	-0,402	6,617	2,466

El código de programación utilizado para todos los cálculos se encuentra en el anexo B.

2.4 Análisis de las aberraciones

Para un sistema que es simétrico con respecto al eje, las aberraciones son solamente de orden impar, por lo que no habría aberraciones de orden par [17]. Los coeficientes de estas

aberraciones son calculados en el software OSLO ingresando para cada objetivo los parámetros previamente calculados (diámetros de los elementos, espesores centrales, radios de curvaturas y tipos de vidrios) [13].

El software OSLO (*Optical Software for Layout and Optimization*) es un programa de diseño óptico bastante eficiente. No solo permite realizar el diseño típico de lentes, sino que también brinda herramientas que mezclan la simulación avanzada de rayos, análisis y técnicas de optimización con un lenguaje de alto nivel, lo cual es útil para estar a la par de las necesidades del diseño óptico actual. Se deben mencionar todas las aberraciones (orden impar) cuyos coeficientes serán analizados después [13].

Aberraciones cromáticas (primer orden):

- Aberración cromática axial principal (PAC)
- Aberración cromática axial secundaria (SAC)
- Aberración cromática lateral principal (PLC)
- Aberración cromática lateral secundaria (SLC)

Aberraciones de tercer orden (aberraciones de Seidel):

- Aberración esférica de tercer orden (SA3)
- Coma de tercer orden (CMA3)
- Astigmatismo de tercer orden (AST3)
- Curvatura Petzval de tercer orden (PTZ3)
- Distorsión de tercer orden (DIS3)

Otras aberraciones de orden mayor:

- Aberración esférica de quinto orden (SA5)
- Aberración esférica de séptimo orden (SA7)

En la tabla 8, se muestra la comparación de 4 coeficientes de aberraciones para todas las combinaciones de vidrios ópticos. Se considera un semi ángulo de visión de $0,5^\circ$ [1].

Tabla 8. Coeficientes de aberraciones

Substrato	PAC (μm)	SAC (μm)	SA3 (μm)	CMA3 (μm)
K5 - F2	-4,432	7,769	72,643	-0,828
K5 - SF2	-3,957	8,403	41,095	-0,544
K5 - SF10	-3,103	9,736	-8,220	0,094
BK7 - F2	-3,676	9,254	25,455	-0,342
BK7 - SF2	-3,289	9,703	6,633	-0,118
BK7 - SF10	-2,573	10,720	-25,530	0,388
BAK4 - F2	-5,479	6,936	33,587	-0,354
BAK4 - SF2	-4,744	7,809	23,664	-0,297
BAK4 - SF10	-3,551	9,477	-6,895	0,092

Se procede a trabajar con la combinación BK7 y SF2 para el diseño óptico final del doblete acromático cementado, ya que primero todos sus coeficientes de aberraciones mostrados son menores al orden de $10 \mu\text{m}$, y luego su coeficiente SA3 es el menor en magnitud

2.5 Optimización del objetivo

Los parámetros de los objetivos previamente calculados han sido diseñados de tal manera que se puedan reducir varias aberraciones como el color axial, aberración esférica y coma. Ahora lo que se busca es optimizar el sistema óptico. Para el diseño del objetivo refractor, el campo de visión que se considera es de 1° [1].

Primero se recomienda realizar un cambio en las medidas de los espesores centrales. Por ejemplo, está el doblete acromático cementando con combinación de los vidrios BK7 y SF2.

El diámetro óptico de cada elemento es 50 mm . Se decide que los nuevos valores de

espesores, en milímetros, tengan a lo máximo una cifra decimal significativa (aproximación o truncación) [1].

Tabla 9. Cambio de los espesores centrales

Vidrio	Espesor inicial (mm)	Espesor modificado (mm)
BK7	7,365	7,200
SF2	2,662	3,400

Para la segunda lente (divergente), se recomienda que el valor de su espesor central se encuentre entre el 6% y el 10% del diámetro del elemento [7]. Entonces se puede considerar que el valor del segundo espesor central del objetivo cambie a 3,40 mm. Se puede comprobar fácilmente que un cambio incluso mayor no afecta el rendimiento óptico del sistema [11].

Además, como es de notar en los diseños, la longitud focal efectiva no ha resultado igual a lo impuesto en un comienzo, debe ser 450 mm. Por lo tanto, se escoge la última superficie del objetivo para modificar su radio de curvatura y así obtener la longitud focal efectiva correcta.

Debe ocurrir lo mostrado en la siguiente figura 3:

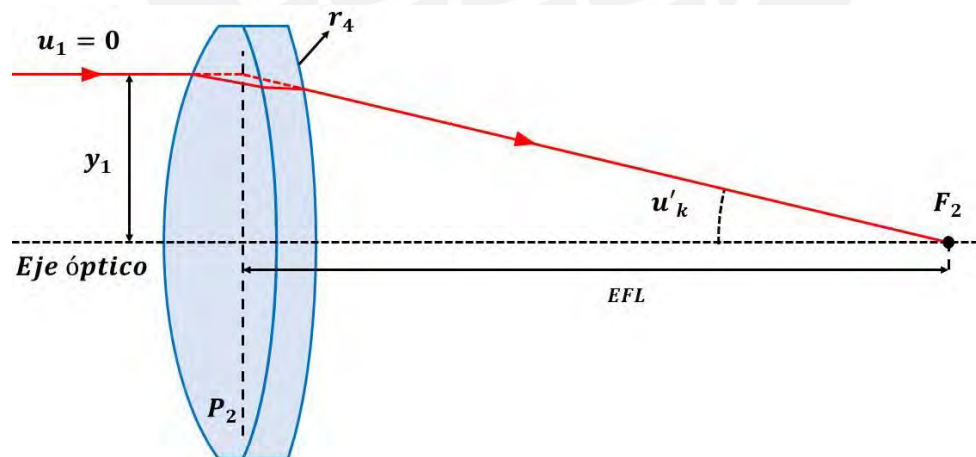


Figura 3. Refracción del rayo axial en un objetivo

- EFL es la longitud focal efectiva
- P_2 es el segundo “plano” principal y F_2 es el segundo punto focal
- r_4 es el radio de curvatura de la superficie 4

- u_1 y u'_k son los ángulos del rayo con respecto al eje óptico (inicial y final)
- y_1 es la altura inicial de rayo con respecto al eje óptico

El valor de u'_k se calcula mediante la ecuación (2.31) [17].

$$u'_k = -y_1/EFL \dots (2.31)$$

Por simplicidad, se puede escoger a y_1 cercano a la mitad del diámetro. Continuando con el mismo ejemplo del doblete acromático cementado. Su diámetro es 50 mm y la longitud focal efectiva que se busca es de 450 mm. Se utiliza el comando *solve* para el radio de curvatura de la última superficie del objetivo y se escoge la opción *axial ray angle* [13], en el cual se escribe el resultado de $-24 / 450 = -0,053$. Así se mantiene la longitud focal efectiva.

Tabla 10. Modificación realizada para obtener la longitud focal efectiva correcta

Valor inicial del radio de curvatura (mm)	EFL inicial (mm)	Valor final del radio de curvatura (mm)	EFL (mm)
-623,187	451,017	-620,163	450,000

Notar que el nuevo radio de curvatura es cercano al anterior.

Lens: Cemented Achromatic Doublet		Zoom	1 of 1	EFL	450.000000	
Ent beam radius		24.000000	Field angle	0.500000	Primary wavln	0.587560
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	1.0000e+20	8.7269e+17	AIR		
AST	272.818000	7.365000	25.000000	BK7	C F	
2	-183.989000	2.662000	25.000000	SF2	C F	
3	-620.163258	444.996143	25.000000	AIR	F	
IMS	0.000000	0.249039	3.942539		S	

Figura 4. Datos iniciales ingresados en OSLO

Para reducir las aberraciones, los dos primeros radios de curvatura son escogidos como variables a iterar para mejorar el rendimiento óptico del sistema, y en la última superficie, se mantiene activo el comando *solve* con el propósito de mantener constante la longitud focal efectiva. En la optimización, se utiliza la función *Generate Error Function > OSLO Spot*

Size/Wavefront > Field Sampling Method > Lobatto [13]. Nótese que los valores finales de optimización son cercanos a los valores iniciales de diseño.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	8.7269e+17	AIR	
AST	274.397366	7.200000	25.000000	BK7	C
2	-188.423621	3.400000	25.000000	SF2	C
3	-623.307179	444.867309	25.000000	AIR	
IMS	0.000000	0.141786	3.935885		S

Figura 5. Valores optimizados para los dos primeros radios de curvatura

Información más detallada sobre los parámetros de las lentes se encuentra en el Anexo C.

2.6 Análisis del objetivo optimizado en el software OSLO

El único coeficiente que se encuentra en el orden mayor de $1,0e-2$ es del color axial primario. Además, los coeficientes para el color axial secundario, aberración esférica de tercer orden, coma de tercer orden y astigmatismo de tercer orden están en el orden de $1,0e-4$. En el caso de la distorsión de tercer orden y el color lateral secundario, se puede considerar que estas aberraciones no tienen efecto alguno en la calidad de imagen, debido a que sus coeficientes se encuentran en el orden de $1,0e-6$.

*CHROMATIC ABERRATIONS					
SRF	PAC	SAC	PLC	SLC	
1	-0.208992	-0.144700	-0.020852	-0.014438	
2	0.665348	0.479483	-0.023596	-0.017004	
3	-0.472206	-0.334190	0.044423	0.031439	
SUM	-0.015851	0.000594	-2.5253e-05	-2.8877e-06	
*SEIDEL ABERRATIONS					
SRF	SA3	CMA3	AST3	PTZ3	DIS3
1	-0.033818	-0.003374	-0.000337	-0.000511	-8.4542e-05
2	0.113457	-0.004024	0.000143	0.000114	-9.1144e-06
3	-0.079472	0.007476	-0.000703	-0.000259	9.0567e-05
SUM	0.000167	7.8570e-05	-0.000897	-0.000656	-3.0891e-06

Figura 6. Coeficientes de las aberraciones de primer y tercer orden

Como se señaló en un inicio, aberraciones como la distorsión y el color lateral son pequeñas pues el campo de visión es de 1° . También, otras aberraciones como el astigmatismo y la

curvatura de campo no tienen mucha influencia en la simulación por la pequeña potencia del objetivo. Por último, para los rayos meridionales, se muestra una notoria simetría en la superficie imagen para distintos ángulos de visión; por lo tanto, la coma está corregida [16].

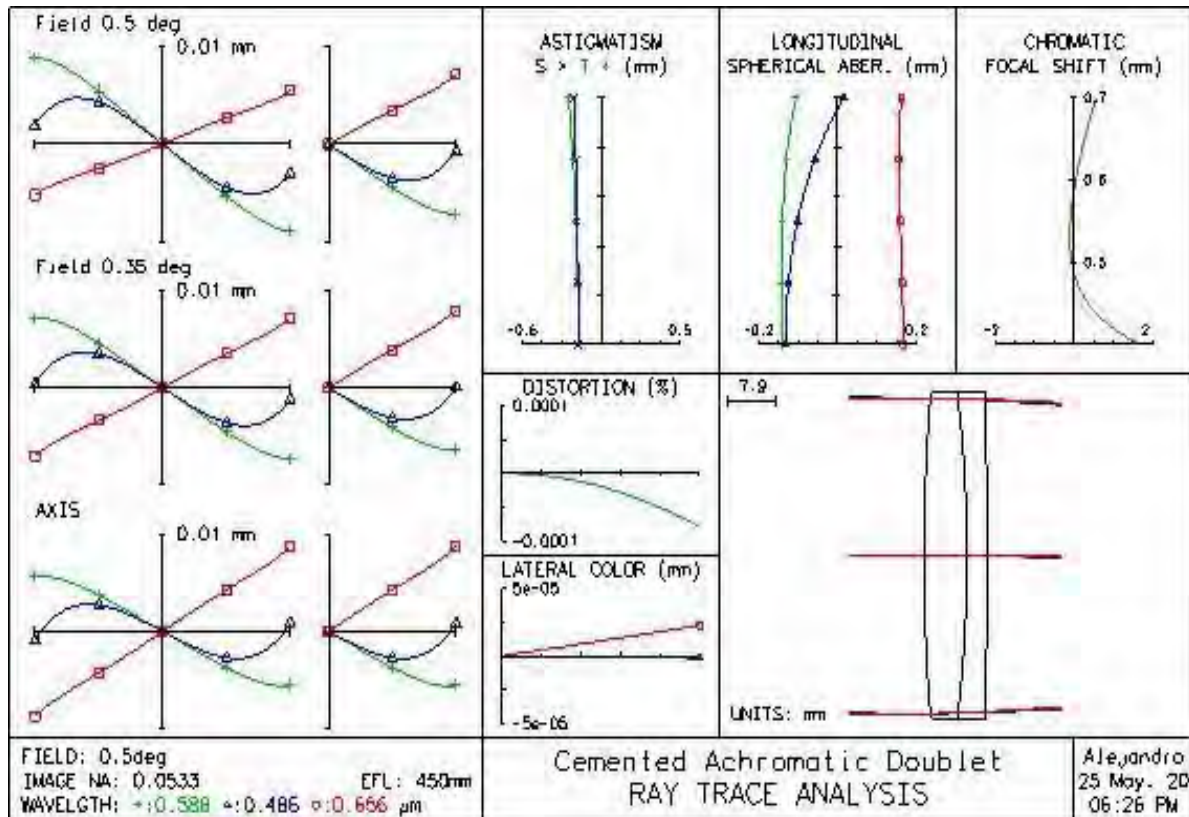


Figura 7. Gráficos de las aberraciones

La superficie imagen fue desplazada de tal manera que el tamaño de la mancha sea mínimo considerando varias longitudes de onda (0,588 μm , 0,486 μm y 0,656 μm) [13].

Para el cambio focal cromático, la posición de enfoque es mayor alrededor del violeta (0,400 μm). Esto no significa un problema, ya que el ojo humano es apenas sensible a este color [16]. En un intervalo continuo de longitudes de onda, la posición de enfoque es la misma para pares distintos, lo cual tiene sentido pues el objetivo corresponde a un acromático [17]. En el gráfico de la aberración esférica longitudinal, se puede notar la presencia de esfero cromatismo (dependencia de la aberración esférica con la longitud de onda): la aberración esférica está sobre corregida para el color azul mientras que, en el rojo, no sucede lo mismo

[8]. Adicionalmente, las curvaturas de campo en el plano sagital y en el plano tangencial corresponden a curvaturas convexas y las gráficas son muy cercanas, por lo que hay poco astigmatismo [16]. Por último, para el porcentaje de distorsión vs. campo, se muestra que la distorsión es negativa [17]. Esta aberración y el color lateral, ambos son bastante bajos.

La luz en su propagación encuentra un obstáculo en los bordes del diafragma de apertura y se difracta. Al ser su forma circular de la parada, se forman anillos de interferencia en la superficie imagen (máximos y mínimos de intensidad luminosa) [9]. El límite de difracción o el radio del disco de Airy se puede calcular en el software OSLO [13], y su valor es de $6,723 \mu\text{m}$. Comparando este valor con el tamaño o radio RMS de la mancha (GEO RMS R) de $4,559 \mu\text{m}$ en la superficie imagen, se puede afirmar que el objetivo se encuentra limitado con respecto a la difracción. Entonces, se cumple el criterio de difracción [14].

En la figura 8, el disco de Airy está señalado en las circunferencia marcadas de negro [16].

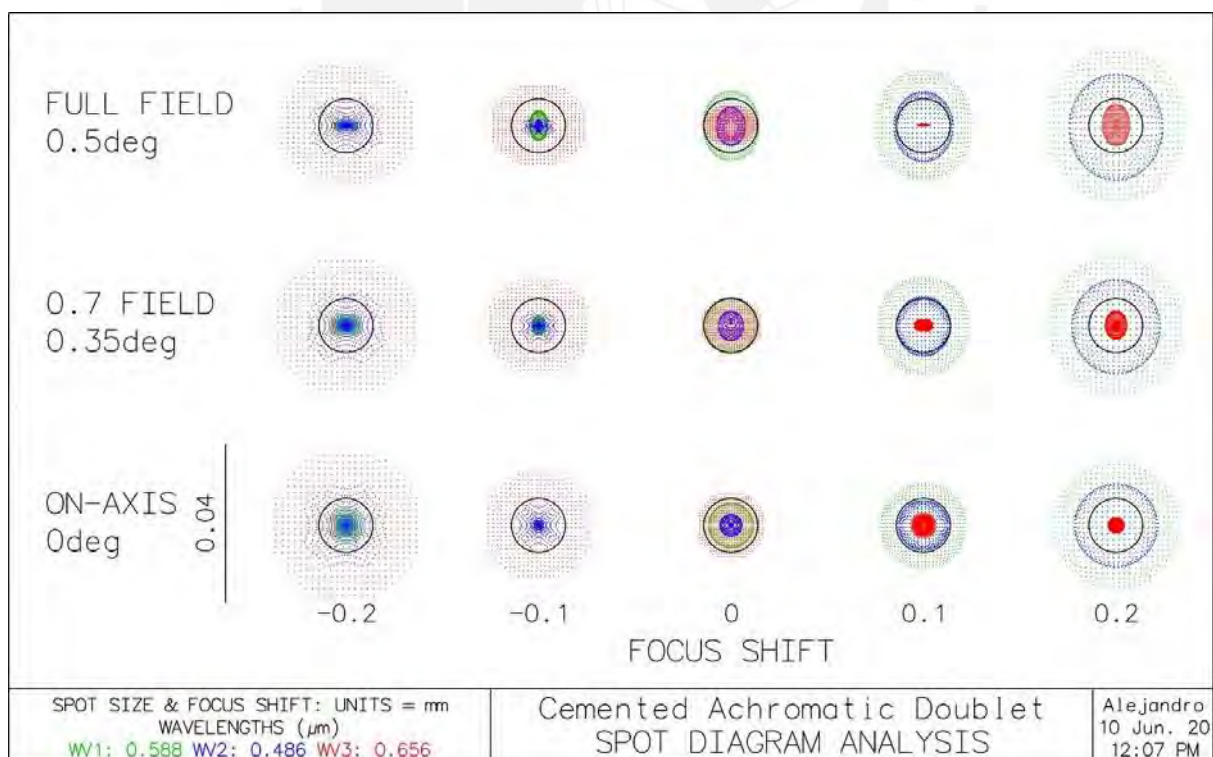


Figura 8. Diagrama de manchas junto con el disco de Airy

```
*SPOT SIZES
GEO RMS Y   GEO RMS X   GEO RMS R   DIFFR LIMIT   CENTY   CENTX
0.003223   0.003223   0.004559   0.006723     --     --
```

Figura 9. Información sobre la difracción

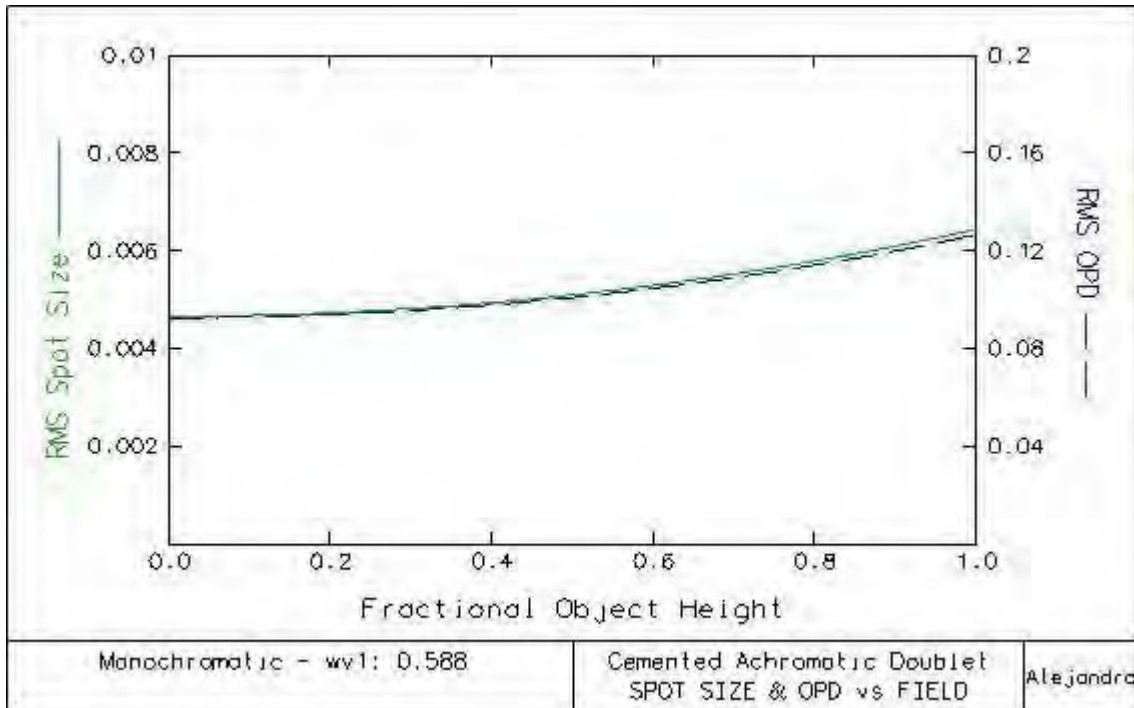


Figura 10. RMS Spot Size (mm) & RMS OPD (mm) vs Fracción de Campo

No es perceptible la presencia de coma para un ángulo de visión no nulo pues se mantiene la simetría con respecto a los ejes. Esto también significa que es baja la curvatura de campo, ya que la mancha para el mayor semi ángulo de visión es parecida a la mancha para rayos que provienen del eje. Por último, es interesante notar que, en el diseño, no solo se ha considerado a la luz como un conjunto de rayos (óptica geométrica) sino como una onda, lo cual es fundamental al hablar de difracción [9].

Se cumple, para una frecuencia de 30 ciclos o pares por milímetros, que la modulación (relación entre el contraste de la imagen y el contraste del objeto) es mayor a 60%. Esto es un requerimiento mencionado en el blog JPGNFOTO (autor desconocido) para la evaluación de un objetivo refractor [14].

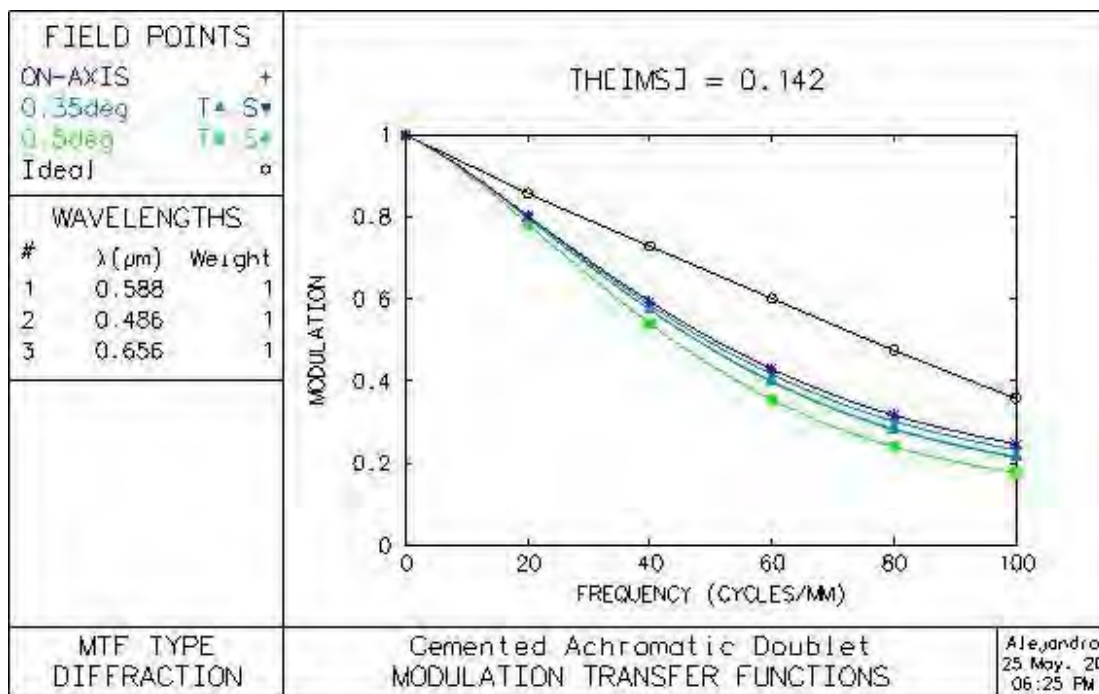


Figura 11. Modulación vs Frecuencia (ciclos/mm)

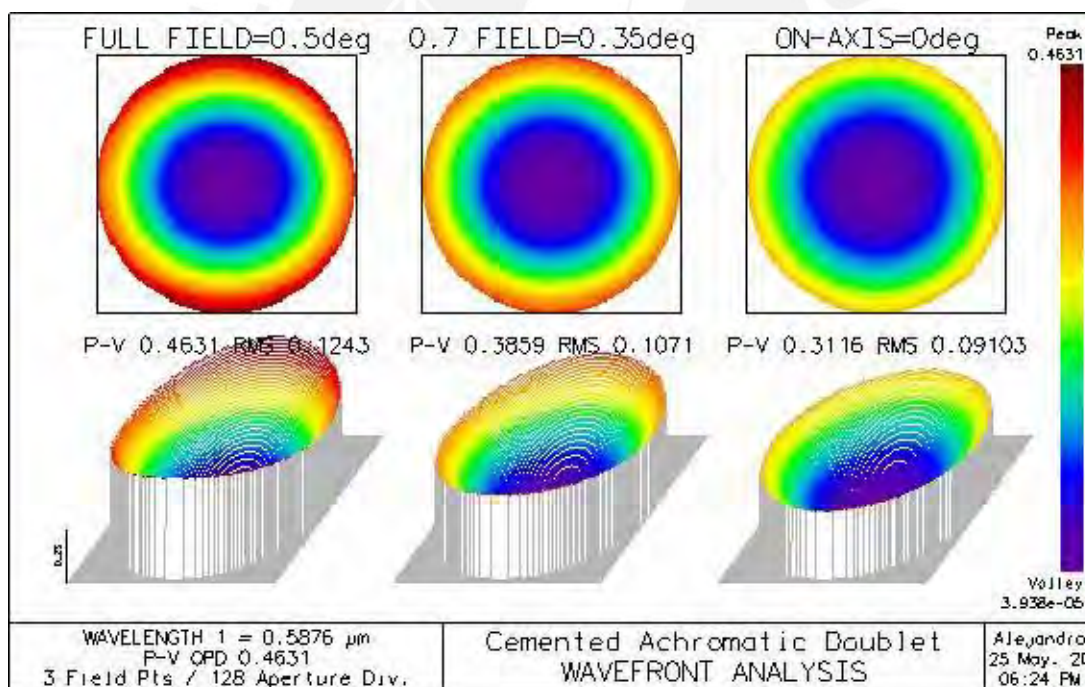


Figura 12. Análisis del frente de onda

Para el error en el frente de onda, se muestra que para un campo de visión de 1° la separación pico - valle (P-V) es 0,464 de longitud de onda, la cual es menor a 0,500 de longitud de onda ($\lambda/2$) [13]. Este error en el frente de onda disminuye al ser menor el campo.

3. Manufactura óptica del doblete acromático cementado

3.1 Corte del vidrio

Primero se limpia el soporte de vidrio, sobre el cual estará posicionado el bloque del vidrio BK7. Después para mantener estos dos elementos juntos, se utiliza un pedazo de cera y una pistola que dispara aire caliente, la cual irá derritiendo la cera para que pueda pegar los vidrios y así evitar cualquier desplazamiento o separación durante el corte transversal [10].

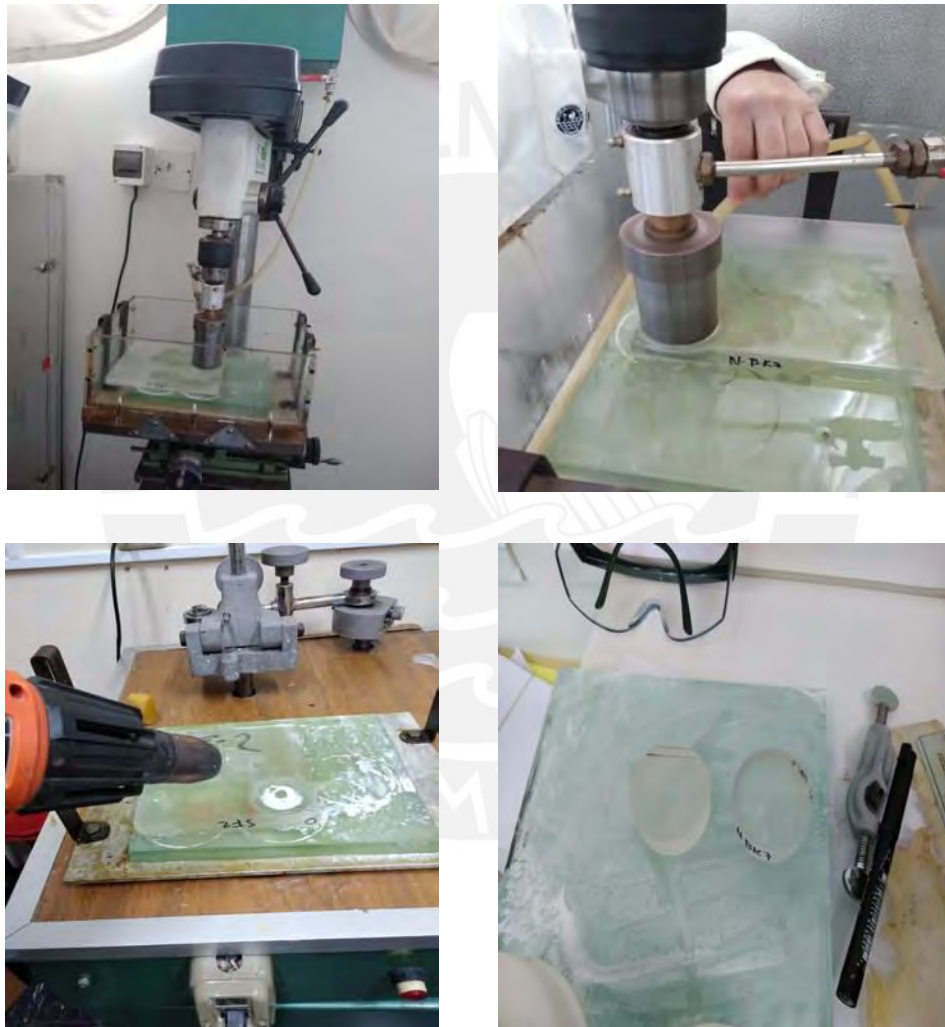


Figura 13. Sistema de corte, y cortes logrados con los vidrios BK7 y SF2

El sistema de corte está conformado de un taladro de columna, una mesa mecánica de desplazamiento horizontal, y dos recipientes de metal y plástico que sirven para la lubricación y refrigeración [6]. El objeto metálico que se utiliza para cortar es de sección transversal

circular (diámetro 50 mm) y se encuentra bañado en polvo de diamante. Este es ensamblado al taladro, el cual, mientras gira, va presionando el vidrio BK7 con el objeto metálico. Este proceso de corte es facilitado por el lubricante que cae continuamente hacia el vidrio [10]. Después se procede a calentar los bloques de vidrios con la pistola, y así separar el corte logrado del vidrio *crow*n. El mismo procedimiento se realiza nuevamente para el vidrio SF2.

3.2 Generado de curvatura

Adicionalmente, debido a que el número de superficies no cementadas del objetivo es 2, se realizan 2 cortes adicionales y similares utilizando vidrio de ventana, y se debe contar con un sujetador plástico cuya sección transversal de agarre sea la misma al de todos los cortes de vidrios [10]. Es decir, diámetro 50 mm. Inicialmente, no se contaba con un diámetro adecuado de este objeto en el Taller de Manufactura Óptica, por lo que tuvo que ser modificado con la máquina generadora.



Figura 14. Máquina generadora de curvatura en los vidrios y sujetador utilizado

Para la generación de curvaturas, se utiliza la máquina SIDAI / CG-2.0, y se debe tener mucho cuidado en esta parte de la manufactura, ya que un mal generado puede ocasionar problemas en los siguientes procedimientos [6].

De ahora en adelante, todo valor de radio de curvatura es mostrado en su módulo, por lo que también se realiza la distinción si la superficie es cóncava o convexa. En la generación de cada tipo de superficie, el arreglo montado no es el mismo (figura 15) Para la generación de superficies que sean convexas, se utiliza el diámetro interno de la herramienta metálica (70 mm), mientras que para superficies cóncavas, se utiliza el diámetro externo (75 mm) [10].

Dado un radio de curvatura r , y el diámetro d de la herramienta metálica que genera la curvatura, el valor teórico del ángulo del generador se calcula por medio de la siguiente ecuación (3.1) [10]:

$$\theta = \arcsin(d/2r) \dots (3.1)$$

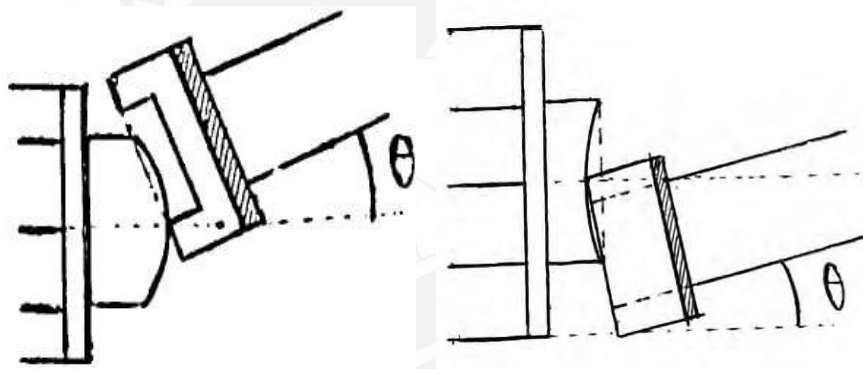


Figura 15. Arreglos para el generado de una superficie convexa y cóncava [10]

Tabla 11. Información previa al generado

Vidrio	Superficie	Diámetro de herramienta (mm)	Radio de curvatura teórico (mm)	Ángulo teórico (°)
BK7	convexa	70,000	274,397	7,328
ventana	cóncava	75,000	274,397	7,855
BK7	convexa	70,000	188,424	10,705
SF2	cóncava	75,000	188,424	11,480
SF2	convexo	70,000	623,307	3,219
ventana	cóncavo	75,000	623,307	3,449

Los vidrios *flint* y de ventana son menos resistentes con respecto a los vidrios *crown*, por lo que en la generación de curvaturas del vidrios *crown* [10], se dio un avance en la máquina alrededor de 2,5 líneas, mientras que para los vidrios *flint* y de ventana, se dio un avance en promedio de 3,5 líneas. El desplazamiento de una línea (hacia adelante o atrás) corresponde a mover 0.010 mm. Es decir, 0.010 mm/división.

Se utiliza un esferómetro para medir la sagita z y controlar los radios de curvatura r como se muestra en la ecuación (3.2) [6]. En las mediciones, la base del esferómetro debe estar en contacto con la superficie esférica del vidrio sin llegar a los bordes para mediciones más precisas [10]. En superficies cóncavas y convexas, el diámetro de contacto de la base es 40 mm. Sin embargo, las herramientas utilizadas como bases del esferómetro no son las mismas para cada superficie (cóncava y convexa). Para realizar la calibración del instrumento, se utiliza una superficie óptica aproximadamente plana con error de $\lambda/10$.

$$r = \frac{(D_{base})^2}{8z} + \frac{z}{2} \dots (3.2)$$



Figura 16. Esferómetro y plano de calibración

En la práctica, se recomienda que el resultado final del radio de curvatura generado sea mayor al valor teórico o de diseño - expresión (3.3). Lo contrario sucede con el ángulo de generado que debe ser menor - expresión (3.4).

$$r_{\text{manufacture}} > r_{\text{theoretical}} \dots (3.3)$$

$$\theta_{\text{manufacture}} < \theta_{\text{theoretical}} \dots (3.4)$$

Tabla 12. Radios de curvatura generados para cada superficie

Vidrio	Superficie	Diámetro de herramienta (mm)	Ángulo aproximado (°)	Radio de curvatura (mm)
BK7	convexa	70,000	7,100	284,040
ventana	cóncava	75,000	7,000	308,692
BK7*	convexa	70,000	10,200	197,552
SF2	cóncava	75,000	10,600	202,923
SF2*	convexo	70,000	2,600	757,708
ventana	cóncavo	75,000	2,900	740,876

Para cada par de vidrios, los radios de curvatura deben ser relativamente cercanos para que después en el esmerilado se puedan acoplar fácilmente.

*En estos 2 casos, luego de que se haya generado la curvatura en cada vidrio, se tuvo trabajar en cambiar los espesores. Para el vidrio *crow*n BK7, el espesor central se redujo a 7,60 mm mientras que, para el vidrio *flint*, el espesor central se redujo a 7,40 mm. Este último valor es más grande que el doble del espesor central de la lente divergente visto en el diseño (figura 5), lo cual es realizado porque el vidrio *flint* es menos frágil y menos resistente en comparación al vidrio *crow*n [10]. Para las mediciones de espesores, se utiliza un micrómetro analógico de esfera [10].



Figura 17. Instrumento para medir espesores

3.3 Esmerilado

Inicialmente, es indispensable que cada par de vidrios que se trabajen juntos cuenten con una curvatura cercana, para que así se puedan acoplar fácilmente en el esmerilado y se trabaje mejor. Usualmente, los vidrios de ventana son utilizados como herramientas en este proceso. Sin embargo, en el caso de las superficies que estarán cementadas, los mismos vidrios ópticos *crown* o *flint* son utilizados como herramientas en el esmerilado.



Figura 18. Máquina de pulido

Se utiliza la máquina de pulido disponible en el Taller de Tecnología Óptica de la PUCP, la cual, mientras trabaja, rota los objetos inferiores en un sentido antihorario y desplaza los objetos superiores de un lado a otro [6]. La extensión normal de la carrera (desplazamiento

horizontal del vidrio superior) se considera a un tercio del diámetro de la lente. Mientras más grande sea el recorrido de la carrera, se da un mayor cambio en los radios de curvatura [10]. Se cumple una relación directamente proporcional. No obstante, se debe procurar no sobrepasar el límite indicado para que ningún elemento sea afectado o dañado.

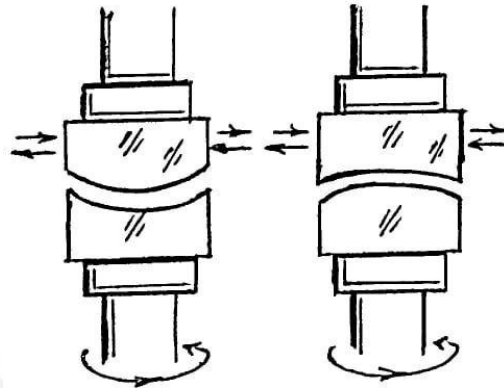


Figura 19. Posiciones para controlar la curvatura

Como se muestra en las 2 imágenes (figura 19), arriba (vidrio superior) se trabaja más en el centro, mientras que abajo (vidrio inferior) se trabaja más en los bordes. Así se puede controlar si ambos radios de curvaturas aumentan (sección de la izquierda en la figura 19) o disminuyen (sección de la derecha en la figura 19). El modo de trabajo indicado en la sección de la izquierda es conocido como modo “anormal” de trabajo, ya que es más susceptible a que se quiebre el borde del vidrio inferior (lente divergente), mientras que el modo de trabajo indicado en la sección de la derecha es conocido como modo “normal” de trabajo, debido a que es más seguro para proceder [10].

Se utilizan diferentes abrasivos (óxido de aluminio disuelto en agua común) para mejorar la calidad de superficie; es decir, moldear la forma esférica del vidrio óptico y reducir la rugosidad, ya que después del generado de curvatura, la forma de la superficie esférica es muy irregular. Se trabaja con abrasivos de $25\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$ y $5\ \mu\text{m}$ [10], estrictamente en este

orden controlando los resultados cada 15 minutos (en promedio). Para cada procedimiento que se realice, los abrasivos deben ser echados entre los vidrios a cada instante.



Figura 20. Proceso de esmerilado de superficies

A medida que disminuye el número indicativo del abrasivo, significa que el tamaño del polvo de la alúmina es menor [10]. Por esto es que se debe comenzar con el mayor de 25 μm , y luego trabajar en orden decreciente (15 μm y 5 μm). Así se mejora la forma esférica.

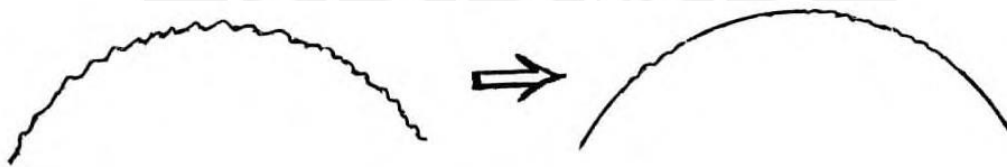


Figura 21. Reducción de la rugosidad

Cabe mencionar que se debe contar con soportes metálicos para sujetar los vidrios en el esmerilado [10]. Como no se contaban con soportes metálicos cuyo diámetro sea 50 mm, se tuvo que utilizar otros de menor sección transversal. El problema después consistió en tratar de centrar lo mejor posible cualquier vidrio con el soporte metálico utilizado (figura 22). Para unirlos, se utilizó cera derretida.



Figura 22. Herramienta adicionales utilizadas

Se recomienda utilizar un disco de metal bañado en polvo de diamante (imagen izquierda de la figura 22) para realizar cortes lineales en forma de cuadrícula solamente en los vidrios de ventana (imagen derecha de la figura 22). Esto es útil para que, al momento de echar cualquier abrasivo entre los vidrios, no se tenga que levantar completamente el elemento superior. Así, con los cortes realizados, se retiene el abrasivo entre estos. Es importante asegurar un correcto esmerilado en toda la cara de los vidrios [6].



Figura 23. Arreglo útil en el esmerilado

Si ya se trabajó con una determinada cara de un vidrio óptico y se debe proceder con la cara opuesta, se puede utilizar como soporte un vidrio de ventana cuyo radio de curvatura debe ser cercano a la cara ya trabajada. Estos son mantenidos juntos utilizando cinta masking, la cual

debe estar pegada en las secciones laterales de los vidrios en un sentido contrario al de giro (para que luego no se desprege). Adicionalmente, con un marcador se puede dibujar unas líneas en las caras de los vidrios para comprobar que se estén trabajando adecuadamente en el esmerilado.

3.3.1 Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7

Esta primera cara de trabajo en el esmerilado corresponde a una superficie convexa.

Tabla 13. Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 25 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,705	284,040
15	0,735	272,476
15	0,785	255,170
15	0,806	248,542
15	0,788	254,201
15	0,750	267,042
15	0,721	277,753
7	0,703	284,847
15	0,671	298,398

Para este proceso, hubo un problema en el acoplamiento de los elementos, ya que cualquiera que fuera el vidrio superior (óptico o de ventana) no giraba por su cuenta. Se tuvo que trabajar por más tiempo de lo normal. En total fue 112 minutos.

Tabla 14. Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 15 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,671	298,398
15	0,695	288,117
15	0,704	284,443
15	0,709	282,442
15	0,732	273,590

En esta segunda parte, los vidrios ya se podían acoplar mejor, por lo que el tiempo total de trabajo fue menor con respecto al primer procedimiento.

Tabla 15. Esmerilado de la superficie externa del vidrio BK7 con abrasivo de 5 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,732	273.590
15	0,724	276,605
15	0,717	279,299
15	0,730	274,338

3.3.2 Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio SF2

Estas caras corresponden a una superficie convexa y una superficie cóncava respectivamente, las cuales son trabajadas juntas porque en el resultado final, se encontrarán cementadas.

Para las tres tablas mostradas a continuación (Tablas 16, 17 y 18):

1 hace indicación a la superficie interna del vidrio BK7.

2 hace indicación a la superficie interna del vidrio SF2.

Tabla 16. Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio

SF2 con abrasivo de 25 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita 1 (mm)	Sagita 2 (mm)	Radio de curvatura 1 (mm)	Radio de curvatura 2 (mm)
0	1,015	0,988	197,552	202,923
15	1,036	1,000	193,568	200,500
15	1,070	1,035	187,451	193,754
15	1,106	1,056	181,385	189,922
5	1,118	1,070	179,450	187,451

Tabla 17. Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio

SF2 con abrasivo de 15 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita 1 (mm)	Sagita 2 (mm)	Radio de curvatura 1 (mm)	Radio de curvatura 2 (mm)
0	1,118	1,070	179,450	187,451
15	1,112	1,050	180,412	191,001
15	1,099	1,033	182,533	194,127
15	1,090	1,023	184,031	196,015
15	1,096	1,013	183,030	197,940

Tabla 18. Esmerilado de la superficie interna del vidrio BK7 y la superficie interna del vidrio

SF2 con abrasivo de 5 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita 1 (mm)	Sagita 2 (mm)	Radio de curvatura 1 (mm)	Radio de curvatura 2 (mm)
0	1,096	1,013	183,030	197,940
15	1,090	1,019	184,031	196,780
15	1,089	1,018	184,199	196,973
15	1,088	1,020	184,368	196,588
15	1,084	1,022	185,044	195,206

Se puede notar, en el resultado final, que la diferencia relativa entre los radios de curvatura de cada superficie aumentó de 5.371 mm a 10.162 mm.

3.3.3 Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2

Esta última cara de trabajo en el esmerilado corresponde a una superficie convexa.

Tabla 19. Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 25 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,264	757,708
15	0,296	675,824
15	0,310	645,316
18	0,324	617,446

Tabla 20. Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 15 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,324	617,446
15	0,333	600,767
5	0,336	595,406
15	0,320	625,160
15	0,318	629,090

Tabla 21. Esmerilado de la superficie externa del vidrio SF2 con abrasivo de 5 μm

Tiempo de trabajo (minutos)	Sagita (mm)	Radio de curvatura (mm)
0	0,318	629,090
15	0,314	637,100
15	0,312	641,182
15	0,314	637,100
15	0,315	635,078
15	0,316	633,069
15	0,320	625,160
4	0,321	623,213

En todos los casos, el cambio es pequeño para los radios de curvatura utilizando el abrasivo de 5 μm . Esto tiene sentido pues el tamaño del grano es el menor de todos los abrasivos utilizados, así que cambia menos la curvatura.

Al final del proceso de esmerilado, el espesor central del vidrio crown BK7 fue 7,48 mm y para el vidrio flint SF2, el espesor central fue 6,53 mm.

3.4 Pulido

Lo que se debe realizar primero es el diseño mecánico a computadora del objeto metálico sujetador que, una vez fabricado en el Taller de Física, será utilizado en el proceso

de pulido (en total deben ser manufacturados 4). El diseño es llevado a cabo en el software SOLIDWORKS 2018. Esta parte es importante pues los diámetros de la herramienta metálica y cada lente ahora sí deben ser muy cercanos.

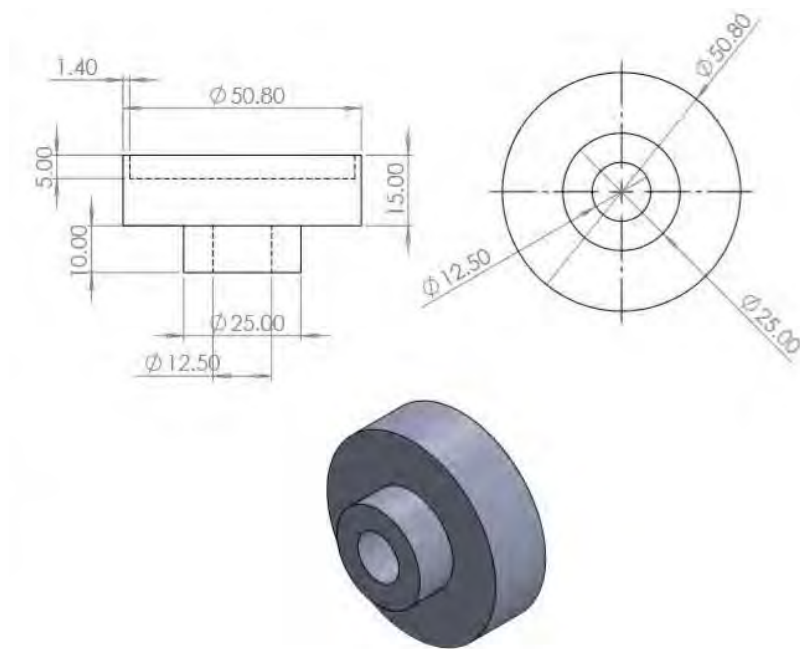


Figura 24. Diseño mecánico de herramienta

Los siguientes procedimientos que faltan realizar quedan como proyectos a futuro. No se pudieron llevar a cabo, debido a la falta de tiempo en el semestre académico 2019-2, y a la coyuntura nacional vivida en el primer semestre del año 2020 debido al COVID-19. La manufactura óptica es un proceso largo que requiere bastante paciencia y dedicación. Cada procedimiento involucrado en la fabricación de una lente puede verse afectado seriamente por los posibles errores que se cometan pues los vidrios son objetos frágiles de dañar [10], por lo que el tiempo total de trabajo podría ser de varios meses para terminar y, a la vez, obtener un buen resultado, el cual luego debe ser analizado en las pruebas ópticas. Por ejemplo, la prueba de Ronchi [6].

4. Conclusiones

- Utilizar adecuadamente las ecuaciones de aberraciones de primer orden y de aberraciones de tercer orden brindan un buen acercamiento a los valores óptimos de un sistema óptico. Los resultados numéricos de estas ecuaciones son muy útiles como punto de partida.
- El software OSLO es una herramienta digital de gran utilidad para realizar la optimización óptica, y para entender el comportamiento geométrico y ondulatorio de la luz en un sistema óptico.
- Se ha logrado diseñar un objetivo refractor que corresponde a un doblete acromático cementado de longitud focal 450 mm y diámetro 50 mm, el cual se encuentra limitado con respecto a la difracción. Esto se ha visto comprobado en el diagrama de manchas y cumple el criterio de difracción.
- La fabricación de una lente no es un tema sencillo pues requiere de bastante paciencia y dedicación. Uno debe estar al tanto de evitar los posibles errores que se puedan cometer.

5. Recomendaciones

- En la parte de optimización, uno debe darse cuenta cuáles parámetros deben ser escogidos como variables y cuáles no. Utilizar todos los radios de curvatura y espesores como variables no implica la mejor optimización posible.
- Al generar la curvatura en una determinada superficie, se debe verificar que se está trabajando con la superficie indicada, ya que un error en este proceso podría retrasar todo lo que previamente se avanzó en la manufactura óptica.
- Si se cambia el ángulo con el que se trabaja en el generado de la curvatura, se debe empezar desde cero alejando lo mejor posible el vidrio de la herramienta generadora.
- La herramienta metálica que genera la curvatura debe ir cortando el vidrio poco a poco, en distancias muy pequeñas y controladas, ya que un avance brusco podría causar que se queme el vidrio junto con el sujetador de plástico.
- En el proceso de esmerilado, es muy importante que los vidrios se encuentren centrados, y que la carrera del vidrio superior no sea mayor a un tercio del diámetro del elemento, sino los vidrios se podrían quebrar en ciertas zonas y cortar a quien lo manipule en las zonas afectadas.
- De quebrarse parte de un vidrio en el esmerilado, se debe utilizar un trapo suave (que no sea áspero) para remover cualquier pequeño trozo de vidrio que se pueda desprender, y luego limar en los bordes del vidrio utilizando piedra de asentar.

6. Bibliografía

- [1] Accostupa, Y. (2007). *Desarrollo de un objetivo de telescopio astronómico refractor para observación lunar orientado a la enseñanza de la astronomía* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- [2] Baldwin, G., Asmad, M., Romero, S., Gonzales, F., Gálvez, G., y Sánchez, E. (2011). Advances in Optical Technologies at Pontificia Universidad Católica del Perú. *International Conference on Applications of Optics and Photonics, Braga-Portugal*. SPIE.
- [3] Baldwin, G., Gonzales, F., y Pérez, C. (2017). First Peruvian Binoculars. *Proc. SPIE 10590: International Optical Design Conference 2017*. doi: 10.1117/12.2299567
- [4] Baldwin, G., y Gonzales, F. (2014). Optical Design of a Telescope Objective for Stadia Measurement Instruments. *9th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication*. (pp. 171-172). The Japan Society of Applied Physics.
- [5] Gee, A. (1953). The Design of Telescope Objectives by the G-sum Method. En *Amateur Telescope Making*. (pp. 208-217). Kingsport, Estados Unidos: Scientific American, Inc.
- [6] Gonzales, F., Baldwin, G., Romero, S., Tupia, W., y Gálvez de la Puente, G. (2018). Design and Manufacture of Small Newtonian Telescope for Lunar Observation. *ÓPTICA PURA Y APLICADA*, 51(1), 1 - 12. doi: 10.7149/OPA.51.1.49028
- [7] Gonzales, F. (2012). *Diseño de un telescopio de apertura pequeña con enfoque interno para instrumentos de medición estadimétrica* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- [8] Gross, H., Blechinger, F., Achtner, B. (2008). Achromate. *Handbook of Optical Systems: Survey of Optical Instruments*. Vol. 4. (pp. 188-191). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
- [9] Hecht, E. (2016). Geometrical Optics. *Optics*. (pp. 159-236). Londres, Reino Unido: Pearson.

- [10] Karow, H. H. (1993). *Fabrication methods for precision optics*. Nueva York, Estados Unidos: Wiley.
- [11] Kidger, M. (2001). Achromatic Doublet Objectives. *Fundamental Optical Design*. (pp. 167-182). Bellingham, Estados Unidos: SPIE Optical Engineering Press.
- [12] Lakida, M. (2006). The Achromatic Doublet. *LENS DESIGN FOURTH EDITION*. (pp. 41-50). Boca Ratón, Estados Unidos: CRC Press.
- [13] Lambda Research Corporation. (2009). *OSLO User Guide*. Littleton, Estados Unidos: Lambda Research Corporation.
- [14] Miranda, J. (2019). *Diseño óptico y prototipo de un telescopio terrestre para observación de aves* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- [15] *Orion Telescopes & Binoculars*. (2020). Refractor Telescopes. Recuperado de <http://www.telescope.com>.
- [16] Rutten, H., Van Venrooij, M., (1999). *Telescope Optics A Comprehensive Manual for Amateur Astronomers*. Richmond, Estados Unidos: Willmann-Bell, Inc.
- [17] Smith, W. (2008). Third-Order Aberration Theory and Calculation. *Modern Optical Engineering*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- [18] Walker, B. (2000). *Optical Design for Visual Systems*. Bellingham, Estados Unidos: SPIE - The International Society for Optical Engineering.

7. Anexos

A. Trazo de rayos ynu

Este tratamiento algebraico es útil si se busca entender cómo varían la altura con respecto al eje y la dirección en la que se propaga cualquier rayo al viajar a través de diversos medios.

El rayo axial se define como un rayo que pasa por la base del objeto y está limitado por los bordes del diafragma de apertura (*stop*) [9]. El objeto está a una distancia l de la lente como se muestra en la figura A1. Además, el rayo inicialmente se encuentra en el aire ($n_1 = 1$) y es refractado dos veces por una lente de espesor central t , índice de refracción n_2 y radios de curvatura R_1 y R_2 , delantero y posterior respectivamente.

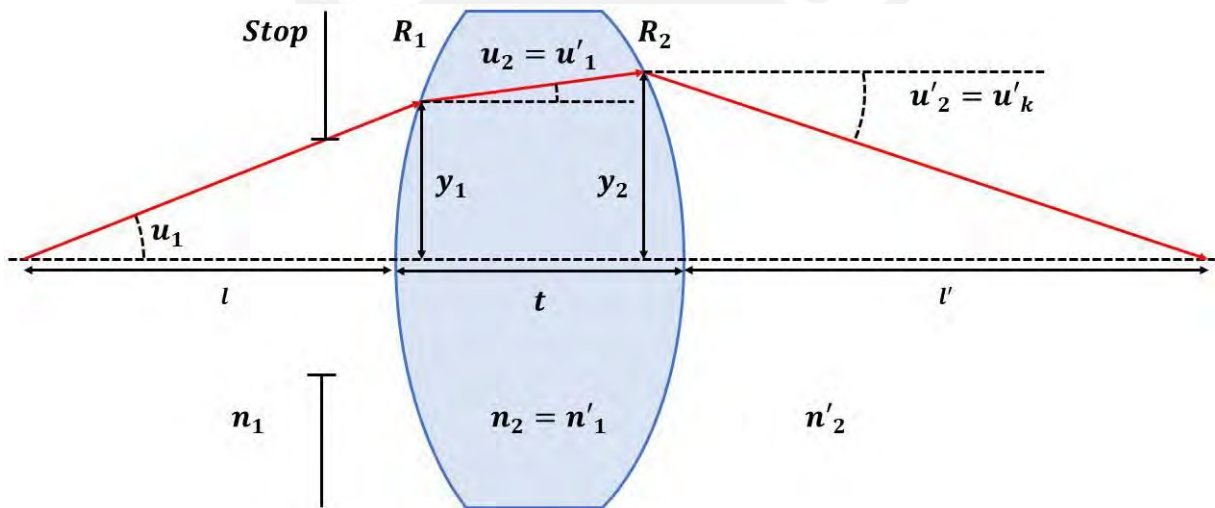


Figura A1. Esquema del trazo de rayos ynu en una lente [17]

Se cumple en todas las ecuaciones que $n_{j+1} = n'_j$, y $u_{j+1} = u'_j$ (ángulo paraxial).

En la primera refracción, el ángulo de inclinación u_1 del rayo axial cambia en una forma parecida a la Ley de Snell [17]. Así se calcula la segunda inclinación u'_1 .

$$n'_1 u'_1 = n_1 u_1 - y_1 \frac{(n'_1 - n_1)}{R_1} \dots (7.1)$$

La primera altura y_1 , y la segunda altura y_2 dentro de la lente son diferentes [17].

$$y_2 = y_1 + tu'_1 \dots (7.2)$$

Para la segunda refracción, el procedimiento es similar para calcular el ángulo u'_2 [17].

$$n'_2 u'_2 = n_2 u_2 - y_2 \frac{(n'_2 - n_2)}{R_2} \dots (7.3)$$

La distancia l' en la que el rayo converge con el eje es obtenido de forma similar a la ecuación (7.2). En este caso, la altura final es cero porque corresponde a la imagen rayo axial.

$$0 = y_2 + l' u'_2 \dots (7.4)$$

La última inclinación u'_k del rayo axial es igual a la tercera inclinación u'_2 considerando una sola lente. El primer y el tercer medio corresponden al aire, por lo que $n_1 = n'_2 = 1$, y el índice de refracción del vidrio es el valor n , igual a n'_1 . Además, se define una variable f [9], por ahora desconocida, característica de la lente como

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{t(n - 1)}{n R_1 R_2} \right) \dots (7.5)$$

Así el resultado de la última inclinación del rayo axial es, combinando las ecuaciones (7.1), (7.2), (7.3) y (7.5)

$$u'_k = u_1 \left[1 + \frac{t(n - 1)}{n R_2} \right] - \frac{y_1}{f} \dots (7.6)$$

La longitud focal efectiva de cualquier sistema óptico se define numéricamente como $-y_1/u'_k$ considerando que el objeto se encuentra en una posición muy lejana (Figura 3 por ejemplo). Esto significa que $u_1 = 0$ [17]. Aplicando esta definición en la ecuación (7.6), se obtiene que la longitud focal efectiva es la variable f .

Si se toma la aproximación a lentes delgadas. Es decir, espesor central t igual a cero, la ecuación (7.6) cambia a

$$u'_k = u_1 - y_1/f \dots (7.7)$$

B. Cálculo de parámetros

En este segundo anexo, se muestra el código utilizado para calcular numéricamente los parámetros del doblete acromático cementado (radios de curvatura de cada superficie y espesores centrales de cada lente). Se deben ingresar, para el vidrio *crown* y el vidrio *flint*, los índices de refracción y el número de Abbe. Adicionalmente, otros valores de entrada son la longitud focal efectiva y el diámetro del objetivo. El lenguaje de programación que se utiliza corresponde al software MATLAB.

```
%Limpiar el espacio de trabajo y las variables a utilizar
clc;
clear na nb Va Vb f D fa fb Ca Cb ua ub ya yb vb;
clear G1a G2a G3a G4a G5a G6a G7a G8a;
clear G1b G2b G3b G4b G5b G6b G7b G8b;
clear J1 J2 J3 J4 J5 J6 J7 J8;
clear a1 a2 a3 C1a C2a C1b C2b;
clear r1a r2a r1b r2b z1a z2a z1b z2b THa THb;

%%Cálculo de los radios de curvatura y los espesores centrales de un objetivo refractor.
%%Este corresponde a un doblete acromático cementado.
%%Las ecuaciones de aberraciones que se utilizan son
%%Color axial primario, aberración esférica de tercer orden y coma de tercer orden
%%Se considera que la posición de la parada es junta a la primera superficie.

%%Características de los vidrios ópticos
na=1.51680; %índice de refracción del vidrio crown
nb=1.64769; %índice de refracción del vidrio flint
Va=64.17; %número de Abbe del vidrio crown
Vb=33.85; %número de Abbe del vidrio flint
f=450.00; %longitud focal efectiva del objetivo
D=50.00; %diámetro transversal del objetivo

%%Longitudes focales
fa=f*(Va-Vb)/Va; %longitud focal de la lente convergente
fb=f*(Vb-Va)/Vb; %longitud focal de la lente divergente
Ca=1/(fa*(na-1)); %curvatura de la lente convergente
Cb=1/(fb*(nb-1)); %curvatura de la lente divergente

%%Términos G para el vidrio crown
G1a=0.5*na*na*(na-1);
G2a=0.5*(2*na+1)*(na-1);
G3a=0.5*(3*na+1)*(na-1);
```

$G4a=0.5*(na+2)*(na-1)/na;$
 $G5a=2*(na+1)*(na-1)/na;$
 $G6a=0.5*(3*na+2)*(na-1)/na;$
 $G7a=0.5*(2*na+1)*(na-1)/na;$
 $G8a=0.5*na*(na-1);$

%%Términos G del vidrio flint

$G1b=0.5*nb*nb*(nb-1);$
 $G2b=0.5*(2*nb+1)*(nb-1);$
 $G3b=0.5*(3*nb+1)*(nb-1);$
 $G4b=0.5*(nb+2)*(nb-1)/nb;$
 $G5b=2*(nb+1)*(nb-1)/nb;$
 $G6b=0.5*(3*nb+2)*(nb-1)/nb;$
 $G7b=0.5*(2*nb+1)*(nb-1)/nb;$
 $G8b=0.5*nb*(nb-1);$

%%Trazo de rayos ynu

%valores iniciales

ua=0; %inclinación inicial del rayo axial

%valores posteriores

ya=D/2; %altura a la que el rayo axial incide en la lente convergente

ub=ua-ya/fa; %inclinación del rayo axial luego de la primera refracción

yb=ya; %altura a la que el rayo axial incide en la lente divergente

vb=ub/yb; %definición de la variables vb

%%Términos J

J1=G4a*Ca;

J2=G4b*Cb;

J3=-G2a*Ca^2;

J4=G5b*Cb*vb-G2b*Cb^2;

J5=G1a*Ca^3+G1b*Cb^3-G3b*Cb^2*vb+G6b*Cb*vb^2;

J6=0.25*G5a*Ca;

J7=0.25*G5b*Cb;

J8=-G8a*Ca^2+G7b*Cb*vb-G8b*Cb^2;

%%Coeficientes de la ecuación cuadrática

a1=J1+J2*(J6/J7)^2; %coeficiente del término cuadrático

a2=J3+2*J8*J6*J2/(J7^2)-J6*J4/J7; %coeficiente del término lineal

a3=J5+J2*(J8/J7)^2-J8*J4/J7; %término independiente

%%Curvaturas de cada superficie del objetivo

%curvatura de la primera superficie de la lente convergente

C1a=(-a2+sqrt(a2^2-4*a1*a3))/(2*a1);

C2a=C1a-Ca; %curvatura de la segunda superficie de la lente convergente

C1b=C2a; %curvatura de la primera superficie de la lente divergente

C2b=C1a-Ca-Cb; %curvatura de la segunda superficie de la lente divergente


```

%%Radios de curvatura de cada superficie del objetivo
r1a=1/C1a; %radio de curvatura de la primera superficie de la lente convergente
r2a=1/C2a; %radio de curvatura de la segunda superficie de la lente convergente
r1b=1/C1b; %radio de curvatura de la primera superficie de la lente divergente
r2b=1/C2b; %radio de curvatura de la segunda superficie de la lente divergente

%%sagitas de cada superficie del objetivo
%sagita de la primera superficie de la lente convergente
z1a=0.25*C1a*(D^2)/(1+sqrt(1-(0.5*D/r1a)^2));
%sagita de la segunda superficie de la lente convergente
z2a=0.25*C2a*(D^2)/(1+sqrt(1-(0.5*D/r2a)^2));
%sagita de la primera superficie de la lente divergente
z1b=0.25*C1b*(D^2)/(1+sqrt(1-(0.5*D/r1b)^2));
%sagita de la segunda superficie de la lente divergente
z2b=0.25*C2b*(D^2)/(1+sqrt(1-(0.5*D/r2b)^2));

%%Espesores centrales de ambas lentes
%Espesor central de la lente convergente
THa=(D/30)+(0.125*D^2)*(abs(C1a)+abs(C2a))+z1a-z2a;
%Espesor central de la lente divergente
THb=(D/30)+(0.125*D^2)*(abs(C1b)+abs(C2b))+z1b-z2b;

%Mostrar resultados
disp('Radios de curvatura');
disp(['r1a = ',num2str(r1a),' mm']);
disp(['r2a = r1b = ',num2str(r2a),' mm']);
disp(['r2b = ',num2str(r2b),' mm']);
disp('Sagitas');
disp(['z1a = ',num2str(z1a),' mm']);
disp(['z2a = z1b = ',num2str(z2a),' mm']);
disp(['z2b = ',num2str(z2b),' mm']);
disp('Espesores centrales');
disp(['THa = ',num2str(THa),' mm']);
disp(['THb = ',num2str(THb),' mm']);

%Limpiar las variables antes de terminar
clear na nb Va Vb f D fa fb Ca Cb ua ub ya yb vb;
clear G1a G2a G3a G4a G5a G6a G7a G8a;
clear G1b G2b G3b G4b G5b G6b G7b G8b;
clear J1 J2 J3 J4 J5 J6 J7 J8;
clear a1 a2 a3 C1a C2a C1b C2b;
clear r1a r2a r1b r2b z1a z2a z1b z2b THa THb;

```

C. Planos mecánicos

En este anexo, se muestra una información más detallada sobre los parámetros de las lentes.

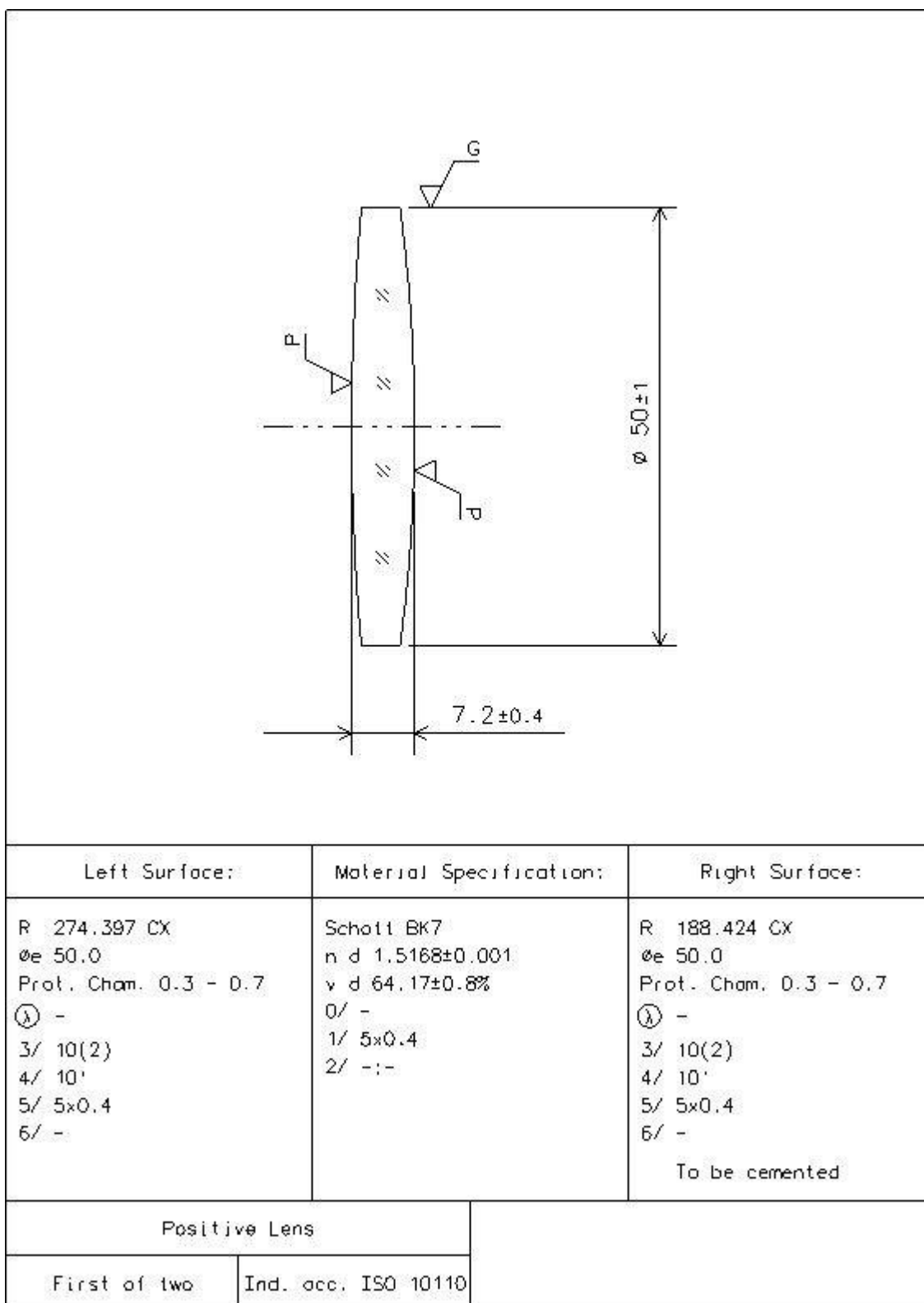


Figura C1. Plano mecánico de la lente convergente

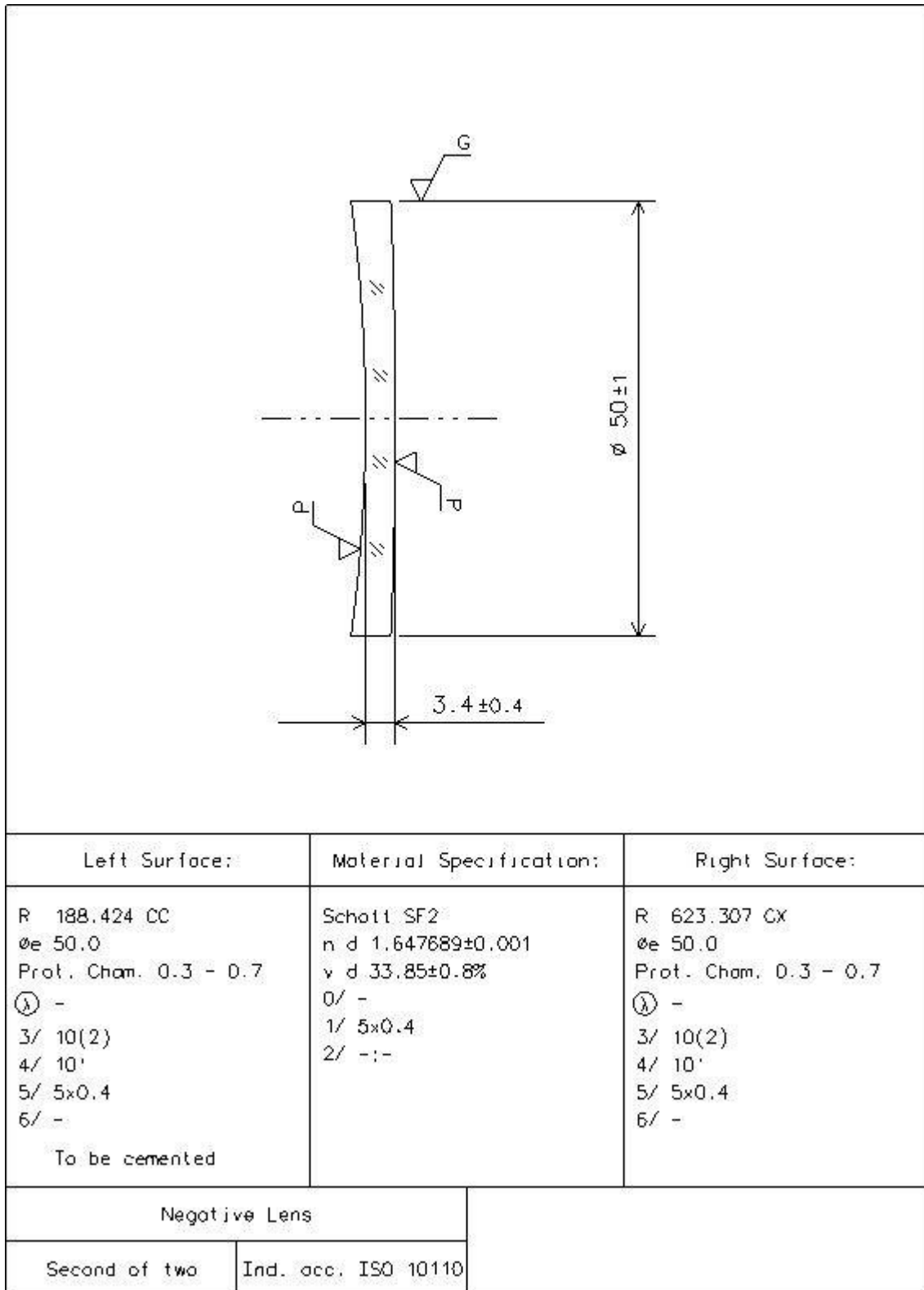


Figura C2. Plano mecánico de la lente divergente