



Universidad de Zaragoza  
Centro Politécnico Superior



# ANEXOS

Departamento de Ciencia y  
Tecnología de Materiales y Fluidos

Autor: Luis Villarreal Calvo

Director: José Ignacio Peña Torre

Mención: Materiales

Diciembre 2010

## CONTENIDO

<b>A ILUMINACIÓN DE UN TUBO DE DESCARGA .....</b>	<b>1</b>
A.1 Procesos físicos .....	3
A.2 Curva tension-intensidad en un tubo de descarga de gas .....	5
A.3 Efecto Avalancha Townsend .....	6
A.4 Curvas Paschen .....	7
A.5 Fluorescentes, vapor de sodio y neones .....	8
A.6 Mezcla Penning .....	9
<b>B TECNOLOGÍA LÁSER .....</b>	<b>11</b>
B.1 Procesos físicos .....	14
B.2 Cavityad optica .....	17
B.3 Curva de ganancia.....	18
B.4 Modos transversales .....	18
B.5 Modos de operacion.....	18
B.6 Tipos de laser .....	19
B.7 Caracterizacion optica de un laser .....	19
B.8 Interaccion luz materia .....	20
B.9 Procesos de ablacion láser .....	21
B.10 Caracteristicas de los laseres empleados .....	22
<b>C HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO .....</b>	<b>25</b>
C.1 Vidrio ceramico .....	27
C.2 Microscopio optico confocal .....	28
C.3 Corte con agua .....	31
C.4 Horno .....	32
C.5 Cortadora con disco diamantado .....	33
C.6 Lupa estereoscopica .....	34
C.7 Microscopio electronico .....	35
C.8 Maquina de traccion Universal.....	39
C.9 Instalacion de vacio .....	45
C.10 Coleccion fotografica de otras herramientas y productos .....	47
<b>D ESTUDIOS (gráficas, cálculos, datos) .....</b>	<b>51</b>
D.1 Escarbado .....	53
D.2 Union .....	65
D.3 Tubos de vidrio .....	70
D.4 Vacio .....	73
<b>E TRADUCCIÓN (Deutsch, English) .....</b>	<b>77</b>
E.1 Aleman (Deutsch) .....	79
E.2 Ingles (English) .....	85
Bibliografía .....	91
Lista de figuras y tablas .....	93



# **ANEXO A**

## **ILUMINACIÓN DE UN TUBO DE DESCARGA**



## ANEXO A: ILUMINACIÓN DE UN TUBO DE DESCARGA

En el desarrollo de este Anexo A se presentan las bases teóricas del proceso de iluminación de un gas fluorescente y se caracterizan las necesidades para dicho proceso [1] [2] [3] [11] [13].

Existen numerosas posibilidades de iluminación, este proyecto se centra en aquellas que tienen como origen un gas a baja presión en las llamadas lámparas de descarga.

### A.1 Procesos físicos

El proceso a través del cual un gas inicialmente inerte se convierte en plasma conductor emisor de luz se describe paso a paso [2] [3].

Una descarga eléctrica resulta de la creación de un camino de conducción entre dos puntos a diferente potencial. El medio que va a estudiarse es un gas. No habrá descarga si el medio es el vacío, ya que se necesita una transferencia de materia para transportar la carga. Usualmente esta materia son los electrones, cada uno puede transportar una carga de  $-1,602176487 \times 10^{-19}$  C, también los iones pueden transportar carga pero son  $\sim 2000$  veces más pesados que los electrones. Cuando coexisten ambos, los electrones llevan la mayor parte de la carga.

Ejemplos de descargas eléctricas son las auroras boreales, el fuego de San Telmo o chispas al tocar un jersey. En tecnología se utiliza en arcos de soldadura, efecto corona, tubos de neón o fluorescentes.

El ánodo es el terminal de potencial positivo o más alto, mientras el cátodo es el más bajo o negativo, normalmente estos electrodos son conductores, pero no tienen por qué. Los electrones viajan del ánodo al cátodo, el convenio de corriente es el contrario.

Se tratará genéricamente sin distinguir moléculas o átomos y tratando el gas como ideal. Considerado el conjunto del gas inicialmente neutro y no conductor, los electrones, iones y moléculas están en incesante movimiento térmico, lo que se tiene son colisiones elásticas. Se inicia un campo eléctrico, la temperatura del electrón ( $T_e$ ) puede ser muy distinta a la de los iones ( $T_n$ ) a bajas presiones, esto diferencia al plasma caliente ( $T_e = T_n$  ambas elevadas), del frío ( $T_e \gg T_n$  sólo  $T_e$  elevada). Esto es porque los electrones reciben mas energía del campo eléctrico y el intercambio de energía cinética lo realizan con dificultad. Las moléculas neutrales e iones se mueven mucho más despacio debido a su elevada masa respecto a los electrones. De esta manera los electrones adquieren, especialmente cerca del cátodo, velocidades mucho mayores que la térmica, la cual pueden perder en una colisión inelástica.

Con un potencial  $V$  y una distancia entre electrodos  $d$ , el campo eléctrico puede definirse  $V/d$ .  $V$  [V] y  $d$  [cm]. Este campo moverá electrones e iones positivos en sentidos opuestos.

Para que ocurra la descarga, se necesita una fuente de electrones en el cátodo, los rayos cósmicos y la radioactividad natural producen continuamente una pequeña cantidad de electrones e iones, consiguiendo una muy pequeña conductividad que suele ser neutralizada rápidamente.

Interesa habitualmente una fuente mayor de electrones, por ejemplo el efecto fotoeléctrico, en el cual una luz con una longitud de onda suficientemente corta al incidir sobre un metal o semiconductor libera un fotoelectrón. También los fotones pueden ser absorbidos por una molécula la cual nos dará un ión positivo y un electrón. La energía del fotón  $E_f = h\nu$  debe de ser mayor que la energía requerida para liberar al electrón (Función de trabajo). Otra opción es la emisión termiónica, donde un cuerpo caliente emite electrones, evitando la necesidad de altas corrientes, el cuerpo debe ser calentado hasta la incandescencia. Es interesante el uso de tungsteno, cuya función

de trabajo son 4 eV, los alcalis tienen buena función de trabajo pero funden más fácilmente.

Los electrones ahora presentes, también los derivados de rayos cósmicos o radioactividad natural, pueden aumentar su número ionizando moléculas de gas por colisión. Cada colisión produce un nuevo electrón y un ión positivo (*Ion pair*) según el Efecto Townsend (*Anexo A3*). Para ello el electrón incidente necesita una energía cinética suficiente, adquirida por la aceleración gracias al campo eléctrico.

La energía del electrón, si no colisiona, incluso con bajo campo eléctrico, se acumula según  $K \cdot E = m \cdot v^2 / 2 = eE \cdot x$  donde  $E$  es el campo,  $x$  la distancia que viaja, las unidades en este tipo de procesos suelen darse en base al electrón, de ahí  $eV \rightarrow eE$ . Por otra parte la probabilidad de colisión del electrón en una distancia  $dx$  es  $dx/L_e$ , donde  $L_e$  es el llamado *free path*, el cual si es mucho menor que  $x$ , resultará de una velocidad en el electrón de  $v = K \cdot E$  donde  $K$  es la movilidad del electrón en cm/s por unidad de campo (V/cm). De modo que deben combinarse distancias sin choque junto con campo eléctrico suficiente para que el electrón acelere y tenga un choque inelástico. El *free path* es inversamente proporcional a la presión: A menor presión hay menor número de moléculas y menor probabilidad de choque, mayor camino para viajar y ganar energía.

Tanto las moléculas como los electrones tienen su propio *free path*. El de las moléculas ( $L$ ) es mucho menor, como estimación  $L_e = 5,64L$ . En neón a 1 atm y 273 K el *free path* electrónico es  $1,93 \times 10^{-5}$  cm, para el aire es  $9,6 \times 10^{-6}$  cm.

La energía necesaria para ionizar neón, (Energía de ionización), en la reacción  $Ne \rightarrow Ne^+ + e^-$  es de 21,559 eV, frente a los 10,43 eV en Hg o los 5,138 eV en Na. Para llevar un átomo de neón a su primer estado de excitación son necesarios 16,58 eV, llamada energía de resonancia. Dado que la mayor parte de los choques no resultan en ionización, y que hay otros fenómenos en los que se pierde energía, la energía promedio para un *ion pair* es mayor que el potencial de ionización teórico, realmente es casi el doble. El campo necesario para dar energía suficiente a un electrón para ionizar un átomo de neón a una atmósfera es de  $E = 21,559 \text{ eV} / ((5,64) \cdot (1,93 \times 10^{-5} \text{ cm}))$ , es decir unos 200.000 V/cm, realmente alto. Sin embargo, a una presión de 1 mmHg se necesitan 260 V/cm quedando así patente la utilidad de la baja presión.

El valor de la energía de resonancia para gases inertes es bastante alta: He 19,81 eV, Ne 16,58 eV; Es baja en Hg 4,67 eV y en Na 2,102 eV. Alcanzando así estados metaestables, para los cuales producir una transición al estado original por radiación es difícil, si mantienen esa energía de excitación durante un período de tiempo suficiente, por ejemplo hasta una nueva colisión con las paredes, átomo o electrón, acumularán suficiente energía de ionización. Es decir que un átomo puede ser ionizado por varias colisiones. En el caso de una colisión de segundo tipo, la energía de un estado metaestable se transmite a otro átomo o molécula.

Luz de una determinada frecuencia es emitida cuando un átomo excitado cae en un nivel de energía menor. La duración de este proceso puede ser de unos  $\sim 10^{-8}$  s si no ocurren otros procesos que lo impidan. Dado que la frecuencia de colisión, por ejemplo, a 1 atm es de  $10^{11}$  colisiones por segundo, la energía de excitación puede ser perdida en una colisión antes de que pueda ser radiada. A 1 mmHg, la frecuencia de colisión es comparable a la vida de radiación, siendo mucho más probable.

La recombinación de iones y electrones se hace difícil, es poco posible la colisión ión electrón con el momento y energía necesaria; Pero los iones acaban por llegar al electrodo (Cátodo), y se recombinan en la superficie, en algunos casos expulsan de nuevo un electrón. Si se dispone de neón y electrodos de hierro, uno de cada 45 iones producirá un electrón. Pero si la avalancha de electrones produce más de 45 electrones, entonces habrá suficientes iones positivos para reemplazar al electrón que dejó originalmente el cátodo. En esta situación la descarga produce sus propios

electrones, sin necesidad de rayos cósmicos o radioactividad natural. La descarga es autosostenida, obteniéndose luz de calidad. El voltaje que se debe tener entre ánodo y cátodo en este momento es el *sparking potential* o voltaje de ruptura (*Anexo A4*). El camino entre ánodo y cátodo se vuelve conductor debido a los electrones e iones distribuidos.

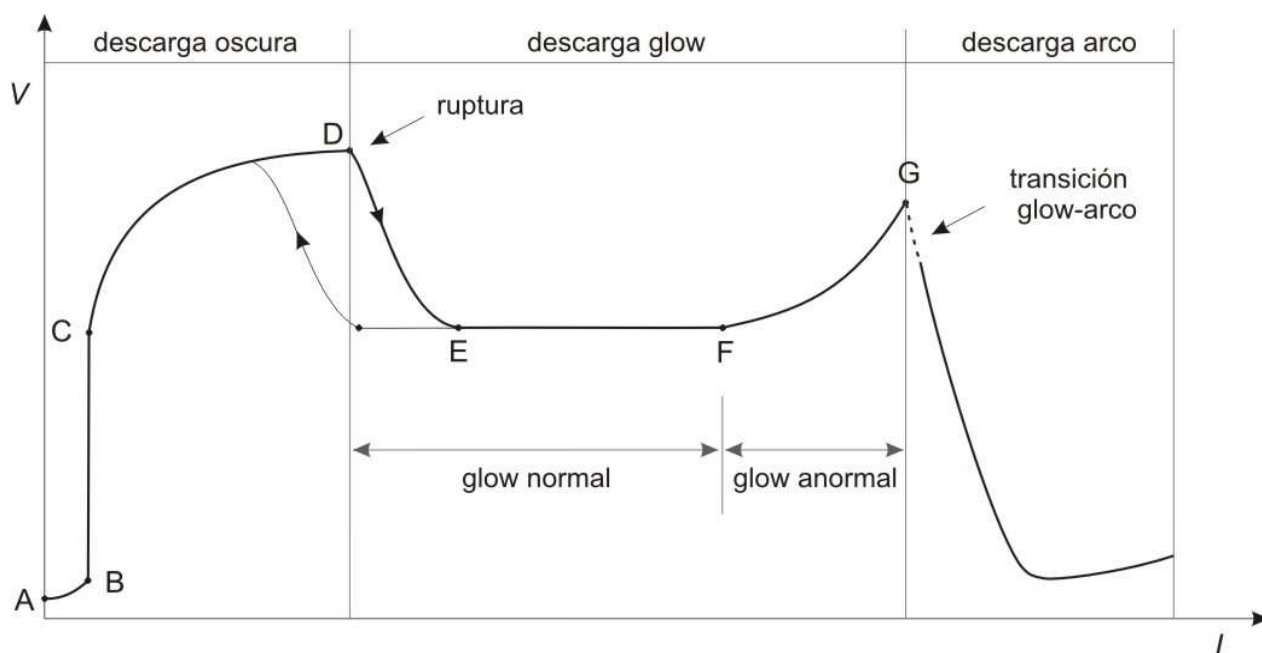
El bombardeo de iones calienta el cátodo, el cual se pone incandescente y empieza a emitir electrones termoiónicamente. Si el proceso continúa, puede alcanzarse la descarga en arco, con plasma de gran temperatura, en esta situación una lámpara de neón acabaría fundida.

La naturaleza de la descarga depende, por tanto, del método de suministrar electrones en el cátodo. Una descarga entre electrodos metálicos en un tubo de vidrio, que toma sus electrones de un bombardeo de iones positivos al cátodo es lo que se llaman tubos de iluminación de descarga glow. En ellos, en los alrededores de un punto afilado, u otro lugar con pequeños radios de curvatura, existe un campo eléctrico muy intenso, mayor que la media del tubo. Este actuará de cátodo, mientras un volumen indefinido a su alrededor actuará de ánodo. Ahí radica la importancia de disponer de un electrodo.

Muchas otras teorías y procesos tienen lugar en este tipo de situaciones, por lo que es motivo de discusión en qué proporción tienen importancia, con la intención de dar una mejor visión global.

## A.2 Curva V-I en un tubo de descarga de gas

Los distintos regímenes de descarga durante la aplicación de un voltaje a un tubo de descarga se explican con la *Figura 52*. En los apartados siguientes se detalla la *zona de descarga oscura* y el valor de la tensión de ruptura. Las otras dos zonas de interés son la *zona de descarga glow* y la *zona de descarga en arco*, se diferencian principalmente, en la densidad de corriente [2] [3] [13]. Debe distinguirse el voltaje de alimentación ( $V_0$ ) que aumenta progresivamente, con el voltaje interelectródico ( $V$ ), representado en la *Figura 52*.



*Figura 52: Curva tensión-intensidad en tubo de descarga de gas*

A-D Descarga oscura: Se divide a su vez en varias zonas.

A – B: Se observa una corriente débil

B – C: Si el voltaje se aumenta lo suficiente se alcanza una saturación en la corriente. En esta región la corriente permanece constante a pesar de que aumente V.

C – D: Esta región recibe el nombre de descarga Townsend. Las corrientes típicas de esta región varían entre  $10^{-18}$  a  $10^{-5}$  A (*Anexo A3*).

D Ruptura eléctrica: En este punto la corriente puede aumentar entre 4 y 8 órdenes de magnitud. Se suma a la corriente la contribución de cargas liberadas en procesos de emisión secundaria debida a la incidencia de iones y fotones sobre el cátodo.

D-G Descarga glow : Esta región de la curva debe su denominación a la emisión de radiación visible (glow = brillo). La luminosidad se debe a que la energía y densidad de las cargas son suficientes para provocar numerosas excitaciones en el medio gaseoso, cuya desexcitación produce emisión de luz. Cuando se tiene una descarga glow en un tubo largo se puede observar entre los electrodos zonas más luminosas alternadas con otras más oscuras sobre las que no se va a profundizar.

E – F: Después de una transición abrupta entre D y E se alcanza el régimen de descarga glow normal. En esta región el voltaje interelectródico es prácticamente independiente de la corriente. A medida que se aumenta el voltaje de alimentación ( $V_e$ ), aumenta la corriente sin haber modificaciones en V. Esto se debe a que se produce un aumento del área a través de la cual fluye la corriente, sin cambio de la densidad de corriente j.

F – G: Cuando se cubre el área del cátodo totalmente (punto F), la corriente se aumenta a expensas de un aumento en j, lo cual se traduce en un aumento de la tensión interelectródica (V). Esta región se denomina descarga glow anormal. Si se parte del punto F y se recorre la curva hacia la izquierda se observa un ciclo de histéresis.

G Descarga arco: Cuando la corriente alcanza valores típicos de 1 A la descarga glow precipita en un arco. En esta zona de la curva se produce una fuerte caída de V y un aumento de I. Un arco voltaico es una descarga continua, mientras que en una chispa la descarga es momentánea, un mechero piezoeléctrico puede ofrecer chispas del orden de 10 KV, pero no arco.

En el caso de lámparas de descarga interesa mantenerse en la *zona glow*, y no entrar en la zona de descarga en arco, puesto que la temperatura inutilizaría la lámpara. Los tubos se controlan mediante resistencias u otros elementos para no entrar en dicha zona.

### **A.3 Efecto Avalancha Townsend [2][3]**

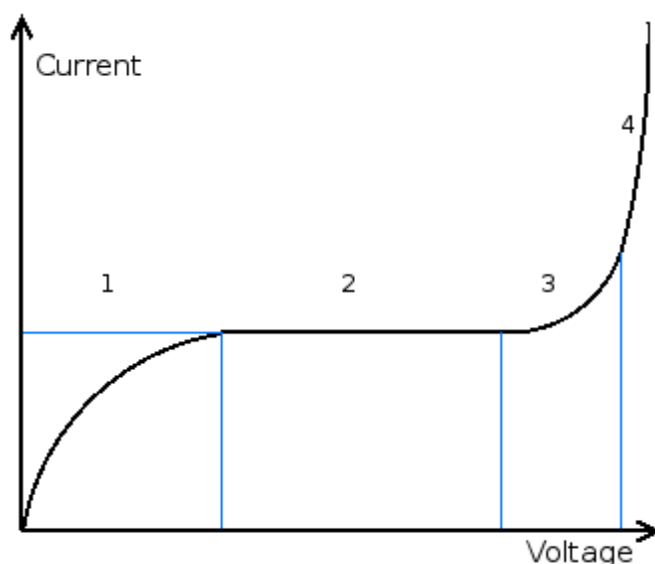
Cuando un electrón choca contra un átomo o molécula puede darse un choque elástico o inelástico. Se denomina choque inelástico a aquel que libera a un nuevo electrón de dicha molécula o átomo, y choque elástico a aquel en el que el electrón incidente no aporta suficiente energía como para liberar a otro electrón. De un electrón incidente en choque inelástico se obtienen dos, que a su vez repiten el proceso. Tras n colisiones tendremos  $2^n$  electrones libres. Su número aumenta exponencialmente, por lo que aparece lo que se denomina efecto en cascada o avalancha. Para iniciar el proceso se necesita combinar valores adecuados de campo eléctrico y distancia entre moléculas. [2][3]

En el *Anexo A1* aparecen distintas formas de obtener los primeros electrones. Si se pretendiera

iniciar el proceso de ionización mediante el choque directo de dos átomos o moléculas, el campo necesario sería mucho más alto. Conforme el gas se ioniza surge el plasma.

El plasma es un estado de la materia en el cual ésta se encuentra fuertemente ionizada, es decir, con gran cantidad de iones. Se compone de iones positivos o cationes, electrones sueltos y aniones, que son iones negativos. También se compone de átomos eléctricamente neutros pero excitados, que se desexcitan (decaen) emitiendo radiación electromagnética característica visible o invisible, como ultravioleta (UV) y/o infrarroja (IR). Existe plasma frío y caliente, en los tubos de iluminación se utiliza plasma frío. Es conocida como "luz fría", para distinguirla de la irradiada por la agitación térmica de los iones de la red de átomos del material, debida a la alta temperatura de los filamentos incandescentes.

El proceso Townsend se caracteriza por muy bajas densidades de corriente, en un tubo de gas común un valor típico puede estar entre  $10^{-18}A$  hasta  $10^{-5}A$ . Los voltajes aplicados son casi constantes. No inicia una descarga sustanciosa, pero multiplica la corriente original, incrementando la corriente fotoeléctrica. Este tipo de descarga produce poca luz, la llamada descarga oscura o Townsend. En la *Figura 53* se muestra la evolución en la zona de descarga oscura hasta el voltaje de ruptura. La descarga Townsend se da en las regiones 3 y 4.



*Figura 53: Descarga oscura, detalle de la Figura 52*

#### A.4 Curvas de Paschen

Al final de la zona de descarga oscura y gracias al *efecto Townsend* se llega al potencial de ruptura. Llegado a este punto, el gas ya es plasma conductor [2] [3].

Friedrich Paschen, en el año 1889, estudió la tensión disruptiva de láminas paralelas envueltas de gas como función de la presión y la distancia entre láminas. La tensión disruptiva se describe mediante la ecuación

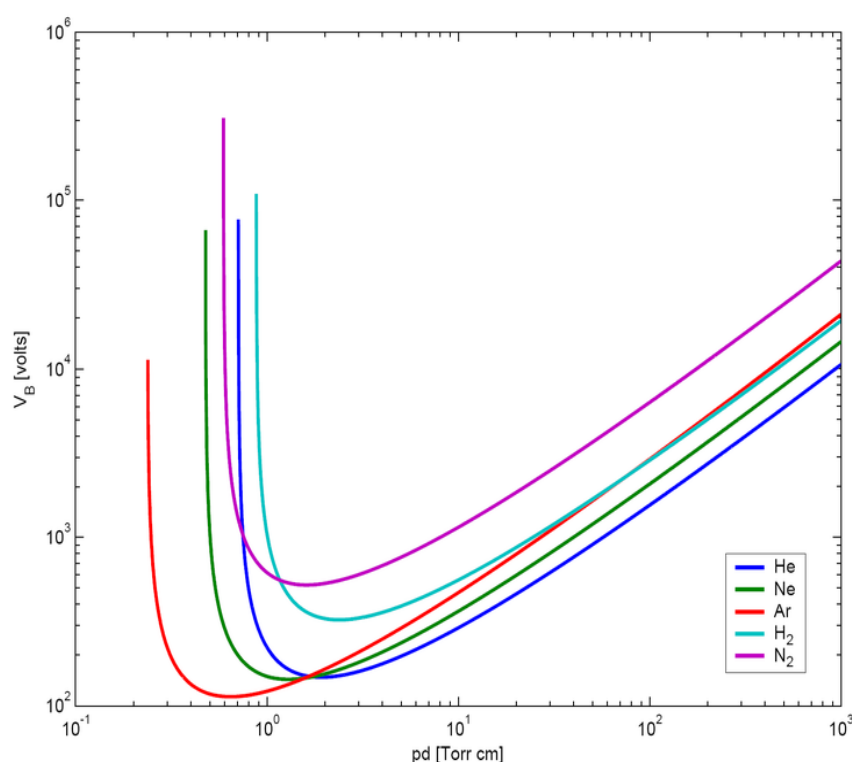
$$V_B = \frac{apd}{\ln(pd) + b}$$

$V_B$  tensión de ruptura [V],  $p$  presión [Torr],  $d$  distancia entre láminas [cm].  $a$  y  $b$  son constantes que dependen del gas.

**Tensión de ruptura** : Voltaje mínimo que produce ruptura en un aislante con el consiguiente paso de corriente. El voltaje de ruptura depende del gas utilizado, del material del cátodo, presión y de la distancia entre electrodos y su forma.

Estas curvas presentan un mínimo que corresponde al punto en que los electrones poseen la máxima capacidad de ionización (*Figura 54*). Para valores de  $p \cdot d$  menores que este punto (rama izquierda de la curva), la probabilidad de colisión entre los electrones y las partículas del gas es muy pequeña y, por lo tanto, es necesario aumentar el campo eléctrico para lograr una amplificación que desencadene una descarga autosostenida. Para valores elevados de  $p \cdot d$  (rama derecha de la curva de Paschen) el aumento de  $V_B$  es causado por un aumento de las pérdidas en choques elásticos.

El voltaje de ruptura puede ser distinto de la predicción Paschen, por ejemplo cuando el campo de emisión, i.e. emisión de electrones inducida por campos electromagnéticos externos, desde la superficie del cátodo se vuelve importante, superando la generación de electrones al efecto termoiónico. Otros factores que pueden variar el valor de la curva son la forma y material de los electrodos, temperatura, etc.



*Figura 54: Curvas Paschen, tensión de ruptura en función de presión y distancia entre electrodos*

### A.5 Fluorescentes, vapor de sodio y neones

En puntos anteriores se han tratado genéricamente los tubos de descarga. Es importante distinguir la diferencia entre tubos fluorescentes y neones [1] [11] [13].

El gas contenido en un tubo fluorescente es vapor de mercurio a baja presión (0,8 Pa) y una pequeña cantidad de un gas inerte que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de electrones. Cuando están excitados, los átomos de mercurio producen luz ultravioleta (254 nm). Los fotones alcanzan un recubrimiento de fósforo en el interior del tubo, y el fósforo excitado crea la luz blanca visible, es decir, reconvierte los fotones a una longitud de onda visible. Para conseguir la ruptura de este tipo de lámparas se utilizan reactancia y cebador, antes era habitual el precalentamiento de electrodos para lograr efecto termoiónico. También se excluye este tipo de luz



por su disminución de calidad a alta temperatura, donde la elevada presión del vapor provoca autoabsorción de la radiación UV producida.

Las lámparas de vapor de sodio son las conocidas bombillas de bajo consumo. Comparten fundamentos físicos con fluorescentes y neones, la gran diferencia estriba en la necesidad de varios minutos para calentarse y poder obtener máximo rendimiento. Producen un color amarillento.

Los tubos de neón son lámparas de descarga de gas de construcción simple. Sólo se componen de un tubo de vidrio delgado y tienen electrodos en ambos extremos. Este tubo de vidrio es llenado con neón (u otros gases nobles o mezclas) a baja presión. El proceso en la generación de luz es el descrito anteriormente. Se diferencian de los fluorescentes en que utilizan un transformador que alimenta el tubo luminoso y es requerido proveer el pico inicial, y después sirve de elemento compensador o balastro, evitando la zona de arco. Una vez encendido, el voltaje para sostener la descarga en un tubo de neón cae aproximadamente un 30%

#### A.6 Mezcla Penning

Un gas puro tiene un voltaje de ionización mayor que una mezcla de gases. La mezcla más eficaz son las llamadas mezclas Penning, formadas por un gas noble y una pequeña cantidad de otros gases. Una mezcla Penning común es 98 a 99,5% de neón con 0,5 a 2% de argón y se utiliza en algunas lámparas de neón, especialmente las de potencia nominal de 110 voltios [1][11][13].

Al realizar este tipo de mezclas se facilita el proceso dado que los gases adicionados adquieren estados de excitación que transmiten mediante choques elásticos a los átomos del gas mayoritario. Por ejemplo, el argón excitado es metaestable y tiene una energía 0.9 veces superior a la energía potencial de ionización del neón. Cuando los átomos metaestables del argón chocan con los del neón, la probabilidad de ionización es muy alta.

El gas adicional tiene también la función de reducir la pérdida de iones que se dirigen a las paredes, controlar la movilidad de los electrones y, por tanto, la conductividad eléctrica, prolongar la vida de los electrodos reduciendo su evaporación y, en lámparas con mercurio, proteger los fósforos de los iones de mercurio.

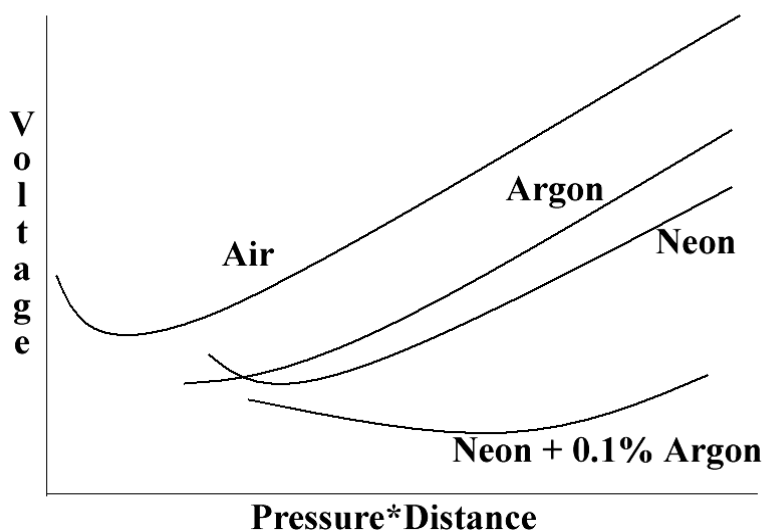


Figura 55: Curvas Paschen con mezclas Penning, la tensión de ruptura es menor



# **ANEXO B**

## **TECNOLOGÍA LÁSER**



## ANEXO B: TECNOLOGÍA LÁSER

Un generador láser es un dispositivo capaz de transformar energía eléctrica, óptica o química en radiación electromagnética coherente, monocromática y direccional gracias al fenómeno de emisión estimulada [1][5][13][14].

Las tres partes principales de un dispositivo láser son: Medio activo, sistema de bombeo y resonador óptico.

El **medio activo** es el conjunto de átomos o moléculas que pueden excitarse hasta producir una inversión de la población en sus niveles energéticos, pudiendo ser sólido, líquido, gas o plasma. De este medio activo dependen las posibles longitudes de onda que se pueden emitir.

El **sistema de bombeo** es la fuente de energía que conduce a los átomos del medio activo desde estados de baja energía a estados excitados, produciendo la inversión de la población. Los mecanismos de excitación pueden ser por bombeo óptico, descarga eléctrica, colisiones con átomos, reacción química o por corriente eléctrica.

Un **resonador óptico** consiste en un par de espejos enfrentados, situados a una distancia tal que la interferencia resultante genera una onda estacionaria, en cuyo centro se sitúa el medio activo.

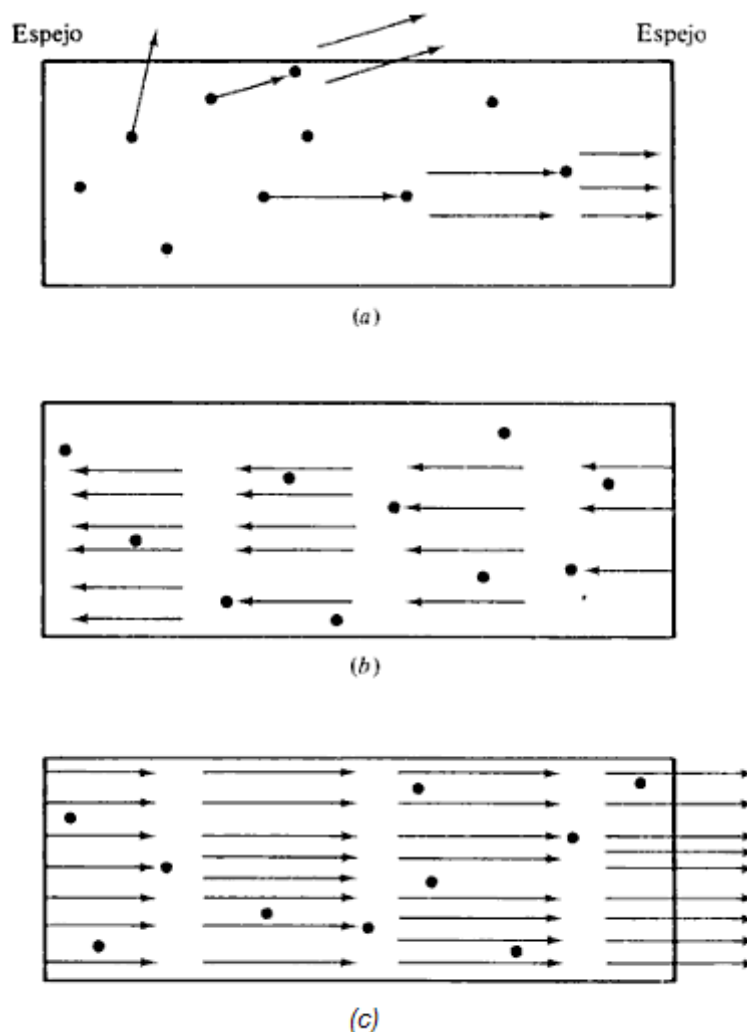


Figura 56: Reforzamiento de la acción láser, los puntos representan átomos gaseosos, las flechas simbolizan fotones

El haz de luz generado por el medio activo viajará entre los dos espejos que limitan la cavidad donde este se encuentra, amplificándose dicho haz por emisión estimulada dando como resultado un haz de mayor intensidad (*Figura 56*).

Existen otros elementos que permiten controlar las características del haz y el modo de trabajo: Lentes, filtros, prismas, divisores de haz, pocket cells, etc.

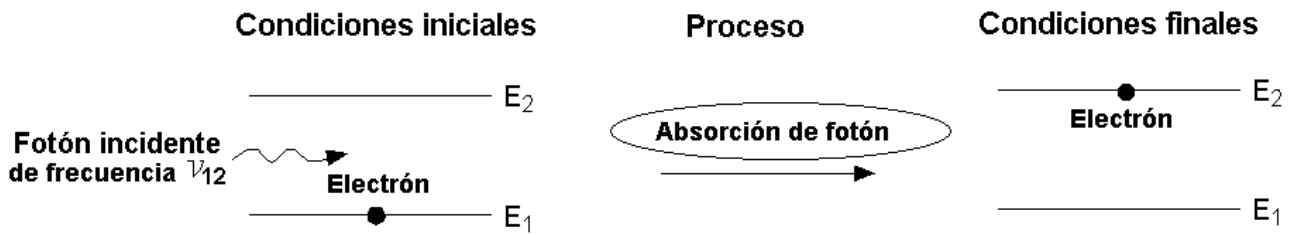
La salida del haz de la cavidad donde se sitúan el medio activo y el resonador, se realiza a través de uno de los espejos, cuya reflectancia es ligeramente inferior al 100%.

## B.1 Procesos físicos

Cuando un átomo o molécula experimenta una transición energética entre dos de sus estados permitidos, absorbe o emite un fotón de energía proporcional a la diferencia de energías entre ambos estados (*Figura 57*) [5] [9].

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{12} \quad (1)$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son las energías de los átomos en los estados 1 y 2,  $h$  la constante de Planck y  $\nu_{12}$  la frecuencia de onda asociada al fotón emitido.



*Figura 57: Absorción de un fotón, condiciones iniciales y finales*

En equilibrio termodinámico a temperatura  $T$ , el número de población  $N_i$  de un nivel específico no degenerado de energía  $E_i$  puede expresarse con la distribución Maxwell-Boltzmann.

$$N_i = N_0 e^{E_i/kt} \quad (2)$$

Con  $k$  la constante de Boltzmann y  $N_0$  el número de población total.

De las ecuaciones (1) y (2) se deduce que para una diferencia de energía determinada, a mayor temperatura, mayor población relativa  $N_2/N_1$  y que en equilibrio térmico, la población en los niveles de mayor energía es menor que en los de menor energía.

Tomando como partida que los cambios de energía de los átomos se deben a transiciones electrónicas es posible diferenciar bombeo, emisión espontánea y emisión estimulada.

**Bombeo:** Se suministra energía a un conjunto de átomos buscando una situación de inversión de población (*Figura 58*) en al menos un nivel de los de energía más alta excitando los electrones del medio activo desde su estado fundamental a estados de energía superior.

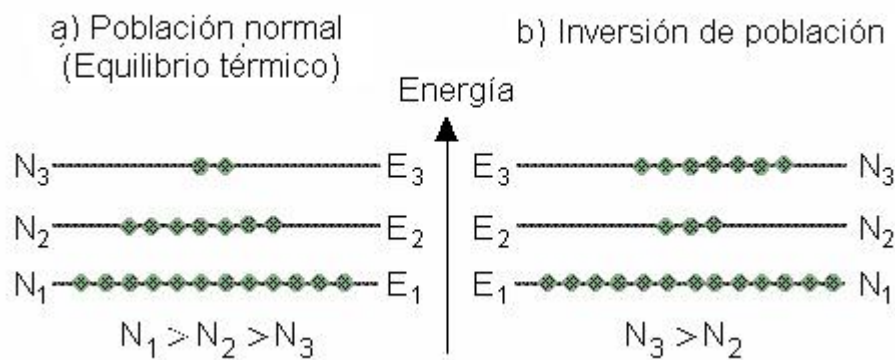


Figura 58: Proceso de inversión de la población

**Emisión espontánea:** Sucede cuando un electrón de manera espontánea y sin intervención externa decae desde un estado de mayor energía a otro de menor energía emitiendo un fotón de energía en dirección y fase aleatoria. El número de átomos en un estado excitado decae exponencialmente (Figura 59).

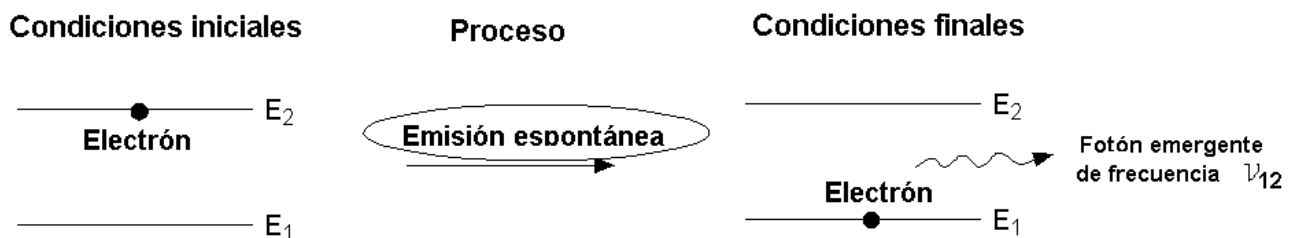


Figura 59: Emisión espontánea de un fotón, condiciones iniciales y finales

**Emisión estimulada:** Proceso de amplificación, consistente en que cuando a un átomo en estado excitado llega un fotón, obliga a este a realizar una transición electrónica que generará la emisión de un segundo fotón idéntico al incidente en energía, fase, dirección y estado de polarización. El proceso acaba, por tanto, con dos fotones iguales viajando en la misma dirección, generados de un único fotón y un estado excitado (Figura 60).

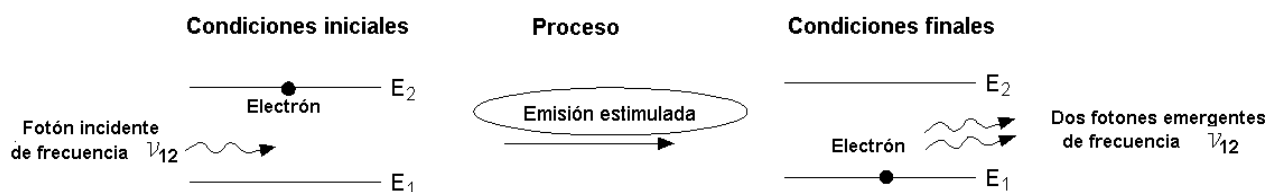


Figura 60: Emisión estimulada de un fotón, condiciones iniciales y finales

Descripción de la variación de la energía de un haz de fotones de energía  $E=h\nu$  debida a los procesos de absorción y emisión estimulada:

Cuando el sistema se encuentra con una distribución de población normal, la población del nivel de mas baja energía es mayor que la del nivel de mayor energía y por tanto sólo es posible el proceso de absorción de la energía del haz. Cuando la población se ha invertido implica que la señal incidente se ve amplificada de forma proporcional a la diferencia de población entre niveles y a la densidad de fotones.

La absorción de energía electromagnética que atraviesa un medio en dirección Z se describe por la Ley exponencial de Beer Lambert.

$$I = I_0 e^{(-\alpha z)}$$

Con I intensidad de la radiación incidente y  $\alpha$  el coeficiente de absorción del material.

$\alpha$  depende del material y de la diferencia de población de sus niveles energéticos.

Los láseres pueden ser de tres o cuatro niveles de energía. Para un sistema de tres niveles, la emisión estimulada se produce entre los niveles 1 y 2. La permanencia en el nivel tres al invertirse la población es muy corta, y la población normal de dicho nivel puede ser despreciada. Para que se produzca una inversión de la población se requiere que más de la mitad del total de los átomos se encuentren en el nivel láser superior. Se requiere un bombeo intenso que conduce a baja eficiencia. Si es de cuatro niveles se dispone de un nivel de energía por encima del fundamental, caracterizado por un tiempo de vida media muy corto, lo que permite que la inversión de población se genere con mayor facilidad y por lo tanto tiene mayor eficiencia (Figura 61).

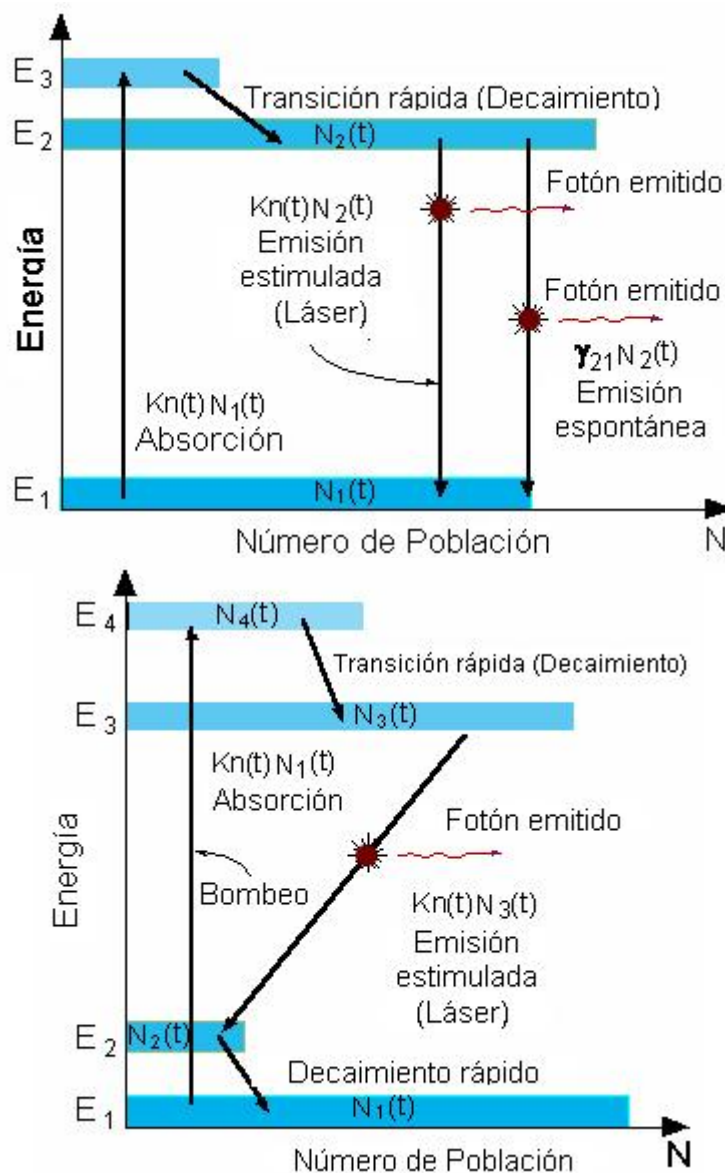


Figura 61: Láser de 3 y 4 niveles



## B.2 Cavity óptica

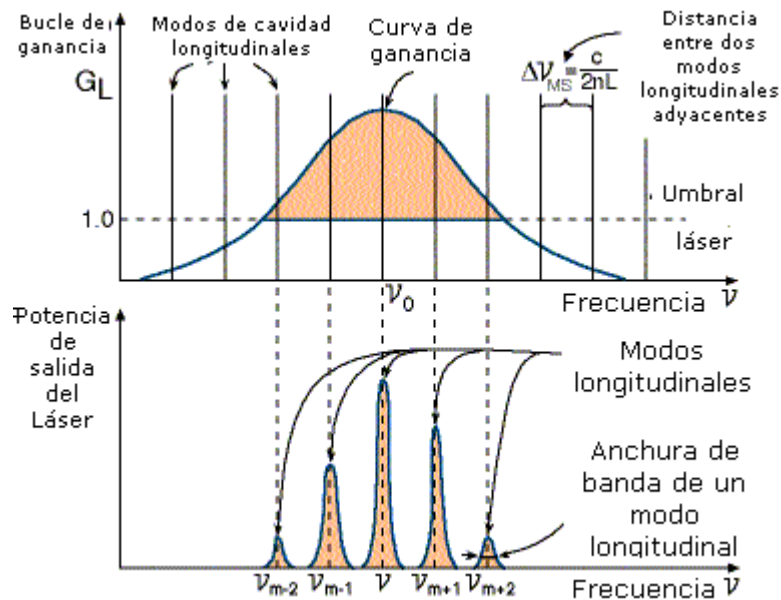
El término cavidad óptica [5] [9] hace referencia a los espejos situados en los extremos del resonador. En su eje se sitúa el medio activo y la distancia entre ambos espejos es tal que se crea una onda estacionaria, siempre y cuando la frecuencia cumpla:

$$\nu_m = m \cdot (c / (2 \cdot n \cdot L))$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del medio,  $L$  la longitud de la cavidad y  $m$  el número de modo longitudinal, es decir, el número de semilongitudes de onda dentro de la cavidad.

La cavidad puede ser tipo esférica, confocal, semiesférica o cóncava-convexa.

De todas las frecuencias posibles en la cavidad, sólo aquellas que tienen una amplificación por encima de un cierto valor se emiten fuera de la cavidad. La condición umbral implica que la amplificación debe ser igual a las pérdidas por absorción (*Figura 62*).



*Figura 62 : Curva de ganancia del láser, y anchuras de banda emitidas*

El número de modos posibles en un láser  $N$  se puede controlar con la longitud de la cavidad  $L$ .

En la cavidad óptica pueden producirse pérdidas debidas principalmente a:

- Desalineación de espejos.
- Absorción y dispersión originadas por los elementos del interior de la cavidad.
- Difracción causada por la abertura.

### B.3 Curva de ganancia

La potencia de salida del láser depende de la ganancia (amplificación) en el medio activo y de las pérdidas producidas en el láser (*Figura 62*) [5].

Mediante estos dos conceptos queda definida la ganancia en un ciclo:

$$G_1 = R_1 \cdot R_2 \cdot \exp(2 \cdot (\beta - \alpha) \cdot L)$$

Siendo  $\alpha$  y  $\beta$  los coeficientes de pérdidas por absorción y de ganancia, respectivamente.

$R_1$  y  $R_2$  los radios de los espejos y  $L$  la longitud de la cavidad.

Debe superarse el valor umbral  $G_1=1$  para tener acción láser.

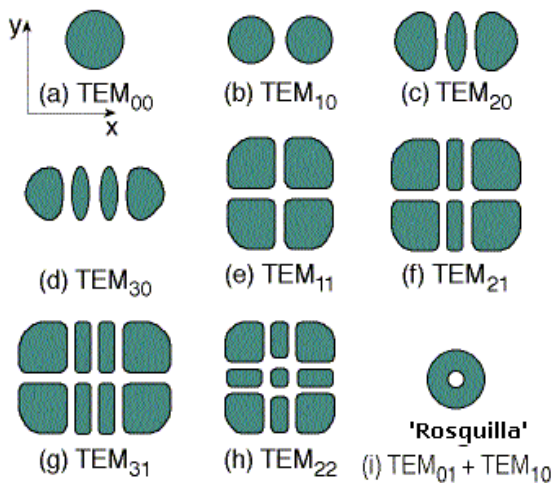
### B.4 Modos transversales

La intensidad de la radiación láser en la sección perpendicular al eje óptico, tiene una distribución con regiones de alta intensidad denominadas modos transversales o TEM (*Figura 63*)[5][9].

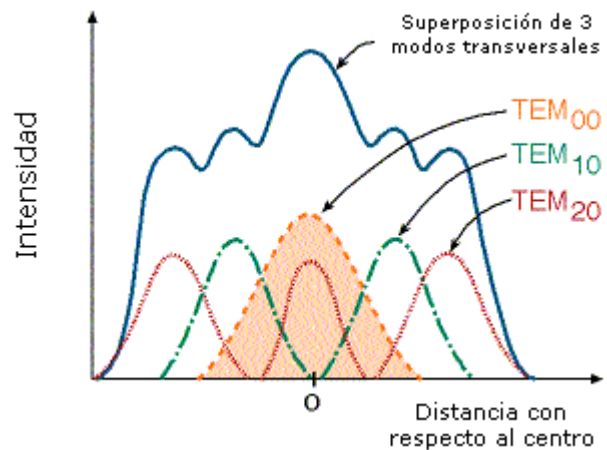
Cuando un láser opera en varios modos transversales, la intensidad total es la superposición de todos los que lo constituyen. Las características de este modo, máxima coherencia espacial y mínima divergencia, lo hacen apropiado para aplicaciones como el procesamiento de materiales.

La distribución espacial de la intensidad de este modo tiene forma gaussiana (*Figura 64*).

La abertura a la salida de la cavidad está limitada por el diámetro del medio activo. Para conseguir que el sistema opere en modo transversal fundamental se introduce un 'pinhole' limitante, actuando sobre el diámetro del haz, de forma que sólo este modo puede atravesarlo, atenuándose los demás.



*Figura 63: Modos transversales (TEM)*



*Figura 64: Superposición de modos transversales*

### B.5 Modos de operación

**Modo continuo:** Nivel continuo de la potencia de salida, el bombeo del medio activo también debe ser continuo. Las fluctuaciones térmicas, falta de uniformidad en la descarga eléctrica, inhomogeneidad del medio, etc ; Producen que la estabilidad de la potencia esté en torno al 98%.

Usado en corte, soldadura y modificación superficial

**Modo pulsado:** Variación temporal de la potencia con el tiempo, pulsos únicos o repetidos, pudiendo variar el número de pulsos por unidad de tiempo. Para caracterizarlos deben considerarse los parámetros de pulso (energía de pulso, anchura o duración de pulso, potencia de pico de pulso, pulsos por segundo o frecuencia) y el valor de la potencia media. Los pulsos se generan por bombeo pulsado, conmutador Q-switch o por bloqueo de modos. Potencia media sería la de un láser continuo que transmitiera la misma energía por segundo. Si además se divide potencia media por número de pulsos se obtiene potencia media de cada pulso.

## B.6 Tipos de láser

Pueden clasificarse según [5]:

- Medio activo.
- Longitud de onda.
- Mecanismo de bombeo del medio activo.
- Características de la radiación emitida.
- Número de niveles de energía que participan en el proceso láser.

La clasificación más habitual es según el medio activo, que puede ser gas, sólido, líquido o plasma. El material usado como medio activo determina la longitud de onda del láser, el método de bombeo más adecuado, orden de magnitud de la potencia de salida y rendimiento.

Los láseres de neodimio, en los que se centra este proyecto, pertenecen al grupo cuyo medio activo es sólido. Consisten, básicamente, en materiales que contienen algún tipo de ión. Las matrices típicas son cristales, vidrios y cerámicas. Como iones se utilizan Cr, Ti, Yb, Er, Pr, Nd. Cristales típicos son el YAG (Y3Al5O12) que se halla en el láser del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza y YVO (YVO4) disponible en el láser de la empresa BSH en Zaragoza.

Los láseres de Nd:YAG son habituales en investigación básica y aplicada debido a que su construcción es simple y su fiabilidad alta. Los haces obtenidos son de buena calidad y se utilizan en aplicaciones de alta potencia. El mecanismo típico de bombeo es por diodos, con una longitud de onda de 808 nm. Es habitual duplicar o triplicar la frecuencia de la radiación para obtener a la salida un láser que emita en verde o en azul.

## B.7 Caracterización óptica de un láser

En procesos como el marcado superficial o el mecanizado, se requieren altas densidades de potencia o irradiancia y elevadas densidades de energía o fluencia. Para obtenerlas es necesario disponer a la salida de la cavidad de diversos componentes ópticos como lentes, colimadores o expansores de haz. Debe situarse la pieza en el plano focal, donde el diámetro de focalización es mínimo pudiendo llegarse a obtener irradiancias y fluencias que permitan evaporar el material [5].

El diámetro de focalización tiene unas dimensiones mínimas finitas. Colocar la pieza a la distancia focal adecuada para conseguir dichas dimensiones es, en ocasiones, complicado por limitaciones mecánicas. Los parámetros ópticos que caracterizan la focalización de un haz láser son:

### *Diámetro del haz en el plano focal*

$$D_{bw}=f\cdot\Theta_{0\infty}=(4\cdot f\cdot M^2\cdot\lambda)/(\pi\cdot D_0)$$

Donde  $f$  es la distancia focal de la lente,  $M^2$  la calidad del haz,  $\lambda$  longitud de onda y  $D_0$  el diámetro del haz antes de la lente.

### ***Rango Rayleigh***

Distancia en z desde el plano focal, en la que la variación del diámetro es de  $(2 \cdot D_{bw})^{1/2}$

$$R = (\pi \cdot D_{bw}^2) / (4 \cdot M^2 \cdot \lambda)$$

### ***Profundidad de foco***

Distancia a cada lado en el eje z, del plano focal, en la que el diámetro varía un 5%

$$DOF = \pm 0,08 \cdot \pi \cdot D_{bw}^2 / (M^2 \cdot \lambda)$$

### ***Diámetro del haz con la distancia***

Variación del diámetro a lo largo de la trayectoria del haz, desde la cintura del haz.

$$Dz = D_{bw} [1 + (4 \cdot f \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot z / (\pi \cdot D_{bw}^2))^2]^{1/2}$$

## **B.8 Interacción luz-materia**

Cuando un haz de luz llega a un material pueden darse diversos fenómenos como reflexión, refracción, absorción y transmisión (doble refracción). Dependiendo del comportamiento del material este puede resultar transparente u opaco a la luz [5].

**1) Absorción:** La luz puede ser absorbida por un material no metálico según diversos procesos:

*Polarización electrónica*, puede seguir dos mecanismos:

En moléculas polares, la distribución de carga de enlace no es uniforme y cuando se aplica un campo eléctrico los dipolos se orientan sobre sí mismos y se produce una polarización orientada en la dirección del enlace, que generalmente es covalente.

En átomos o moléculas no polares, la aplicación de un campo eléctrico provoca una polarización condicionada por la dirección de E, pero sin coincidir necesariamente con ella.

*Mecanismos de promoción electrónica de la banda de valencia a la de conducción o a través de las impurezas del material:*

La absorción de un fotón mediante la promoción de un electrón de la banda de valencia a banda de conducción sólo es posible si la energía del fotón incidente es mayor que la energía del intervalo prohibido (entre bandas).

Por ejemplo, la luz visible no es absorbida por materiales con intervalo prohibido superior a 3,1 eV y son transparentes. Serán opacos si el intervalo prohibido es inferior a 1,8 eV. La existencia de impurezas puede causar existencia de niveles discretos de energía dentro del intervalo prohibido, de manera que haya absorción de radiación por transiciones electrónicas.

**2) Disipación:** La energía electromagnética absorbida se disipa de distintas maneras:

*Generación de fonones:* Cuando la longitud de onda de los fotones incidentes se encuentran en la región infrarroja no tienen suficiente energía para transiciones electrónicas pero sí para variar las vibraciones de los iones en la red. La energía necesaria depende del tipo de átomo y enlace.

Los átomos de una red cristalina se encuentran en movimiento relativo entre ellos, vibran a frecuencias constantes y permanece fijo el centro de masas. Cuando se acercan unos a otros se produce repulsión, si se alejan, atracción. La energía de las vibraciones de la red está cuantizada, el cuanto de energía se llama fonón. Las ondas elásticas que se propagan por cristales se componen de fonones.

*Generación de fotones:* En caso de transiciones de banda de valencia a banda de conducción el electrón decae a la banda de valencia produciéndose una recombinación electrón-hueco generándose un fotón de la misma energía que el incidente.

*Generación fotones/fonones:* Cuando la transición se da en presencia de impurezas puede decaer el electrón generando dos fotones o mediante un fotón y un fonón disipándose esta energía en forma de calor.

## **B.9 Procesos de ablación láser**

Se define como ablación láser el proceso de eliminación de material como consecuencia de la interacción del material con un haz láser. Durante este proceso puede producirse calentamiento, fusión y/o evaporación. Estos fenómenos surgen de mecanismos fototérmicos, fotofísicos o fotoquímicos dependiendo de la duración de los procesos de excitación  $t_R$  y termalización de la energía de excitación  $t_T$  (tiempo de relajación del proceso de excitación) [5].

Los modelos existentes de ablación distan todavía de ser capaces de explicar completamente el fenómeno mediante un modelo teórico único.

La eficacia y el rendimiento de ablación dependen de:

- Características del haz láser: Longitud de onda, coherencia espacial y temporal, condiciones de focalización, duración del pulso, número de pulsos incidentes.
- Propiedades ópticas, térmicas y mecánicas del material, su composición química y microestructura.
- Fenómenos que se dan durante la interacción: Absorción, transferencia de calor, evaporación, formación de plasma, apantallamiento del haz debido al plasma, aparición de ondas de choque, etc.

Las posibilidades de aplicación de un láser para un determinado proceso como la ablación dependen de la irradiancia (potencia incidente por unidad de superficie), fluencia (energía por unidad de superficie) y tiempo de interacción.

Si un haz tiene baja irradiancia, tiempo de interacción largo y fotones poco energéticos se obtendrá calentamiento, modificación de superficies, soldadura, corte, etc

Si el haz es de alta irradiancia, tiempos de interacción cortos y fotones muy energéticos se pueden dar ablación, deposición de materiales, recocidos (PLA), etc.

Se produce evaporación, esto es, escape de moléculas y/o átomos de una superficie líquida al gas ambiente, cuando en ablación fototérmica se forma una delgada capa en fase líquida.

Con pulsos de elevada irradiancia la interacción del láser con el vapor puede formar plasma o bien el vapor puede mostrarse como un medio casi transparente al haz.

*Mecanismos fototérmicos:*  $t_T \ll t_R$  Mecanismos de desexcitación irrelevantes, láser~Fuente de calor localizada en el tiempo y el espacio, pudiendo llegar a  $10^4$  K/s

*Mecanismos fotofísicos:* Se consideran los mecanismos fotoquímicos y fototérmicos como los casos extremos y menos habituales de los mecanismos fotofísicos. Siendo por tanto mecanismos intermedios.

*Mecanismos fotoquímicos:*  $t_R \ll t_T$  La temperatura del sistema bajo la irradiación del haz puede considerarse constante.

## B.10 Características de los láseres empleados

**Nd(YAG):** La máquina disponible en el departamento de Ciencia de Materiales y Fluidos del Centro Politécnico Superior de Zaragoza, es un láser YAG de neodimio, marca ROFIN-SINAR, modelo E-line 20. El medio activo es sólido, la matriz es cristal YAG (Y3Al5O12), los iones son de neodimio. El mecanismo de bombeo es por diodos, trabajando en su longitud de onda fundamental 1064 nm. La potencia promedio máxima de salida de 11 W, pudiendo trabajar en modo continuo o pulsado. En modo pulsado el rango de frecuencia de trabajo es entre 1 y 40 KHz [5].

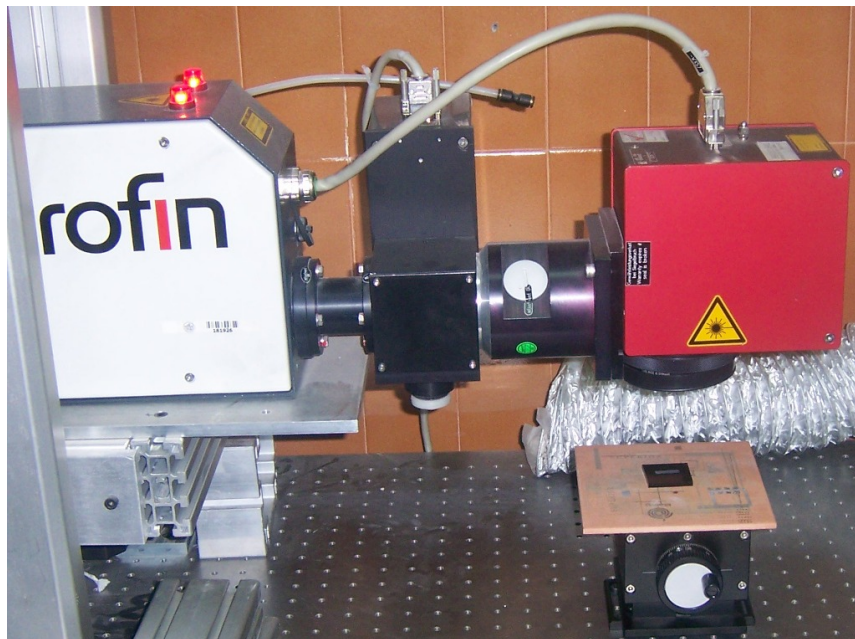
**Nd(YVO4):** Láser facilitado por la empresa BSH en Zaragoza: con conmutador Q-Switch bombeado por diodos de la casa Trumpf, modelo TruMark 6230, en el interior de la cavidad del sistema dispone de un cristal KDP generador de segundo armónico que duplica la frecuencia de la radiación láser de manera que la longitud de onda a la salida es de 532 nm. La potencia promedio máxima de salida es de 7,2 W. En modo pulsado el rango de frecuencias de trabajo es de 10 a 100 KHz. Patrones introducidos por software tipo CAD [5].

Parámetros:

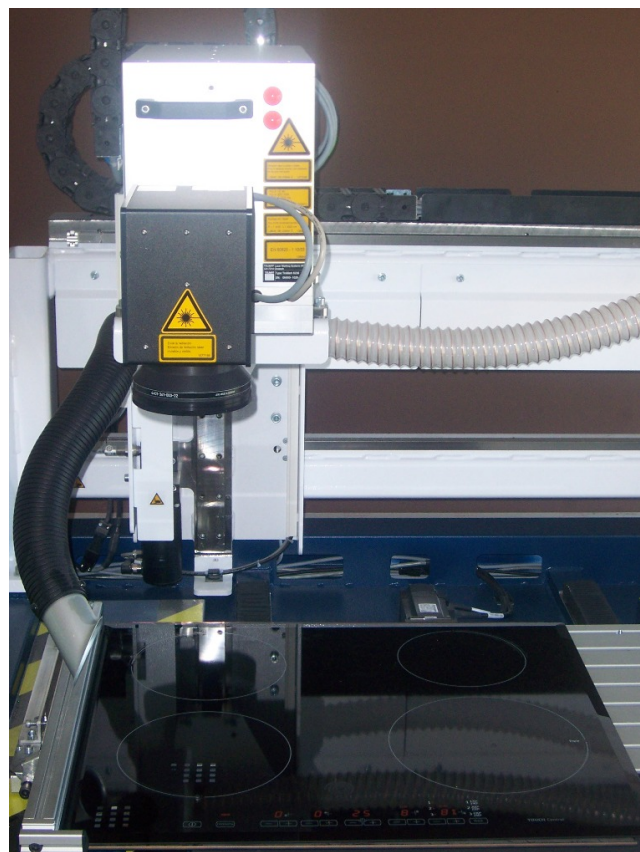
- Potencia (% Potencia que mediante el sistema de bombeo se le suministra al medio activo).
- Frecuencia (Pulsos por segundo).
- Velocidad (Velocidad lineal de barrido).
- Distancia entre líneas adyacentes.
- Desfocalización (Posición fuera de la posición focal).
- Tipo de relleno(Zig-zag, unidireccional y bidireccional, líneas equidistantes o en espiral).
- Lente

Tabla 26: valores ópticos para los dos láseres utilizados

	Nd:YAG	Nd:YVO4
Dbw (μm)	13	12
R (μm)	96	177
DOF (μm)	±31	±57



*Figura 65: Láser Nd(YAG)*



*Figura 66:Láser Nd(YVO4)*





# **ANEXO C**

## **HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO**



## ANEXO C: HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS

### C.1 Vidrio cerámico

Un desarrollo relativamente reciente, unos 40 años, en el ámbito de los materiales cerámicos lo constituyen las vitrocerámicas. Algunas formulaciones de vidrio se pueden desvitrificar totalmente (experimentan una transformación desde el estado vítreo al cristalino) mediante un tratamiento térmico adecuado (temperatura entre 500 y 1100 °C). Si se conforma la pieza mientras el material está en su forma vítreo pueden obtenerse formas complicadas [5] [12].

Las vitrocerámicas son uno de los materiales cerámicos mas sofisticados, pues combinan la naturaleza de los cerámicos cristalinos y los vidrios. El resultado es un producto con unas características especialmente atractivas. Comienzan por obtenerse como un producto común de vidrio, por lo que pueden conformarse de forma precisa y económica.

Una vez obtenido el producto con la forma deseada, se realiza una cristalización localizada inicial por medio de rayos ultravioleta, a continuación y por medio de un tratamiento térmico cuidadosamente controlado cristaliza entre el 90% y el 98% del material vítreo. El tamaño de grano final de las cristalitas esta generalmente entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ . La pequeña cantidad de vidrio residual rellena de forma efectiva el volumen entre los distintos granos, dando lugar a una estructura libre de poros.

Se ha hecho mención a la importancia de un tratamiento térmico, cuidadosamente controlado, para producir la microestructura uniforme de grano fino de la vitroceramicas. Es necesario recalcar que la recrystalizacion de un vidrio es un proceso de estabilización. Tal transformación comienza en algunas impurezas de la frontera entre fases. En el caso de un vidrio ordinario en estado fundido, la cristalización tenderá a nuclear en unos pocos puntos aislados a lo largo de la superficie del recipiente que contiene el fundido, seguido del crecimiento de unos cuantos cristales de gran tamaño. La estructura resultante es basta y no uniforme. Las vitrocerámicas se diferencian por la presencia de un porcentaje de un agente nucleante como el  $\text{TiO}_2$ , plata, oro u óxido de fósforo.

El producto vitrocerámico final viene caracterizado por una resistencia al impacto mecánico y al choque térmico muy superior a las de los cerámicos convencionales, puede considerarse su dilatación térmica prácticamente cero. La resistencia de las vitrocerámicas al impacto mecánico es consecuencia de la eliminación de los poros, que actúan como puntos de concentración de tensiones. La resistencia al choque térmico es el resultado de los bajos coeficientes de dilatación característicos de estos materiales. También destacan por sus propiedades como aislantes eléctricos. En la *Tabla 27* se presentan las propiedades de la vitrocerámica negra de 4 mm de espesor utilizada por el grupo BSH en placas de inducción.

*Tabla 27: Propiedades del material vitrocerámico Ceran Suprema*

CERAN SUPREMA ®	
Densidad, $\rho$	2,5 g/cm <sup>3</sup>
coeficiente lineal de expansión térmica, $\alpha$ (20-700°C)	0 $\pm$ 0,15·10 <sup>-6</sup> 1/K
Resistencia a la flexión MoR	110 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Young, E	95 GPa
Dureza HV	600
Capacidad calorífica, $C_p$ (20-100°C)	0,8 J/(g·K)
Conductividad térmica, K(100°C)	1,7 W/mK
Difusividad térmica D	0,85 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
Temperatura de fusión, $T_m$	1200°K

## C.2 Microscopio óptico confocal

El principio de la microscopía Confocal se basa en eliminar la luz reflejada procedente de los planos fuera de foco. Para ello, se ilumina una pequeña zona de la muestra y se registra el haz luminoso que proviene del plano focal, eliminándose los haces procedentes de los planos inferiores y superiores. El método de trabajo del microscopio confocal es por epiluminación, es decir, con muestras que al incidir la luz sobre ellas reflejan toda o parte de la luz incidente. Como fuente de luz se utiliza un sistema monocromático que permite focalizar la iluminación en una región muy pequeña de la muestra. Además, cuenta con un sistema de barrido en el eje Z, así la muestra es escaneada verticalmente en diferentes planos y se puede obtener una imagen tridimensional de la superficie en observación [6].

Las medidas se han realizado con un microscopio confocal marca Sensofar modelo PL $\mu$  2300 que combina la técnica confocal y la interferométrica. Como fuente de iluminación cuenta con un LED que emite a una longitud de onda de 460 nm. El equipo dispone de cuatro objetivos confocales y dos interferométricos. La interferometría se utiliza frecuentemente para medir topografías de superficies muy planas, posee una gran resolución en el eje Z, independiente de los aumentos que se utilicen. Por el contrario, la técnica confocal es muy sensible a la apertura numérica de los objetivos utilizados, permite utilizar valores de apertura numérica altos y se pueden medir perfiles con pendientes abruptas. Cuando se utilizan los objetivos confocales, el equipo posee una alta resolución lateral que depende del objetivo utilizado y que va desde 0.935  $\mu\text{m}$  para el objetivo de menos aumentos (10X) hasta 0.311  $\mu\text{m}$  para el de mayor (100X). Esta alta resolución lateral proporciona al equipo en la modalidad confocal la funcionalidad de perfilómetro óptico, lo que permite evaluar la rugosidad de la superficie no sólo en 3D a través de su topografía sino que también en 2D a partir de la adquisición de perfiles. El microscopio no hace contacto con la superficie por lo que es una técnica no destructiva.

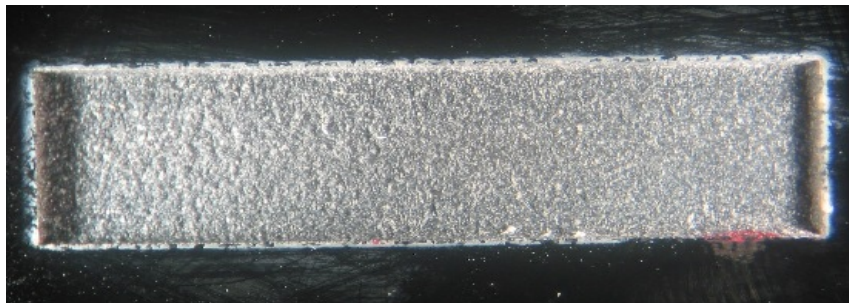


*Figura 67: Confocal Sensofar*

### Procedimiento con microscopio confocal:

En cada muestra se aplica un número distinto de pasadas con el láser : 1, 2, 4 , 6, 8 ó 10 para obtener una forma geométrica (cuadrado o rectángulo), la *Figura 68* ilustra el caso de 10 pasadas.

Con el láser Nd: YAG se realizaron marcas rectangulares de 20 x 5 mm, en el láser Nd:YVO4 marcas cuadradas 5 x 5 mm.



*Figura 68: 10 pasadas láser Nd:YAG en forma de rectángulo 5 mm x 20 mm*

Dado que el factor tiempo es importante en este proceso, es necesario entender en qué se emplea. El láser marca el dibujo del rectángulo a través de líneas rectas obtenidas por pulsos puntuales. Hay líneas largas que recorren el ancho del rectángulo (5mm), y otras más cortas sin pulsos mientras cambia de línea (0,025 mm) despreciables en tiempo. Así hasta recorrer 20 mm.

Ejemplo de una pasada en un rectángulo 5 x 20 mm

*Velocidad: 25 mm/s. 5000 pulsos cada segundo. Superficie del rectángulo: 100mm<sup>2</sup>.*

*Anchura entre líneas: 0,025 mm (El láser no marca durante este movimiento).*

*Tiempo que tarda el láser en recorrer 0,5 mm: Ancho/velocidad = 5/25= 0.2 s*

*Nº de líneas total a lo largo de 20 mm separadas 0,025 mm: 20 mm/0,025 mm = 800 líneas.  
(0,2 s/línea)x(800 líneas)=160 segundos ~ 161 segundos indicados por el software.*

Ejemplo de una pasada en un cuadrado 5 x 5 mm

*Velocidad: 40 mm/s Distancia entre pasadas: 25x10<sup>-3</sup> mm Superficie de una marca 25mm<sup>2</sup>*

*Tiempo necesario para hacer una línea de 0,5 cm: 5[mm]/40[mm/s]=0,13 segundos*

*Dado que hay 25 µm entre líneas, hasta completar la pieza tenemos*

*5[mm]/0,025[mm/línea] = 200 líneas , en total 200 x 0,13 = 25 segundos una pasada*

*Tabla 28: Tiempo de pasada a distintas velocidades*

Velocidad[mm/s]	Tiempo [s] 1 pasada
40	25
50	20
90	11,11
150	6,67

El siguiente paso del procedimiento consiste en utilizar el microscopio *Confocal Sensofar* para medir la profundidad de las marcas láser. Con esta herramienta pueden conseguirse tanto barridos superficiales (topografías), como lineales (perfiles). Se hizo una primera topografía de la muestra rectangular de 10 pasadas (Nd:YAG), comprobándose que la rugosidad media era de tan sólo 0,89 micras.

Para conocer la profundidad basta con obtener perfiles, siendo más rápidos y sencillos (Figura 69). Se realizan tres perfiles por muestra, en los rectángulos se toman en la zona media y a 5 mm de cada extremo (Figura 70). En los cuadrados en la zona media y a 1,5 mm de cada extremo.

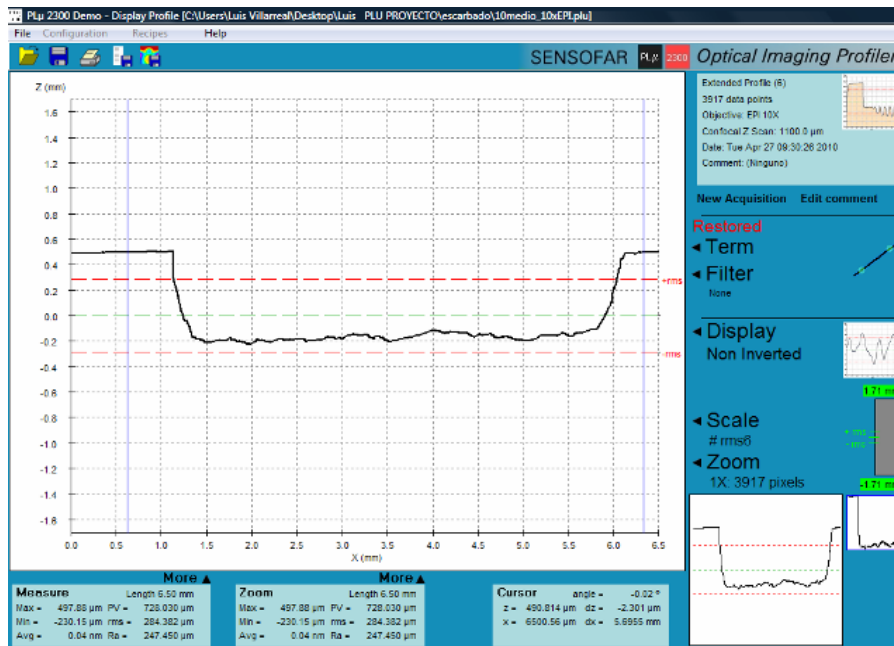


Figura 69 : Perfil Confocal de la muestra con 10 pasadas rectangular

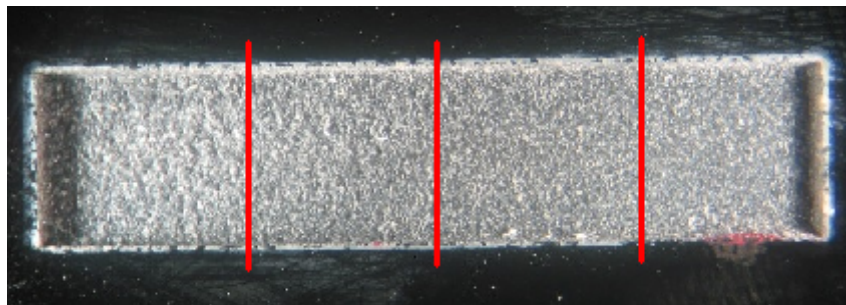


Figura 70: Las líneas rojas representan las zonas donde se ha hecho un perfil con confocal

Se evalúa una profundidad media en cada perfil con los 3 valores más altos y los 3 más profundos con el programa PLμ, descartando errores de medida, picos muy altos y estrechos que se deben a reflejos. Cuando ya se tiene un valor medio por perfil se calcula un valor medio por muestra (3 perfiles por muestra). Cuando el número de pasadas es muy bajo, el perfil es más abrupto y por lo tanto hay mayor dispersión de valores, pero con diferencias del orden de una decena de micras.

La profundidad media se divide por el número de pasadas de la muestra para comprobar la profundidad de una *pasada media* en cada caso. De ahí se calcula el número y tiempo de *pasadas medias* necesarias para alcanzar 3 mm, esto representa lo que ocurriría si se recoloca la distancia muestra-lente a la distancia focal cada vez que se ejecuta ese número de pasadas.

Con un valor medio de profundidad, conocida el área del cuadrado o rectángulo y con el tiempo (suministrado por el software o calculado) pueden calcularse los mm<sup>3</sup>/s escarbados en cada caso.

Una selección de perfiles puede encontrarse en el Anexo D1.

### **C.3                    Corte con chorro de agua**

Esta técnica consiste en la proyección sobre el soporte a cortar de un chorro de agua a una presión de entre 2.500 y 4.000 bar, con un flujo de agua de entre 20 y 40 litros por minuto, incorporando en ocasiones por efecto venturi un árido abrasivo al chorro de agua.

La máquina necesita de una mesa que va cubierta con agua que actúa como barrera del chorro. Para realizar el corte, primero hay que realizar el dibujo en la computadora y desde ahí se le da la orden a la máquina.

El operario introduce la clase de pieza que se va a cortar, el espesor y el tipo de material. Ese menú de piezas es el que da la dureza y los parámetros de tiempo necesarios para realizar el corte. Según todos estos parámetros, el tiempo empleado puede variar mucho. También, dependiendo de esos parámetros, varía el precio del corte.

Es necesario también tener en cuenta el tipo de corte que se desea obtener, ya que puede ir desde el más basto al más perfecto, independientemente del material que sea. Todo ello depende de la utilidad que se le quiera dar después a la pieza.

Otra ventaja de la tecnología, es que pesar de que esté muchas horas en funcionamiento no se calienta.

La máquina puede cortar todo tipo de materiales metálicos y plásticos, así como mármol, vidrio... El proceso de corte no afecta los materiales porque no los calienta, endurece ni deforma, además el trabajo con esta tecnología es muy limpio y eficiente.

Los abrasivos se utilizan para obtener cortes sobre materiales de alta resistencia alcanzando por ejemplo cortes hasta de 15 cm de espesor en aceros, y mayores en materiales más suaves con alta precisión en diseños sofisticados.



## C.4 Horno

### Procedimiento térmico:

Algunas muestras requieren un procesamiento térmico para su unión, se utiliza el horno de la *Figura 71*:

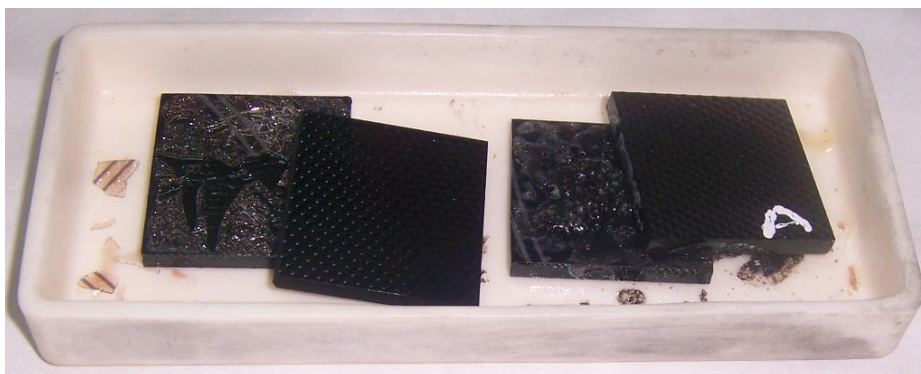
- Posición inicial del horno a 50°C, muestra colocada en barquilla cerámica (*Figura 72*).
- Cuando se han alcanzado 50°C, el aumento de temperatura es de 50°C cada diez minutos.
- Al llegar a 600°C se mantiene 30 minutos.
- La muestra enfría dentro del propio horno hasta 100°C y se abre entonces la puerta para que alcance temperatura ambiente.

Este proceso suave reduce los efectos perjudiciales de tensiones debidas a los distintos coeficientes de dilatación térmica del material de unión y la vitrocerámica.



*Figura 71: Horno*

Durante la utilización de productos en polvo se utiliza etanol para que estos sean más fluidos y fáciles de aplicar. En ocasiones el alcohol interacciona con el producto (Mezcla A u óxido de boro), por lo que se coloca el material en seco y las placas pueden desplazarse una sobre otra mientras están en el horno (*Figura 72*). En estos casos se fija la muestra con papel de aluminio. El aluminio tiene una temperatura de fusión de 660°C [7], la cual se sitúa en torno a la temperatura de horno pero se ha comprobado que soporta 650 °C de temperatura durante 30 minutos sin fundir.



*Figura 72: Muestras unidas con con óxido de boro seco, las placas se desplazan una sobre otra durante el procesamiento en horno*



## C.5 Cortadora con disco diamantado

### Procedimiento de corte de muestras unidas:

Para poder realizar análisis de la estructura y composición de las muestras unidas, éstas deben cortarse.

Se utiliza la cortadora Minitom (*Figura 73*), que utiliza un disco con recubrimiento de diamante, posteriormente se etiquetan y se les aplica el Procedimiento Lupa estereoscópica o el Procedimiento SEM (*Anexos C6 y C7*).

Conforme se realizaban cortes en distintos experimentos, se examinaron las distintas velocidades posibles, estas no afectaban a la estructura de la superficie cortada, por lo que se seleccionaron velocidades altas.

Debido a que el disco se encuentra desgastado aparecen en ocasiones marcas doradas en el corte.



*Figura 73: Máquina de corte Minitom Struers*

## C.6 Lupa estereoscópica

Una lupa o microscopio (dependiendo del nivel de aumento) estereoscópico se utiliza para ofrecer una imagen estereoscópica (tridimensional) de la muestra. Para ello, y como ocurre en la visión binocular convencional, es necesario que los dos ojos observen la imagen con ángulos ligeramente distintos. Todos los microscopios estereoscópicos son binoculares.

El microscopio estereoscópico es apropiado para observar objetos de tamaños relativamente grandes, por lo que no es necesario modificar los objetos (laminar), ni tampoco que la luz pase a través de la muestra.

Con un microscopio de calidad adecuada, como los que se encuentran en la mayoría de los laboratorios científicos, se pueden realizar fotomicrografías utilizando una cámara de uso general, de objetivo fijo o intercambiable.

Para el proyecto se ha utilizado una cámara de objetivo fijo. El objetivo realiza una función parecida a la del cristalino del ojo y proyecta sobre el sensor una imagen real de la imagen virtual que se ve por el ocular del microscopio.

### **Procedimiento con lupa estereoscópica:**

De las muestras cortadas se espera obtener información acerca de la estructura de la capa del material de unión. El corte va a observarse inicialmente con una lupa estereoscópica (*Figura 74*) a la que se le adapta una cámara fotográfica. La luz proviene de dos lámparas flexibles.

Se ha trabajado a 16 y 25 aumentos.



*Figura 74: Lupa estereoscópica*

## C.7 Microscopio electrónico

Un microscopio electrónico utiliza electrones para formar imágenes de objetos, todo en alto vacío ya que los electrones son absorbidos por el aire. Permiten alcanzar una capacidad de aumento muy superior a los microscopios convencionales debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones "visibles". Pueden encontrarse microscopios electrónicos de barrido o transmisión [10] [15].

### Microscopio electrónico de transmisión (TEM: Transmission electron microscope)

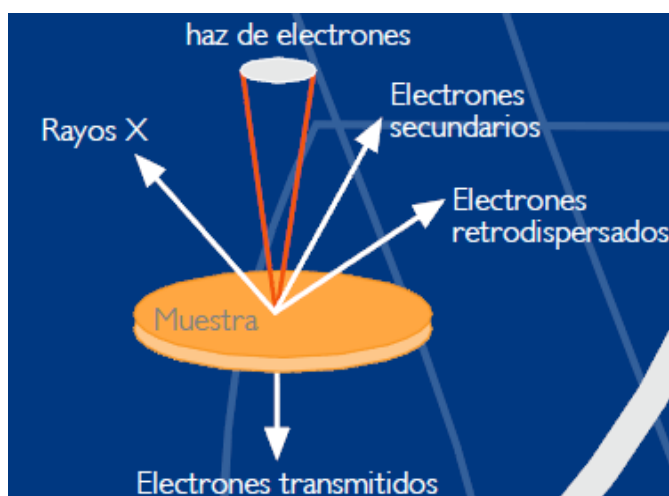
El microscopio electrónico de transmisión emite un haz de electrones dirigido hacia el objeto cuya imagen se desea aumentar. Una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada de la muestra. Para utilizar un microscopio electrónico de transmisión debe cortarse la muestra en capas finas, no mayores que un par de miles de Angstroms. Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar la imagen de un objeto hasta un millón de veces.

### Microscopio electrónico de barrido (SEM: Scanning electron microscope)

No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos, principalmente metalizar su superficie.

Explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones. Conforme el haz barre la superficie de la muestra, ésta emite fotones y electrones (*Figura 75*). Su intensidad es utilizada para formar la imagen cuando todos los puntos son recorridos. Las señales más comúnmente utilizadas son los electrones secundarios, los retrodispersados y los rayos-X. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos más de 200.000 veces, su resolución está entre 3 y 20 nm. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los TEM o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto.

Comparativamente con un microscopio óptico, la luz se sustituye por un haz de electrones y las lentes por electroimanes.



*Figura 75: Barrido electrónico, se aprecia el haz incidente, los tres tipos de electrones de los que se obtiene la información y los transmitidos a través de la muestra.*

Las observaciones de Microscopia Electrónica de Barrido pueden ser en

- 1) Modo de detección de electrones retro-dispersados: Las fases más brillantes son las compuestas por elementos con mayor número atómico.
- 2) Realización de microanálisis químico: Gracias a los rayos X permite conocer la composición química de los materiales en observación, para elementos con número atómico superior al del Boro.
- 3) Modo de detección de electrones secundarios: Permite observar la morfología (tamaños y formas) y relieve de las superficies.

Para la observación de la estructura y composición de varias muestras en el presente proyecto se han realizado barridos electrónicos de todos los tipos.

### **Características del microscopio utilizado**

Características de la microscopía electrónica en el Área de Ingeniería de Materiales, Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza.

#### *Microscopía de barrido:*

- Imágenes de superficies de muestras masivas.
- Resolución 3.5 nm (x100000).
- Gran profundidad de campo.
- Microanálisis semi-cuantitativo.
- Difracción de electrones (Resolución espacial ~ 50 nm).

#### *Microscopía de transmisión:*

- Imágenes de transmisión de muestras delgadas.
- Alta resolución 2.8 Å (x 1000000).
- Microanálisis semi-cuantitativo.
- Difracción de electrones (Resolución espacial ~2 nm).



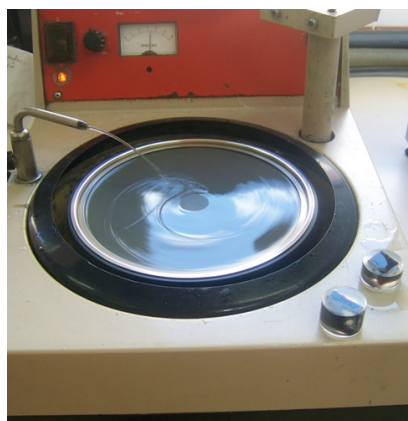
*Figura 76: Microscopio electrónico*

### Procedimiento para observar la morfología de las muestras:

- Primero hay que colocar la muestra en un recipiente de plástico, consistente en un pequeño tubo cilíndrico al que se le ajusta una tapa.
- Una fina capa de vaselina en el interior del recipiente evita que se pegue el polímero.
- El recipiente es rellenado con polímero hasta cubrir la muestra. El polímero resulta de la mezcla de 5 partes de resina por dos de endurecedor (*Figura 77*).
- Tras endurecer, la muestra puede ser desmoldeada con un martillo de goma.
- En la máquina rotatoria se lija la muestra con papeles desde grano grueso a fino (*Figura 78*).
- Se continúa con paños en los que hay que aplicar un aceite con polvo de diamante.
- Girar la muestra 90° cada cambio de papel de lija o paño.
- Los residuos se limpian en cada cambio con la máquina de ultrasonidos (*Figura 79*).
- El personal de laboratorio aplicará para acabar una capa de carbono en la superficie.



*Figura 77: Resina y endurecedor para SEM*



*Figura 78: Lija rotatoria utilizada en muestras embutidas*

*Figura 79: Limpieza con ultrasonidos*





## C.8 Máquina de tracción Universal

El ensayo destructivo más importante para conocer las cargas que pueden soportar los materiales es el de tracción, donde se coloca una probeta en una máquina consistente en dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil.

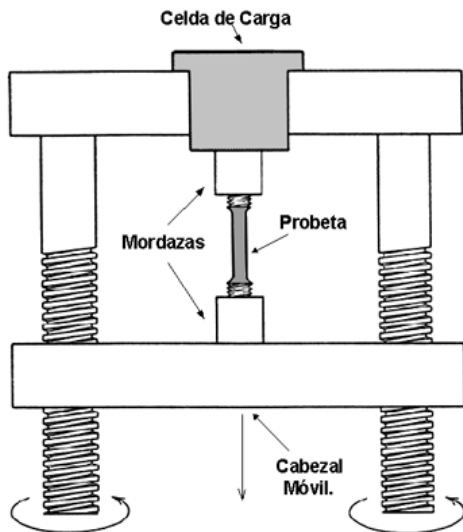


Figura 82: Máquina de tracción esquema y foto (máquina Instron)

La máquina de ensayo (Figura 82) impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas envían la señal a un ordenador que grafica el desplazamiento y la carga.

La probeta normalizada es sometida a un esfuerzo axial de tracción hasta que se rompe, en general una curva tensión-deformación presenta una serie de zonas diferenciadas.

1. Deformaciones elásticas
2. Fluencia o cedencia.
3. Deformaciones plásticas
4. Estricción.

Para expresar la resistencia en términos independientes del tamaño de la probeta, se dividen las cargas por la sección transversal inicial  $A_0$ .

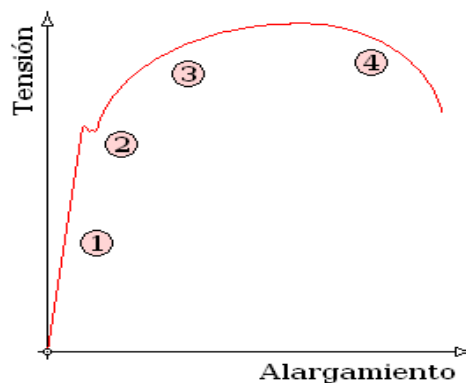


Figura 83: Curva tensión-deformación

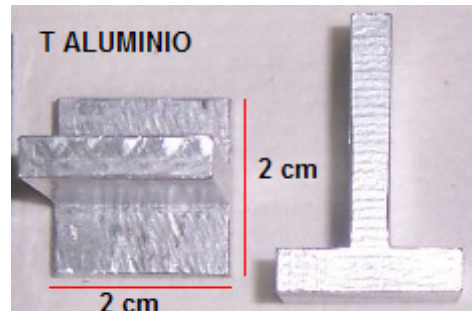
## Procedimiento de Tracción:

Uno de los ensayos destructivos más importantes es el de tracción, pero es problemático colocar las muestras en la máquina. Lo usual es utilizar muestras alargadas y planas, ya preparadas para el agarre, la geometría de las muestras no permite esta colocación.

Una opción utilizada en el laboratorio consiste en realizar este tipo de pruebas pegando una T metálica a la pieza con pegamento instantáneo, pero crea un problema limpiar la T metálica para reutilizarla, podría realizarse este proceso con un producto que se retire de manera sencilla.

El procedimiento se desarrolla en tres fases, una vez las dos placas ya están unidas:

- 1) Unir las T de aluminio.
- 2) Tracción.
- 3) Limpieza de las T de aluminio.



*Figura 84: T Aluminio*

- 1) **Primera fase:** El material para unir las T será Araldit®, una resina epoxi bicomponente.

Se requieren tres días de escado para el mejor resultado.

El pegado de las T metálicas a la pieza se realiza en la propia máquina, buscando un correcto alineamiento y aplicar una carga que mantenga las partes unidas durante el secado.

- Primero se dibuja, utilizando cinta aislante blanca, un cuadrado en la placa de vitrocerámica, con un tamaño ligeramente mayor al de la superficie de la T a pegar (2 cm x 2 cm).
- Las mordazas de la máquina deben atrapar las T y la mordaza superior es bajada hasta que las dos superficies de las T entran en contacto, comprobando que ambas superficies quedan centradas. Entonces la mordaza sube otra vez a la posición inicial.
- Se prepara y aplica una fina capa de Araldit con gotas del tamaño de un guisante (~1g), una de cada producto, tanto en la superficie de pegado de las T como en la pieza.
- En este punto hay que bajar de nuevo la mordaza superior, pero ahora con la muestra colocada en medio de las dos T, queda presionada por ambas mordazas, en esos momentos se busca la exactitud de la posición de la T respecto al cuadrado dibujado con cinta blanca.
- Pasadas dos horas la muestra puede retirarse y seguir endureciendo en otro lugar.

La carga a aplicar durante la fase de pegado de las T será entre 20 N y 45 N en todos los casos, consiguiendo así inmovilizar la pieza sin riesgo de romperla o de que se expulse el Araldit por la presión.



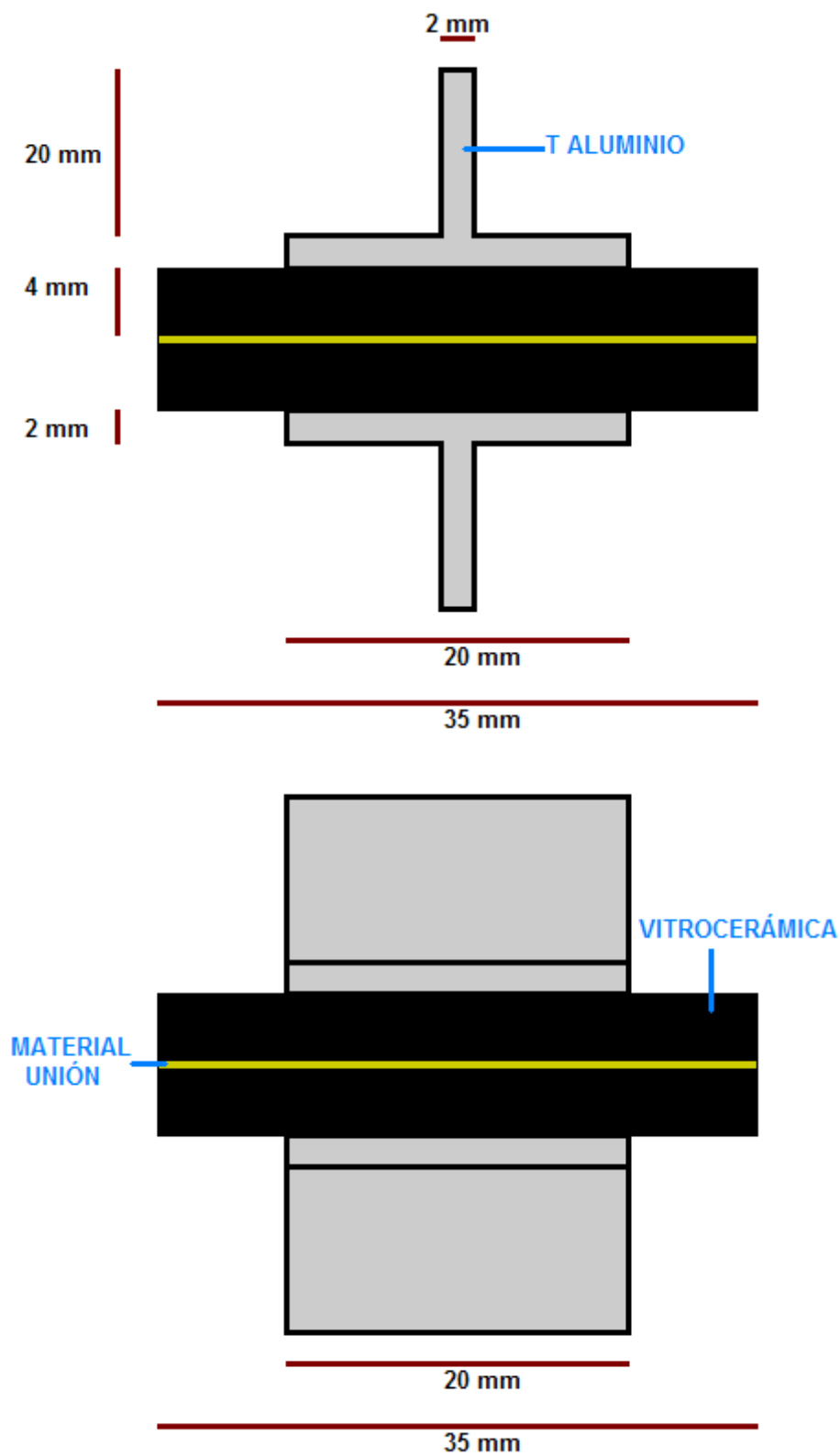


Figura 85: Esquema de las muestras de tracción con la T unida



*Figura 86: Muestra preparada para tracción, las mordazas sujetan firmemente las T de aluminio*

2) **Segunda fase:** La máquina de tracción es capaz de dar dos valores

- Elongación de la muestra.
- Carga en cada momento.

La muestra colocada para ser traccionada (*Figura 86*) está formada por distintos materiales: Metal (aluminio), polímero (Araldit), vidrio cerámico y el material de unión. La elongación total será la suma de las elongaciones que sufra cada uno, la mayor parte de la deformación puede asumirse que sucede en el Araldit, por su naturaleza como polímero. No se cuantifica exactamente cuanto corresponde a cada uno pero no va a ser necesario.

Sí que hace falta, sin embargo, tener un valor que indique la carga mecánica que es capaz de aguantar el material de unión, siendo este el objetivo de la prueba. En el momento en que el elemento rompe, el ordenador va a indicar la carga que el elemento sufre en ese momento, no puede saberse la distribución exacta de carga en cada punto pero se considera que la zona que rompe está sometida a una carga igual a la mostrada por el software.

En caso de que la rotura no se produzca en el producto de unión, sino en la unión de la T de aluminio a la placa, la carga que es capaz de resistir ese producto supera al valor en ese momento.

Esta prueba permite comparar los distintos productos entre sí y dar un orden de magnitud acerca de sus capacidades de resistencia a tracción para comparar con las exigencias de fábrica ( $60 \text{ N/cm}^2$ ).

Al colocarse la muestra en las mordazas, se genera una carga inicial que siempre estará en el rango entre 25 y 50 N, habitualmente se balanceará esta carga (inicializar en cero).

Parámetros utilizados en la prueba de tracción:

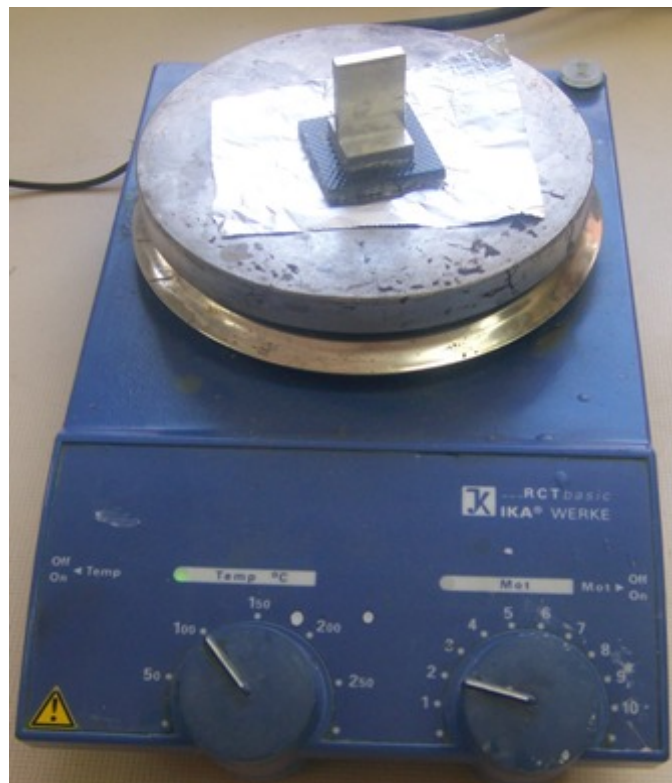
- Sensibilidad de rotura: Elongación del 40%.
- Máxima carga 4800 N, la máquina soporta un máximo de 5000 N.
- Experimento en un sólo ciclo.
- Datos obtenidos en las gráficas se muestran en ms y con precisión 0,1 N.
- Velocidad de desplazamiento de la mordaza: 0,01 mm/min.

3) **Tercera fase:** Limpieza de las T, deben separarse de la vitrocerámica y retirarse el Araldit.

La utilización de acetona no es capaz de limpiar en profundidad las T metálicas.

Se consigue una limpieza perfecta en una placa calefactora a 200°C durante 20 minutos, tras este tiempo, puede separarse a mano la T, y el Araldit puede ser arrancado como un bloque (*Figura 87*).

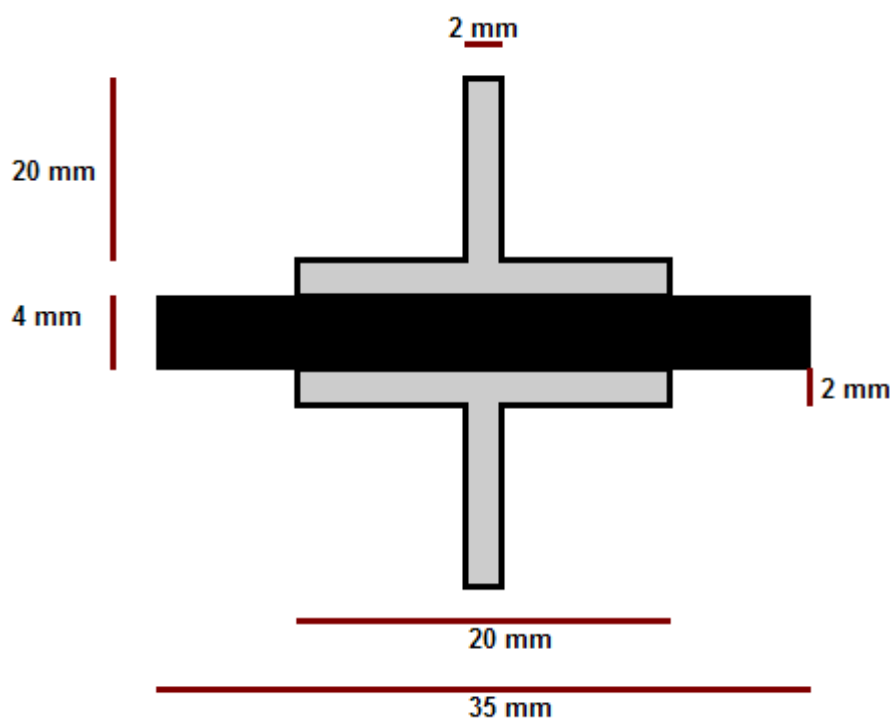
Tras experimentar con 4 muestras se observa que el tiempo necesario para separar la T es ~10 minutos menor al colocar las piezas apoyadas en la vitrocerámica, en lugar de apoyarlas por la T. La T es metálica y transmite mejor el calor pero la superficie de contacto es mucho menor.



*Figura 87: Limpieza T en placa calefactora 20 min 200 °C*

### Valoración del diseño de los agarres

Como información para valorar los agarres a utilizar hay un primer experimento en el que se unen las dos T de aluminio a una única placa vitrocerámica 3,5 cm x 3,5 cm.



*Figura 88: Valoración de los agarres*

Al ser sólo una placa, una T queda unida a la cara plana y otra a la cara rugosa de la vitrocerámica. La carga de colocación no se balancea. En el momento de rotura la carga aplicada es de  $750 \text{ N / cm}^2$  y la elongación es de 0,888 mm. La unión rompe por la cara plana.

La carga se considera suficiente como para que en el experimento de tracción el elemento de rotura sea el producto de unión. En caso de que rompa el agarre el resultado seguirá superando a los requisitos de fábrica.

## C.9 Instalación de vacío

**Vacío (Ingeniería):** Espacio lleno de gases cuya presión es inferior a la atmosférica (1,013 bar).

$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1.02 \text{ Kg/cm}^2$$

### Bomba turbomolecular

El funcionamiento de una bomba de vacío consiste en la extracción de los gases presentes. Según el rango de presión en el que operan se clasifican:

*Bombas de vacío preliminar* (Hasta  $10^{-3}$  mbar) Desplazamiento positivo o mecánico.

*Bombas de vacío elevado* ( $< 10^{-3}$  mbar): Arrastre molecular. (Ej. Turbomolecular).

Una bomba turbomolecular está constituida por una turbina o motor con álabes o paletas que se mueven a velocidad supersónica (rotor) en la proximidad de álabes o paletas fijas (estator). La velocidad de rotación habitual es de unas 60.000 r.p.m.

El objetivo de los álabes rotantes de la turbina es modificar la trayectoria de las moléculas de gas, para lograr un flujo macroscópico de las mismas en la dirección de bombeo.

Para que un bombeo eficiente tenga lugar, es necesario que:

- El álabe de la turbina golpee a cada molécula dirigiéndola hacia el estator.
- La molécula alcance el estator antes de chocar con otra y ser consecuentemente desviada antes de llegar a destino.

Tipos de flujo gaseoso:

El parámetro que diferencia el flujo gaseoso, según la teoría cinética de los gases, es el recorrido libre medio de las partículas ( $L_{med}$ ). Denominando “d” el diámetro de la tubería de conducción:

1.-Flujo viscoso: Típico de la región de vacío tosco. En este flujo  $L_{med} \ll d$ .

1.a.-Flujo turbulento: Domina un movimiento desordenado y con remolinos.

1.b.-Flujo laminar: Deslizamiento de capas gaseosas entre sí.

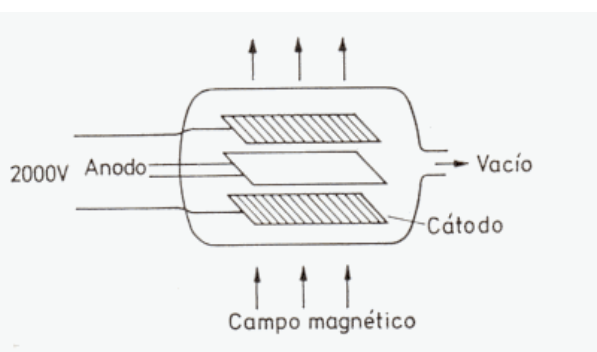
2.-Flujo molecular: Alto y ultra-alto vacío.  $L_{med} > d$ .

3.-Flujo Knudsen: Vacío medio. Transición del flujo laminar al molecular.

## Medidor de vacío

Se trata de un sistema de medición de la presión, pueden clasificarse según la *Figura 89*.

MEDIDORES DE VACÍO		Rango [torr]	
		Mín.	Máx.
Mecánicos		760	5
McLeod		5	$10^{-5}$
Térmico	Termopar	0,5	$10^{-3}$
Térmico	Pirani	2	$10^{-3}$
Térmico	Bimetal	1	$10^{-3}$
Ionización	Filamento caliente	$10^{-3}$	$10^{-11}$
Ionización	Cátodo frío	$10^{-2}$	$10^{-7}$
Ionización	Radiación	760	$10^{-4}$



*Figura 89: Medidores de vacío*

*Figura 90: Cátodo frío*

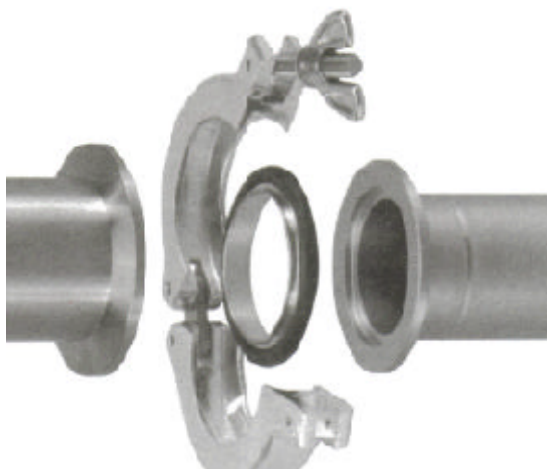
En la instalación se dispone de un sistema de cátodo frío (*Figura 90*). Se basa en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. Los electrones desprendidos del cátodo toman un movimiento en espiral al irse moviendo a través de un campo magnético en su camino hacia el ánodo. El movimiento en espiral da lugar a que el camino libre medio entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos. Por consiguiente, aumenta la posibilidad de colisiones con las moléculas del gas presente lo que da lugar a una mayor corriente iónica y de este modo la descarga catódica se mantiene a una presión más baja, o sea a un vacío más alto. Es susceptible de contaminación por el mercurio.

### Procedimiento de toma de datos en vacío:

Para coleccionar los datos de vacío con los que se realizan las gráficas de vacío dinámico debe realizarse vacío tomando valores de presión cada 10 segundos, y se controla igual el aumento de presión una vez parada la bomba. El valor máximo estabiliza su valor entre 9 y 15 minutos con la bomba encendida. Las gráficas muestran la velocidad con la que se llega a este valor dado que (a mismo volumen) se llega más rápidamente cuando no existen fugas; O la velocidad con la que el sistema pierde vacío una vez la máquina para y se mantiene por la inercia de la máquina.

Para poder desconectar las piezas de la bomba hay que esperar a que frene hasta 100 Hz.

A todas las juntas se les ha aplicado durante el montaje grasa de vacío (*Figura 91*).



*Figura 91: Detalle de unión entre tubos con anillo de centrado, junta de neopreno y abrazadera*



## Productos de unión

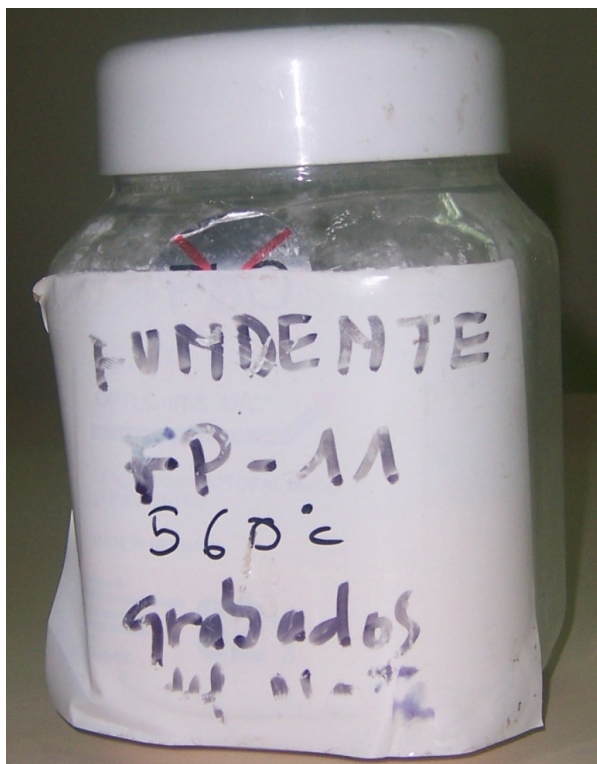


Figura 92: Fundente



Figura 93: Óxido de silicio



Figura 94: Óxido de boro



Figura 95: Araldit

## Herramientas y accesorios para manejar productos de unión

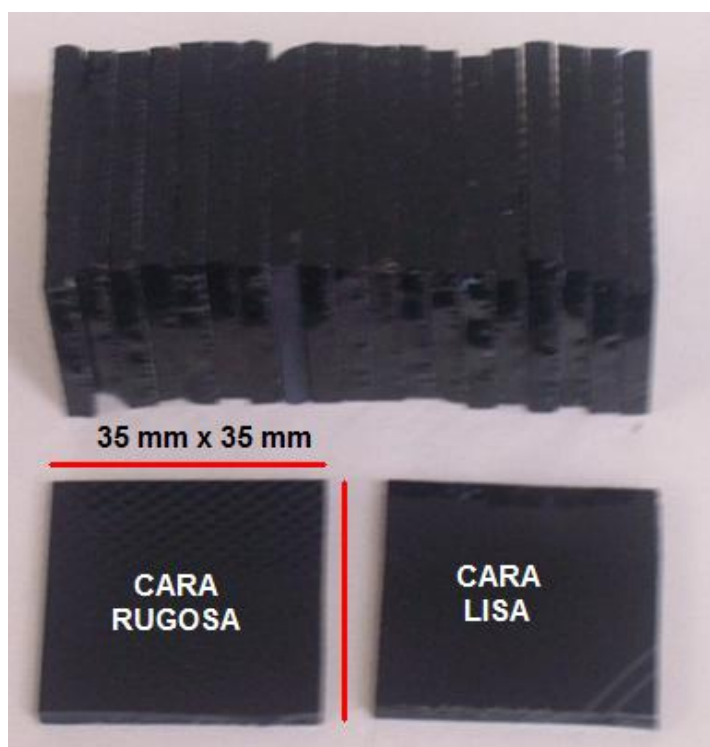


Figura 96: Placas cortadas para colocar producto de unión

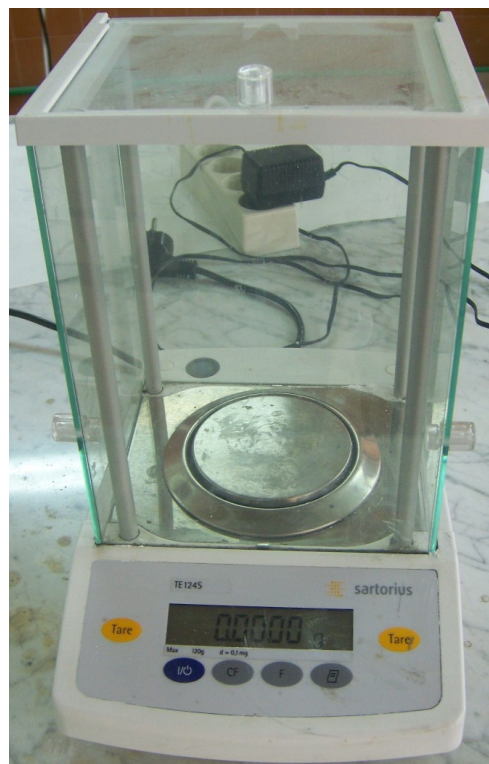


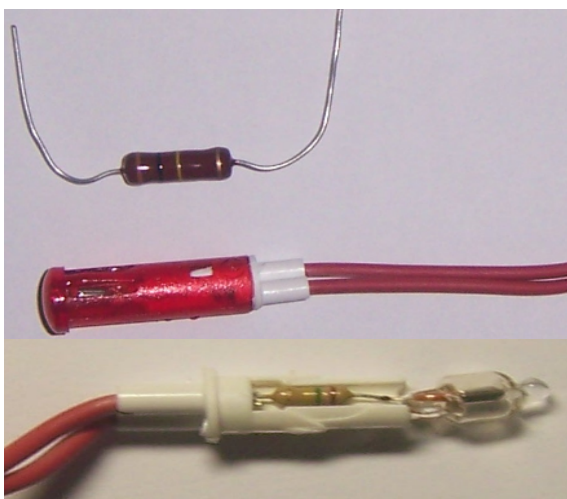
Figura 97: Balanza de precisión para controlar la cantidad de producto de unión



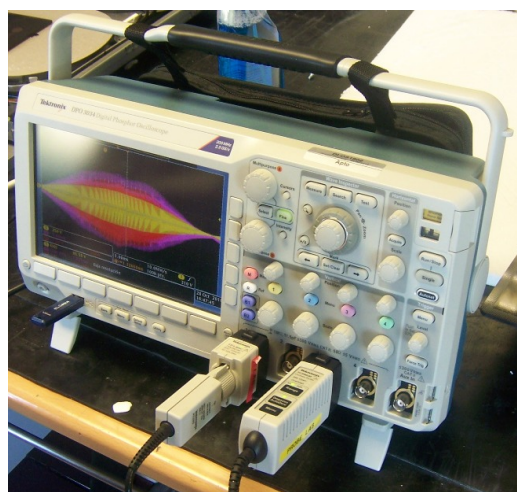
Figura 98: Campana extractora, etanol, mascarilla, guantes y pipeta para usar fundente y óxidos



## Herramientas y accesorios para iluminación



*Figura 99: Lámpara de neón y lámpara abierta donde se aprecia la resistencia interior*



*Figura 100: Osciloscopio*



*Figura 101: Electrodo y electrodos unidos para crear lámparas de pequeño tamaño, junto al transformador utilizado para encenderlas*



# **ANEXO D**

## **ESTUDIOS**

**(Gráficas, cálculos, datos)**



## ANEXO D: ESTUDIOS (Gráficas, cálculos, datos)

### D.1 ESCARBADO

#### Nd (YAG) SELECCIÓN DE PERFILES PL<sub>μ</sub> PARA VALORAR EFICIENCIA

Ejemplos de perfiles (*Figuras 101 a 106*) obtenidos a 5 mm del extremo del rectángulo marcado con láser. Se presenta un perfil por muestra (1, 2, 4, 6, 8 y 10 pasadas) en los que observa nítidamente cómo además de aumentar la profundidad con el número de pasadas, la superficie tiene un mejor acabado. Las *Figuras 107 y 108* ilustran los casos extremos con 1 y 10 pasadas.

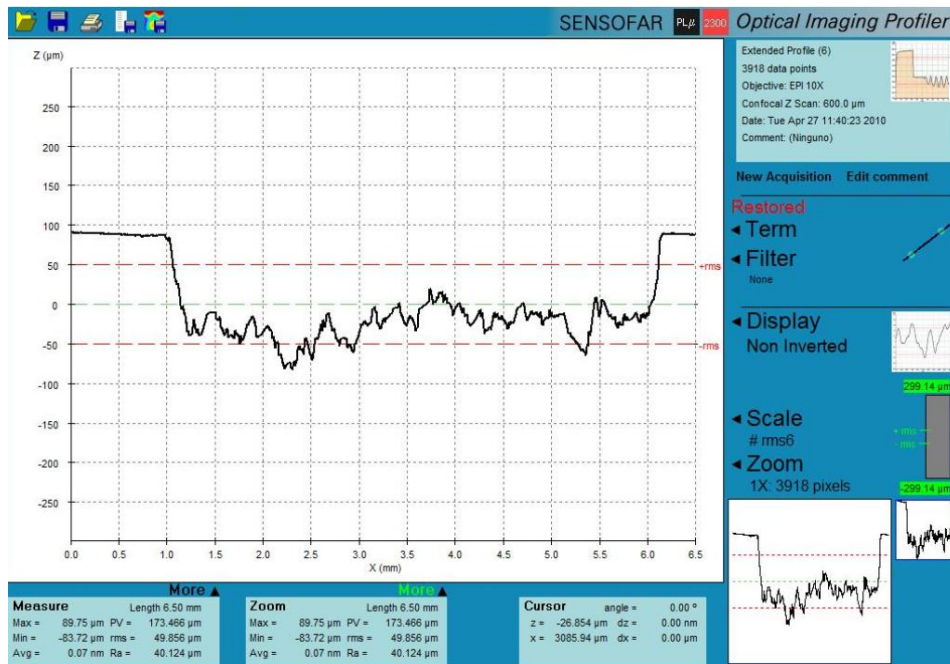


Figura 101: 1 pasada láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo

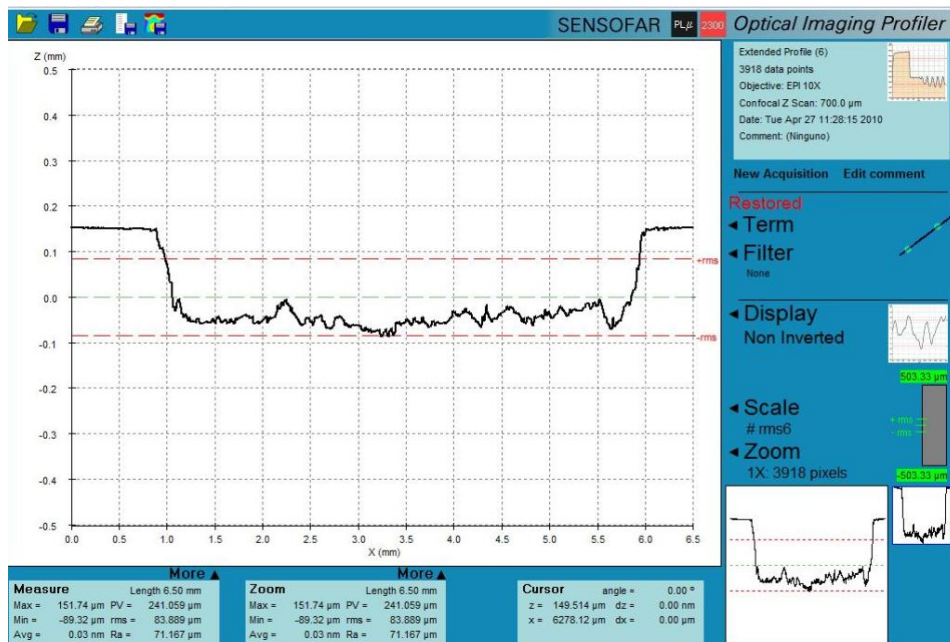


Figura 102: 2 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo

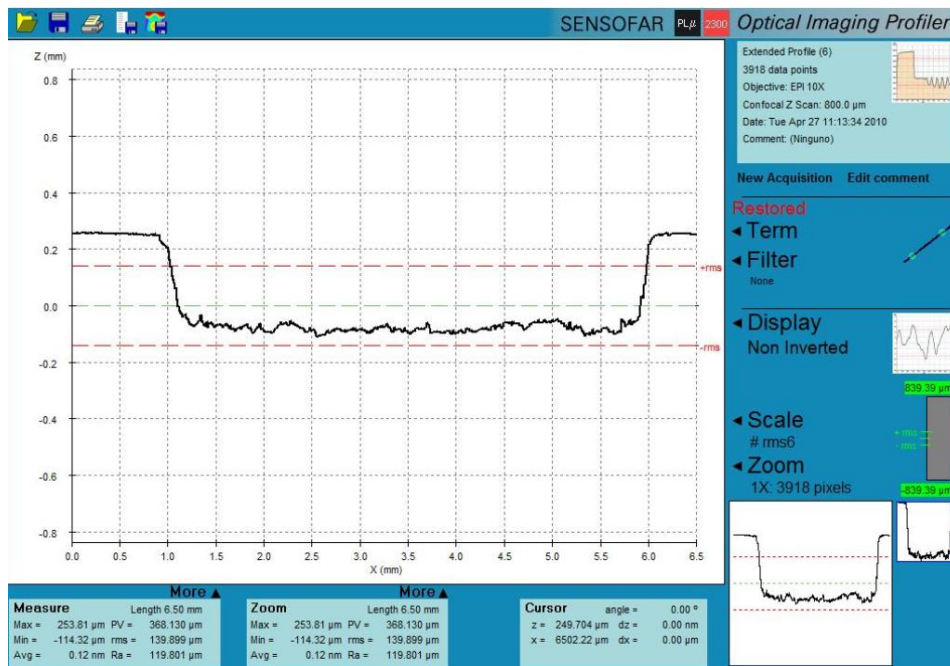


Figura 103: 4 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo

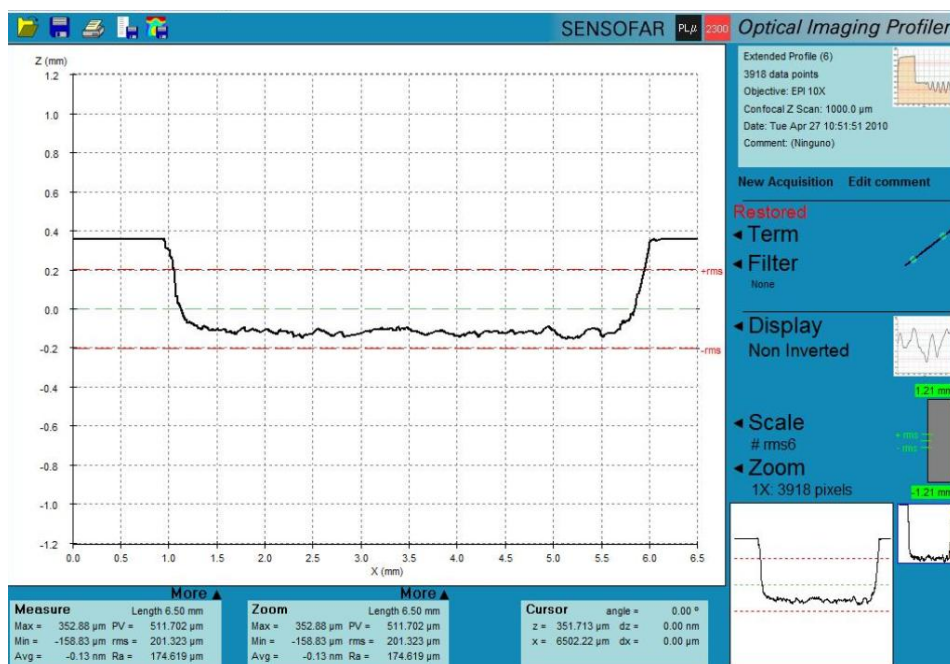


Figura 104: 6 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo



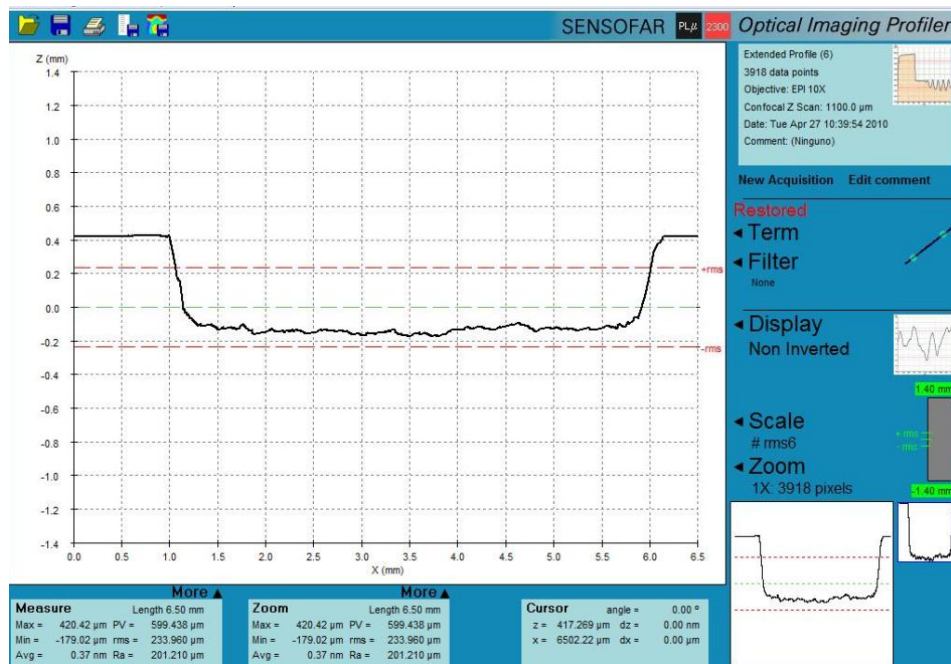


Figura 105: 8 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo

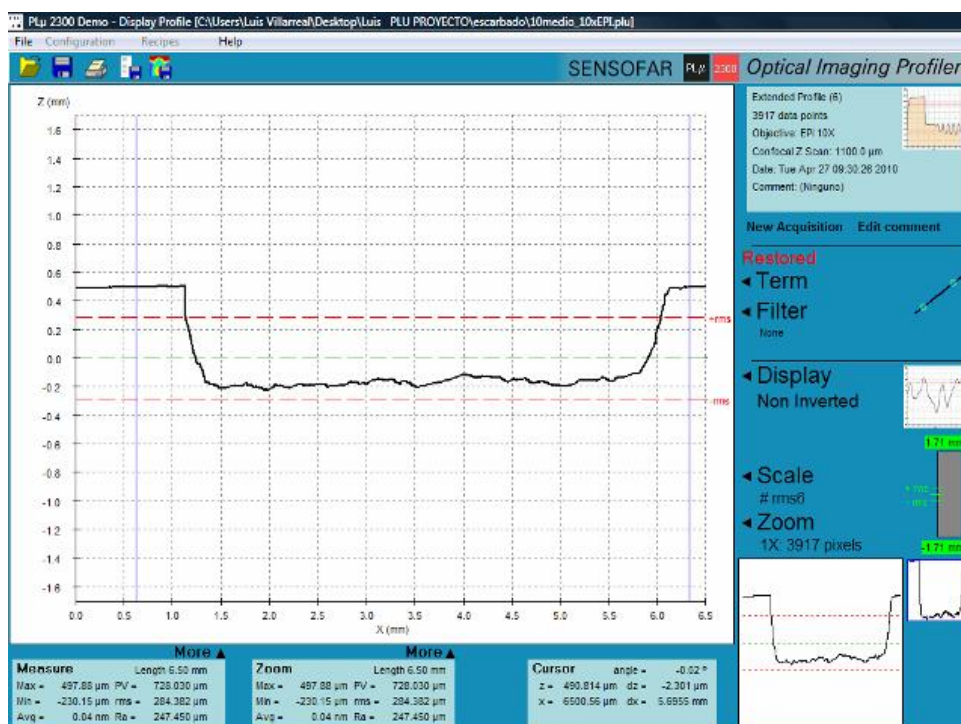


Figura 106: 10 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo

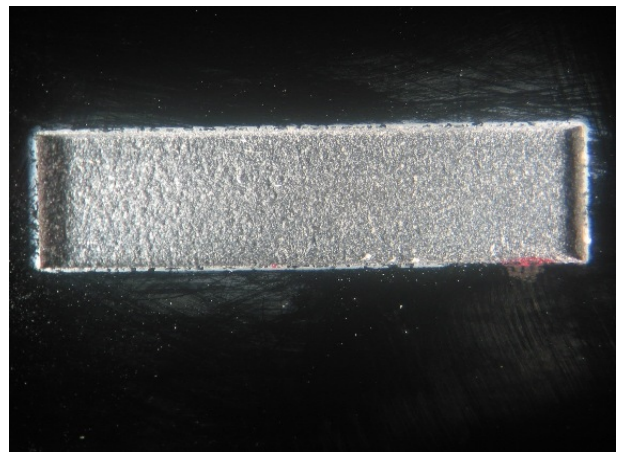
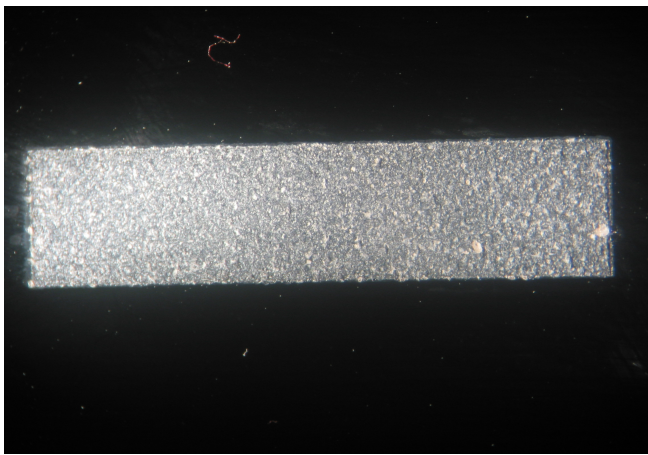


Figura 107: Marca 1 pasada láser Nd:YAG

Figura 108: Marca 10 pasadas láser Nd:YAG

### Nd(YAG): DATOS Y CÁLCULOS A PARTIR DE LOS DATOS DE LOS PERFILES

Tabla 29: Datos para valoración de eficiencia y profundidad por pasada media (Nd:YAG)

PASADAS	1	2	4	6	8	10
PROFUNDIDAD MEDIA PERFIL 1 [ $\mu\text{m}$ ]	140,33	251,85	394,32	473,75	571,32	648,5
PROFUNDIDAD MEDIA PERFIL 2 [ $\mu\text{m}$ ]	151,18	227,27	365,15	500,3	608,26	720,25
PROFUNDIDAD MEDIA PERFIL 3 [ $\mu\text{m}$ ]	169,22	237,46	362,4	506,96	596,03	614,78
PROFUNDIDAD MEDIA [ $\mu\text{m}$ ]	153,58	238,86	373,96	493,67	591,87	661,18
PROFUNDIDAD MEDIA POR PASADA	153,58	119,43	93,49	82,28	73,98	66,12

Con los datos de los perfiles, se calculan los valores de la Tabla 29.

Se muestra la profundidad media de los perfiles según el número de pasadas (cada muestra 3 perfiles). Profundidad media total por muestra y profundidad media por pasada en cada caso.

### Nd(YAG):DATOS UTILIZADOS PARA DIBUJAR LA GRÁFICA DE LA FIGURA 10.

Ideal: Reenfocando cada pasada.

Real: 10 pasadas seguidas.

Intermedia: Reenfocando cada 6 pasadas.

Tabla 30: Profundidad  $\mu\text{m}$  según el número de pasadas en cada caso

PASADAS	0	1	2	4	6	8	10
IDEAL	0	153,58	307,16	614,32	921,48	1228,64	1535,80
REAL OPTIMIZADO	0	153,58	238,86	373,96	493,67	647,25	732,53
REAL INICIAL	0	153,58	238,86	373,96	493,67	591,87	661,18



## Nd(YVO4): MATRICES REALIZADAS PARA OPTIMIZAR PARÁMETROS

Colección de todas las matrices realizadas para seleccionar parámetros óptimos del láser Nd:YVO4

Tabla 31: Matrices 1, 2, 3

Enfoque en 0, eje Z en 8 mm	MATRIZ 1	MATRIZ 2	MATRIZ 3
Filas: VELOCIDADES [mm/s]	25 50 75 100	25 50 75 100	25 50 75 100
Columnas: FRECUENCIAS [KHz]	30 50 70 100	5 10 20 30	10 20 30 40

Tabla 32: Mejores combinaciones de la tabla 29

Mejores resultados	VELOCIDAD [mm/s]	FRECUENCIA [KHz]
COMBINACIÓN 1	25	20
COMBINACIÓN 2	50	30
COMBINACIÓN 3	75	30
COMBINACIÓN 4	100	30

Las matrices 4, 5 y 6 usan las mejores combinaciones y experimentan sobre la distancia focal.

Tablas 33: Matrices 4, 5, 6

	MATRIZ 4
Filas: COMBINACIÓN	1 2 3 4
Columnas: ENFOQUE [mm]	-2 -1 1 2

Frecuencia 30 KHz	MATRIZ 5
Filas: ENFOQUE [mm]	-1 0 1 2
Columnas: VELOCIDAD [mm/s]	40 50 60 70

Frecuencia 30 KHz	MATRIZ 6
Filas: EJE Z [mm]	7 8 9 10
Columnas: VELOCIDAD [mm/s]	40 50 60 70

La frecuencia de 30 KHz es la que mejores resultados da, la siguiente matriz se centra en ella y experimenta varias velocidades.

Tabla 34: Matriz 7

Frecuencia 30 KHz	MATRIZ 7 (VECTOR 1X8)
VELOCIDAD [mm/s]	30 50 70 90 120 150 175 200

Los mejores resultados se obtienen a 50 70 y 90 mm/s.

Tabla 35: Matriz 8

Frecuencia 30 KHz, enfoque en 0	MATRIZ 8 (VECTOR 1X4)
VELOCIDAD [mm/s]	200 400 600 800

La matriz 8 muestra que a velocidades más altas los resultados son peores, dado que los pulsos se encuentran demasiado espaciados (*Anexo B8*). La matriz 9 muestra una selección de los candidatos a ser los mejores parámetros de escarbado, a esta matriz se le aplica el Procedimiento: Confocal.

Tabla 36: Matriz 9 Se le realiza el Procedimiento Confocal

30 KHz, enfoque en 0, Z=8mm	MATRIZ 9 (4X6)
Filas: VELOCIDADES [mm/s]	40 50 90 150
Columnas: N° PASADAS	1 2 4 6 8 10

## Nd (YVO4): SELECCIÓN DE PERFILES PL<sub>μ</sub> PARA VALORAR EFICIENCIA

Se presentan los perfiles (*Figuras 109 a 116*) más representativos, pueden compararse profundidad y acabado según la velocidad y número de pasadas. Los perfiles son de 1 y 10 pasadas, con velocidades de 40, 50, 90 y 150 mm/s.

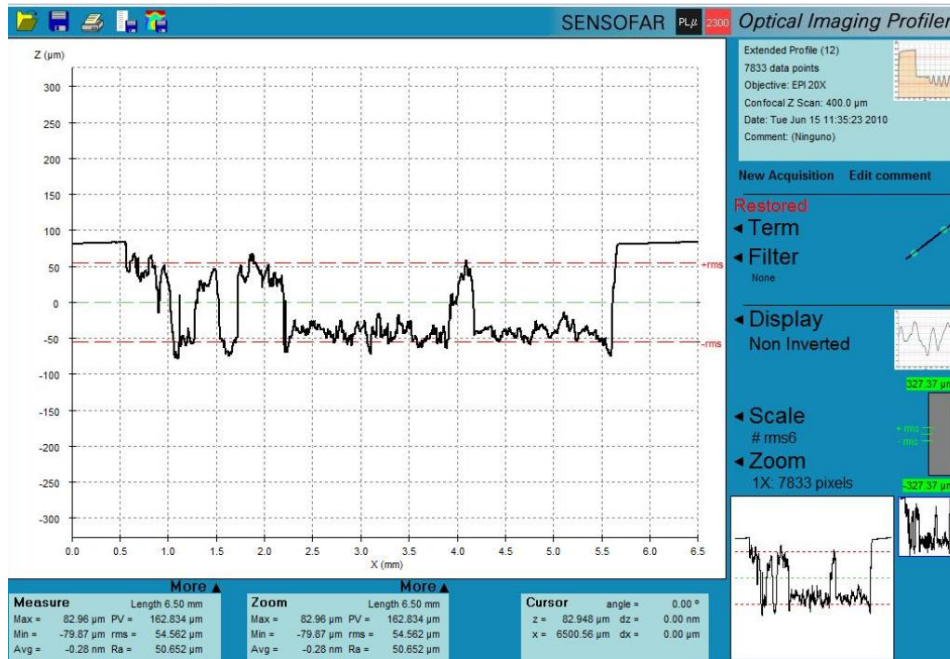


Figura 109: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 40 mm/s

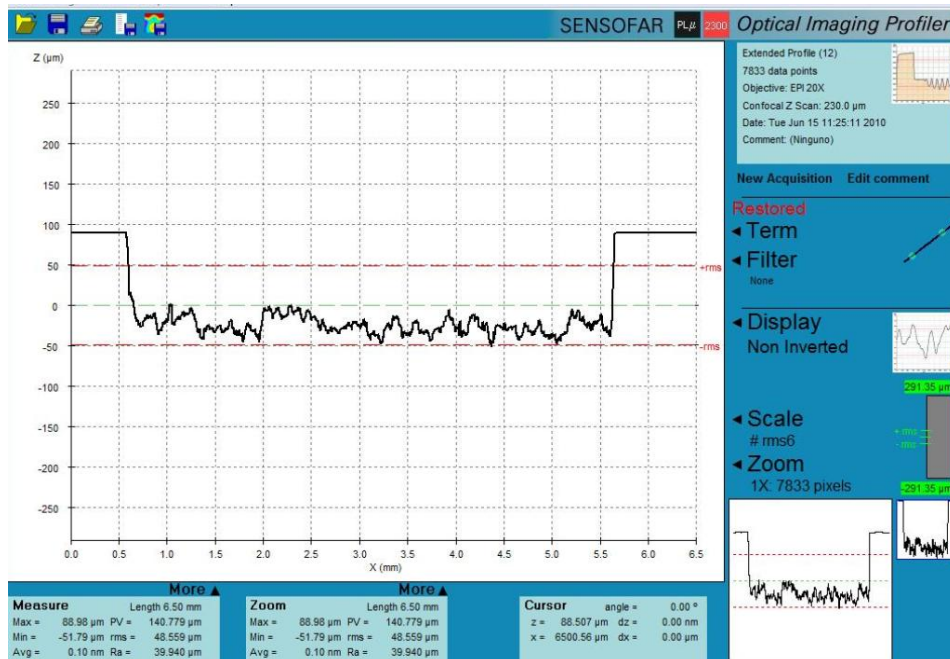


Figura 110: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 50 mm/s

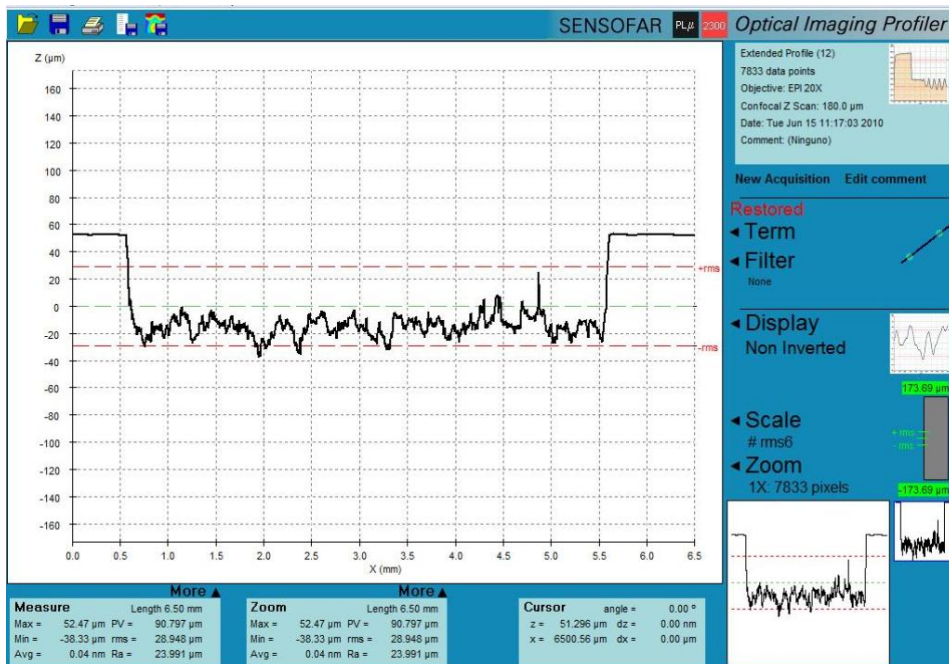


Figura 111: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 90 mm/s

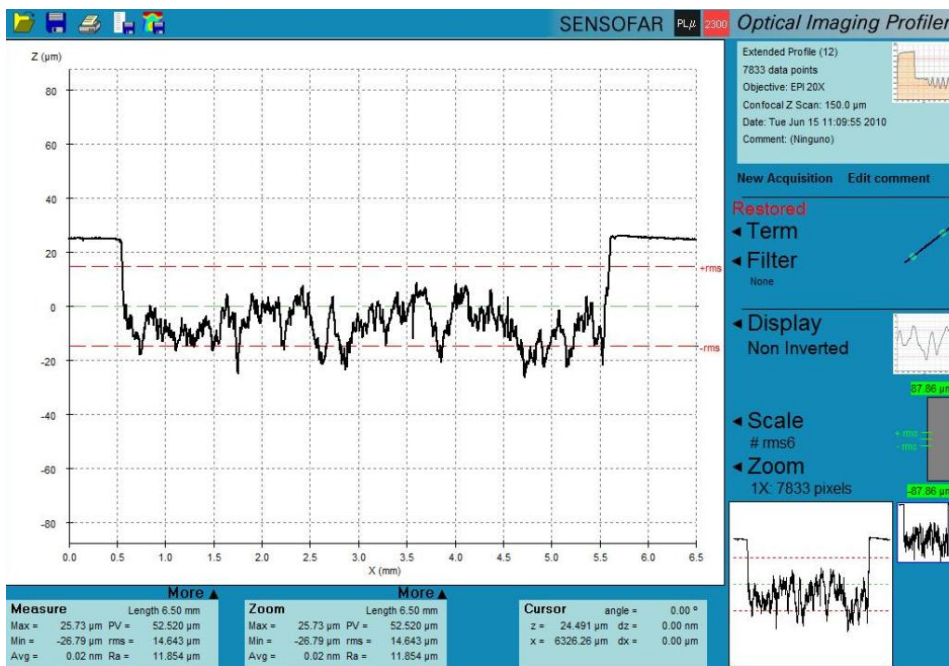


Figura 112: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 150 mm/s

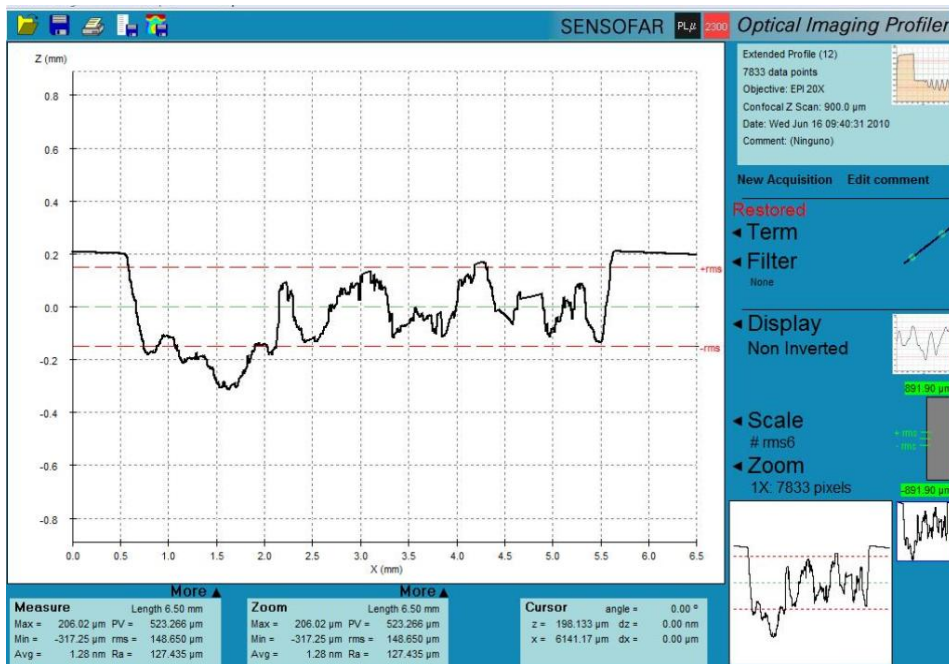


Figura 113: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 40 mm/s

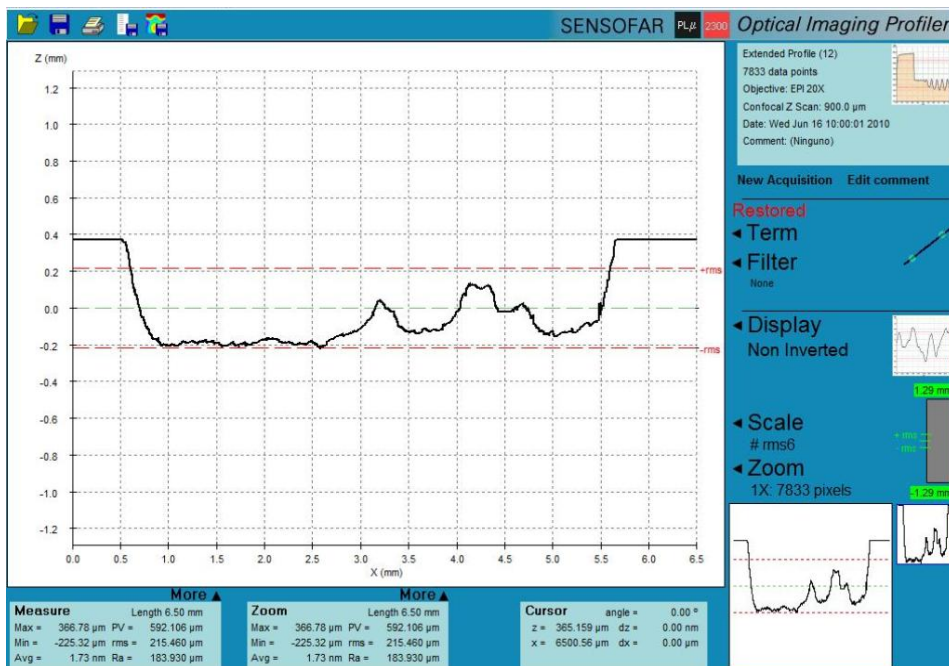


Figura 114: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 50 mm/s



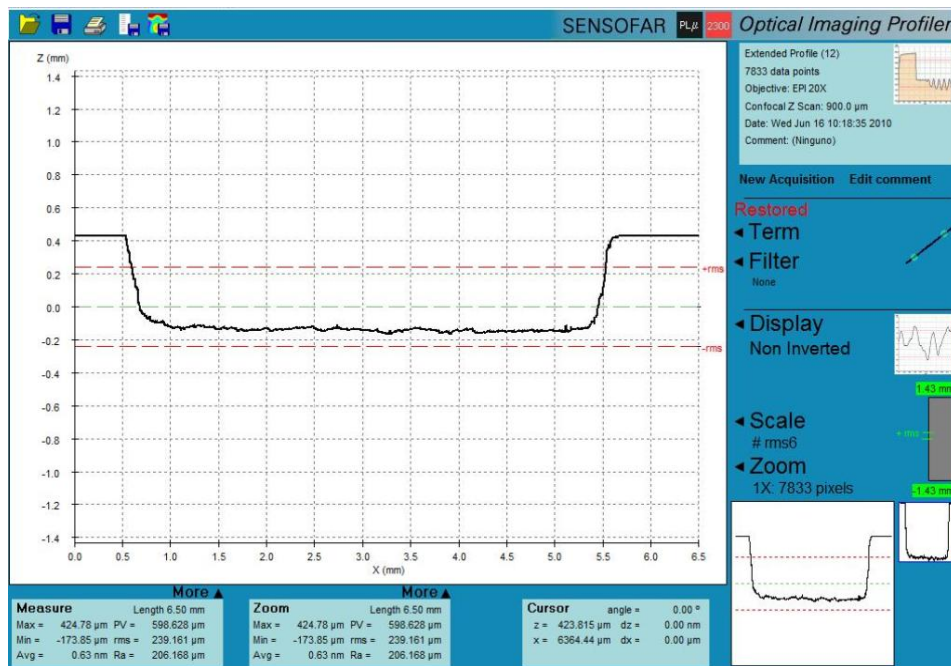


Figura 115: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 90 mm/s

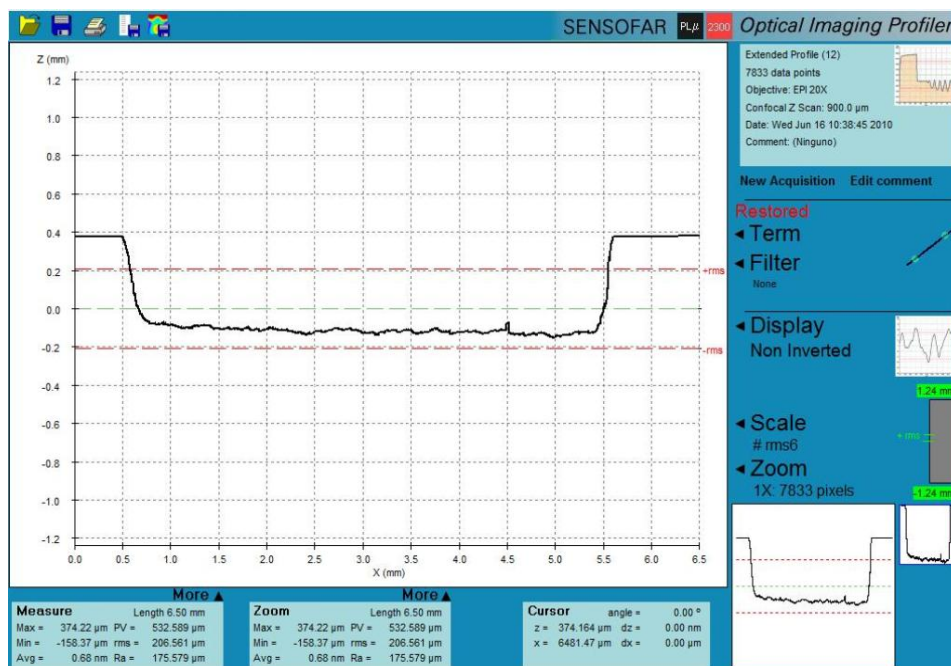


Figura 116: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 150 mm/s

## Nd(YVO4): CÁLCULOS A PARTIR DE LOS DATOS DE LOS PERFILES PARA LA VALORACIÓN DE EFICIENCIA Y PROFUNDIDAD POR PASADA MEDIA

Tabla 37: Profundidades a 30 KHz, distintas velocidades (Amarillo) y según el número de pasadas.  
Con 6 datos por perfil se calcula profundidad media, profundidad media por pasada y eficiencia.

40 mm/s						
nº PASADAS	1	2	4	6	8	10
PUNTO 1 PROFUNDO	-155,00	-190,00	-229,00	-240,00	-420,00	-500,00
PUNTO 2 PROFUNDO	-156,00	-187,00	-226,00	-240,00	-390,00	-514,00
PUNTO 3 PROFUNDO	-151,00	-173,00	-231,00	-243,00	-390,00	-510,00
PUNTO 4 ELEVADO	-23,00	-122,00	-170,00	-1,00	-300,00	-40,00
PUNTO 5 ELEVADO	-20,00	-122,00	-170,00	-2,00	-318,00	-70,00
PUNTO 6 ELEVADO	-18,00	-125,00	-183,00	-1,00	-312,00	-114,00
Media total	-87,17	-153,17	-201,50	-121,17	-355,00	-291,33
Media total / nº pasadas	-87,17	-76,58	-50,38	-20,19	-44,38	-29,13
Eficiencia [mm3/s]	-0,09	-0,08	-0,05	-0,02	-0,04	-0,03

50 mm/s						
nº PASADAS	1	2	4	6	8	10
PUNTO 1 PROFUNDO	-133,00	-204,00	-261,00	-317,00	-450,00	-590,00
PUNTO 2 PROFUNDO	-134,00	-212,00	-256,00	-316,00	-430,00	-580,00
PUNTO 3 PROFUNDO	-135,00	-214,00	-255,00	-314,00	-425,00	-560,00
PUNTO 4 ELEVADO	-89,00	-151,00	-200,00	-269,00	-366,00	-247,00
PUNTO 5 ELEVADO	-91,00	-149,00	-202,00	-263,00	-350,00	-240,00
PUNTO 6 ELEVADO	-92,00	-136,00	-203,00	-270,00	-338,00	-330,00
Media total	-112,33	-177,67	-229,50	-291,50	-393,17	-424,50
Media total / nº pasadas	-112,33	-88,83	-57,38	-48,58	-49,15	-42,45
mm3/s total	-0,14	-0,11	-0,07	-0,06	-0,06	-0,05

90 mm/s						
nº PASADAS	1	2	4	6	8	10
PUNTO 1 PROFUNDO	-88,00	-191,00	-254,00	-336,00	-430,00	-590,00
PUNTO 2 PROFUNDO	-85,00	-173,00	-261,00	-330,00	-431,00	-588,00
PUNTO 3 PROFUNDO	-80,00	-170,00	-253,00	-328,00	-432,00	-590,00
PUNTO 4 ELEVADO	-53,00	-124,00	-216,00	-292,00	-390,00	-550,00
PUNTO 5 ELEVADO	-53,00	-128,00	-216,00	-287,00	-396,00	-560,00
PUNTO 6 ELEVADO	-57,00	-131,00	-217,00	-287,00	-380,00	-560,00
Media total	-69,33	-152,83	-236,17	-310,00	-409,83	-573,00
Media total / nº pasadas	-69,33	-76,42	-59,04	-51,67	-51,23	-57,30
mm3/s total	-0,16	-0,17	-0,13	-0,12	-0,12	-0,13

150 mm/s						
nº PASADAS	1	2	4	6	8	10
PUNTO 1 PROFUNDO	-50,00	-113,00	-269,00	-341,00	-420,00	-520,00
PUNTO 2 PROFUNDO	-46,00	-115,00	-258,00	-345,00	-425,00	-510,00
PUNTO 3 PROFUNDO	-44,00	-117,00	-259,00	-343,00	-424,00	-510,00
PUNTO 4 ELEVADO	-17,00	-74,00	-222,00	-308,00	-375,00	-450,00
PUNTO 5 ELEVADO	-18,00	-78,00	-227,00	-318,00	-378,00	-480,00
PUNTO 6 ELEVADO	-20,00	-79,00	-216,00	-312,00	-380,00	-480,00
Media total	-32,50	-96,00	-241,83	-327,83	-400,33	-491,67
Media total / nº pasadas	-32,50	-48,00	-60,46	-54,64	-50,04	-49,17
mm3/s total	-0,12	-0,18	-0,23	-0,20	-0,19	-0,18

## Nd (YVO4): GRÁFICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ESCARBADO

Si X es el n° de pasadas en una muestra y su valor puede ser 1, 2, 4, 6, 8 ó 10:

Volumen arrancado en X pasadas (área x profundidad) dividido por X da valor medio por pasada.

El tiempo necesario para una pasada láser se ha calculado en el *Anexo C2*.

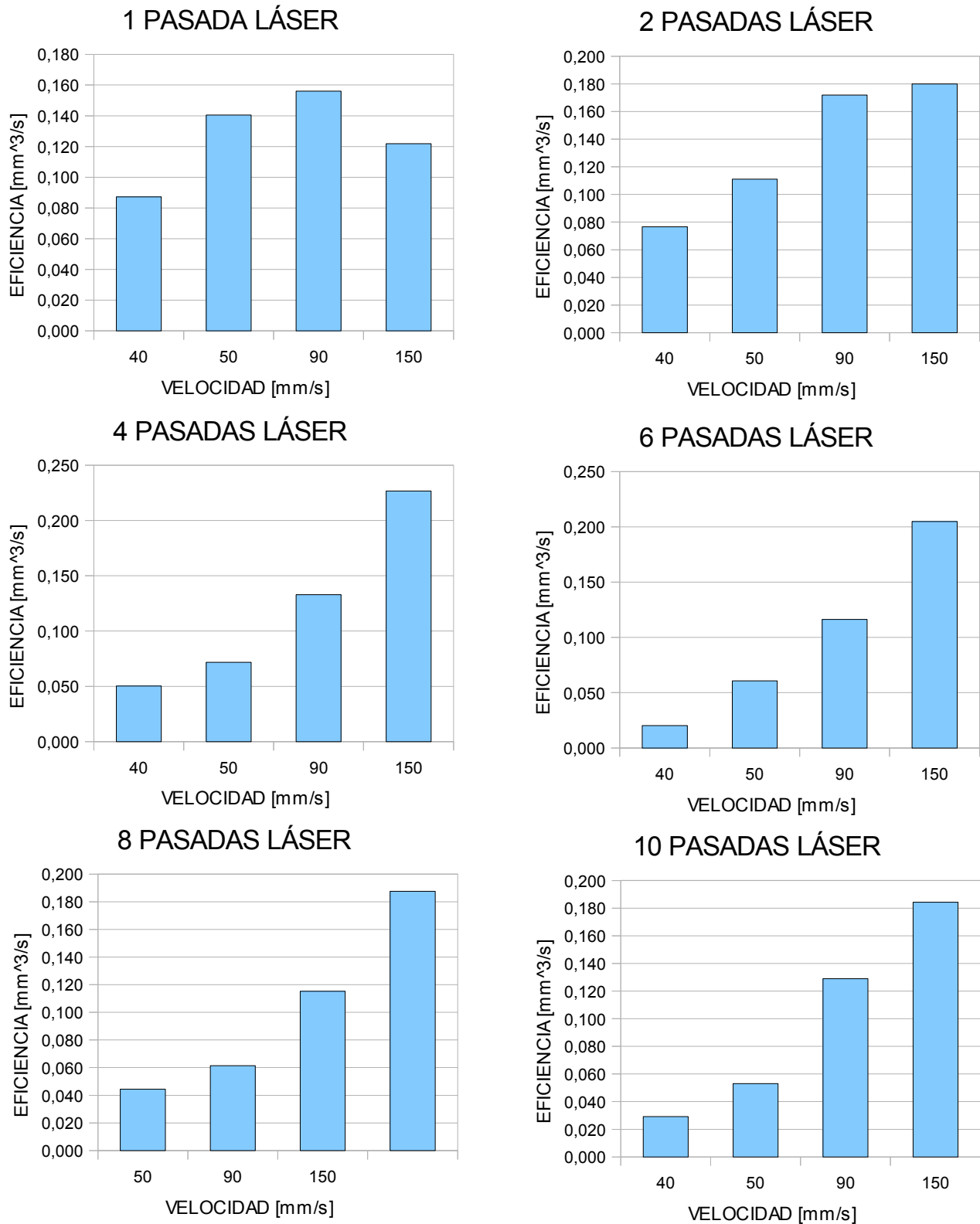


Figura 117: mm³/s arrancados en muestras de 1, 2, 4, 6, 8, 10 pasadas a distintas velocidades

## Nd (YVO4): EFICIENCIA [mm<sup>3</sup>/s] EN FUNCIÓN DE VELOCIDAD Y N° DE PASADAS

Datos utilizados en la realización de las gráficas de la *Figura 117*.

*Tabla 38: Eficiencia mm<sup>3</sup>/s*

Nº PASADAS	1 pasada	2 pasadas	4 pasadas	6 pasadas	8 pasadas	10 pasadas
VELOCIDAD [mm/s]						
40	0,087	0,077	0,050	0,020	0,044	0,029
50	0,140	0,111	0,072	0,061	0,061	0,053
90	0,156	0,172	0,133	0,116	0,115	0,129
150	0,122	0,180	0,227	0,205	0,188	0,184

## MUELA DE DIAMANTE:ELECCIÓN

Para la elección del tipo de punta (muela) se acudió la página web del fabricante Dremel, seleccionando:

- Tarea: tallar/grabar/fresar.
- Material: No aparece vitrocerámica, pero sí cerámicas, baldosas, granito, vidrio plano, vidrio laminado, vidrio para automóvil, thermoglass, etc.

En todos los casos se repiten las muelas de diamante 7134 y 7144 (*Figura 118*), diferenciándose tan sólo en forma y medidas.



*Figura 118: Muela de diamante 7144*

## FOTOGRAFÍAS PARA LA COMPARACIÓN DE CUADRADO ESCARBADO CON LÁSER (Nd:YVO4), CUADRADO ESCARBADO CON PUNTA DE DIAMANTE Y CUADRADO COMBINANDO PUNTA DE DIAMANTE Y LÁSER.

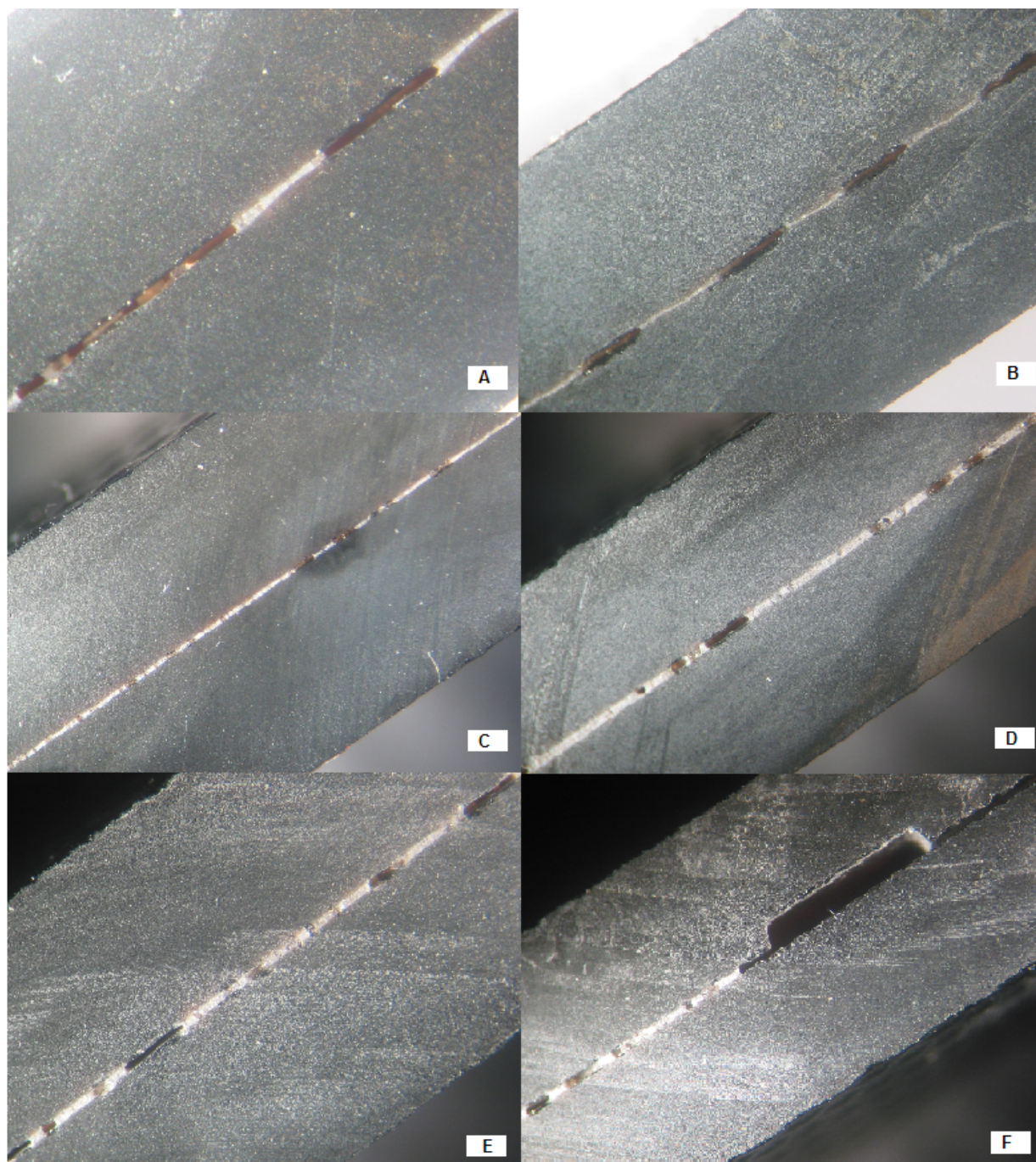


*Figura 119: Comparación cuadrado con láser, punta y punta con pasada final láser*



## D.2 UNIÓN

### FUNDENTE: VARIACIONES DE MUESTRAS UNIDAS



*Figura 120: Muestra cerrada con fundente, distintas cantidades, posiciones, con o sin etanol*

En la *Figura 120* se contemplan los siguientes casos:

A Muestra unida con 0,5 g de fundente con etanol, enfrentando cara rugosa y lisa

B Muestra unida con 0,5 g de fundente con etanol, enfrentando cara rugosa y rugosa

C Muestra unida con 0,5 g de fundente con etanol, enfrentando cara lisa y lisa

D Muestra unida con 2 g de fundente seco, enfrentando cara lisa y lisa

E Figura: Muestra unida con 2 g de fundente con etanol, enfrentando cara lisa y lisa

F Muestra unida con 2 g de fundente con etanol, se observa un escarbado láser en el que no ha entrado el fundente

## FABRICACIÓN DE MATERIAL DE UNIÓN: EJS. DE VIDRIOS ENCONTRADOS [8]

Tabla 39: Algunos vidrios patentados , con composición y temperatura de fusión

Glass #	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	BaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	F	TiO <sub>2</sub>	$\alpha \times 10^7, K^{-1}$	L.P., °C	T <sub>liq</sub> , °C
88547	52.04	10.86	8.36	2.39	7.90	4.01	6.54	4.03	1.71	2.16	-	-	-	1020
88548	57.09	8.80	7.14	2.43	6.51	3.39	6.62	4.09	1.74	2.19	-	78.1	756	850
88549	58.92	11.03	5.81	1.61	8.03	2.72	4.42	4.10	1.16	2.19	-	65.7	834	840
88550	58.40	8.87	8.54	1.57	6.56	4.10	4.45	4.12	1.17	2.16	-	82.2	717	610
88551	60.32	8.90	7.21	1.63	6.59	3.42	4.46	4.13	1.17	2.15	-	76.2	766	600
88552	64.04	8.95	4.53	1.64	6.62	2.20	4.49	4.15	1.18	2.22	-	-	-	660
88553	58.41	11.78	7.14	1.61	6.51	2.71	4.42	4.09	1.16	2.19	-	71.6	790	910
88554	59.16	11.73	5.79	1.61	6.50	3.38	4.41	4.08	1.15	2.18	-	69.1	829	970
88555	60.10	10.37	7.20	1.63	6.57	2.19	4.45	4.12	1.17	2.21	-	69.2	799	650
88556	61.63	8.90	5.86	1.63	6.58	3.42	4.46	4.13	1.17	2.21	-	67.7	798	1060
88557	63.55	8.93	5.88	1.63	4.57	3.43	4.48	4.15	1.17	2.22	-	67.3	839	1200
88558	62.32	8.95	7.26	1.64	5.60	2.20	4.49	4.16	1.18	2.22	-	70.4	789	1110
88559	61.92	10.36	5.85	1.62	5.55	2.74	4.45	4.12	1.18	2.21	-	65.5	876	1030
88560	60.64	10.35	7.64	1.62	4.54	3.28	4.45	4.12	1.17	2.20	-	-	-	600
88561	55.36	13.21	8.48	1.61	6.47	4.07	4.41	4.09	1.16	1.10	-	-	-	750
88562	61.20	10.33	6.73	1.62	4.53	3.59	4.44	4.11	1.16	2.20	-	-	-	890
88563	61.67	8.40	8.83	5.05	4.71	4.24	-	4.26	-	2.28	0.61	81.3	713	500
88564	63.92	7.02	6.64	4.89	6.93	3.32	-	4.35	-	2.32	0.62	67.3	749	600
88565	64.93	7.03	6.65	4.90	5.87	3.32	-	4.36	-	2.33	0.61	66.8	756	680
88566	63.02	8.82	4.02	-	7.53	3.12	6.61	4.10	-	2.16	0.58	-	-	950
88567	55.79	10.93	8.41	-	7.46	4.04	6.65	4.06	-	2.17	0.57	-	-	970
88568	54.92*	10.51 <sup>†</sup>	8.09*	-	7.66*	3.87*	6.32*	3.89 <sup>‡</sup>	-	2.18	0.55*	79.3	681	480
88569	56.97	10.74	8.27	-	7.82	3.97	6.47	1.99	-	3.20	0.56	76.9	682	780
88570	59.67	10.56	4.28	-	6.25	2.09	10.59	3.92	-	2.10	0.55	60.0	844	780
88571	54.04	10.50	8.09	-	7.27	3.88	6.32	5.85	-	3.33	0.55	79.4	709	780

## GRÁFICAS DE TRACCIÓN (Eje Y: CARGA [N] Eje X: ELONGACIÓN [mm])

Gráficas (Figuras 121 a 130) obtenidas de la tracción de muestras unidas con Araldit, fundente comercial, óxido de boro y mezcla A de las que se deducen los valores de carga soportados indicados en el proyecto. Se han obtenido con una Máquina de Tracción Universal Instron.

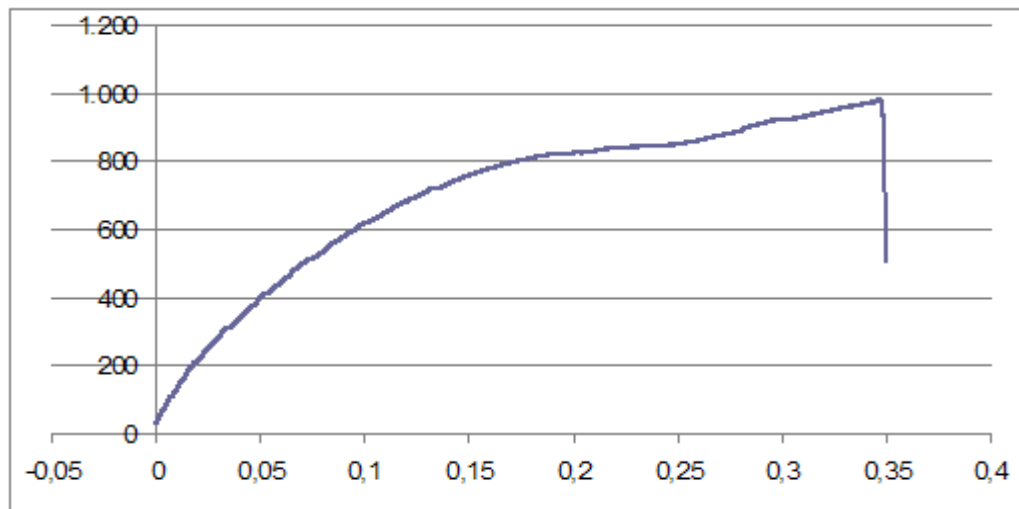


Figura 121: Tracción muestra con FUNDENTE (0,5 g) enfrentando caras lisas

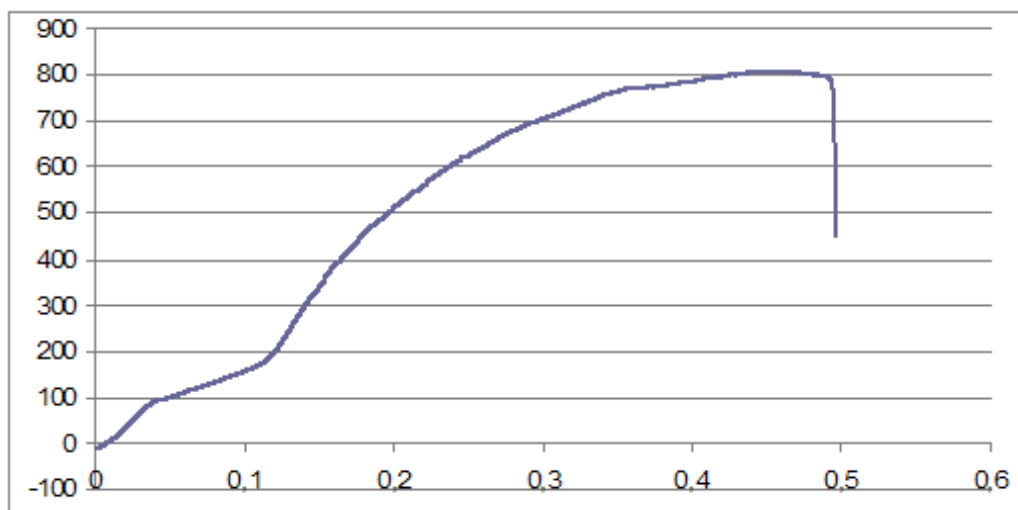


Figura 122: Tracción muestra con FUNDENTE (2 g) enfrentando caras lisas

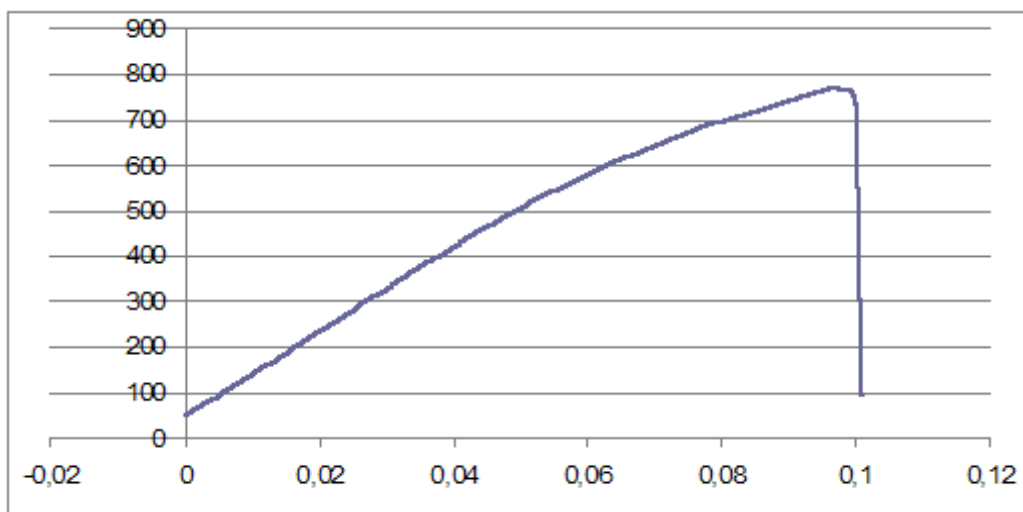


Figura 123: Tracción muestra con FUNDENTE (0,5 g) enfrentando cara rugosa y lisa

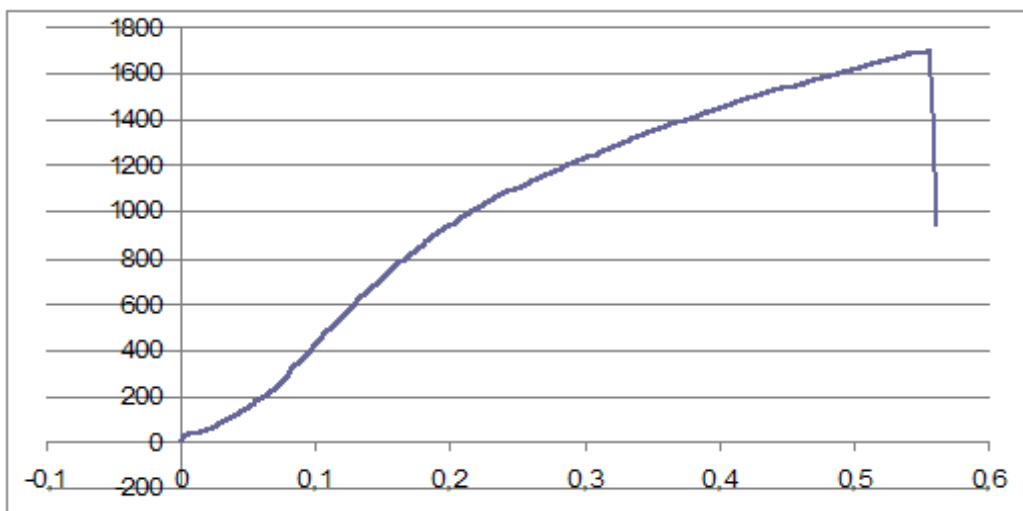


Figura 124: Tracción muestra con MEZCLA A

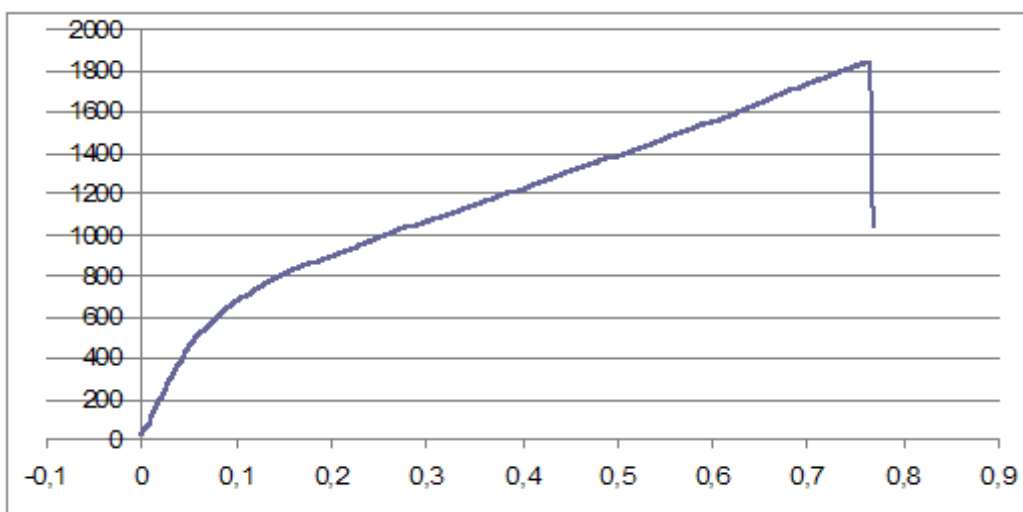
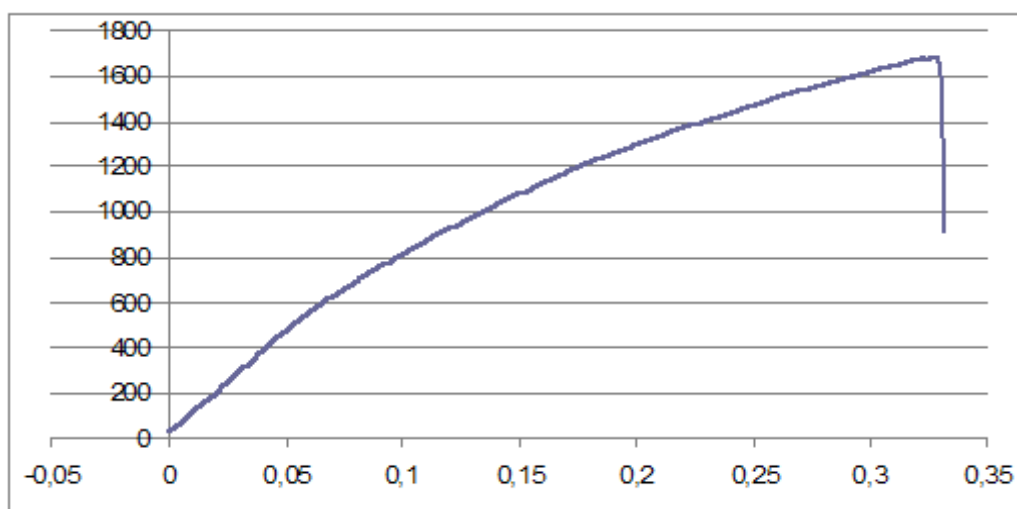
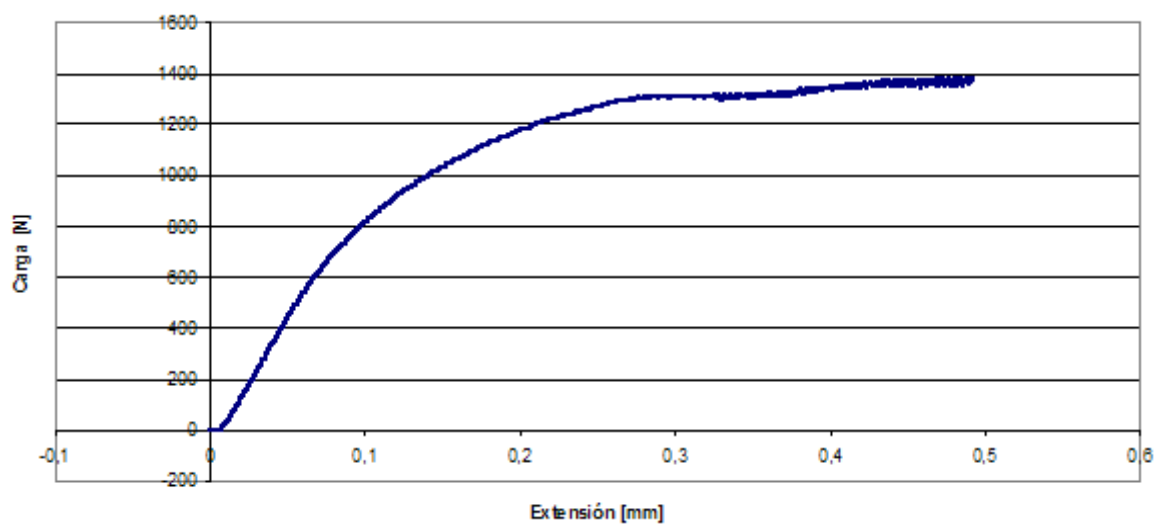


Figura 125: Tracción muestra con BORO

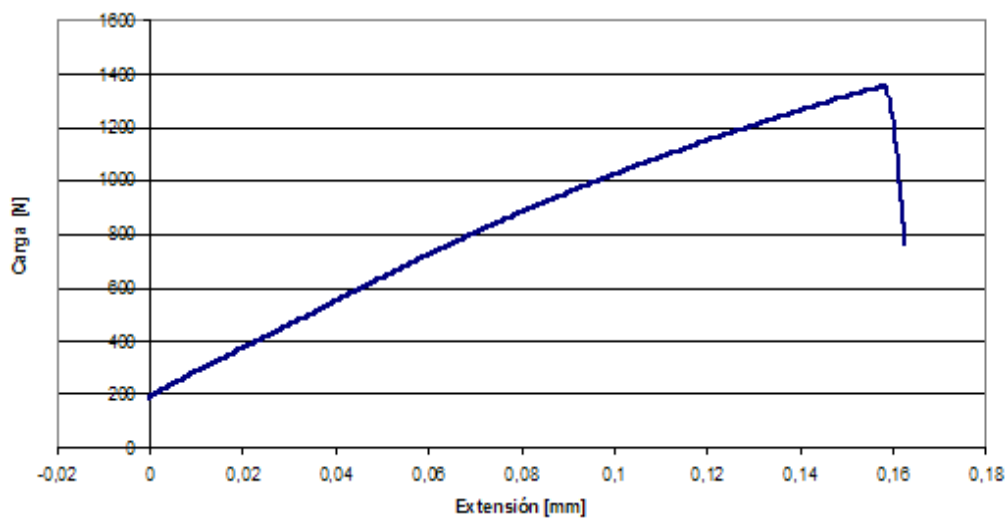




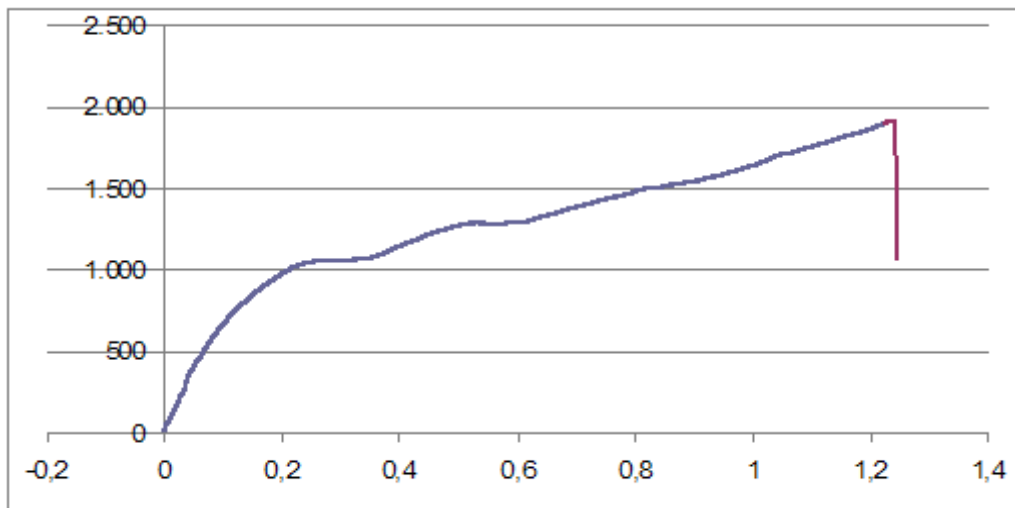
*Figura 126: Tracción muestra con BORO*



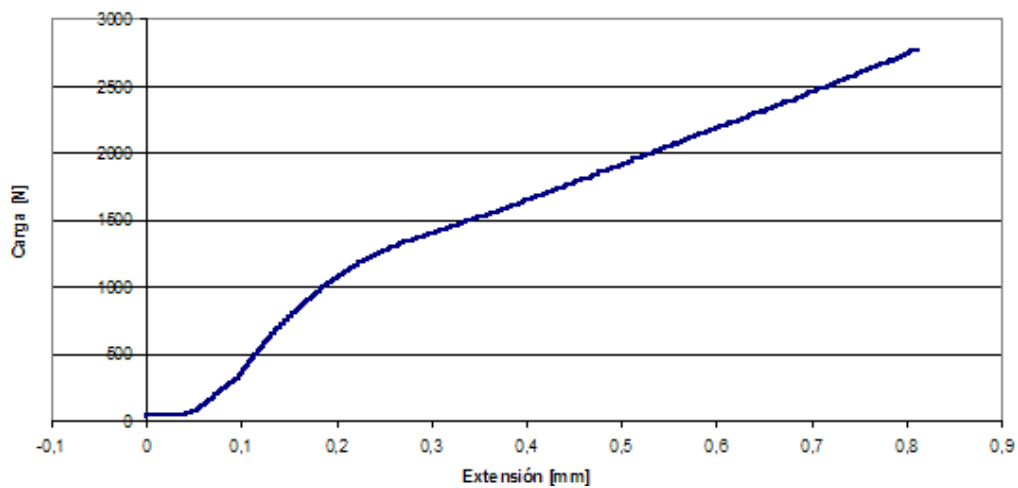
*Figura 127: Tracción muestra con BORO*



*Figura 128: Tracción muestra con BORO, se le ha realizado choque térmico previo*



*Figura 129: Tracción muestra con ARALDIT enfrentando caras lisas*

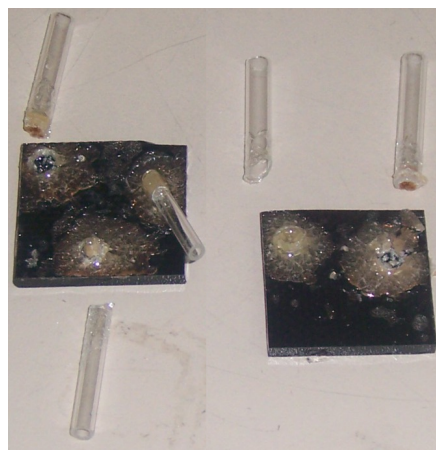


*Figura 130: Tracción muestra con ARALDIT enfrentando caras lisas*

### **D.3 TUBOS DE VIDRIO**

#### **TUBOS DE VIDRIO: UNIDOS CON FUNDENTE A UNA PLACA VITROCERÁMICA**

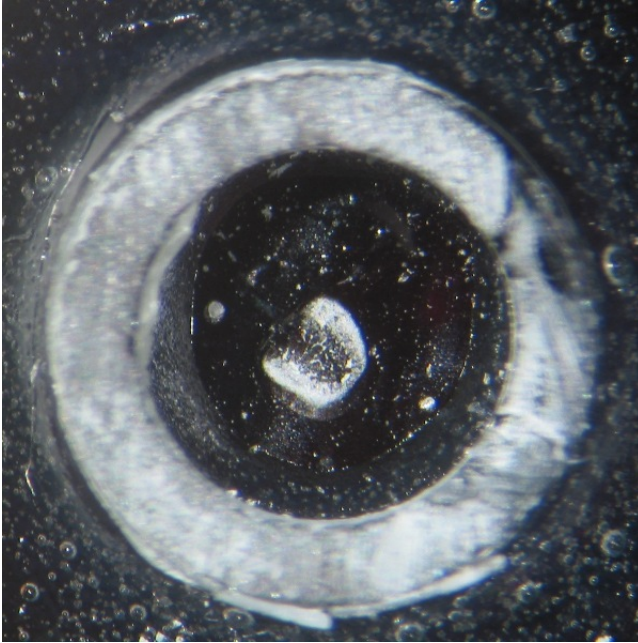
Los tubos y la vitrocerámica acaban quebrados tras el Proceso Térmico (*Figura 131*).



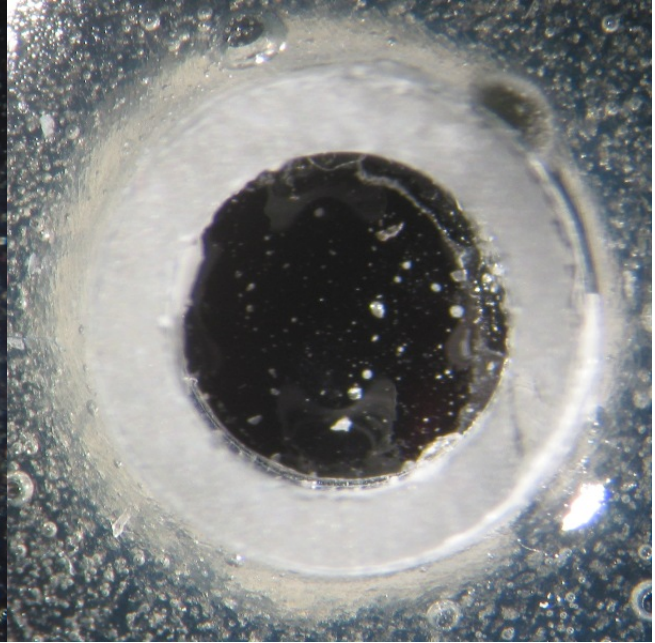
*Figura 131: Tubos unidos con fundente*

## TUBOS DE VIDRIO: UNIDOS CON ARALDIT A LA PLACA, Y CORTADOS PARA COMPROBAR TAPONAMIENTO

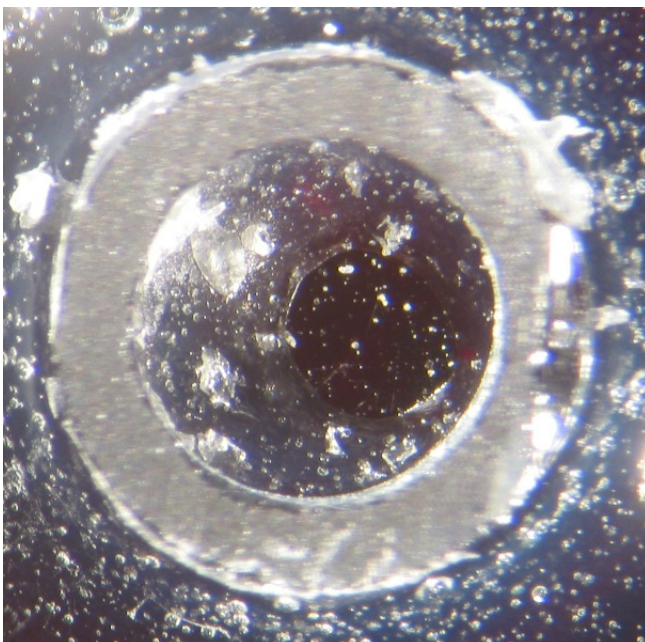
Las Figuras 132 a 138 demuestran que aplicar presión sobre los tubos evita su taponamiento, la Figura 139 ilustra el mejor resultado, introduciendo el tubo en un agujero perforado de su mismo diámetro.



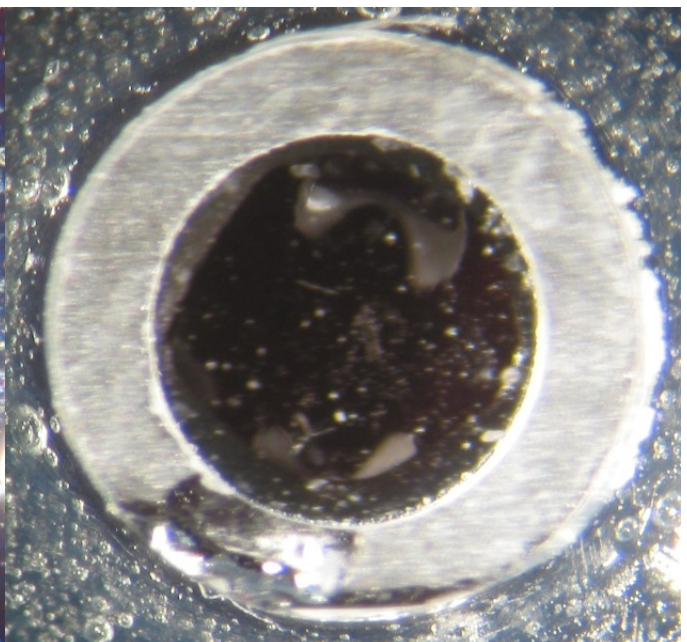
*Figura 132: Tubo tipo 1, una pequeña cantidad de Araldit ha entrado*



*Figura 133: Tubo tipo 1, aplicando presión, no ha entrado Araldit*

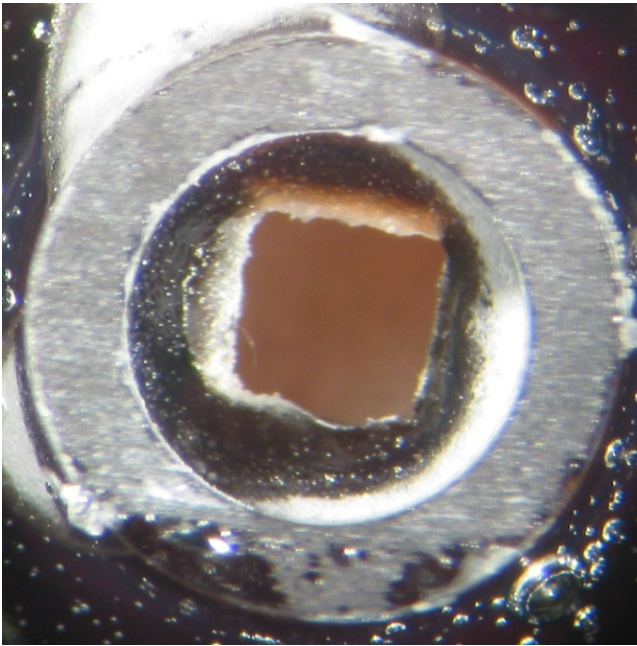


*Figura 134: Tubo tipo 2, una pequeña cantidad de Araldit ha entrado*

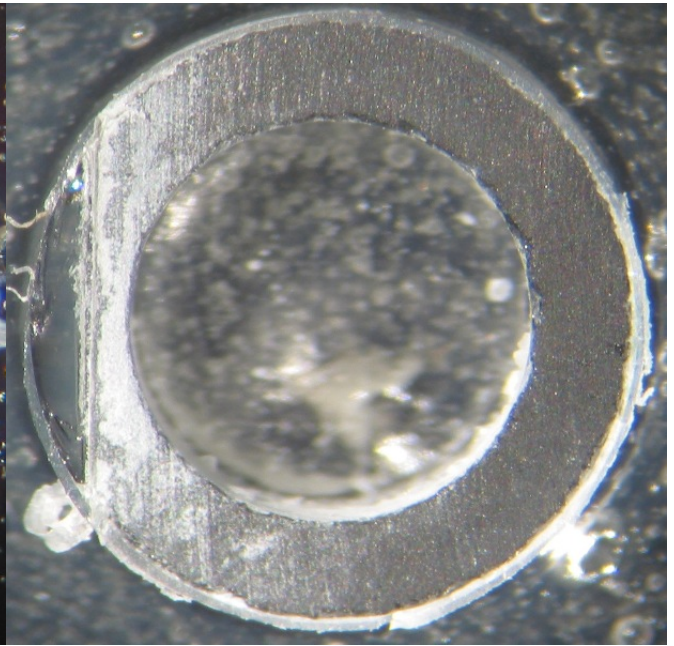


*Figura 135: Tubo tipo 2, aplicando presión, no entra Araldit*

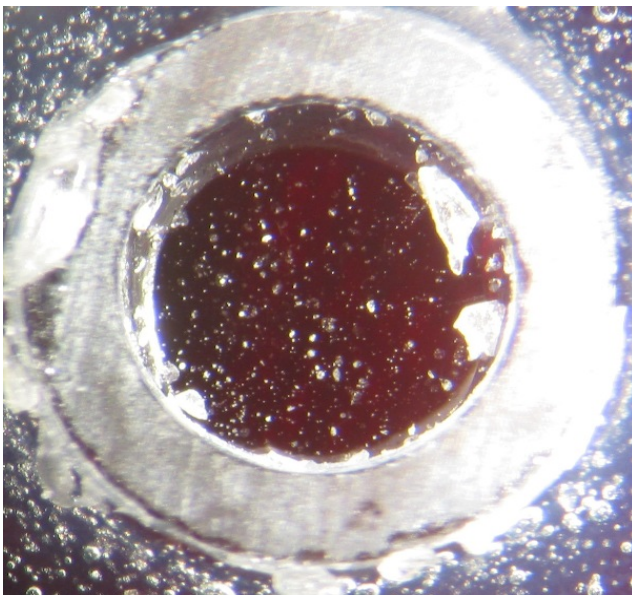




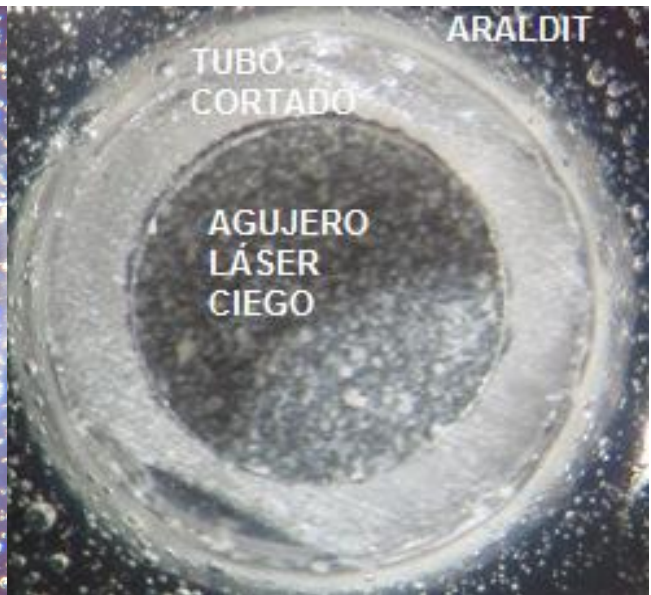
*Figura 136: Tubo tipo 2, con presión y con agujero perforado, no ha entrado Araldit*



*Figura 137: Tubo tipo 5, totalmente taponado*



*Figura 138: Tubo tipo 5, aplicando presión, no entra Araldit*



*Figura 139: Introduciendo el tubo en agujero perforado en la placa de su mismo diámetro, aplicando externamente el Araldit, se consigue el mejor de todos los resultados*



## D.4 VACÍO

### VACÍO MÁXIMO ALCANZADO CON DISTINTOS MATERIALES DE UNIÓN

Las *Tablas 40 y 41* muestran los resultados de presión mínima alcanzada con vacío dinámico en piezas cerradas con los distintos materiales de unión. También al combinar dos de estos materiales.

*Tabla 40: Pruebas vacío con tres materiales de unión*

PRUEBA	1	2	3
MUESTRA (Material de unión)	Fundente	Óxido De Boro	Araldit
PRESIÓN 15 min[mbar]	$1,3 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-5}$	$4,9 \times 10^{-5}$

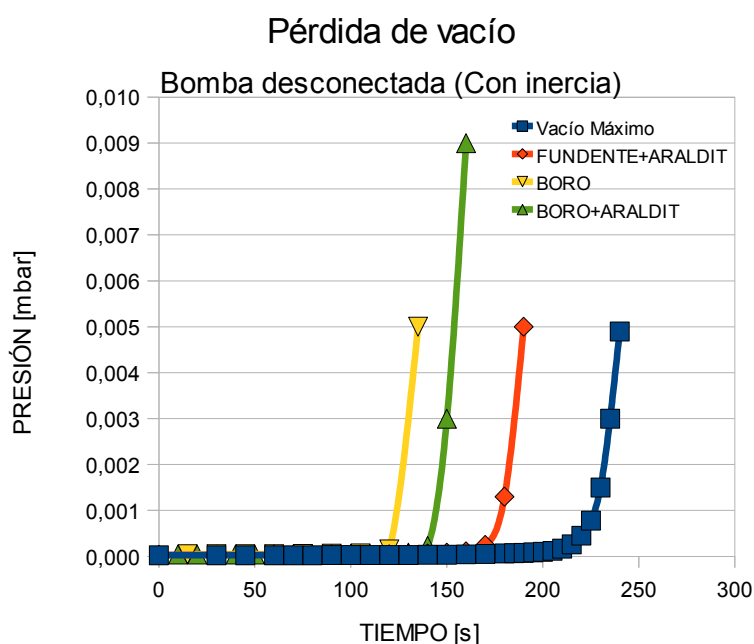
*Tabla 41: Pruebas vacío, diferencias al sellar por encima*

PRUEBA	4	5	6
MUESTRA (Material de unión)	Fundente	Fundente sellado Con Araldit	Fundente sellado Unión vidrio- goma sellada
PRESIÓN 9 min[mbar]	$1,3 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-5}$

PRUEBA	7	8
MUESTRA (Material de unión)	Óxido de Boro	Óxido de Boro sellado Con Araldit
PRESIÓN 15 min[mbar]	$4,9 \times 10^{-5}$	$4,9 \times 10^{-5}$

### ESTUDIO DE LAS GRÁFICAS UNA VEZ PARADA LA BOMBA

La *Figura 140* muestra la velocidad de pérdida del vacío una vez apagada la bomba turbomolecular. Al principio se mantiene por la inercia de la bomba pero al cabo de pocos segundos la presión se dispara hasta la atmosférica. El peor resultado se da con óxido de boro y las piezas que utilizan Araldit son las más cercanas a la referencia máxima. Los resultados coinciden con los de la *Figura 49*.



*Figura 140: Gráfica de presión en la instalación una vez apagada la bomba*

**TABLA 42: DATOS PARA LA GRÁFICA DE LA FIGURA 43**

REFERENCIA (TAPA)		FUNDENTE + ARALDIT	
TIEMPO [s]	PRESIÓN [mbar]	TIEMPO [s]	PRESIÓN [mbar]
0	1000,000000	0	1000,000000
90	0,0003700	145	0,000370
110	0,0001800	165	0,000250
120	0,0001400	180	0,000170
130	0,0001200	190	0,000140
140	0,0001000	200	0,000120
150	0,0000950	210	0,000110
160	0,0000880	220	0,000100
170	0,0000830	230	0,000094
180	0,0000780	240	0,000089
190	0,0000750	250	0,000084
200	0,0000710	260	0,000080
210	0,0000680	270	0,000077
220	0,0000650	280	0,000075
230	0,0000630	290	0,000073
240	0,0000600	300	0,000071
250	0,0000570	310	0,000069
260	0,0000560	320	0,000066
270	0,0000540	330	0,000064
280	0,0000520	340	0,000063
290	0,0000510	350	0,000061
300	0,0000500	360	0,000059
310	0,0000490	370	0,000058
320	0,0000470	380	0,000057
330	0,0000460	390	0,000056
340	0,0000450	400	0,000054
350	0,0000440	410	0,000053
360	0,0000420	420	0,000052
370	0,0000410	430	0,000051
380	0,0000400	440	0,000050
390	0,0000390	450	0,000050
400	0,0000380	460	0,000049
410	0,0000380	470	0,000048
420	0,0000370	480	0,000048
430	0,0000360	490	0,000047
440	0,0000350	500	0,000046
450	0,0000340	510	0,000046
460	0,0000340	520	0,000045
470	0,0000330	530	0,000044
480	0,0000320	540	0,000043
490	0,0000320	550	0,000043
500	0,0000310	560	0,000042
510	0,0000310	570	0,000042
520	0,0000310	580	0,000041
530	0,0000310	590	0,000040
540	0,0000290	600	0,000040
550	0,0000290	630	0,000033
560	0,0000280		
570	0,0000280		
580	0,0000270		
590	0,0000270		
600	0,0000270		
900	0,000020		

## ÓXIDO DE BORO

TIEMPO [s]	PRESIÓN [mbar]
0	1000,000000
105	0,0025000
120	0,0012000
135	0,0006600
150	0,0004100
165	0,0002700
180	0,0001900
195	0,0001500
210	0,0001200
225	0,0001100
240	0,0000970
255	0,0000900
270	0,0000850
285	0,0000780
300	0,0000750
315	0,0000740
330	0,0000710
345	0,0000680
360	0,0000650
375	0,0000640
390	0,0000610
405	0,0000600
420	0,0000580
435	0,0000570
450	0,0000560
465	0,0000550
480	0,0000530
495	0,0000530
510	0,0000520
525	0,0000520
540	0,0000510
555	0,0000510
570	0,0000500
585	0,0000500
600	0,0000490
615	0,0000490
705	0,0000470
750	0,0000460
810	0,0000450
870	0,0000440
900	0,0000440

## ÓX. BORO + ARALDIT

TIEMPO [s]	PRESIÓN [mbar]
0	1000,000000
90	0,002500
105	0,000600
120	0,000320
135	0,000200
150	0,000150
165	0,000120
180	0,000110
195	0,000097
210	0,000090
225	0,000085
240	0,000079
255	0,000076
270	0,000073
285	0,000070
300	0,000068
315	0,000066
330	0,000064
345	0,000062
360	0,000061
375	0,000060
390	0,000059
405	0,000058
420	0,000058
435	0,000058
450	0,000056
465	0,000055
480	0,000054
495	0,000053
510	0,000053
525	0,000053
540	0,000053
555	0,000053
570	0,000052
585	0,000051
600	0,000051
615	0,000050
630	0,000049
645	0,000049
660	0,000049
675	0,000049
690	0,000047
705	0,000047
720	0,000046
735	0,000046
750	0,000045
765	0,000045
780	0,000044
810	0,000044
840	0,000043
870	0,000042
900	0,000041

**TABLA 43: DATOS PARA LA GRÁFICA DE LA FIGURA 140**

REFERENCIA (TAPA)		FUNDENTE+ARALDIT		ÓXIDO DE BORO		ÓX. BORO+ARALDIT	
TIEMPO	PRESIÓN	TIEMPO	PRESIÓN	TIEMPO	PRESIÓN	TIEMPO	PRESIÓN
0	0,000026	0	0,000033	15	0,000045	10	0,000041
30	0,000026	60	0,000034	30	0,000046	20	0,000041
45	0,000025	90	0,000039	45	0,000047	30	0,000042
60	0,000026	105	0,000042	60	0,000049	40	0,000042
70	0,000026	120	0,000049	75	0,000051	50	0,000042
80	0,000026	130	0,000055	90	0,000056	60	0,000043
90	0,000027	140	0,000064	105	0,000067	70	0,000044
100	0,000027	150	0,000081	120	0,000150	80	0,000045
110	0,000028	160	0,000110	135	0,005000	90	0,000047
120	0,000029	170	0,000250			100	0,000050
130	0,000031	180	0,001300			110	0,000055
140	0,000034	190	0,005000			120	0,000063
150	0,000037					130	0,000083
160	0,000043					140	0,000230
170	0,000051					150	0,003000
180	0,000062					160	0,009000
185	0,000069						
190	0,000075						
195	0,000087						
200	0,000100						
205	0,000120						
210	0,000170						
215	0,000260						
220	0,000450						
225	0,000780						
230	0,001500						
235	0,003000						
240	0,004900						

# **ANEXO E**

**TRADUCCIÓN  
(INGLÉS, ALEMÁN)**



## Einleitung

### Ästhetik

In Zusammenarbeit mit der Universität Zaragoza entwickelt die Firma Balay, ein Zweig der Bosch Siemens Haushaltsgeräte Gruppe, diverse Projekte im Feld der Induktionskochfelder.

Ein Zweig der Forschung spezialisiert sich auf Materialien und innerhalb dieses Themas befasst sich eine Linie mit der Suche nach einer sich von den anderen Produkten unterscheidenden Ästhetik.

Um das Produkt von den anderen sich auf dem Markt befindenden zu unterscheiden, ist es nötig Prozesse zu finden, die es möglich machen den Ceranfeldern eine neue Ästhetik zu geben. Zu diesem Zeitpunkt existieren nur wenige Firmen, die den gesamten Markt in diesem Feld bedienen, so sind die Ceranfelder sowie die Induktionskochfelder vom äußeren Anschein gleich, auch wenn es Unterschiede in der Qualität der Kontrollelektronik der verschiedenen weiterverarbeitenden Firmen gibt.

Wie im Bild zu sehen ist, sehen wir uns generell mit zwei verschiedenen Ästhetiken konfrontiert:

- Die am meisten verbreitete schwarze Variante
- Transparente Felder, in welchem der Untergrund koloriert ist, so erscheinen sie weiß oder metallfarben.

In der Rolle des Käufers entscheiden später lediglich der Aspekt sowie die Preisklasse über die Wahl des Produktes. Wenig ausschlaggebend für den Käufer sind die nicht erkennbaren Unterschiede in der Elektronik, die wichtige Charakteristiken bestimmen wie die Anspruchsgeschwindigkeit, Fehlersicherheit, Maximaltemperaturen und vieles mehr. Es muss eine mögliche Qualitätsunterscheidung gefunden werden, die in der Ästhetik der Felder sichtbar gemacht werden muss.



*Abbildung : Ceranfelder weißer und schwarz.*

Eine Möglichkeit zur Unterscheidung der Induktionsfelder, in der momentan geforscht wird, ist die Illumination der gesamten Oberfläche, oder ein Teil in Form von geometrischen Symbolen, mittels eines fluoreszierenden Gases.



## Illumination

Zusammenfassung der Theorie der Gasentladungslampen, *Anexo :Teoría* [1][2][3]

Um diese Lampen zu erleuchten muss sich das isolierende Gas in einem Zustand der Leitfähigkeit befinden, in dem es ein kaltes Plasma übergeht.

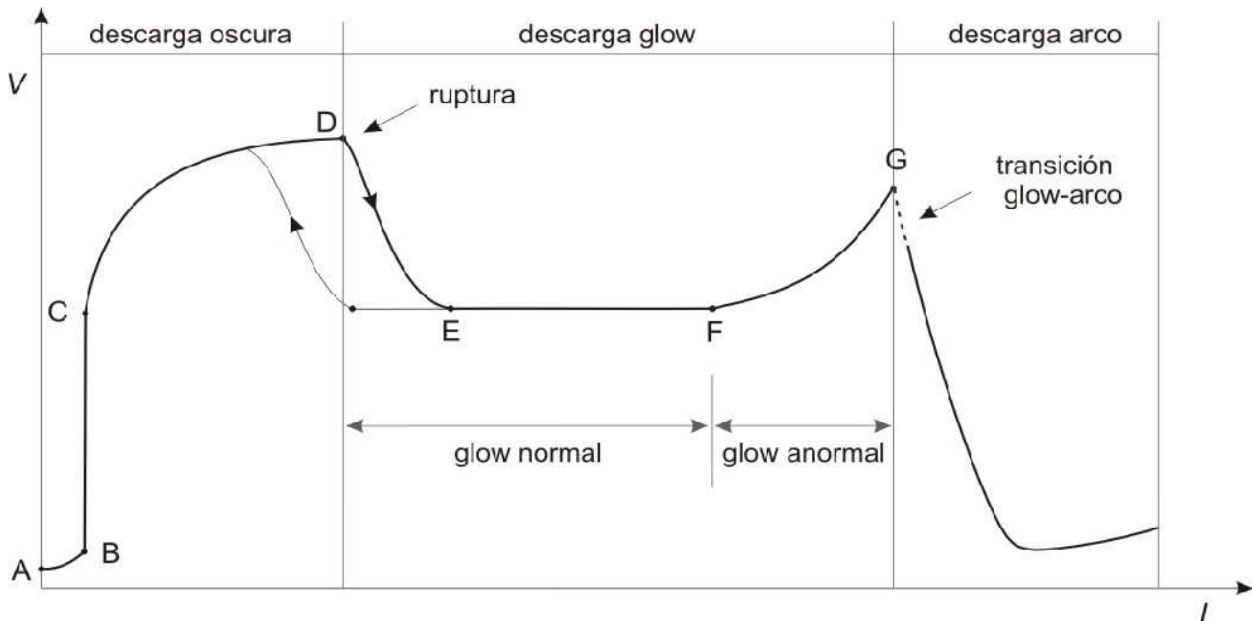


Abbildung: V-I Gasentladungsröhre.

In der zuvor dargestellten Abbildung werden die verschiedenen Fasen des Prozesses veranschaulicht. Durch Erhöhung der angelegten Spannung wird der Punkt erreicht an dem die freien Elektronen mit den Molekülen zusammenstoßen und dabei erneut Elektronen freisetzen. Dieser Prozess führt bis zu dem so genannten " Townsend Effekt" , in der Abbildung Punkt C und D.

Die Elektronen werden durch das Elektrische Feld beschleunigt was sie befähigt durch einen unelastischen Stoß ein weiteres Elektron eines Moleküls freizusetzen.

Da ein Gas bei tiefem Druck weniger Moleküle besitzt, ist es möglich das die Elektronen länger beschleunigt werden ohne ihre Energie durch einen Zusammenstoß mit einem Molekül zu verlieren.

Der Punkt D ist der Punkt der Lichtbogenentladung, in den Paschenkurven wird dieser Punkt für die verschiedenen Gase charakterisiert durch die Gleichung *Spannung X Entfernung zwischen Elektroden*.

Penning entdeckte, dass bestimmte Gasgemische , zum Beispiel Neon mit Anteilen von Argon, den Punkt der Lichtbogenentladung wesentlich herabsetzen.

Sobald der Punkt D einmal überschritten ist befindet sich die Leuchtröhre in der glüh Zone (E-F) mit kontrollierter Intensität.

Die Lampe sollte nie in der Lichtbogenentladung operiert werden, da das heiße Plasma die Röhre beschädigen würde. In der Glüh Zone leitet das Plasma und emittiert Licht im sichtbaren Bereich sobald die Elektronen wieder auf die Kernnennschalen zurückkehren.

Der Druck innerhalb der Röhre ist 25 mbar im Fall des Penning Gemischtes und 28 mbar falls sie mit reinem Neon betrieben wird.

Der derzeitige Forschungsstand ist:

- 1) Verständnis der Physikalischen Prozesse die zur Illumination der Niederdruckentladungslampe führen (*Anexo A*).
- 2) Evaluierung der nötigen Umstände zur Erzeugung des Glimmens.
- 3) Der Gebrauch von punktuellen Lampen oder welcher von wenigen Zentimetern Länge.
- 4) Die Zusammenführung der Technik in einem Induktionskochfeld.

Anhand dieser Information können konkrete Pläne für den direkten Gebrauch von Neonlicht unterhalb des Ceranfeldes gemacht werden, sowie die Konkretisierung der Dimensionierung und der nötigen Spannung.

Das Projekt fokussiert sich auf der Entwicklung eines Werkstückes, in dass das Gas direkt unterhalb der Platte eingeführt werden kann und auf diese weise Erleuchtete geometrische Formen erhalten werden können (Quadrate, Ringe, Buchstaben, etc.)

#### **Arbeitsschritte:**

Fabrikationsphasen des Werkstückes:

- Einfersen einer geometrischen Figur in eine Ceranfeldplatte.
- Verschließen des erstellten Freiraumes mit Hilfe einer zweiten Platte.
- Einleiten von Gas in den Freiraum und die anschließende Stimulation des Gases.



*Abbildung : Gefräster Freiraum und Verbindung der zwei Teilstücke.*

Eine Entwicklung und Optimierung findet in folgenden Arbeitsschritten statt:

## Fräsen

Die erste Phase in der Erstellung des Werkstückes ist die Ausfräsung. Das Problem dieses Schrittes ist, dass nicht mit dem Rohmaterial gearbeitet wird, welches einfach umzuformen ist, die für die Experimente verwendete Keramik ist sehr hart und schwer zu bearbeiten.

Zunächst wird die Ausfräsung mit Hilfe der Lasertechnik untersucht. Die beiden dafür verwendeten Laser sind ein Nd:YAG und ein Nd:YVO4. Anhaltspunkt für diese Technik ist eine Doktorthese.

Der *Laser Nd:YAG* wird mit der in der Doktorthese beschriebenen Parametern ( Frequenz Geschwindigkeit, Anstand etc) betrieben.

Untersucht wird der Einfluss des Abstandes des Lasers von dem zu bearbeitenden Werkstück und das daraus resultierende Optimum für diesen Parameter. Die effizienteste Einstellung wird anhand des Geräusches der Interaktion zwischen Laser und Oberfläche gefunden. Allerdings können aus der manuellen Justierung des Lasers einige experimentelle Fehler resultieren.

*Laser Nd:YVO4:* Durch eine Kombination der verschiedenen Prozessparameter wird die, für diesen automatisierten Laser, optimale Einstellung gesucht.

Für beide Laser soll die Effizienz anhand von Studien des Abstandes- Laser zu Oberfläche maximiert werden. Verschiedene Profile werden realisiert wobei die Anzahl der Übergänge des Lasers variiert wird, anschließend wird das erhaltene Profil mit dem Programm PLU analysiert und der Mittelwert des Abgetragenen Materials bei jedem Durchgang berechnet. So wird der Durchsatz des Lasers berechnet  $[(\text{mm}^3 \text{ Abtrag})/\text{s}]$  anhand dessen ein Protokoll zur Effizienzoptimierung erstellt werden kann.

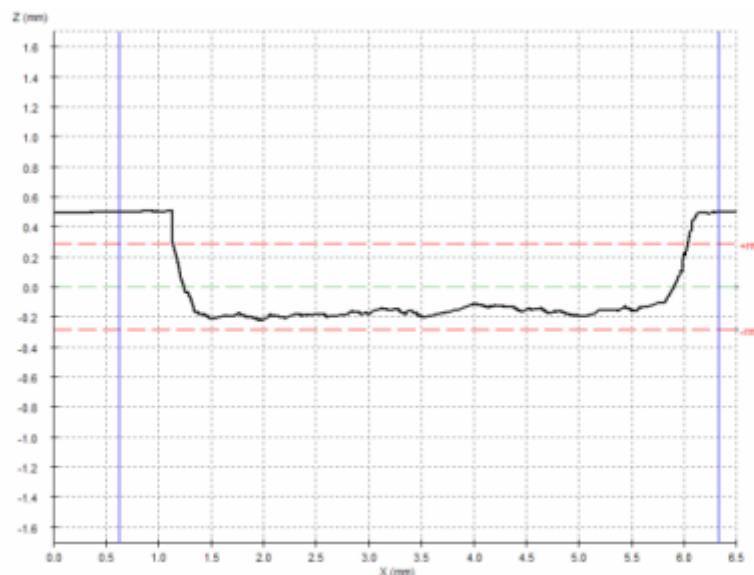


Abbildung: Profil einer Probe bearbeitet mit Laser Nd:YAG, erhalten mit Konfokal

*Wasserstrahlschneiden:* Hierfür wurden die Einstellungen von einer sich hierauf spezialisierten Firma erstellt.

*Diamantfräse:* Gesucht wird eine für Glasschnitt geeignet Fräse mit einem Diamantfräskopf. Eine andere Möglichkeit ist die manuelle Bearbeitung.

## Verbindung

Sobald die Aussparung angefertigt ist, muss die Platte verschlossen werden um ein Hohlraum für das einzuleitende Gas zu erstellen.

Benutzt wird eine Platte der gleichen Größe, die Aufgabe besteht darin, ein Material zur Verbindung der beiden Platten zu finden, die den Mechanischen Ansprüchen, das Erhalten einer Niederdruckkammer, gerecht wird. Es ist in Betracht zu ziehen, dass die Keramik ab etwa 800 °C die Struktur ändert.

*Kleber:* Benutzt wird ein bereits zuvor gebrauchter Klebstoff in einem anderem Projekt der sich als mögliches Material der Verbindung erwiesen hat.

*Glas:* Gesucht wird ein Glas, das aus einer Serie von erhältlichen Oxiden produziert werden kann; Dieses Glas soll einfach in der Fabrikation sein oder es soll kommerziell erhältliches Glas für diese Zwecke untersucht werden.

*Boroxide:* Die Verwendung dieses Oxids verspricht eine Verbindung mit wünschenswerten Eigenschaften.

*Harzepoxide:* Der Gebrauch eines Polimers beinhaltet einige Vorteile, wie die einfache Applikation, eine gute Langzeitstabilität sowie die sichere Versiegelung, ein Nachteil ist die Anwendungstemperatur. Fokus liegt auf einem Epoxibioharz.

Eine Traktionsprobe wird für alle Verbindungen durchgeführt, wofür eine wie in der Abbildung dargestellte Experimentelles -setup verwendet wird. Die Metallischen Backen werden an die beiden verbundenen Ceranplatten, an denen die Traktionsprobe vollführt wird, formschlüssig angebracht. Von Interesse ist die maximale Belastbarkeit bis zum Bruch der verschiedenen Verbindungsstoffe.

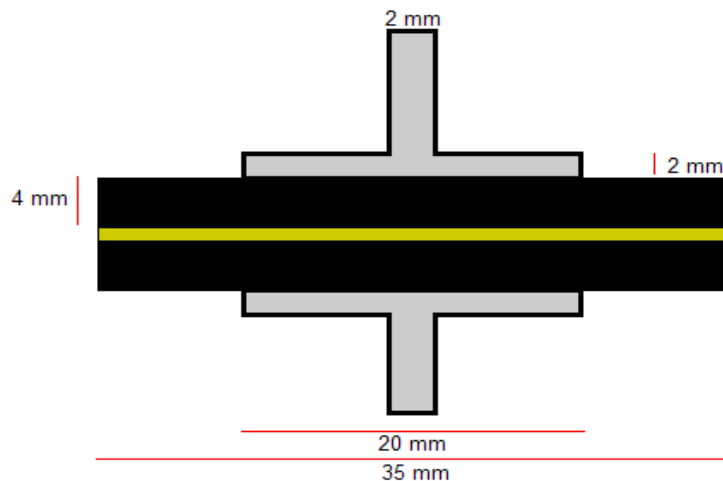


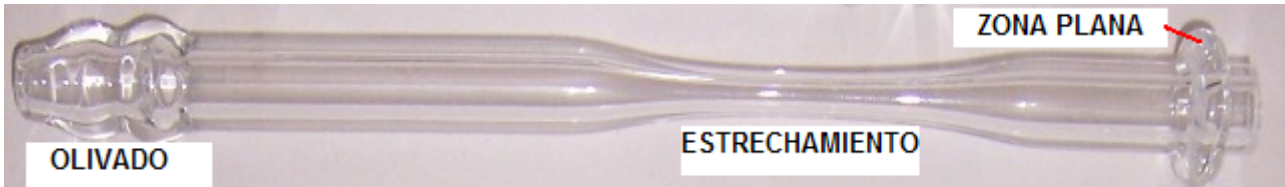
Abbildung : Experimentelles -setup für die Traktionsprobe.

Die Verbindungsstellen zwischen den Ceramikplatten wird mit Hilfe von Lupe und Elektronenmikroskop untersucht. Weitergehend wird unter zu Hilfenahme des Mikroskops die Komposition einiger der Verbundstoffe untersucht.

Abschließend werden einige Proben mit dynamischen Vakuum durchgeführt, um das maximale Vakuum zu evaluieren, sowie die Geschwindigkeit des darauffolgenden Druckanstiegs und die Dauer der Endstandhaltung des erzeugten Vakuums nach dem Abschalten der Vakuumpumpe.

## Glasrohre

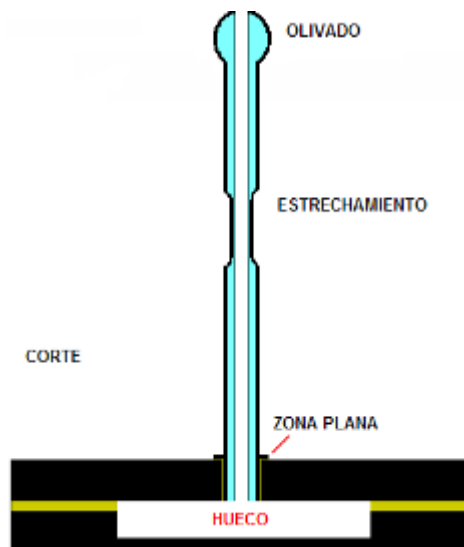
Ausgewählt wird der benutzte Rohrtyp nach folgenden Kriterien: eine Form um sie mit der Platte zu verbinden ohne sie zu verschließen, sowie die Möglichkeit sie während des Prozesses in der korrekten Position zu halten. Als optimal Herausgestellt hat sich folgende Form: Verdickt, Verengt, Abgeflacht.



*Abbildung : Optimierte Rohrform*

## Fertiges Werkstück

In dem Schema dargestellt das fertige Werkstück erhalten mit den zuvor beschriebenen Optimierens Schritten:



*Abbildung: Schema des fertigen Werkstückes.*

## Vakuuminstallation

In den ersten Vakuumproben wird mit der Verfügbaren Einrichtung gearbeitet, ein späteres designe erlaubt eine direkte Erzeugung des Vakuums sowie das Einleiten des Gases. Wichtig sind die Turbomolekularpumpe, Druckmesser, Ventil zum Schutz der Pumpe, Gasflasche zum Befüllen ect.

## Licht Erzeugung

Sobald ein konstantes Vakuum erreicht ist, kann das Werkstück mit Gas befüllt werden und anschließend verschlossen werden. Aufgrund von der unpräzisen Dosierung des geringen Gasvolumens, wird hier eine Expertenmeinung eingeholt, sowie die Hilfe desselben in Anspruch genommen zur Befüllung des Werkstückes.

Zur Stimulierung des Gases wird eine Piezozündung benutzt, welche im Bereich von tausend Volt betrieben werden kann. Das Ziel ist die Erzeugung von Licht im fertigen Werkstück und die Untersuchung ob es möglich ist erhellte Grafiken sichtbar zu machen.

## Introduction

### Aesthetic

In cooperation with the University of Zaragoza the company Balay, part of the BSH, develops various projects regarding induction cookers.

One branch of the investigation focuses on material and within this searching for a new aesthetic to be able to differ the product from the ones provided by the competitors.

New processes have to be found to change the aesthetic of the ceramic hob since the ceramic for the whole market is provided by one company, leading to the fact that the ceramic hob as the induction cookers all have the same aspect although differing in electronics and quality.

Like seen in the figure the two versions with which the buyer is confronted.

- The common black version.
- A transparent hob, obtained by a colored undercoat giving it a white or metallic aspect.

The buyer is only attend to the appearance and the price, with which some characteristics are indicated but regarding the electronics nor other important characteristics like the maximal temperature, the speed of response or the reliability the buyer has no chance to differ. It must be made possible to bring out these differences in the aesthetic of the ceramic hob.



*Figure : Ceramic black and white.*

One possibility distinguishing mark could be the illumination of the surface or a part of the surface in shape of a geometric symbol or letter with florescent gas.

## Illumination

Resume of the theory of gas-discharge lamps *Anexo :Teoría* [1][2][3]

To illuminate this lamps the isolating gas has to be in a conducting state in which it is in the form of a cold plasma.

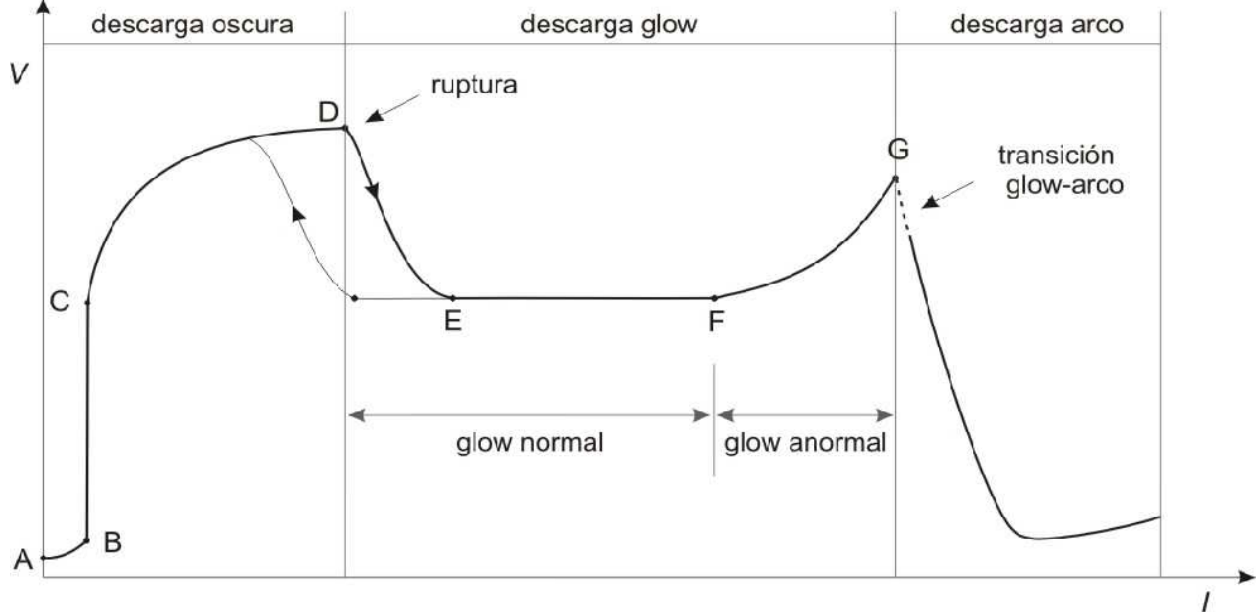


Figure: V-I Gas discharge lamps.

In the figure the different phases of the process is shown. By increasing of the tension the point is reached in which electrons collide with other molecules and liberate new electrons. This is leads to the so called "Towsend Effect", in the graph point C and D.

The electrons are accelerated by the electric field what enables them to carry out an inelastic jolt liberating new electrons. Since a gas at low pressure incorporates less molecules, the electrons can travel longer distance until colliding with a molecule loosing the energy.

The Point D is the point of electric arc discharge, the Paschen curves characterize this point for various gases by the equation *Tension X Distance between electrodes*

Penning discovered that some mixtures of gas reduce the point of electric arc discharge, e.g. Neon mixed with Argon.

As the voltage increases (passing the point D) to the ionization point the Townsend discharge happens just as glow discharge becomes visible, this is the start of the normal glow range (E-F). Visible light is emit as the electrons return to the core close shells.

As the voltage is increased above the normal glow range, abnormal glow begins. If the voltage is increased to the point the cathode glow covers the entire cathode arc discharge begins. The lamps should never be operated at arc discharge since the high temperatures damage the build- up.

The pressure inside of the tubes es 25 mbar operated with a Penning mixture and 28 mbar in the case of pure neon.



The state of Investigation at this point of time:

- 1) Understatement of the physical processes which lead to the illumination of Low-pressure lamps (*Anexo A*).
- 2) Evaluation of the circumstances to produce the glow.
- 3) Usage of spot lamps or ones of few cm of length.
- 4) Combination of the technics in an induction cooker.

With this information it is possible to start a concrete planing for the use of neon-light in ceramic hobs, as well as the appropriation of the dimension and the necessary tension.

The project focuses in the construction of a specimen in which the gas be injected right below the ceramic plate and with this obtaining lighted geometric forms as squares, rings or letters.

### **Procedure :**

Manufacturing of the specimen:

- Scratching of geometric figures in the ceramic plate.
- Closing of the hole by a second plate.
- Introduction of the gas in the hole and stimulation of the gas.



Figure : Scratched hole and closure by combination of the two pieces.

A development and optimization of the following steps takes place:

### Scratching

The first step is the scratching of the specimen, the problem is that it is not worked with the raw material but with a very hard and difficult to process ceramic.

First of all the scratching done with the laser technic is analyzed. Used are two different laser a Nd:YAG and a Nd:YVO4. A doctor thesis is used as guide for the needed information.

*Laser Nd:YAG* the parameters described in the thesis are used (frequency, speed, distance ect.)

Analyzed is the influence of the distance between the laser and the specimen to optimize the process. Since the sound indicates the effectiveness of the process it is used as rule parameter, nonetheless this is a manual adjustment and it gives rise to various experimental errors.

*Laser Nd:YVO4:* By combining the various process parameter an optimal setting is found.

An efficiency study is made for both lasers evaluating the distance between the laser to the surface. Various profiles are obtained with by varying the number of runs over the surface, following the surface structure is evaluated with the program PLU and the median value of material discharge is calculated. Comparing the efficiency of the laser  $[(\text{mm}^3 \text{ discharge})/\text{s}]$  the process is optimized.

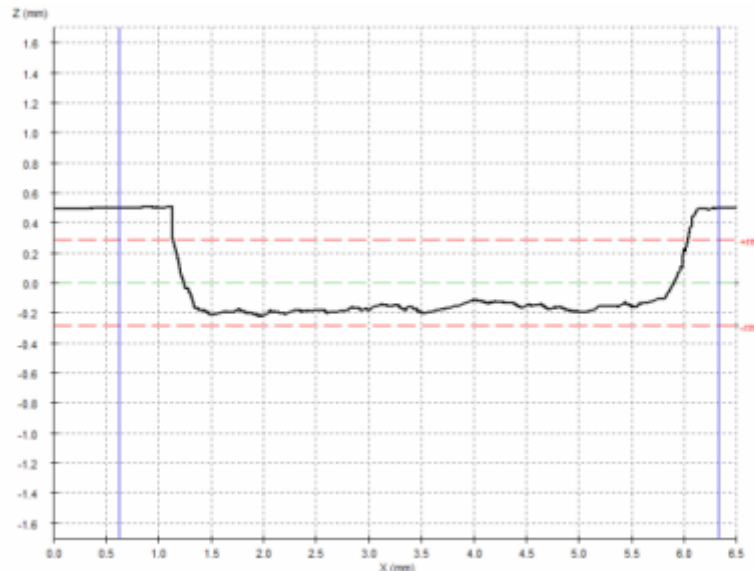


Figure: Profile of a sample worked with Laser Nd:YAG, obtained with Confocal

*Water jet cutting:* The adjustments are done by a company specialized in this field.

*Diamante milling:* It is searched for a diamante milling machine that is designed for cutting glass as well possible is a manuel process of milling.

## Junction

With the scraping completed the hole has to be closed to obtain a hole for the gas. Done is that by using a plate of the same size, the challenge is to find a material to form the junction. This material has to fulfill the mechanical demands, it has as well the task to close the hole well to be able to produce a low pressure chamber. It is important to mention that the ceramic changes the structure above 800 °C.

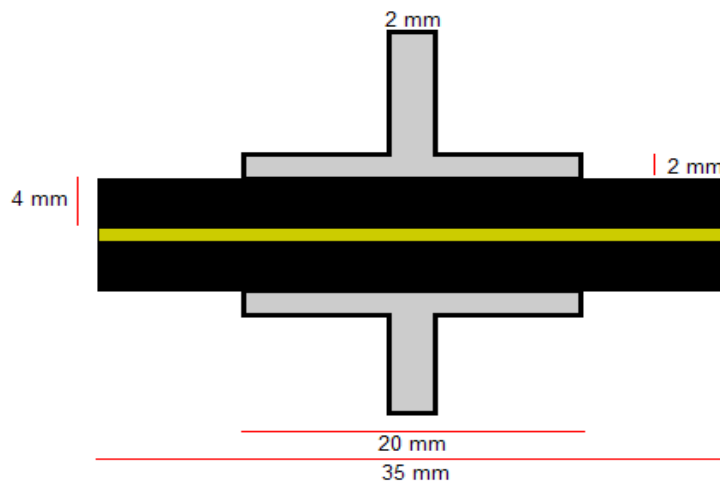
*Glue:* Used is a glue that was already used in a different project that was valuable to join this kind of material.

*Glass:* Searched is for a glass easy to be produced of a series of oxides, or the glass is purchased commercial.

*Boron oxide:* The usage of this oxide promises a junction with the desired properties.

*Resin epoxide:* The use of a polymer incorporates some advantages as the easy application, good long-term stability and a safe sealing. A disadvantage is the temperature of usage. The focus lies on a epoxide resin.

A traction experiment is some for all of the junctions, the experimental setup is as demonstrated in the figure. The metallic brackets are connected to the two ceramic plates on which the experiment is preformed. Main interest lies on the maximal force that can be applied before rupture.



*Figure : Experimental -setup for the traction test.*

The Junction between the plates is observed with a magnifying glass as well as electron microscopy. Furthermore is the composition of the junction material analyzed under the microscope.

Following some tests are done in a dynamic vacuum to evaluate the lowest possible vacuum, the speed of the pressure increase and the time for which the vacuum can be held after turning the pump off.

### Glass tubes

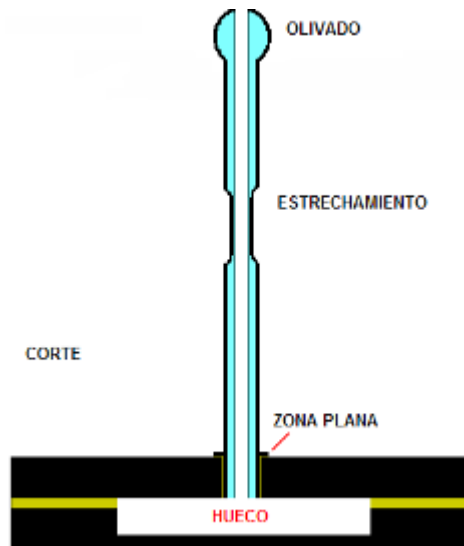
The chosen tube type is elected regarding the following criteria: Having a shape so that a junction is formed but the plate is not closed and the possibility to keep the tube in the correct position during the experiments. It turned out as ideal having first a thickened part followed by a narrow stretch and at the edge having a plane zone.



*Figure : Optimized tube shap.*

### Complete specimen

Sown in the scheme the complete specimen embodying all the steps of optimization.



*Figure: Scheme of the complete specimen.*

### Vacuum istalation

In the first installation of the vacuum it was worked with the available station, later on a new installation is designed giving the option to produce the vacuum and directly introducing the gas. Important parts are the Turbomolecularpump, pressure gauge, protection valve for the pump, gas bottle for filling ect.

### Light generation

When reached a constant vacuum the specimen is filled with gas and sealed. Due to an inaccurate filling with small amounts of gas of the specimen an expert is consulted and for the filling his help is demanded.

To stimulate the gas a piezoelectric element is used, which operates at a view thousand volt. The gole is to illuminate the specimen and the examination if it is possible to obtain lighted graphics in the ceramic hob.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vicente Franco Martín. *Manual Práctico de Iluminación*. Ediciones A.Madrid.
- [2] Departamento de Física de Saint John's University (EEUU)  
<http://www.physics.csbsju.edu/tk/370/jcalvert/dischg.htm.html> 26/10/2010
- [3] Profesor Carlos Acha. *Textos de la práctica 5*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.,  
<http://www.df.uba.ar/users/acha/Lab5/Glow.pdf> 26/10/2010
- [4] Eva S. Carod, José A. Domínguez, María Jesús Velilla. *Máquinas eléctricas*. Copy Center Digital, Zaragoza 2007
- [5] Daniel Sola Martínez. *Tesis Doctoral: Mecanizado por Láser de Materiales Cerámicos y Vitrocerámicos*.  
Dpto. De Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos. Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón. Universidad de Zaragoza-CSIC
- [6] Texto ofrecido por investigadores del laboratorio Confocal de la Universidad de Zaragoza.
- [7] Web dedicada a los elementos de la tabla periódica  
[www.webelements.com](http://www.webelements.com) 26/10/2010
- [8] Web dedicada a vidrios patentados  
[www.sciglassweb.com](http://www.sciglassweb.com) 26/10/2010
- [9] Rami Arieli: "*The Láser Adventure*"  
Versión en español por A. Requena, C.Cruz, A. Bastida y J. Zúñiga. Universidad de Murcia.  
<http://www.um.es/LEQ/laser/Preface/Toc.htm> 26/10/2010
- [10] Rodrigo Fernandez - Pacheco Chicón. *Synthesis, Characterisation and Funcionalisation of Magnetic Nanoparticles for Biomedical applications*.  
Prensas universitarias de zaragoza
- [11] O'Donell B./ Sandoval J./ Paukste F., *FUENTES LUMINOSAS, capítulo 4, Libro ILUMINACIÓN EFICIENTE*. Proyecto ELI Ed., 2002
- [12] Mikell P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas* Pearson Educación, 1997
- [13] José Marcos Alonso Álvarez. *Sistemas electrónicos para iluminación*  
Universidad de Oviedo Dpto. Ingeniería Eléctrica - Tecnología Electrónica
- [14] Eugene D. Olsen Reverte *Métodos ópticos de análisis* 1990
- [15] Web del servicio de microscopía electrónica de la Universidad de Zaragoza.  
[http://wzar.unizar.es/invest/sai/mic\\_ele/mic\\_ele.html](http://wzar.unizar.es/invest/sai/mic_ele/mic_ele.html) 26/10/2010

## **Empresas que han proporcionado información**

Grupo BSH

Rótulos Plasneón

Cortenfrío

Taller de vidrio de la Universidad de Zaragoza.

Red Eléctrica de España

Pfeiffer Vacuum

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

- Figura 1: Placas de inducción con vitrocerámica color metalizado y vitrocerámica negra
- Figura 2: Lámparas de descarga de pequeño tamaño (Gases nobles)
- Figura 3: Diseño inicial del hueco escarbado y unión de dos placas
- Figura 4: Diseño inicial de la pieza final, con dos placas unidas que contienen un hueco escarbado en el interior, con el tubo se conectan el hueco y el sistema de vacío
- Figura 5: Si el electrón no es arrancado del átomo, al desexcitarse emite radiación
- Figura 6: Los electrones arrancados al átomo mantienen la descarga
- Figura 7: Lámparas de descarga emiten luz bajo línea de alta tensión
- Figura 8: Efectos del láser al variar la distancia muestra-lente alrededor de la distancia focal
- Figura 9: Rendimiento del láser en función del número de pasadas realizadas.
- Figura 10: Comparación entre la profundidad alcanzada idealmente reenfocando el láser cada pasada, caso real aplicando diez pasadas sin reenfocar y un caso intermedio en el que se reenfoca cada 6 pasadas.
- Figura 11: Esquema de matriz láser y foto de la situación real con el láser Nd:YVO4.
- Figura 12: Eficiencia en muestras con 10 pasadas láser aplicadas, en función de la velocidad.
- Figura 13:  $\text{mm}^3/\text{s}$  según el nº de pasadas, muestras realizadas a 150 mm/s.
- Figura 14: Muestra escarbada con láser 20 mm x 20 mm con agujero pasante.
- Figura 15: Punta de diamante y muestras escarbadas.
- Figura 16: Detalle de la muela de diamante desgastada.
- Figura 17: Esquema de una muestra preparada para el procedimiento tracción.
- Figura 18: Distintas cantidades de fundente aplicadas en las muestras.
- Figura 19: Muestra 9 con poros y marca del disco de corte, foto obtenida con lupa.
- Figura 20: Muestra con fundente nº14, traccionada.
- Figura 21: Capa de fundente vista con secundarios, muestra 11.
- Figura 22: Imagen tomada con electrones secundarios a la muestra 11, ampliación de un poro.
- Figura 23: Imagen tomada con electrones retrodispersados y composición de la muestra 11.
- Figura 24: Imagen tomada con electrones secundarios y tabla de composición del material en polvo
- Figura 25: Muestra 1 (Mezcla A) antes y después de mojarse.
- Figura 26: Muestras de estudio individual de los componentes de la mezcla A, se indica el número de muestra y el disolvente en el caso de que se utilice.
- Figura 27: Ejemplo de vidrios con componentes y propiedades.
- Figura 28: Muestra 5, se observa la zona cuadrada marcada con láser.
- Figura 29: Muestra 1 con óxido de boro cortada y observada con lupa.
- Figura 30: Muestra 3 con araldit, foto con lupa .
- Figura 31: Muestra 3 con araldit, foto con SEM, se observan burbujas.
- Figura 32: Muestra 3 analizada con SEM, foto y tabla con composición.
- Figura 33: Estructura soporte de los tubos.
- Figura 34: Agujero láser ciego, con tubo introducido y luego cortado.
- Figura 35: Modificaciones a la geometría del tubo.
- Figura 36: Pieza final.
- Figura 37: Varias piezas finales.
- Figura 38: Esquema pieza final exterior.
- Figura 39: Esquema pieza final corte.
- Figura 40: Instalación de vacío básica
- Figura 41: Cátodo frío
- Figura 42: Detalle de la unión vidrio-goma
- Figura 43: Gráfica de presión en la instalación, vacío dinámico.
- Figura 44: Instalación completa de vacío e introducción de gas.



Figura 45: Algunos de los elementos de la instalación de vacío.  
 Figura 46: Detalle unión a la muestra.  
 Figura 47: Campo  $E_{\phi}$  alrededor de una bobina de la placa de inducción.  
 Figura 48: Valoración de potencia capturada alrededor de la bobina de la placa.  
 Figura 49: Espiras arrolladas alrededor de la bobina de la placa.  
 Figura 50 : Neón 7 cm entre electrodos bajo placa de inducción 1000 V.  
 Figura 51: Luz en pieza final obtenida con chispómetro.

#### **Anexo A**

Figura 52: Curva tensión-intensidad en tubo de descarga de gas  
 Figura 53: Descarga oscura, detalle de la figura 52  
 Figura 54: Curvas Paschen, tensión de ruptura en función de presión y distancia entre electrodos  
 Figura 55: Curvas Paschen con mezclas Penning, la tensión de ruptura es menor

#### **Anexo B**

Figura 56: Reforzamiento de la acción láser, los puntos representan átomos gaseosos, las flechas simbolizan fotones.  
 Figura 57: Absorción de un fotón, condiciones iniciales y finales  
 Figura 58: Proceso de inversión de la población  
 Figura 59: Emisión espontánea de un fotón, condiciones iniciales y finales  
 Figura 60: Emisión estimulada de un fotón, condiciones iniciales y finales  
 Figura 61: Láser de 3 y 4 niveles.  
 Figura 62 : Curva de ganancia del láser, y anchuras de banda emitidas.  
 Figura 63: Modos transversales (TEM)  
 Figura 64: Superposición de modos transversales (TEM)  
 Figura 65: Láser Nd(YAG)  
 Figura 66: Láser Nd(YVO4)

#### **Anexo C**

Figura 67: Confocal Sensofar  
 Figura 68: 10 pasadas láser Nd:YAG en forma de rectángulo 5 mm x 20 mm.  
 Figura 69 : Perfil Confocal de la muestra con 10 pasadas rectangular  
 Figura 70: Las líneas rojas representan las zonas donde se ha hecho un perfil con confocal.  
 Figura 71: Horno  
 Figura 72: Muestras unidas con mezcla A y con óxido de boro en seco, las placas se desplazan una sobre otra durante el procesado en horno.  
 Figura 73: Máquina de corte Minitom Struers  
 Figura 74: Lupa estereoscópica  
 Figura 75: Barrido electrónico, se aprecia el haz incidente, los tres tipos de electrones de los que se obtiene la información y los transmitidos a través de la muestra.  
 Figura 76: Microscopio electrónico  
 Figura 77: Resina y endurecedor para SEM  
 Figura 78: Lija rotatoria utilizada en muestras embutidas  
 Figura 79: Limpieza con ultrasonidos  
 Figura 80: Muestras embutidas en resina para SEM  
 Figura 81: Microanálisis SEM  
 Figura 82: Máquina de tracción esquema y foto máquina Instron.  
 Figura 83: Curva tensión-deformación  
 Figura 84: T Aluminio  
 Figura 85: Esquema de las muestras de tracción con la T ya unida  
 Figura 86: Muestra preparada para tracción, las mordazas sujetan firmemente las T de aluminio  
 Figura 87: Limpieza T en placa calefactora 20 min 200 °C  
 Figura 88: Valoración de los agarres  
 Figura 89: Medidores de vacío  
 Figura 90: Cátodo frío

Figura 91: Detalle de unión entre tubos con anillo de centrado, junta de neopreno y abrazadera  
 Figura 92: Fundente  
 Figura 93: Óxido de silicio  
 Figura 94: Óxido de boro  
 Figura 95: Araldit  
 Figura 96: Placas cortadas para colocar producto de unión  
 Figura 97: Báscula de precisión para controlar la cantidad de producto de unión  
 Figura 98: Campana extractora, etanol, mascarilla, guantes y pipeta para usar fundente y óxidos.  
 Figura 100: Electrodo y electrodos unidos para crear lámparas de pequeño tamaño  
 Figura 101: Osciloscopio

#### **Anexo D**

Figura 101: 1 pasada láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 102: 2 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 103: 4 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 104: 6 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 105: 8 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 106: 10 pasadas láser, perfil a 5 mm del extremo del rectángulo  
 Figura 107: Marca 1 pasada láser Nd:YAG  
 Figura 108: Marca 10 pasadas láser Nd:YAG  
 Figura 109: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 40 mm/s  
 Figura 110: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 50 mm/s  
 Figura 111: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 90 mm/s  
 Figura 112: 1 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 150 mm/s  
 Figura 113: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 40 mm/s  
 Figura 114: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 50 mm/s  
 Figura 115: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 90 mm/s  
 Figura 116: 10 pasada láser Nd:YVO4, perfil en el centro 150 mm/s  
 Figura 117: mm<sup>3</sup>/s arrancados en muestras de 1, 2, 4, 6, 8, 10 pasadas a distintas velocidades  
 Figura 118: Muela de diamante 7144  
 Figura 119: Comparación cuadrado con láser, punta y punta con pasada final láser  
 Figura 120: Muestra cerrada con fundente, distintas cantidades, posiciones, con o sin etanol  
 Figura 121: Tracción muestra con FUNDENTE (0,5 g) enfrentando caras lisas  
 Figura 122: Tracción muestra con FUNDENTE (2 g) enfrentando caras lisas  
 Figura 123: Tracción muestra con FUNDENTE (0,5 g) enfrentando cara rugosa y lisa  
 Figura 124: Tracción muestra con MEZCLA A  
 Figura 125: Tracción muestra con BORO  
 Figura 126: Tracción muestra con BORO  
 Figura 127: Tracción muestra con BORO  
 Figura 128: Tracción muestra con BORO, se le ha realizado choque térmico previo  
 Figura 129: Tracción muestra con ARALDIT enfrentando caras lisas  
 Figura 130: Tracción muestra con ARALDIT enfrentando caras lisas  
 Figura 131: Tubos unidos con fundente  
 Figura 132: Tubo tipo 1, una pequeña cantidad de Araldit ha entrado  
 Figura 133: Tubo tipo 1, aplicando presión no ha entrado Araldit  
 Figura 134: Tubo tipo 2, una pequeña cantidad de Araldit ha entrado  
 Figura 135: Tubo tipo 2, aplicando presión, no entra Araldit  
 Figura 136: Tubo tipo 2, con presión y con agujero que permite hacer vacío, no ha entrado Araldit  
 Figura 137: Tubo tipo 5, totalmente taponado  
 Figura 138: Tubo tipo 5, aplicando presión, no entra Araldit  
 Figura 139: Introduciendo el tubo en un agujero perforado en la placa de su mismo diámetro, aplicando exteriormente el Araldit, se consigue el mejor de todos los resultados  
 Figura 140: Gráfica de presión en la instalación una vez apagada la bomba

## TABLAS

- Tabla 1: Selección de transformadores para tubos de neón, argón o mezclas Penning.
- Tabla 2: Efectos del láser al variar la distancia muestra-lente alrededor de la distancia focal.
- Tabla 3: Eficiencia láser dependiendo del número de pasadas.
- Tabla 4: Matriz 9 con los parámetros de las mejores marcas escarbadas, a las que se aplica el Procedimiento confocal.
- Tabla 5: Ventajas e inconvenientes de escarbado.
- Tabla 6: Muestras con fundente cortadas para examen en lupa y microscopio electrónico.
- Tabla 7: Detalles y resultado de muestras con fundente traccionadas.
- Tabla 8: Muestra de fundente analizada con SEM.
- Tabla 9: Muestras de distintos productos colocados sobre una placa, se les aplica Proceso Horno.
- Tabla 10: Muestra de mezcla A uniendo 2 placas, se le aplica Proceso Horno.
- Tabla 11: Unión de dos placas con Mezcla B, procesado en horno.
- Tabla 12: Muestras óxido de boro ,cortadas o traccionadas.
- Tabla 13: Muestras realizadas con material vitrocerámico transparente.
- Tabla 14: Muestra unida con Araldit observada con microscopio electrónico.
- Tabla 15: Muestras tracción Araldit.
- Tabla 16: Resultados con los productos de unión.
- Tabla 17: Tipos de tubo disponibles.
- Tabla 18: Optimización del corte de los tubos.
- Tabla 19: Optimización del pegado de tubos.
- Tabla 20: Optimización del pegado de tubos con estructura soporte.
- Tabla 21: Muestras con tubo introducido en perforación previo a aplicar araldit.
- Tabla 22: Pruebas vacío con tapa o con tubo taponado.
- Tabla 23: Piezas de la instalación completa.
- Tabla 24: Tensión en bornes de las espiras medido con voltímetro, circuito abierto.
- Tabla 25: Espiras arrolladas, conectado a luz de neón valores rms.
- Tabla 26 :valores ópticos para los dos láser utilizados
- Tabla 27: Propiedades del material vitrocerámico Ceran Suprema
- Tabla 28: Tiempo de pasada a distintas velocidades
- Tabla 29: Datos para valoración de eficiencia y profundidad por pasada media (Nd:YAG)
- Tabla 30: Profundidad  $\mu\text{m}$  según el número de pasadas en cada caso
- Tabla 31: Matrices 1, 2, 3
- Tabla 32: Mejores combinaciones de la tabla 29
- Tablas 33:Matrices 4, 5, 6
- Tabla 34:Matriz 7
- Tabla 35:Matriz 8
- Tabla 36:Matriz 9 Se le realiza el Procedimiento Confocal
- Tabla 37: Profundidades a 30 KHz, distintas velocidades (Amarillo) y según el número de pasadas. Con 6 Datos por perfil se calcula profundidad media, profundidad media por pasada y eficiencia.
- Tabla 38: Eficiencia  $\text{mm}^3/\text{s}$ .
- Tabla 39: Algunos vidrios patentados , con composición y temperatura de fusión.
- Tabla 40: Pruebas vacío con tres materiales de unión
- Tabla 41 Pruebas vacío, diferencias al sellar fundente u óxido de boro con araldit.
- Tabla 42: Datos de vacío sobre velocidad de variación de presión
- Tabla 43: Datos de vacío para realización de las gráficas sobre mantenimiento del vacío con la inercia de la máquina apagada



