



**Universidad**  
Zaragoza

## Proyecto Fin de Carrera

# **Mecanizado por láser de cerámicas avanzadas y vitrocerámicas en medios líquidos**

Autor

Antonio García Girón

Director

D. Daniel Sola Martínez

PONENTE

D. José Ignacio Peña Torre

Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Noviembre 2014



## **Agradecimientos**

*A mi familia y amigos.*

*A Sofía.*

*Y en especial a José Ignacio y Daniel, por su tiempo, su ayuda y por haberme enseñado con paciencia desde el primer día.*



# **Resumen**

## **“Mecanizado por láser de cerámicas avanzadas y vitrocerámicas en medios líquidos”**

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un método eficiente para la mecanización de superficies de cerámicas avanzadas y vitrocerámicas con propósitos funcionales, como por ejemplo para que sirvan de alojamiento a sensores, guías, sujetaciones, etc. Para ello se ha modificado el método convencional de mecanizado en aire colocando un medio líquido auxiliar sobre la pieza a mecanizar. La presencia del fluido aporta algunas ventajas, como son la mejor eliminación del material arrancado, o la utilización de las ondas de choque producidas al incidir el haz láser en el fluido para generar un mayor daño en la superficie a mecanizar.

Previamente se han realizado pruebas de mecanizado en aire que servirán de comparación en el análisis con los resultados obtenidos en los mecanizados asistidos por fluidos.

En los marcas asistidos con agua se han variado los parámetros de mecanizado para determinar el efecto que tienen estas variables y así obtener las condiciones óptimas de marcado.

Se han realizado experimentos en tres materiales distintos (Vitroceramica SCHOTT Ceran® Suprema, alúmina y circona 8YSZ) para comprobar los efectos en distintos tipos de cerámica, y variado los espesores de la capa de líquido para comprobar el efecto en la eficiencia del mecanizado.

Se ha utilizado un líquido más viscoso para comprobar el efecto de la viscosidad del líquido auxiliar en el mecanizado.

Las piezas ensayadas se han caracterizado mediante microscopía confocal, óptica y electrónica de barrido y se han realizado análisis mediante técnicas de espectroscopia Raman, para identificar posibles cambios estructurales en los materiales.



# Índice de contenidos

## Memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Método experimental.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Ensayos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Análisis de las muestras .....</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 3. Mecanizado en aire.....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 4. Variación de parámetros para el mecanizado asistido por agua .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 5. Mecanizado en distintos materiales variando el espesor de la capa líquida .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1. Vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema .....</b>	<b>17</b>
<b>5.2. Circona 8YSZ .....</b>	<b>23</b>
<b>5.3. Alúmina.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4. Comparativa de los 3 materiales .....</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo 6. Utilización de un fluido auxiliar más viscoso: etilenglicol .....</b>	<b>34</b>
<b>Capítulo 7. Conclusiones y pasos futuros .....</b>	<b>36</b>

## Anexos

<b>Anexo A. Fundamentos de la tecnología láser .....</b>	<b>41</b>
<b>A.1. Funcionamiento .....</b>	<b>41</b>
<b>A.2. Procesos de interacción atómica .....</b>	<b>43</b>
<b>A.3. Características del haz.....</b>	<b>48</b>
<b>A.4. Tipos de láseres .....</b>	<b>54</b>
<b>A.4.1. Modos de operación .....</b>	<b>55</b>
<b>A.4.2. Láser Nd:YAG .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo B. Principios del procesado láser asistido por líquidos.....</b>	<b>58</b>
<b>B.1. Introducción .....</b>	<b>58</b>
<b>B.2. Mecanismos fundamentales en el líquido .....</b>	<b>59</b>
<b>B.2.1. Penetración del haz en el líquido .....</b>	<b>60</b>
<b>B.2.2. Emisión de ondas de choque .....</b>	<b>61</b>
<b>B.2.3. Formación de burbujas .....</b>	<b>62</b>
<b>B.2.4. Formación de nanopartículas .....</b>	<b>63</b>
<b>B.3. Ventajas e inconvenientes .....</b>	<b>65</b>
<b>B.4. Aplicaciones.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo C. Materiales .....</b>	<b>69</b>
<b>C.1. Vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema .....</b>	<b>69</b>

<b>C.2. Cerámicas avanzadas .....</b>	<b>71</b>
<b>C.3. Fluidos utilizados .....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo D. Tablas .....</b>	<b>74</b>
<b>D.1. 8YSZ en aire, 4 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>74</b>
<b>D.2. 8YSZ en aire, 4 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>75</b>
<b>D.3. Alúmina en aire, 4 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>76</b>
<b>D.4. Alúmina en aire, 4 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>77</b>
<b>D.5. Vitrocerámica en aire, 4 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>78</b>
<b>D.6. Vitrocerámica en aire, 4 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>79</b>
<b>D.7. 8YSZ en aire, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>80</b>
<b>D.8. 8YSZ en aire, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>81</b>
<b>D.9. Alúmina en aire, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>82</b>
<b>D.10. Vitrocerámica en aire, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>83</b>
<b>D.11. Vitrocerámica en aire, 20 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>84</b>
<b>D.12. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 4 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>85</b>
<b>D.13. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 4 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>86</b>
<b>D.14. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>87</b>
<b>D.15. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>88</b>
<b>D.16. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 1kHz – Profundidad.....</b>	<b>89</b>
<b>D.17. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 1kHz – Anchura .....</b>	<b>90</b>
<b>D.18. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 5kHz – Profundidad.....</b>	<b>91</b>
<b>D.19. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 5kHz – Anchura .....</b>	<b>92</b>
<b>D.20. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 10 mm/s, 1kHz – Profundidad.....</b>	<b>93</b>
<b>D.21. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 10 mm/s, 1kHz – Anchura .....</b>	<b>94</b>
<b>D.22. Vitrocerámica en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>95</b>
<b>D.23. Vitrocerámica en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>96</b>
<b>D.24. Vitrocerámica en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad.....</b>	<b>97</b>
<b>D.25. Vitrocerámica en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura .....</b>	<b>98</b>
<b>D.26. 8YSZ en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>99</b>
<b>D.27. 8YSZ en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>100</b>
<b>D.28. 8YSZ en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>101</b>
<b>D.29. 8YSZ en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>102</b>
<b>D.30. 8YSZ en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>103</b>
<b>D.31. 8YSZ en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>104</b>
<b>D.32. Alúmina en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	<b>105</b>
<b>D.33. Alúmina en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	<b>106</b>

<b>D.34. Alúmina en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	107
<b>D.35. Alúmina en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	108
<b>D.36. Alúmina en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Profundidad .....</b>	109
<b>D.37. Alúmina en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2kHz – Anchura.....</b>	110
<b>D.38. Vitrocerámica en 3 mm de etilenglicol, 20 mm/s, 2kHz .....</b>	111
<b>Anexo E. Gráficas .....</b>	112
<b>E.1. Gráficas individuales de la vitrocerámica .....</b>	112
<b>E.2. Gráficas individuales de la circona 8YSZ .....</b>	115
<b>E.3. Gráficas individuales de la alúmina .....</b>	118
<b>E.4. Gráficas comparativas por material, según la capa de líquido .....</b>	121
<b>E.5. Gráficas comparativas por profundidad de capa de líquido, según el material .....</b>	123
<b>Bibliografía .....</b>	126



# ***Memoria***



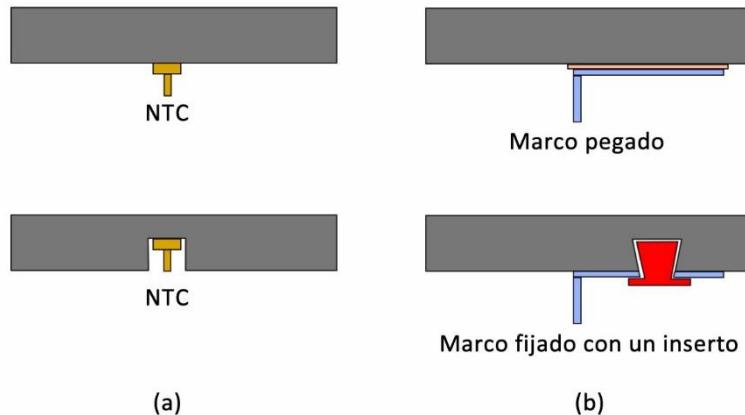
# Capítulo 1. Introducción

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Nuevos Materiales y Procesos en Electrodomésticos, Subproyecto 1: Marcaje de Vidrios y Cerámicos Mediante Tecnologías Láser”, desarrollado entre BSH Electrodomésticos España S.A., la Universidad de Zaragoza y la Universidad Carlos III de Madrid.

El objetivo de este proyecto es estudiar el efecto del mecanizado por técnicas láser en medios líquidos en vitrocerámicas y cerámicas avanzadas, con el fin de mecanizar pequeños agujeros y ranuras funcionales en estos materiales.

Las cocinas de inducción constan, entre otros elementos, de una placa de material vitrocerámico, que sirve de soporte para los utensilios y recipientes de cocina, y a su vez contiene los controles que sirven de interfaz entre el usuario y la cocina. Estas encimeras se fabrican de material vitrocerámico porque sus características lo convierten en el material más apropiado para su aplicación, presentan una alta resistencia al choque térmico y no transfieren calor a las zonas que no están siendo calentadas, con lo que se minimizan las pérdidas de calor. Para la realización de este proyecto se han utilizado placas vitrocerámicas de SCHOTT Ceran® Suprema, por ser la empleada en las cocinas fabricadas por BSH Electrodomésticos España S.A.

La finalidad de realizar pequeñas ranuras y agujeros funcionales es poder introducir sensores NTC de temperatura, para que estén más próximos a la superficie de la vitrocerámica y medir con mayor precisión, así como la fijación de otros tipos de dispositivos. Otra función es la inclusión de insertos para sujetar el vidrio con el marco metálico de la cocina, proceso que actualmente se realiza mediante procesos de pegado.



**Figura 1.1. (a) Sensor NTC en su posición clásica y en su posición nueva. (b) Sujeción del vidrio y el marco, por pegado y mediante inserto.**

En anteriores trabajos se demostró que la realización de ranuras y agujeros funcionales en vitrocerámicas mediante técnicas láser es posible [1], aunque la lentitud del proceso lo hacía inviable a la hora de ser implantado en una línea de producción. Con el fin de solucionar este problema se han empleado técnicas de mecanizado láser asistido por líquidos, que presentan las siguientes ventajas respecto al mecanizado láser convencional [2]:

- 1) El material arrancado durante la ablación se suele depositar en la superficie mecanizada, de modo que dificulta la mecanización. Al existir un líquido sobre la superficie mecanizada, las partículas arrancadas se dispersan, quedando limpia la superficie y permitiendo que la profundidad mecanizada sea mayor.
- 2) Se forman en el líquido ondas de choque que producen una compresión sobre la superficie mecanizada.
- 3) Se producen procesos térmicos en el líquido, como vaporización o ebullición explosiva. Todo ello produce una alta presión, que favorece el mecanizado.
- 4) La ebullición hace que se produzcan burbujas en la superficie mecanizada, que al colapsarse generan gran cantidad de energía. Este es el fenómeno principal del mecanizado en presencia de líquidos. Durante la expansión de las burbujas, la presión y temperatura disminuye rápidamente, hasta que colapsan, en ese momento la temperatura y la presión aumenta y se genera una nueva burbuja y una

onda de choque. Al colapsar la burbuja se produce un fenómeno de cavitación, que arranca material de la superficie mecanizada.

5) En algunos casos, dependiendo del medio líquido, pueden producirse reacciones químicas que ayuden a la ablación o que produzcan cambios en la superficie mecanizada.

6) El hecho de mecanizar en presencia de líquidos evita que el material evaporado se disperse, formando partículas en el agua y evitando así la emisión de partículas en el aire.

Para poder llevar a cabo este trabajo se ha utilizado la siguiente metodología:

- Revisión bibliográfica (artículos, patentes, tesis) relacionada con el mecanizado láser y el mecanizado láser asistido por líquidos.
- Adaptación de los equipos de mecanizado por láser disponibles.
- Diseño de los experimentos, en los que se han estudiado las variables más relevantes del proceso, a saber: frecuencia de pulsos, potencia promedio de salida, velocidad de barrido del haz láser, posición del material a mecanizar respecto al plano focal, espesor de la capa líquida utilizada, distintos medios líquidos, etc.
- Desarrollo de los experimentos: procesado y caracterización de 3 materiales diferentes (Vitrocéramica SCHOTT Ceran® Suprema, alúmina, circona estabilizada con un 8% molar de itria (8YSZ)). Para la caracterización de los materiales se han utilizado técnicas de microscopía confocal, óptica y electrónica de barrido, análisis estructural (Raman), análisis químico...
- Discusión de los resultados y estudio de la viabilidad del proceso para su posible implantación en la industria.
- Redacción de la memoria, conclusiones y pasos futuros.

## Capítulo 2. Método experimental

La experimentación consta de 2 partes principales, la primera es la realización de los ensayos y la segunda la caracterización de las muestras obtenidas.

### 2.1. Ensayos

Para mecanizar las muestras se ha utilizado un sistema láser pulsado tipo Q-Switch bombeado por diodos, de la casa Rofin-Sinar, modelo E-line20, que trabaja a una longitud de onda fundamental de 1064 nm. El equipo tiene una potencia promedio de 11 W, haz en modo gaussiano ( $TEM_{00}$ ), y un factor de calidad  $M^2 < 1.3$ . El conmutador opto-acústico, Q-switch, controla el factor de calidad de la cavidad, permitiendo al sistema trabajar tanto en modo continuo como en modo pulsado generando, en este último caso, pulsos de unos pocos nanosegundos. A la salida del resonador un expulsor de x5 permite obtener un haz de diámetro máximo de salida de 14 mm. El equipo dispone de un sistema de espejos galvanométricos que deflectan el haz haciendo barridos en zig-zag según el patrón dibujado con el software de tipo CAD que controla el equipo.

Se han realizado diferentes marcas sobre probetas de vitrocerámica CERAN SUPREMA de SCHOTT®, alúmina y circona 8YSZ, de aproximadamente 5x5 cm de tamaño.

Para cada condición de marcado se realizan 3 marcas rectangulares iguales de 5 mm de longitud y 0.3 mm de anchura, así como un número identificador correspondiente a la posición de la pieza en el momento del mecanizado. Las marcas deben estar separadas lo suficiente para que al mecanizar cada una de ellas no se vea afectada la marca contigua por efectos térmicos o vibraciones, por ello se han separado una distancia de 2 mm. Cada surco se obtiene por barrido del haz con una separación de 10  $\mu\text{m}$ .

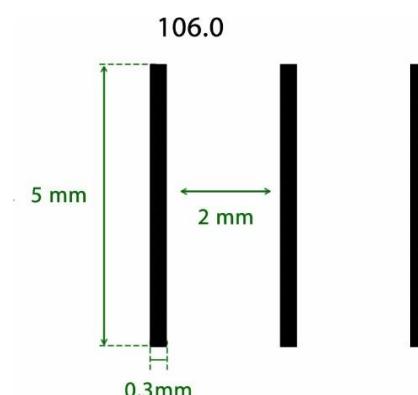
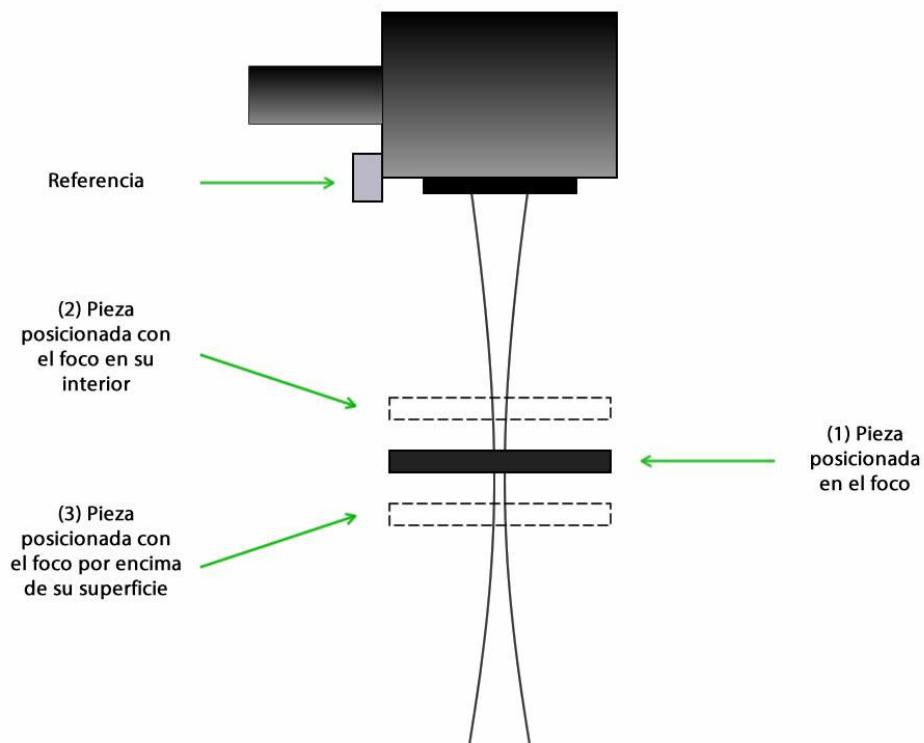


Figura 2.1. Plantilla y medidas de las marcas realizadas.

En cada probeta se han realizado marcas en diferentes posiciones respecto al plano focal, para estudiar la relación entre el rendimiento de ablación y la posición de la pieza.

Se sabe que para la lente de 100 mm utilizada el plano focal se encuentra a una distancia de 106 mm desde la posición de referencia.

Las probetas se colocan en una plataforma móvil en dirección del eje Z y se sujetan en un utilaje de aluminio, para evitar que la pieza se mueva o vibre, y conseguir la mejor calidad posible en las marcas. Con un calibre electrónico de precisión se mide la posición de la pieza respecto al sistema de referencia del sistema láser utilizado, de forma que se coloca primeramente a una distancia tal que el plano focal esté situado por encima de la superficie de la pieza de trabajo. Después de cada marca realizada se sube la plataforma 100 µm, de forma que la distancia entre la lente y la pieza se va reduciendo, el plano focal pasa por la superficie de la pieza, por el interior y finalmente por debajo de la pieza.



**Figura 2.2. Esquema del movimiento de la pieza respecto a la referencia del equipo láser. En (1) la pieza está posicionada en el plano focal de la lente. En (2) la pieza está más alta, de forma que el plano focal está situado en su interior. En (3) la pieza está más baja, de forma que el plano focal está sobre ella.**

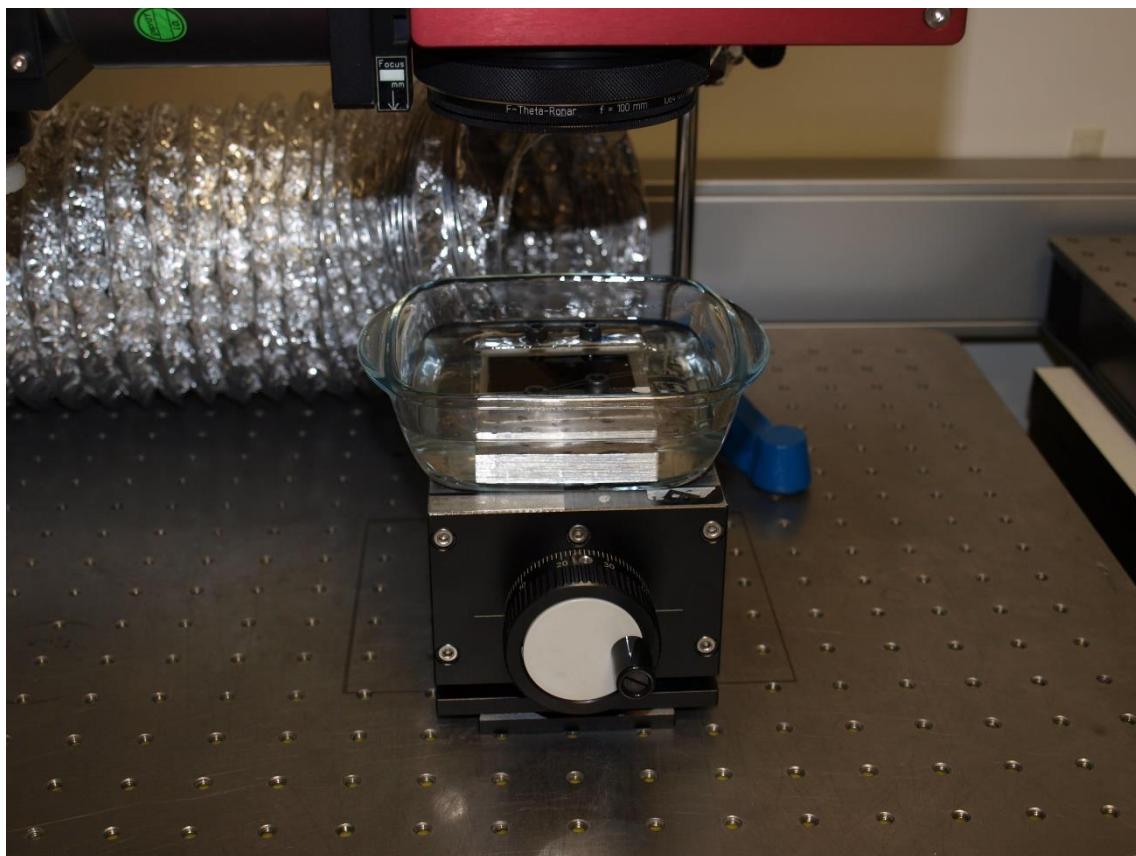
Para realizar los marcas asistidos por líquidos se han utilizado recipientes de Pyrex resistentes al choque térmico y a las altas temperaturas.

Se sujeta la pieza al utilaje de aluminio para evitar que las piezas se muevan debido a las vibraciones producidas por los fenómenos que ocurren en el líquido durante el mecanizado.

Se calcula la corrección de la distancia focal mediante la Ecuación B.2 (Ver anexo B), y se posiciona la pieza.

$$\Delta f = l \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$$

Después el recipiente y se llena del líquido elegido hasta que el espesor de la capa líquida es el adecuado.



**Figura 2.3. Imagen del montaje empleado para el mecanizado asistido por líquido.**

Después de realizar cada marca es necesario cambiar el líquido, ya que quedan suspendidas partículas en él y pueden afectar al siguiente proceso de escarbado.

Para cada condición de mecanizado que se ha estudiado se han realizado medidas en las distintas posiciones del foco.



**Figura 2.4. Fotografía de una probeta de vitrocerámica. Cada conjunto de 3 líneas corresponde a un marcaje realizado a distinta posición respecto al plano focal.**

## 2.2. Análisis de las muestras

La observación óptica de las marcas y la toma de fotografías y topografías se ha realizado utilizando un microscopio confocal Nikon Sensofar Plu2300.

Para cada posición de la pieza respecto al plano focal se han obtenido 3 marcas rectangulares, se analiza cada una de ellas tomando una fotografía y una topografía de la zona que se considera más representativa de cada marca.

En cada topografía se toman medidas de la anchura y la profundidad de la marca en 3 puntos, de forma que en total se tienen 9 medidas de la anchura y 9 medidas de la profundidad para cada posición de la pieza según el plano focal. Con ellas se calculan los valores medios y la desviación típica. Una vez se tienen todos los valores de anchura y profundidad de marcas se representan gráficamente para analizar la tendencia.

Por último se han realizado espectroscopias Raman de las muestras para comprobar si se ha producido algún tipo de cambio en la estructura del material. La Espectroscopía Raman es una técnica óptica de alta resolución que proporciona información estructural y química de cualquier material o compuesto orgánico e inorgánico en pocos segundos, permitiendo su identificación. El análisis mediante espectros Raman se basa en un examen de la luz dispersada por el material a estudiar al incidir sobre él un haz de luz monocromático

procedente de un láser. Parte de la luz se dispersa inelásticamente experimentando cambios de la frecuencia característicos del material analizado, independientes de la frecuencia de la luz incidente. Esta técnica no requiere de ningún tipo de preparación especial de las muestras y no produce ninguna alteración sobre la superficie que se analiza.

## Capítulo 3. Mecanizado en aire

Antes de empezar con el mecanizado láser asistido por líquidos se han realizado ensayos de mecanizado en aire para poder usarlos como referencia y hallar la posición del plano focal del equipo. Se sabe que al realizar procesos de mecanizado en torno al plano focal se obtiene un mínimo en la profundidad y de anchura de marca cuando el plano focal coincide justamente con la superficie de la pieza que se mecaniza. De este modo se puede averiguar la distancia focal de un equipo realizando marcas a diferentes alturas y viendo qué posición coincide con el mínimo.

Se han realizado ensayos en los 3 materiales con dos parámetros de mecanizado diferentes, variando la velocidad, han sido llamados A1 y A2, y los parámetros de mecanizado se enumeran en la Tabla 3.1. La intensidad es la de excitación del medio activo, la frecuencia es el número de pulsos por segundo que emite el equipo, la velocidad es la del movimiento del haz láser, e  $\Delta l$  es la separación entre las líneas de barrido.

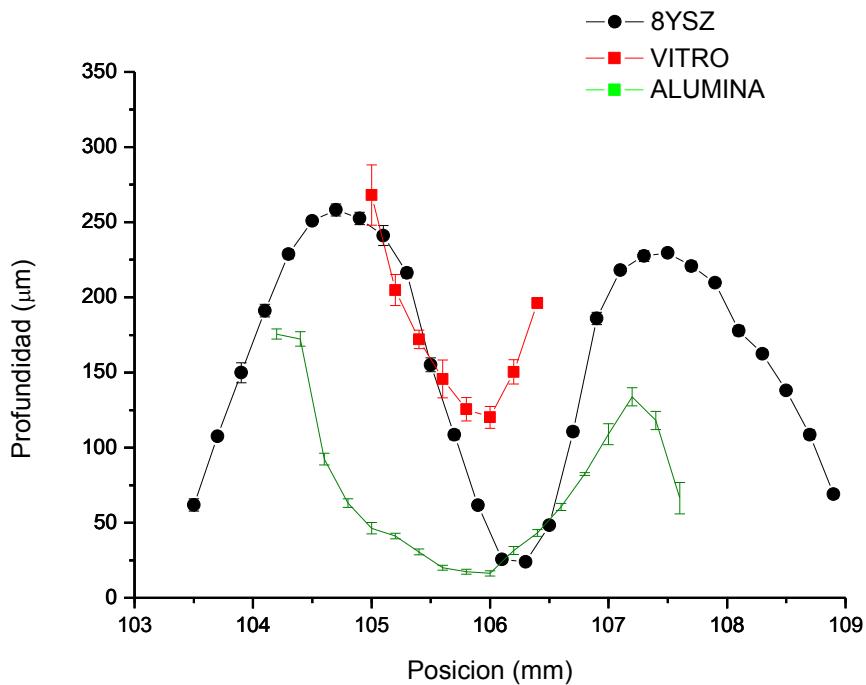
	A1	A2
Intensidad	35 A	35 A
Frecuencia	2 kHz	2 kHz
Velocidad	4 mm/s	20 mm/s
$\Delta l$	10 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

**Tabla 3.1. Parámetros utilizados para el mecanizado en aire.**

De los ensayos realizados en aire se obtiene que el plano focal del equipo, utilizando una lente de 100 mm, se encuentra a 106.0 mm de distancia de la referencia, ya que para los 3 materiales se presenta un mínimo en esa posición [3].

Además, la profundidad obtenida cuando el plano focal se encuentra dentro de las probetas es mayor a la obtenida cuando el plano focal se encuentra por encima.

También se puede comprobar que la profundidad alcanzada guarda relación con la dureza del material. La alúmina es el más duro y presenta una profundidad de marca máxima de 175.55  $\mu\text{m}$ , seguida por la circona 8YSZ, cuya profundidad máxima es 258.16  $\mu\text{m}$ , y por último la vitrocerámica, con una profundidad máxima de 268  $\mu\text{m}$ .

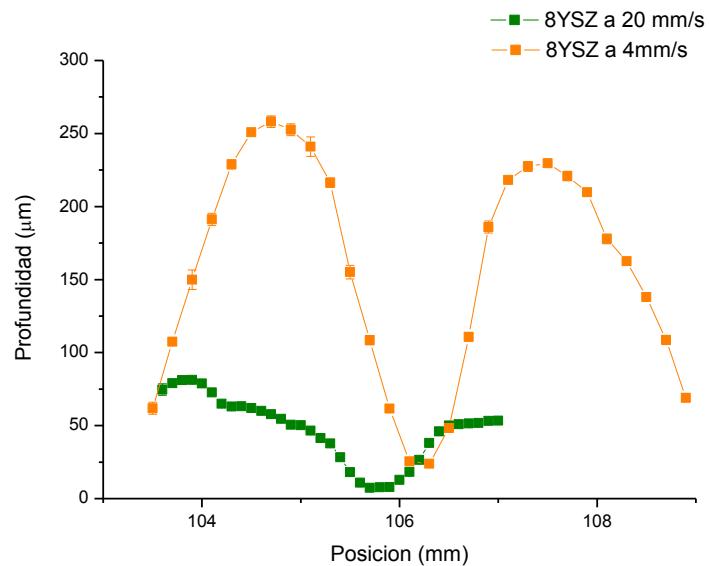


**Figura 3.1. Relación entre la profundidad de marca y la posición del plano focal con los parámetros de marcaje A1 para los 3 materiales.**

Comparando los resultados obtenidos se puede determinar que la profundidad de marca también depende de los parámetros empleados, para A1 se obtienen profundidades mayores que para A2, debido a que la velocidad es mayor en A2, y esto implica que la densidad de energía por superficie es menor, ya que el haz se mueve más rápido mientras el resto de los parámetros se mantienen iguales.

En el caso de la alúmina, con los parámetros de marcaje A2 solo se obtiene un marcado superficial, la profundidad máxima que se obtiene es de menos de 7  $\mu\text{m}$ , que es un valor cercano al de su rugosidad, por ello se ha considerado una profundidad de marcaje aproximadamente nula.

En la Figura 3.1. se muestran los resultados de profundidad para el conjunto de parámetros A1, y en Figura 3.2. se muestran los resultados de profundidad de 8YSZ. Se han añadido todos los demás resultados en el Anexo E.



**Figura 3.2. Comparación de las profundidades obtenidas en unas probetas de 8YSZ a dos velocidades distintas (4 mm/s y 20 mm/s).**

## Capítulo 4. Variación de parámetros para el mecanizado asistido por agua

Una vez finalizados los mecanizados en aire se han realizado los primeros ensayos en agua para estudiar cómo afecta la variación de algunos parámetros al mecanizado y qué resultados se obtienen.

Para ello se han obtenido cinco probetas en vitrocerámica (B1, B2, B3, B4 y B5) variando la velocidad de barrido del haz láser y la frecuencia de pulso, y manteniendo los demás constantes (Distancia entre pulsos, intensidad de excitación...). Para los cinco ensayos se ha utilizado agua destilada, de forma que el espesor de la capa líquida sobre la pieza mecanizada ha sido de 5 mm para todas las pruebas.

Los parámetros utilizados han sido los siguientes:

- Parámetros comunes:
  - $\Delta l = 10 \mu\text{m}$ .
  - $I = 35 \text{ A}$ .
- Parámetros variables (Velocidad y frecuencia):

Ensayo	v(mm/s)	f(kHz)
B1	4	2
B2	20	5
B3	20	2
B4	10	1
B5	20	1

Tabla 4.1. Parámetros para cada uno de los ensayos.

La potencia de salida y la energía de pulso obtenidas con el equipo láser Rofin-Sinar E-line20 depende de la intensidad de excitación del medio activo ( $I$ ) y la frecuencia de pulso ( $f$ ). Se dispone de una tabla proporcionada por el fabricante en la que se pueden ver los valores de potencia y energía en función de estos parámetros (Tabla 4.2).

I(A)\f(kHz)	1	2	5	10	40	
25	60	0.9	40	1.75	20	0.4
27	100	1.4	75	1.3	25	0.7
29	160	1.85	130	1.5	50	1
30	200	2.2	160	1.75	70	1.15
31	220	2.25	175	2	75	1.25
33	260	2.45	210	2.3	100	1.4
35	300	2.7	260	2.45	120	1.6

Potencia de pico (kW)
Energía de pulso (mJ)

**Tabla 4.2. Potencia de salida (W) y Energía de pulso (mJ) proporcionadas por el fabricante del equipo láser Rofin-Sinar E-line20.**

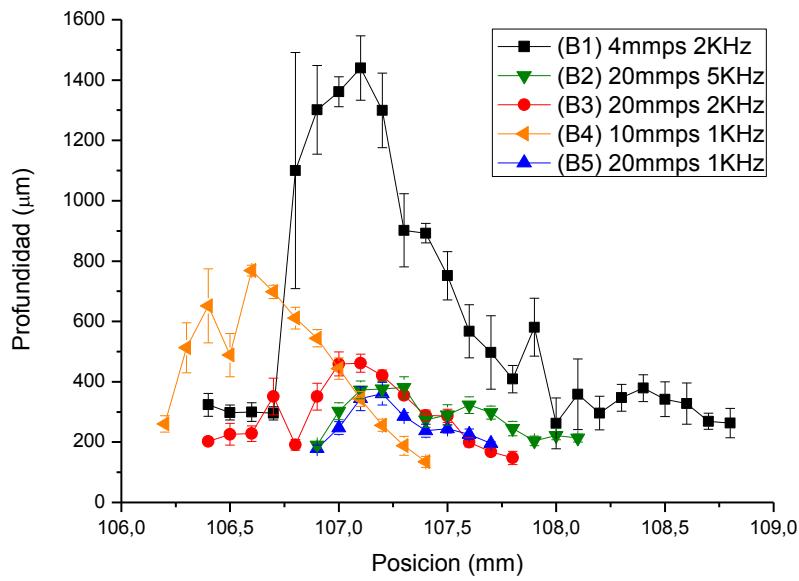
Se han realizado todos los ensayos con la máxima intensidad para disponer de la mayor energía por pulso en cada caso, como puede verse en la Tabla 4.2. También puede observarse que al aumentar la frecuencia, la energía por pulso es menor, así como la potencia de pico.

Con la distancia entre líneas, la velocidad de barrido y la frecuencia de pulso puede calcularse el número de pulsos por unidad de superficie que se obtienen en cada una de las 5 probetas, y con el valor de energía por pulso proporcionado por el fabricante se puede calcular la energía por unidad de superficie para cada caso.

Ensayo	v(mm/s)	f(KHz)	Pulsos	Energía (J/cm <sup>2</sup> )	Potencia pico (TW/cm <sup>2</sup> )
B1	4	2	5x10 <sup>6</sup>	12250	1.3
B2	20	5	2,5 x10 <sup>6</sup>	4000	0.3
B3	20	2	1 x10 <sup>6</sup>	2450	0.36
B4	10	1	1 x10 <sup>6</sup>	2700	0.3
B5	20	1	0,5 x10 <sup>6</sup>	1350	0.15

**Tabla 4.3. Velocidad y frecuencia para cada uno de los ensayos, número de pulsos por unidad de superficie (cm<sup>2</sup>) y energía por superficie (J/cm<sup>2</sup>).**

Al analizar la Tabla 4.3 se puede comprobar que a mayor número de pulsos por unidad de superficie la energía por área es mayor.

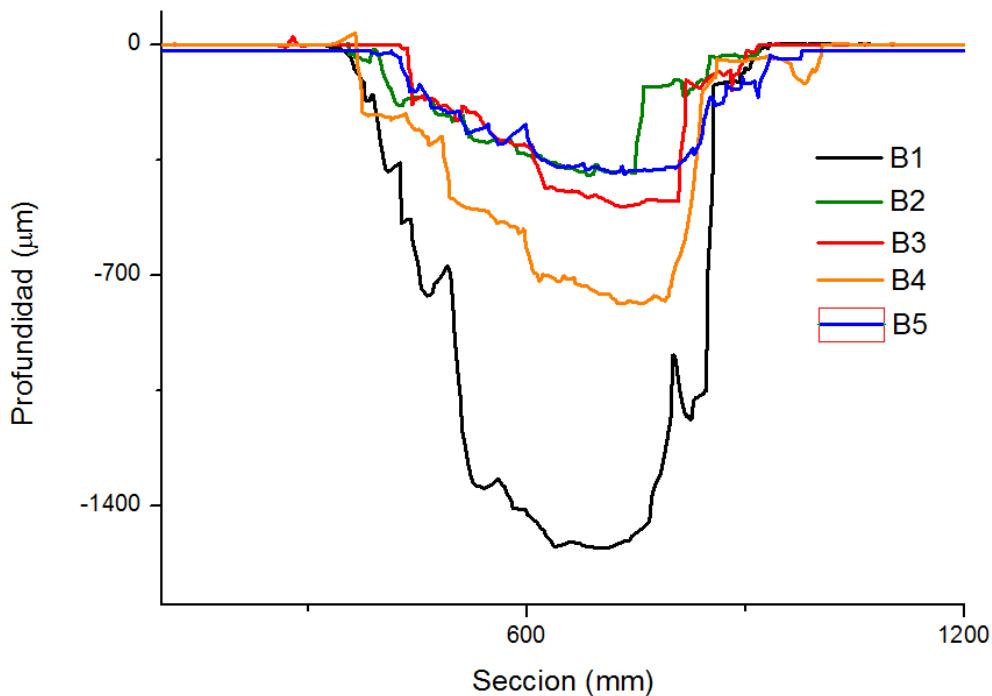


**Figura 4.1. Profundidad en función de la posición en función de los parámetros de mecanizado.**

En la Figura 4.1. se muestran las profundidades obtenidas para cada una de las 5 probetas en función de la posición de la pieza. Se puede comprobar que algunos valores no corresponden con la profundidad que se puede esperar, como el punto 106.5 en B4 y el punto 106.8 en B3, esto se debe a los errores a la hora de realizar las medidas.

Se ha calculado la variación de la distancia focal para una capa de agua destilada de 5 mm de espesor ( $n=1.33$ ) con la Ecuación B.2, cuya nueva posición está a 107.25 mm de distancia respecto a la referencia del equipo. Como puede verse en la Figura 4.1., en esa posición se observa un mínimo local para las probetas B2, B3 y B5. En la probeta B1 se puede ver un punto de inflexión que coincide con la posición del plano focal, mientras que para la probeta B4 coincide con el mínimo absoluto.

El hecho de que los valores no coincidan exactamente con el punto calculado se debe a los posibles errores a la hora de medir la posición de la pieza, la altura de la capa de líquido, o las posibles vibraciones producidas durante el mecanizado, pero sí que se puede observar la tendencia en las proximidades del punto a presentarse un mínimo, al igual que ocurre con el mecanizado en aire.



**Figura 4.2. Profundidad máxima obtenida en cada uno de los 5 ensayos. Secciones hechas por un plano perpendicular a cada marca.**

A la vista de los resultados representados en las Figuras 4.1. y 4.2. se puede observar que la mayor profundidad de ablación obtenida coincide con el ensayo B1, que corresponde a la probeta mecanizada a menor velocidad y con mayor densidad de energía depositada. La siguiente marca más profunda es la obtenida en el ensayo B4, correspondiente a una velocidad intermedia. Mientras que las profundidades obtenidas en el caso de B2, B3 y B5 son las menores, siendo éstas las marcas realizadas a una velocidad superior.

Se puede comprobar que la energía por unidad de superficie no es un parámetro determinante, al contrario de lo que pueda pensarse, ya que en el ensayo B5 y B2 se obtienen prácticamente las mismas profundidades máximas de ablación, siendo la energía por unidad de superficie 3 veces mayor en un caso que en otro. Además, en el ensayo B4 y en el B3 se tiene una energía por unidad de superficie muy similar, siendo mayor la profundidad de marca obtenida en B4, correspondiente al ensayo realizado a una velocidad menor.

Por lo tanto, se puede determinar que a menor velocidad de movimiento del haz, mayor es la profundidad de ablación obtenida.

En la Figura 4.1 puede verse también que el máximo rendimiento de ablación se obtiene con el plano focal por debajo de la pieza, al igual que sucede con el mecanizado en aire, mientras que cuando el plano focal se sitúa en el líquido, por encima de la pieza, las profundidades obtenidas son mucho menores. El punto de máxima ablación coincide en la mayoría de los casos y se encuentra alrededor de la posición 107.1 mm para una capa de agua de 5 mm, que corresponde a la posición en la que el plano focal se encuentra 1.15 mm por debajo de la superficie de la pieza, y por tanto se está enfocando por debajo de la superficie del material.

Se puede ver que en las piezas en las que se obtiene mayor rendimiento de ablación, se pierde el máximo relativo que sí que se obtiene mecanizando en aire con el foco por encima de la pieza, de forma que las gráficas dejan de ser casi simétricas respecto al eje vertical.

# Capítulo 5. Mecanizado en distintos materiales variando el espesor de la capa líquida

A continuación se han realizado ensayos en los 3 materiales, vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema, circona 8YSZ y alúmina, variando la profundidad de la capa de líquido (3 mm, 5 mm y 10 mm) y utilizando agua destilada como fluido auxiliar.

Los parámetros del equipo láser se han mantenido constantes para que los resultados sean comparables entre sí y poder establecer qué fenómenos se deben al cambio del material y a la variación de la capa de líquido. De esta forma la energía del haz ha sido la misma para todos los siguientes ensayos.

Los parámetros elegidos son los siguientes:

$$I = 35 \text{ A}$$

$$v = 20 \text{ mm/seg}$$

$$f = 2000 \text{ Hz}$$

$$\Delta I = 10 \mu\text{m}$$

Como se ha visto en el Capítulo 4, estos parámetros no coinciden con los de mayor ablación, pero se han elegido porque con ellos las marcas presentan un mejor acabado y un fondo de marca más uniforme, ya que para otros conjuntos de parámetros se ha observado la formación de escalones.

Antes de realizar los ensayos se ha calculado la variación de la posición del plano focal para cada uno de los espesores de capa líquida, como se muestra en la Tabla 5.1.

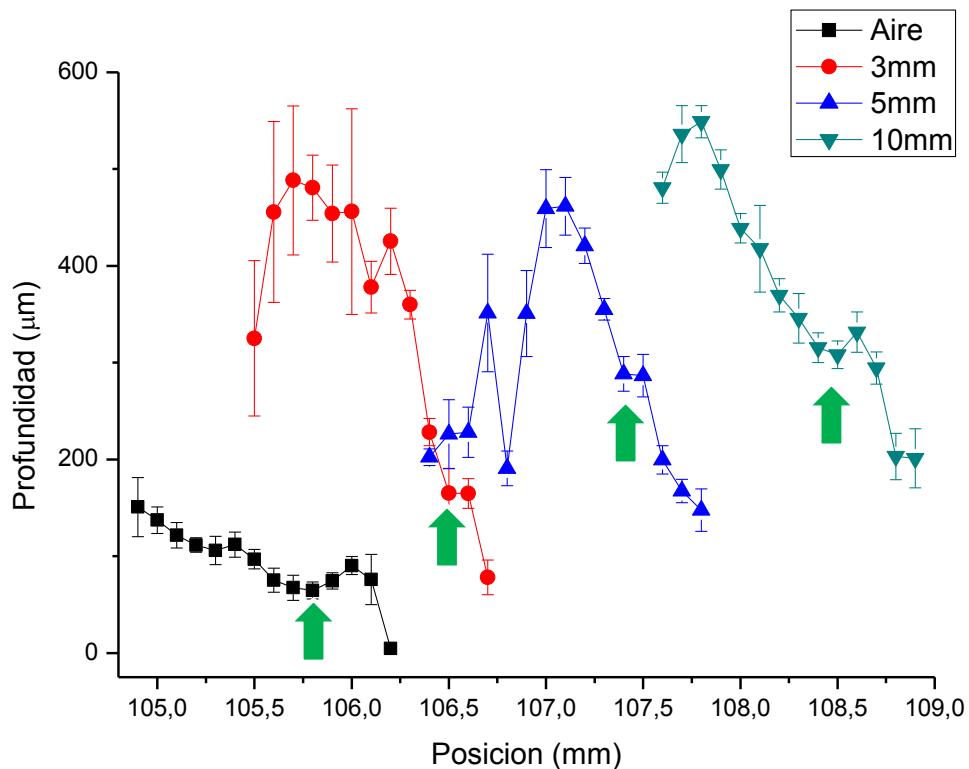
Profundidad	Distancia focal (mm)
Aire	106.0
3 mm	106.75
5 mm	107.25
10 mm	108.5

Tabla 5.1. Distancia focal corregida en función de la profundidad de la capa de agua.

## 5.1. Vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema

En la Figura 5.1 se puede ver la representación gráfica de los resultados obtenidos para los ensayos realizados en vitrocerámica.

Para los distintos espesores de capa de agua destilada se puede comprobar que en la posición del foco aparece un mínimo, o un punto de inflexión, y corresponden con los valores calculados anteriormente salvo pequeñas desviaciones producidas por el error en la medida. El punto focal se ha representado en la Figura 5.1. con unas líneas verdes. Como es lógico, al aumentar la capa de líquido, las gráficas se van desplazando hacia la derecha, ya que aumenta también la distancia focal.



**Figura 5.1. Profundidad de marca en función de la posición para los 4 ensayos realizados con vitrocerámica, en función del espesor de capa de líquido.**

Las profundidades máximas obtenidas son muy similares en los 3 casos y se observa cierta tendencia a aumentar con el espesor de la capa de líquido. En los 3 casos se obtiene un rendimiento de ablación mayor que en el mecanizado en aire.

Capa	Profundidad ( $\mu\text{m}$ )
Aire	150.72
3 mm	488.35
5 mm	461.68
10 mm	548.99

**Tabla 5.2. Profundidad máxima de marca en función del espesor de capa líquida en la vitrocerámica.**

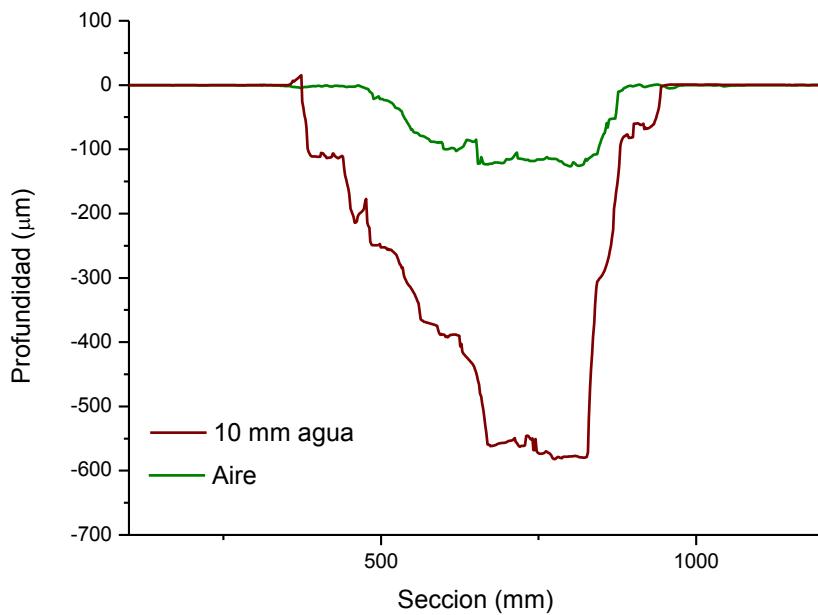
La máxima profundidad de ablación se obtiene con una capa de 10 mm de agua destilada, y es de 548.99 mm, que equivale a 3.68 veces la profundidad máxima obtenida en el mecanizado en aire, con los mismos parámetros en el equipo láser, y por tanto con la misma cantidad de energía emitida.

Puede verse también que la anchura de la marca es mayor, lo que influye en el volumen total mecanizado.

Al ser también mayor la anchura de marca, el volumen total mecanizado es aproximadamente 6 veces mayor en el caso del mecanizado con 10 mm de capa de agua que en el aire, y por tanto el rendimiento es superior.

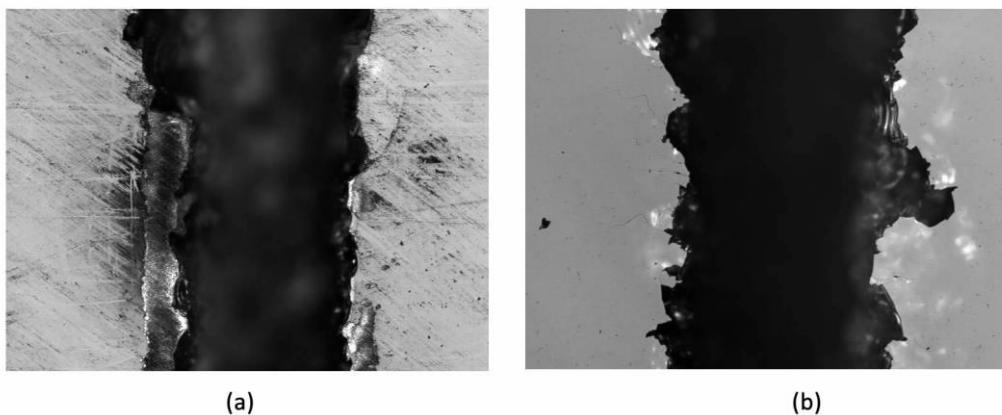
En la Figura 5.2. se puede ver la diferencia entre las marcas de profundidad máxima obtenidas en el aire y en el agua.

Se puede calcular que para las marcas realizadas en aire se tiene una velocidad de ablación de  $2.28 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{s}$ , mientras que para las marcas realizadas en agua, la velocidad de ablación es de  $14.00 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{s}$ . Si se quiere realizar un orificio cilíndrico de 2mm de diámetro por 3 mm de profundidad, se puede calcular que en caso de realizarlo en aire se tardarían 6 minutos y 53 segundos, mientras que al realizarlo en agua se tardaría 1 minuto y 7 segundos, se mecanizaría 6.13 veces más rápido.



**Figura 5.2. Sección de la marca de mayor profundidad realizada en aire y la realizada en agua con 10 mm de capa en una probeta de vitrocerámica.**

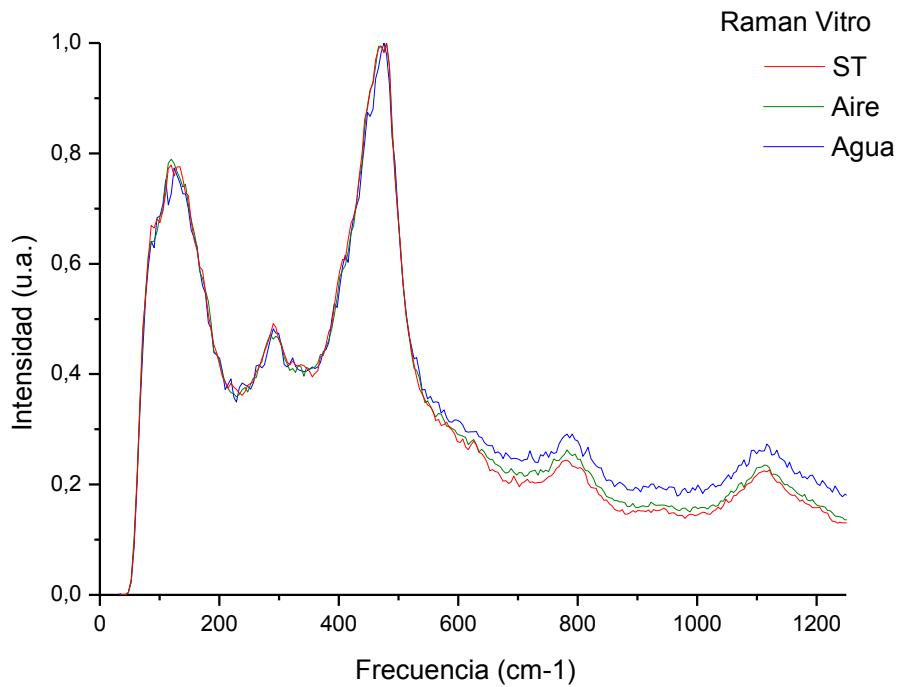
Para los 3 espesores se da también que la profundidad máxima de mecanizado se obtiene cuando el plano focal se encuentra por debajo de la superficie de la pieza. Además, al aumentar el espesor de la capa de agua también aumenta la profundidad obtenida al mecanizar en el foco.



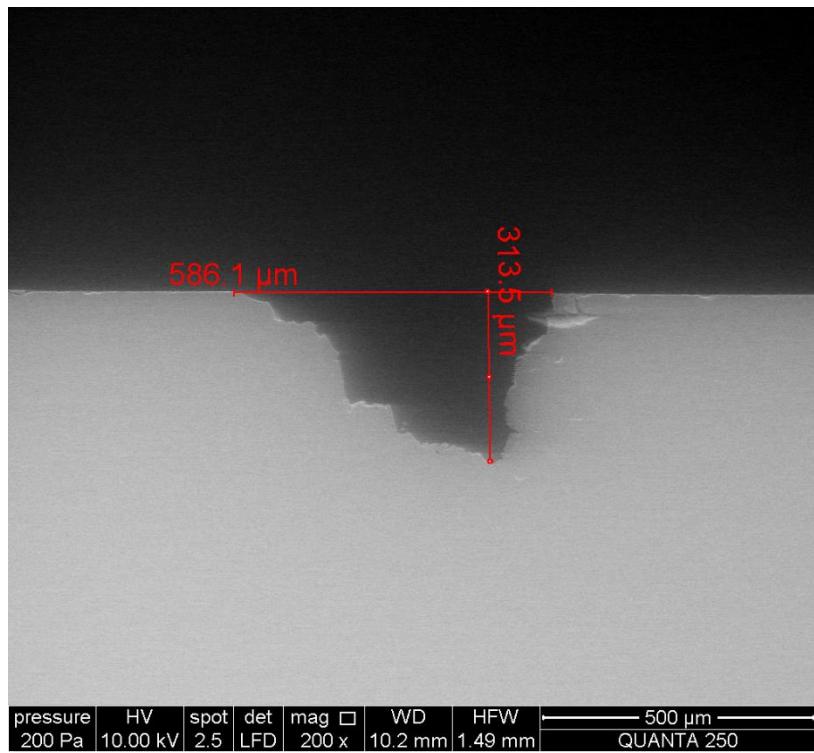
**Figura 5.3. Imagen vista desde arriba de las marcas de mayor profundidad realizadas en vitrocerámica, tanto en aire (a) como con 10 mm de agua (b).**

Como puede comprobarse en la Figura 5.3. los acabados obtenidos tanto en aire como en agua son bastante similares. También puede verse que la marca (b) correspondiente al mecanizado realizado en agua con 10 mm de capa es más ancha.

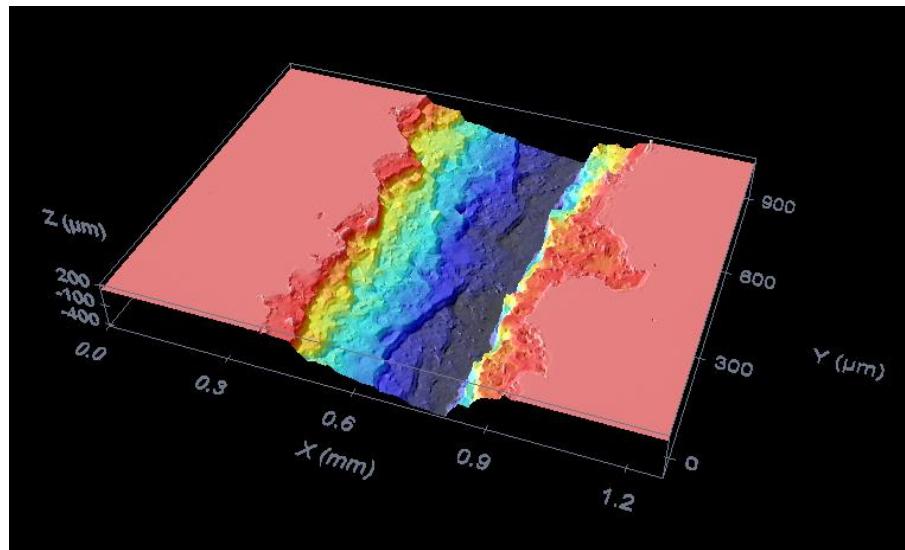
En la Figura 5.4 se pueden ver los espectros Raman de la vitrocerámica obtenidos en tres zonas, la primera en una superficie sin tratar, la segunda en el interior del surco realizado en aire y la tercera en el interior del surco realizado en agua, para comprobar si se ha producido alguna alteración estructural al marcar en los diferentes medios. Como puede verse, los espectros son idénticos en los tres casos, con lo que se puede concluir que el proceso de marcado con láser, tanto en aire como en agua, no cambia la estructura de la vitrocerámica.



**Figura 5.4. Comparación de las espectroscopias Raman de la vitrocerámica, en una superficie sin tratamiento, una superficie marcada en aire y otra marcada en agua.**



**Figura 5.5. Imagen transversal de una marca realizada en una vitrocerámica con agua, tomada con el microscopio electrónico.**



**Figura 5.6. Topografía de una sección de la marca tomada con el microscopio confocal.**

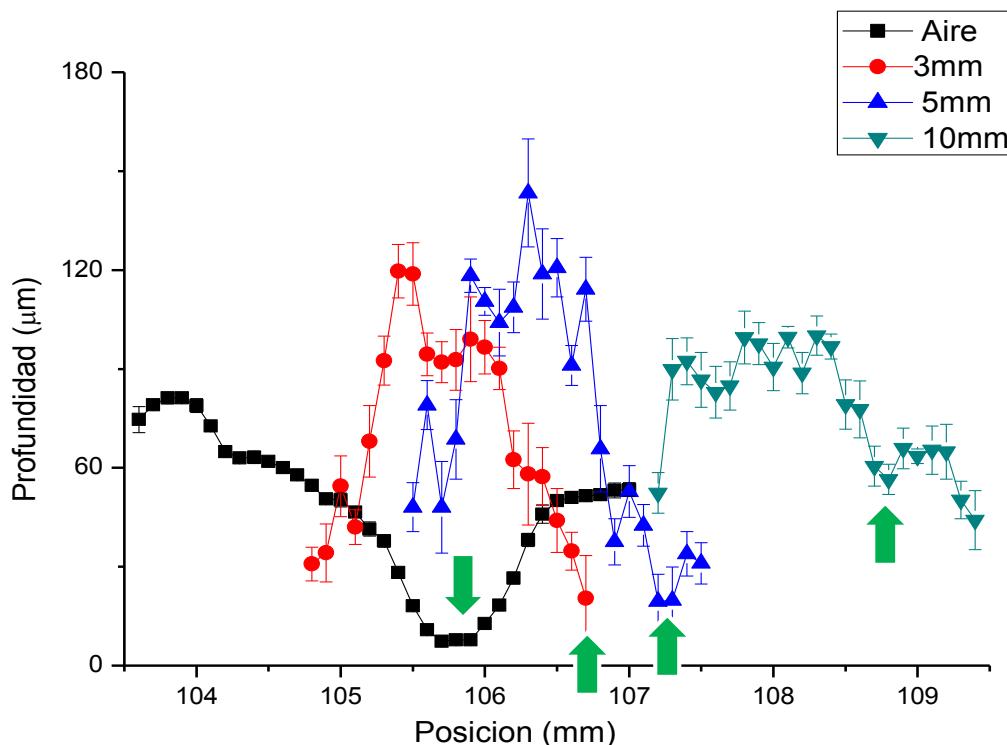
En la Figura 5.5. se puede ver una imagen de un corte transversal de una marca realizada en vitrocerámica mediante mecanizado láser asistido por agua destilada, tomada

mediante microscopía electrónica de barrido, y en la Figura 5.6. una topografía tomada con el microscopio confocal.

## 5.2. Circona 8YSZ

Los resultados obtenidos para la circona 8YSZ se muestran en la Figura 5.7., las posiciones correspondientes con el foco se han señalado con una flecha verde y puede comprobarse que coinciden con los valores calculados con anterioridad, obteniéndose también mayor profundidad en el foco conforme la capa de líquido aumenta.

Los resultados obtenidos son similares a los de la vitrocerámica, los mayores rendimientos de ablación se obtienen con el foco por debajo de la superficie del material, mientras que con el foco situado dentro del líquido se obtienen rendimientos más bajos.



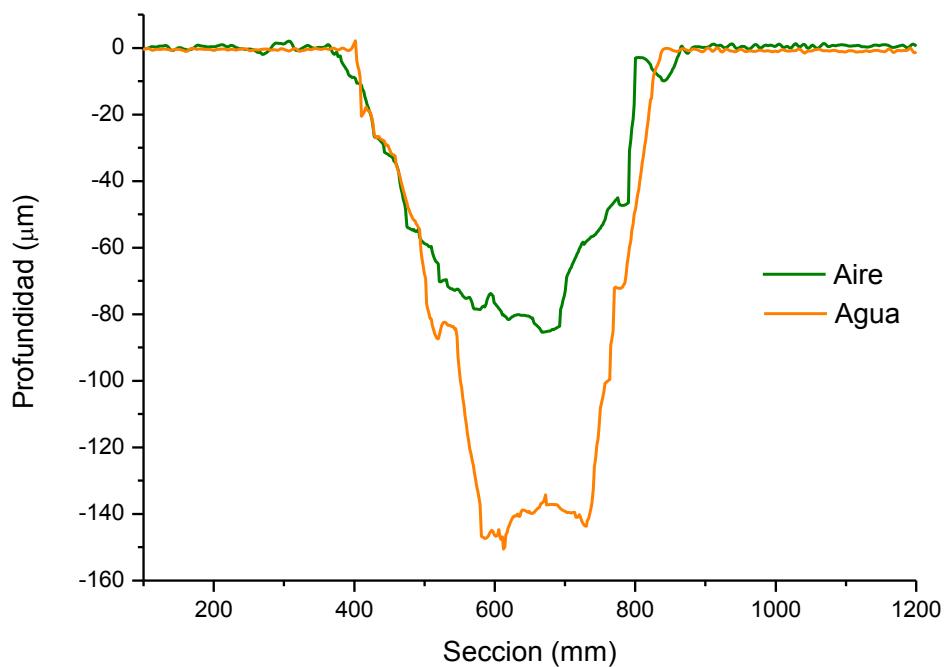
**Figura 5.7. Profundidad de marca en función de la posición para los 4 ensayos realizados en 8YSZ, en función del espesor de capa de líquido.**

En la Tabla 5.3 puede verse que el rendimiento de ablación es mayor en los 3 casos que el obtenido en aire, si bien la diferencia no es tan grande como la obtenida en los ensayos realizados con vitrocerámica. La profundidad máxima es 1.76 veces mayor y la anchura es

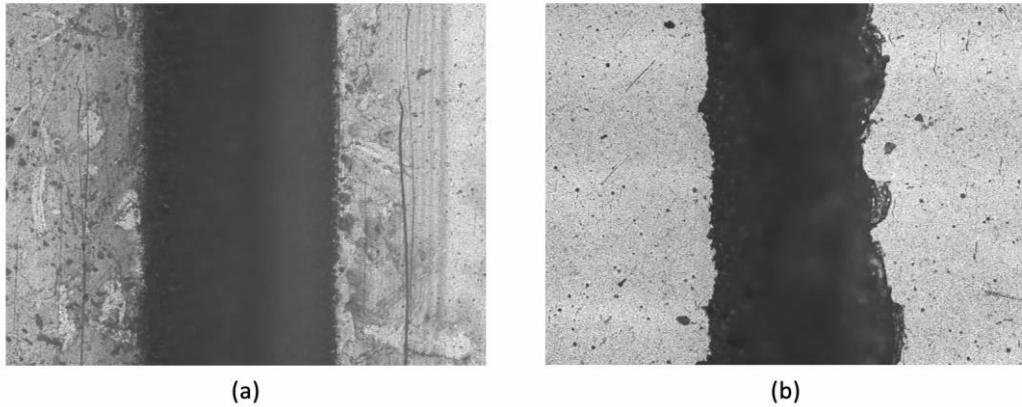
similar. En el caso de la circonia 8YSZ se obtiene el máximo rendimiento con una profundidad de capa de agua de 5 mm, en lugar de con 10 mm como ocurría en el agua.

Capa	Profundidad ( $\mu\text{m}$ )
Aire	81.21
3 mm	119.63
5 mm	143.39
10 mm	100.1

**Tabla 5.3. Profundidad máxima de marca en función del espesor de capa líquida en la circonia 8YSZ.**

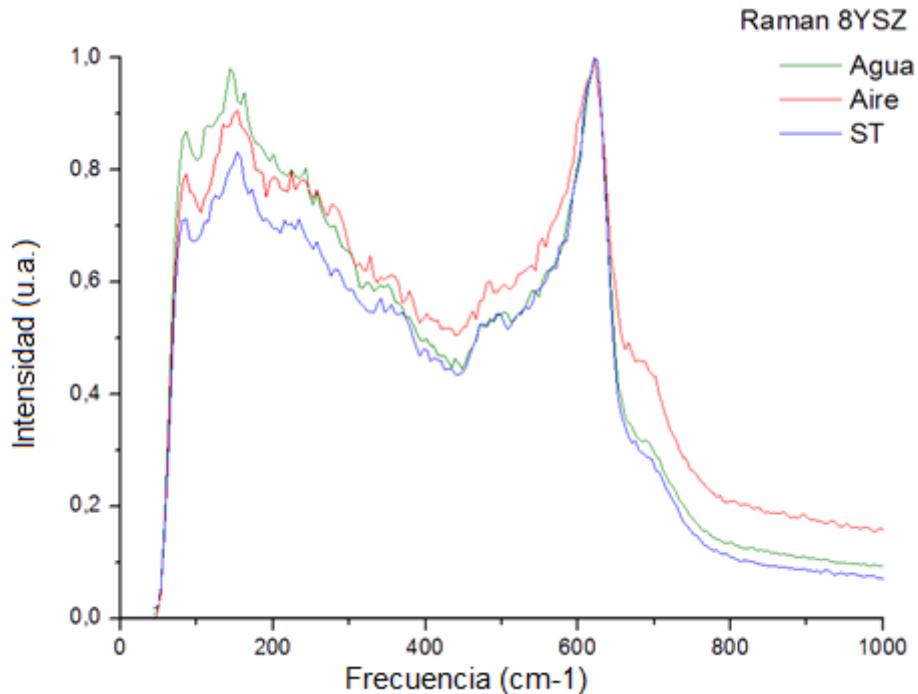


**Figura 5.8. Sección de la marca de mayor profundidad realizada en aire y la realizada en agua con 5 mm de capa en una probeta de 8YSZ.**



**Figura 5.9.** Imagen vista desde arriba de las marcas de mayor profundidad realizadas en 8YSZ, tanto en aire (a) como con 5 mm de agua (b).

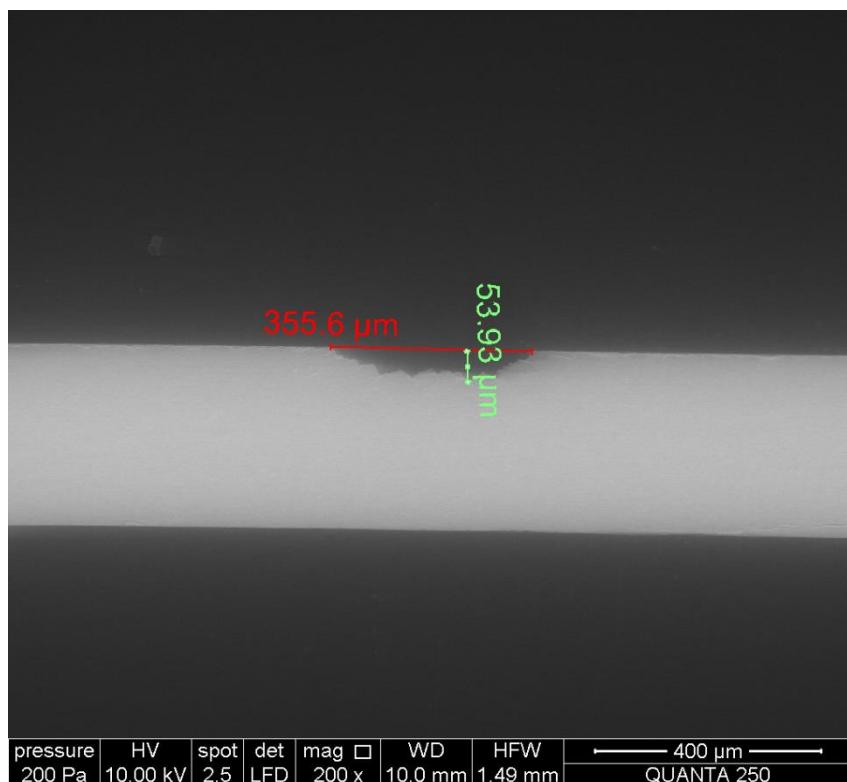
Comparando las fotografías tomadas con el microscopio confocal se puede ver que en el caso de la circona 8YSZ, el acabado es peor en el caso del mecanizado con agua.



**Figura 5.10.** Comparación de los espectros Raman de la circona 8YSZ, en una superficie sin tratamiento, una superficie marcada en aire y otra marcada en agua.

En la Figura 5.10. se pueden comparar los espectros Raman realizados en las tres superficies, y se observa que son similares entre sí, con lo cual se concluye que tampoco se han producido cambios en la estructura de la circonia tras mecanizar en aire y en agua.

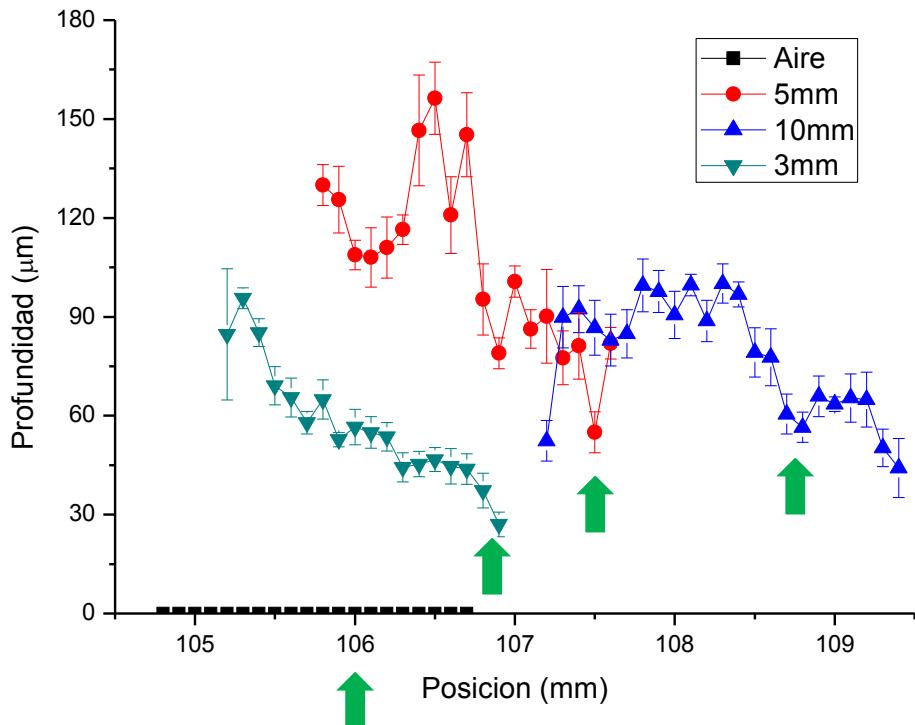
En la Figura 5.11. se puede ver una imagen de un corte transversal de una marca realizada en circonia mediante mecanizado láser asistido por agua destilada, tomada mediante microscopía electrónica.



**Figura 5.11. Imagen transversal de una marca realizada en circonia 8YSZ con agua, tomada con el microscopio electrónico.**

### 5.3. Alúmina

En el caso de la alúmina se obtienen las mayores diferencias, con el mecanizado en aire se obtiene solamente un marcado superficial para las condiciones de mecanizado estudiadas, se produce un oscurecimiento del material y en el punto de máxima ablación la profundidad obtenida es de aproximadamente 6  $\mu\text{m}$ , valor que está en el orden de la rugosidad superficial del material, por eso se ha considerado que la ablación es nula. Al aplicar la capa del agua se obtienen escarbados de profundidades superiores a los 150  $\mu\text{m}$ , con lo que la utilización de una capa de líquido auxiliar supone una diferencia notable para este material.



**Figura 5.12. Profundidad de marca en función de la posición para los 4 ensayos realizados en alúmina, en función del espesor de capa de líquido.**

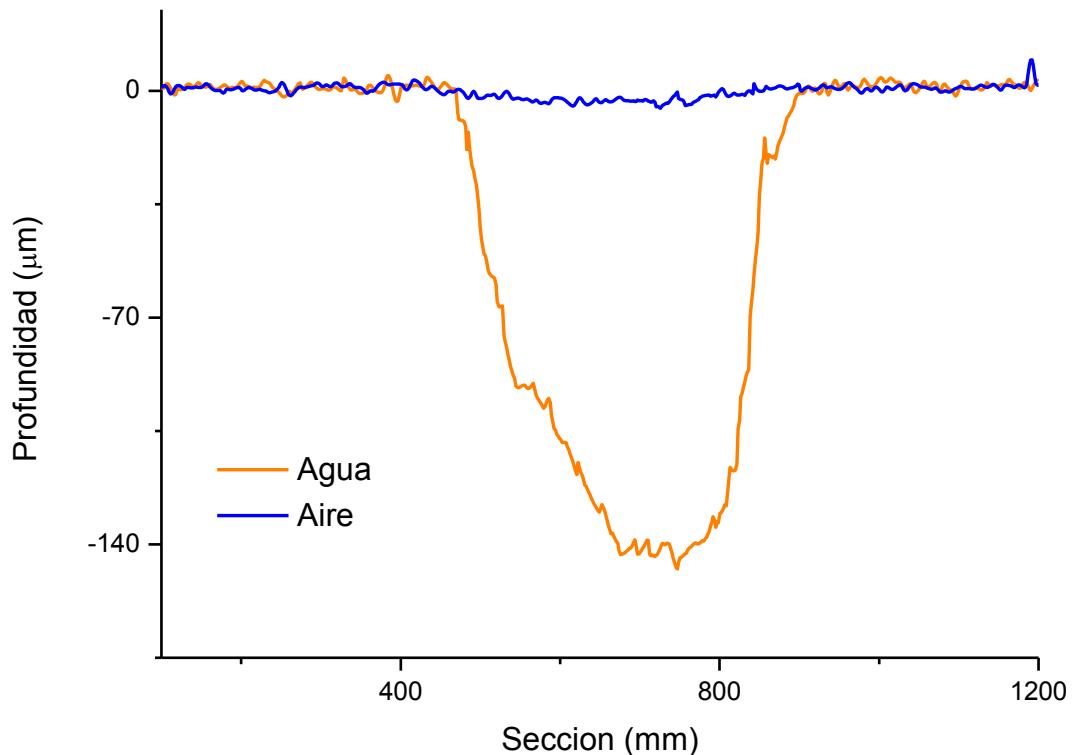
Como puede observarse en la Figura 5.12. la profundidad máxima obtenida también se da para las posiciones donde el plano focal está por debajo de la superficie de la probeta, mientras que cuando el foco se sitúa por encima de su superficie las marcas son de menor profundidad.

La máxima ablación se obtiene otra vez para el marcado realizado con una capa de agua de 5 mm de espesor.

Capa	Profundidad (μm)
Aire	6
3 mm	85.21
5 mm	156.34
10 mm	100.1

**Tabla 5.4. Profundidad máxima de marca en función del espesor de capa líquida en la alúmina.**

En la Tabla 5.4. se han incluido los resultados de ablación máxima obtenidos según el espesor de la capa de agua utilizada, y como puede verse, la diferencia entre el ensayo realizado en aire y los demás es muy grande, llegando a obtenerse una profundidad 26 veces mayor en el caso de utilizar una capa de 5 mm de espesor.

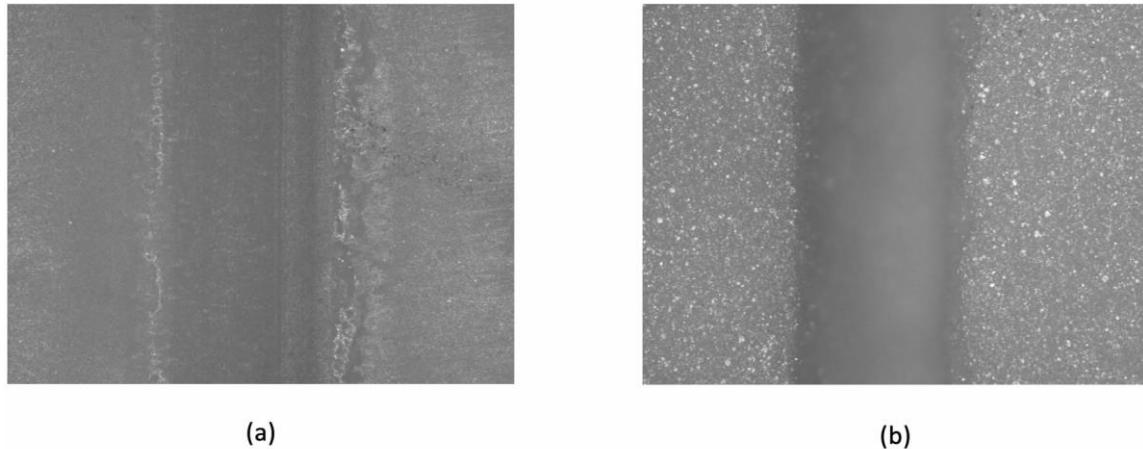


**Figura 5.13. Sección de la marca de mayor profundidad realizada en aire y la realizada en agua con 5 mm de capa en una probeta de aluminio.**

En la Figura 5.13. se pueden comparar las secciones obtenidas en agua y en aire y se puede observar cómo en el caso del mecanizado en aire no se obtiene casi profundidad de ablación, únicamente se da un marcado superficial de muy pocas micras, mientras que al utilizar agua, se obtiene una marca bastante profunda. Esto mismo puede verse en la Figura 5.14. donde se presentan dos imágenes tomadas con el microscopio confocal, que muestran la marca más profunda hecha en aire y la hecha con agua.

Como ya se ha dicho al principio del capítulo, los parámetros láser utilizados en estos ensayos han sido los mismos, de modo que en ambos casos, en aire y en agua, la energía proporcionada por unidad de superficie por el equipo ha sido igual. Esto quiere decir que la

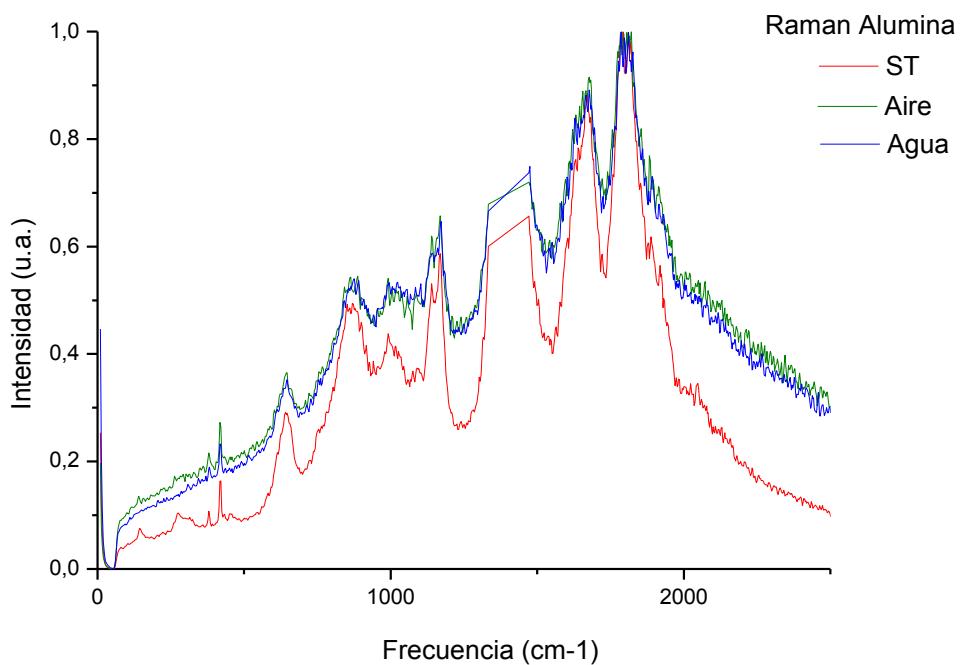
diferencia entre las profundidades obtenidas es únicamente causada por la presencia del líquido auxiliar, y se debe a los fenómenos que se producen dentro del líquido durante el mecanizado.



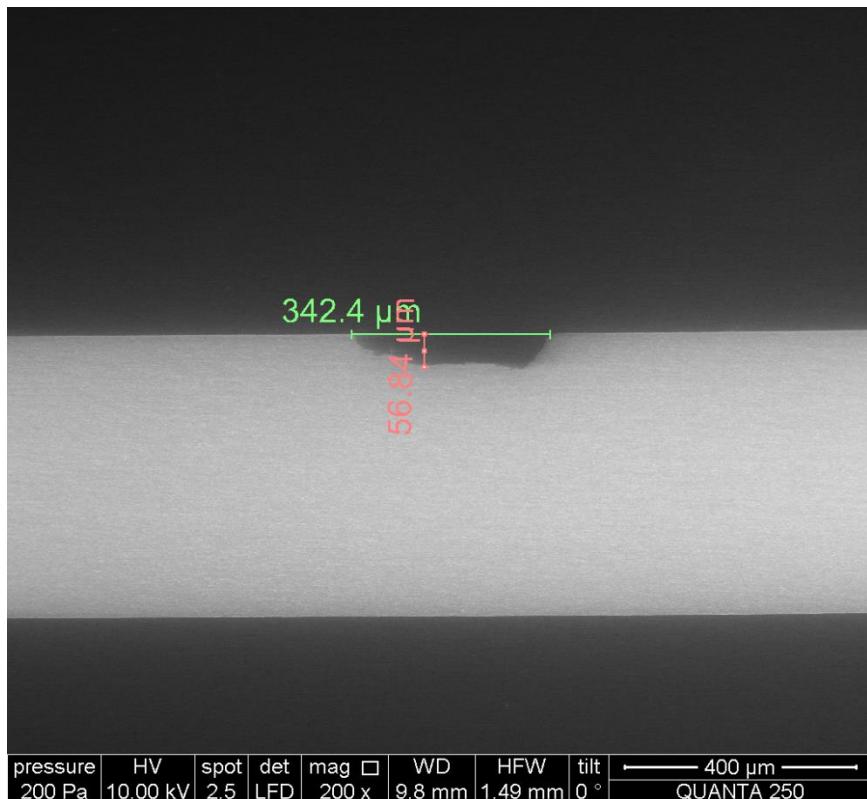
**Figura 5.14. Imagen vista desde arriba de las marcas de mayor profundidad realizadas en alúmina, tanto en aire (a) como con 5 mm de agua (b).**

En la Figura 5.15 se muestran los espectros Raman realizados en la alúmina, en una superficie sin tratar, en una marca realizada en aire y en una marca realizada en agua. Puede comprobarse que los picos coinciden y que son similares entre sí, con lo que también se concluye que en este caso no se ha alterado la estructura de la alúmina.

En la Figura 5.16. se puede ver una imagen de un corte transversal de una marca realizada en alúmina mediante mecanizado láser asistido por agua destilada, tomada mediante microscopía electrónica de barrido.



**Figura 5.15. Comparación de los espectros Raman de la alúmina, en una superficie sin tratamiento, una superficie marcada en aire y otra marcada en agua.**



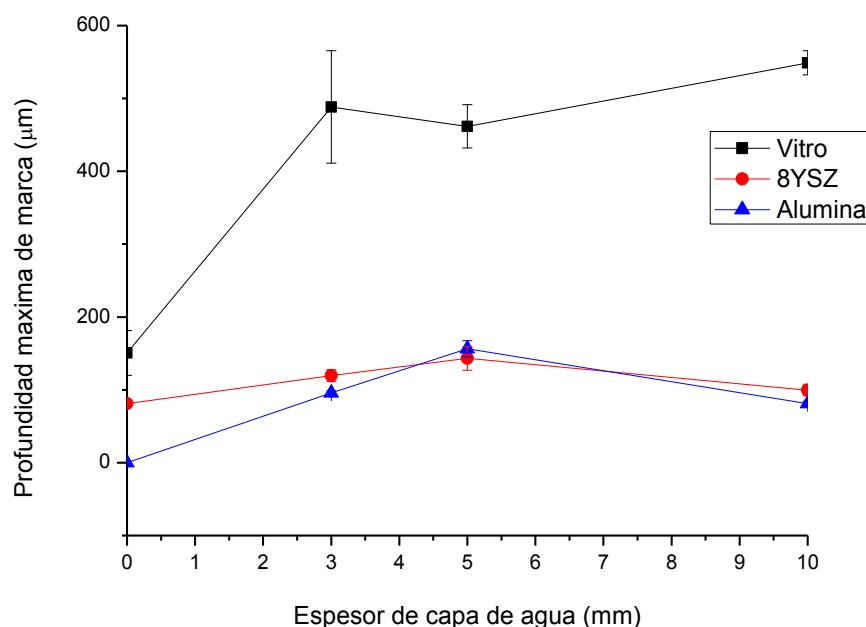
**Figura 5.16. Imagen transversal de una marca realizada en alúmina con agua, tomada con el microscopio electrónico.**

## 5.4. Comparativa de los 3 materiales

A la vista de los resultados anteriores se puede concluir que para los 3 materiales se obtienen mayores rendimientos de ablación utilizando un líquido auxiliar que en presencia de aire. También se puede comprobar que las máximas ablaciones se obtienen cuando el plano focal se encuentra por debajo de las superficies de las piezas, independientemente del material utilizado y del espesor de la capa de líquido, y que los rendimientos obtenidos cuando el plano focal se encuentra sobre la superficie de las probetas es menor.

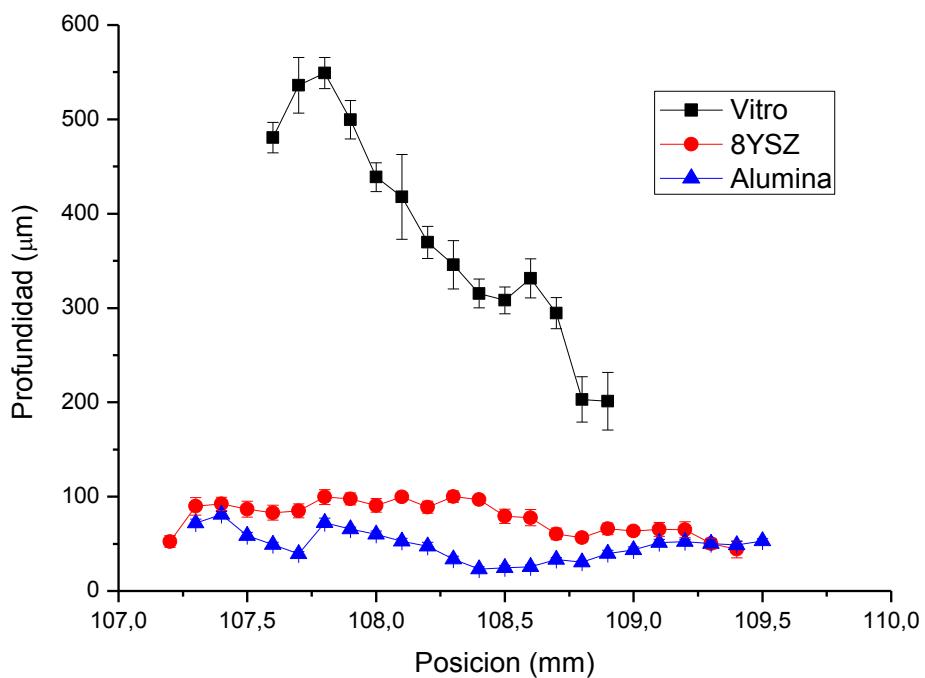
En todos los casos se obtiene un mínimo o un punto de inflexión cuando el plano focal se encuentra en la superficie de la pieza, y estos coinciden con los calculados previamente, aunque en ocasiones se encuentran desviados ligeramente debido a los posibles errores de las medidas.

Al comparar las Figuras 5.1., 5.7. y 5.12. puede observarse que al aumentar el espesor de la capa de líquido también se dispone de más medidas hacia la derecha del punto focal. Esto significa que existe más recorrido en el que se mecaniza con el plano focal por encima de la superficie de la pieza, y se puede ver en los 3 materiales. También se puede apreciar que la profundidad obtenida en el foco es mayor conforme aumenta el espesor de la capa [4].



**Figura 5.17. Profundidad máxima obtenida en función del espesor de la capa de agua en los 3 materiales.**

En la Figura 5.17. puede verse la profundidad máxima obtenida en cada material, en función del espesor de la capa de agua. A la vista de los resultados puede verse que en el caso de la vitrocerámica, la tendencia es ascendente, si bien el valor correspondiente para la capa de 5 mm está un poco por debajo del correspondiente a la capa de 3 mm, es debido a que los valores de ésta última presentan mucha dispersión, pero puede decirse que son valores muy similares, mientras que el valor correspondiente a un espesor de 10 mm es bastante mayor. En el caso de la circona 8YSZ y de la alúmina puede verse que primero se produce un aumento de la profundidad de marca, y luego una disminución, es decir, se obtiene un máximo para el espesor de agua de 5 mm. Esta tendencia también puede observarse en las Figuras 5.1., 5.7. y 5.12. y demuestra que al ir aumentando el espesor de la capa de líquido se va consiguiendo un mayor rendimiento, hasta que se llega a un máximo, a partir del cual el rendimiento obtenido es menor, debido a las pérdidas que se producen cuando el espesor de la capa de líquido supera un límite. En el caso de la vitrocerámica cabe esperar que al aumentar el espesor de la capa de líquido por encima de los 10 mm también se produzca este fenómeno.



**Figura 5.18. Profundidad obtenida en los 3 materiales en función de la posición de la pieza, para una capa de agua de 10 mm de espesor.**

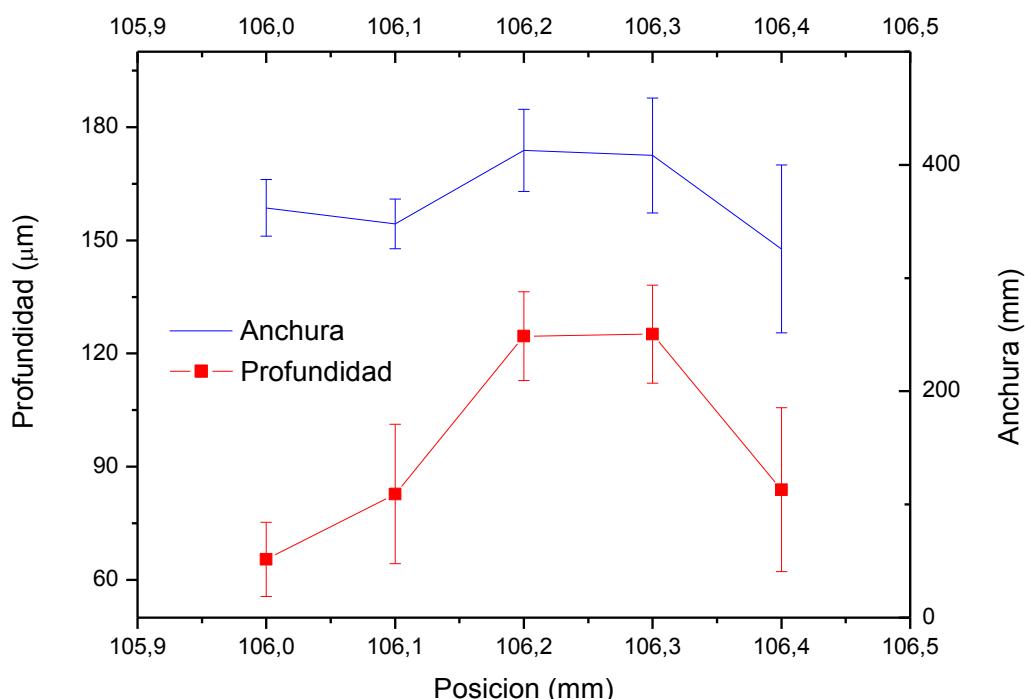
En la Figura 5.18 se pueden ver las profundidades obtenidas para cada material en función de la posición de las piezas, para un espesor de la capa de agua de 10 mm. Puede verse que en los 3 materiales se obtienen mínimos cercanos a la posición de 108.5 mm, correspondiente al punto en que se enfoca el haz sobre la superficie de las piezas.

Al comparar las gráficas de los 3 materiales puede verse que la profundidad es mayor en la vitrocerámica, seguida por la circona 8YSZ y por último la de la alúmina, como ocurre en el caso del mecanizado con aire, y es inversamente proporcional a la dureza del material.

## Capítulo 6. Utilización de un fluido auxiliar más viscoso: etilenglicol

Con el fin de comprobar el efecto de la viscosidad del líquido auxiliar en el mecanizado se ha utilizado etilenglicol, cuya viscosidad dinámica es unas 20 veces superior a la del agua destilada (Ver anexo C).

Para espesores de capa de 5 y 10 mm no se ha obtenido ningún resultado, por ser la capa demasiado gruesa, y solamente para espesores de 3 mm se ha conseguido marcar. En el caso de la alúmina y la circona 8YSZ se ha conseguido un marcado superficial, sin obtener profundidad aparente, únicamente se ha conseguido colorear las muestras, mientras que en el caso de la vitrocerámica se han obtenido unas pocas marcas profundas.

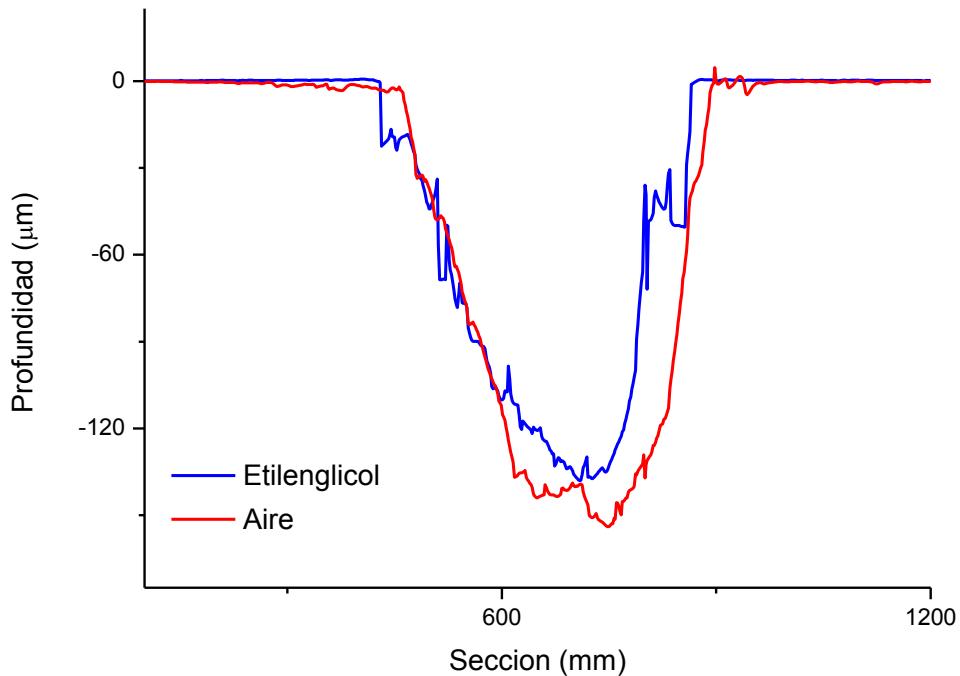


**Figura 6.1. Profundidad en función de la posición obtenida en vitrocerámica con etilenglicol.**

Según la Ecuación B.2, utilizando etilenglicol, con un índice de refracción superior al del agua,  $n = 1.427$ , el plano focal se encuentra en la posición 106.9 mm aproximadamente, y como puede comprobarse en la Figura 6.1, para esa posición no se encuentran medidas. Únicamente se han conseguido marcas cuando el plano focal se sitúa por debajo de la

superficie de la pieza mecanizada. Además, esas medidas son menos profundas que las realizadas en aire, como puede verse en la Figura 6.2.

La explicación es que al tratarse de un líquido auxiliar más viscoso, es más difícil que se produzcan en él los fenómenos mecánicos que sí que se producen al utilizar agua destilada, las ondas de choque se propagan con mayor dificultad [2]y por ello la utilización del líquido deja de ayudar al mecanizado. Cuanto mayor es la viscosidad del líquido que se utiliza, más se reducirán los rendimientos de ablación.



**Figura 6.2. Sección de la marca de mayor profundidad realizada en aire y la realizada en etilenglicol con 3 mm de capa en una probeta de vitrocerámica.**

## Capítulo 7. Conclusiones y pasos futuros

Analizando los resultados expuestos en los capítulos anteriores se pueden llegar a una serie de conclusiones sobre el mecanizado láser asistido por líquidos:

- El parámetro más influyente a la hora de mecanizar es la velocidad del haz láser. Bajas velocidades producen mayores profundidades.
- Si se utiliza el líquido adecuado se obtienen mayores profundidades de mecanizado que con el mecanizado en aire.
- Cuanto menor es la viscosidad del líquido auxiliar utilizado, mejores rendimientos de ablación se obtienen.
- Al utilizar un fluido auxiliar, la posición del plano focal cambia.
- Se obtienen mayores profundidades de marca cuando el plano focal se encuentra posicionado por debajo de la superficie de la pieza.
- Cuanto mayor es el espesor de la capa de líquido auxiliar, mayor es el rendimiento de ablación, hasta que se llega a un espesor límite, a partir del cual el rendimiento disminuye.
- El hecho de mecanizar piezas con técnicas láser asistidas por fluidos no altera ni la estructura ni las fases de los tres materiales utilizados (Vitrocerámica, circona 8YSZ y alúmina).
- Cuanto menor es la dureza del material a mecanizar, mayores profundidades de marca se obtienen.

Con estas características se pueden llegar a reducir los tiempos de mecanizado, con el ahorro en tiempo y energía que ello conlleva. En el caso de la circona 8YSZ el aumento de la profundidad es el menor, 1.76 veces más que en aire, pero en el caso de la vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema se obtiene un aumento mayor, 4.5 veces superior, permitiendo así que la realización de pequeñas ranuras y agujeros funcionales por técnicas láser sea un proceso viable, realizando el mecanizado 6.13 veces más rápido que al hacerlo en aire. En el caso de la alúmina el resultado es mucho más sorprendente, obteniendo unos rendimientos 26 veces mayores. Esto permite no solo que se puedan marcar piezas de alúmina con láser, sino que se pueden cortar de una forma rápida y precisa utilizando un fluido auxiliar.

Una vez demostrado que el marcado láser asistido por líquidos en vitrocerámicas y cerámicas avanzadas es viable y presenta muy buenos resultados desde el punto de vista del rendimiento, se plantean una serie de pasos futuros para continuar con las investigaciones:

- Utilización como líquido auxiliar de un alcohol, como metanol, en una atmósfera inerte para evitar su combustión. El objetivo es comprobar qué efectos tiene el utilizar un fluido con una viscosidad similar a la del agua pero menos corrosivo.
- Adaptación de los equipos para que el líquido auxiliar circule durante el procesado, en vez de encontrarse estático sobre la pieza.
- Utilización de gases en vez de líquidos durante el procesado.
- Búsqueda de posibles aplicaciones para reutilizar el líquido auxiliar cuando tiene partículas de la pieza suspendidas en él, por ejemplo para obtener nanopartículas que puedan ser depositadas en otra pieza y formar recubrimientos.
- Utilizar fluidos con una viscosidad o densidad menor que la del agua, como la acetona.



# ***Anexos***



# Anexo A. Fundamentos de la tecnología láser

## A.1. Funcionamiento

La tecnología láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) permite obtener grandes densidades de energía de manera muy localizada en el espacio y en el tiempo. El primer láser se creó en 1960 por T. Maiman, a partir de los trabajos de Einstein sobre la emisión estimulada y de Townes sobre la posibilidad de extender al rango óptico la emisión de radiación coherente, sólo demostrada en el rango de las microondas hasta ese momento. Se trata de una tecnología en continuo desarrollo, cuya evolución ha posibilitado su uso en distintos campos como la medicina, metalurgia, comunicaciones, etc. [1].

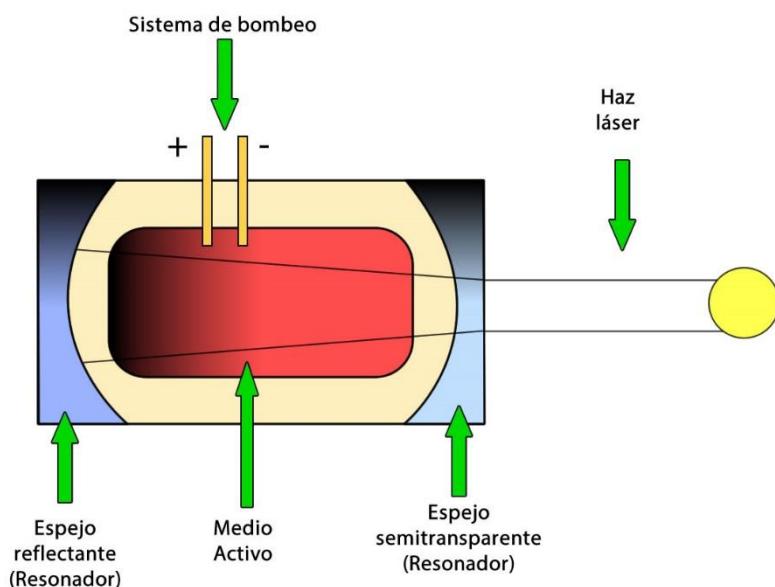


Figura A.1. Esquema de una cavidad láser.

Se pueden distinguir tres partes que definen la cavidad láser [5]:

- Resonador: formada por dos espejos, uno de ellos semitransparente, y el otro totalmente reflectante y ligeramente cóncavo para minimizar las pérdidas.
- Medio activo: es un conjunto de átomos o moléculas, que al ser excitadas por una fuente de alimentación alcanzan una inversión de población en sus niveles energéticos. Los electrones pasan a una capa superior, y al volver a la capa inferior generan un fotón. Al oscilar entre los espejos se amplifica la intensidad, gracias al fenómeno de emisión estimulada. El medio activo puede variar mucho de un láser a otro, puede estar formado por gases, como CO<sub>2</sub>, por tierras raras, como el Neodimio, disueltas en una matriz sólida, por líquidos o plasmas. El tipo de medio activo determina la longitud de onda del láser y el régimen de operación (potencia, tiempo de pulso, coherencia...).
- Sistema de bombeo: dependiendo del medio activo puede tratarse de fuentes eléctricas o sistemas ópticos. Es el sistema que inicia el proceso, conduciendo a los átomos del medio activo a estados de excitación, consiguiendo la inversión de población, y posteriormente la emisión de fotones.

El proceso que se lleva a cabo es el siguiente [6]:

- El sistema de bombeo excita el medio activo.
- Se produce la inversión de población, haciendo que los electrones pasen a una capa superior de mayor energía, y al volver a su estado natural generan un fotón.
- La onda coherente oscila entre los espejos.
- Al oscilar entre los dos espejos y atravesar el medio activo se repite el proceso y se amplifica la oda.
- Al ser un espejo semitransparente, parte de la onda sale al exterior, formando el haz láser.

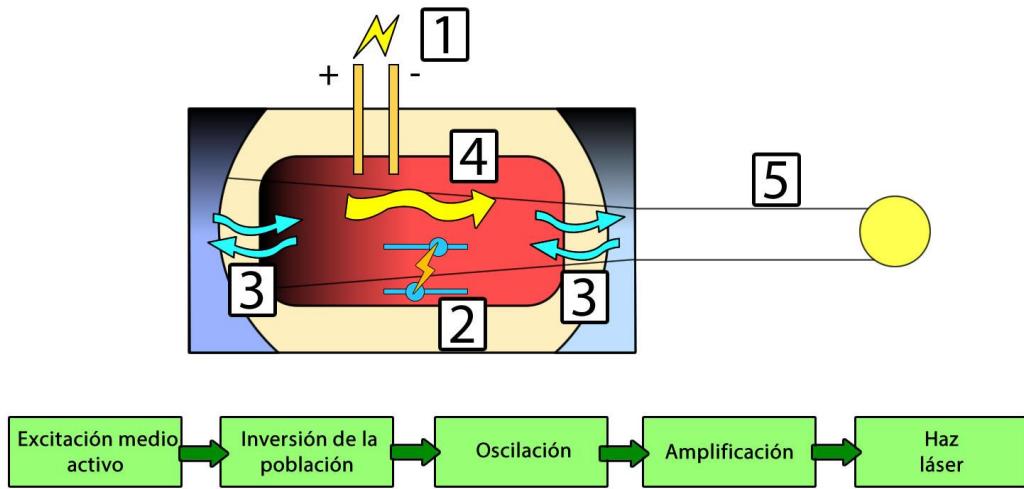


Figura A.2. Esquema de la formación del haz láser.

## A.2. Procesos de interacción atómica

Un átomo puede estar en un estado energético determinado según qué orbital ocupen sus electrones, cuanto más alejado del núcleo, mayor será el estado energético. En estado de equilibrio termodinámico existen más probabilidades de que los electrones se encuentren en niveles de baja energía, es decir, ocupan los orbitales que están más cercanos al núcleo [1].

En una población de átomos iguales, cuando las condiciones son normales, la mayoría de los átomos se encuentran en estado de baja energía, mientras que unos pocos estarán en un nivel de energía superior. La población de dichos átomos se rige según la ecuación de Boltzman (Ecuación A.1):

$$N_i = N_0 \exp\left(-\frac{E_i}{KT}\right)$$

Donde:

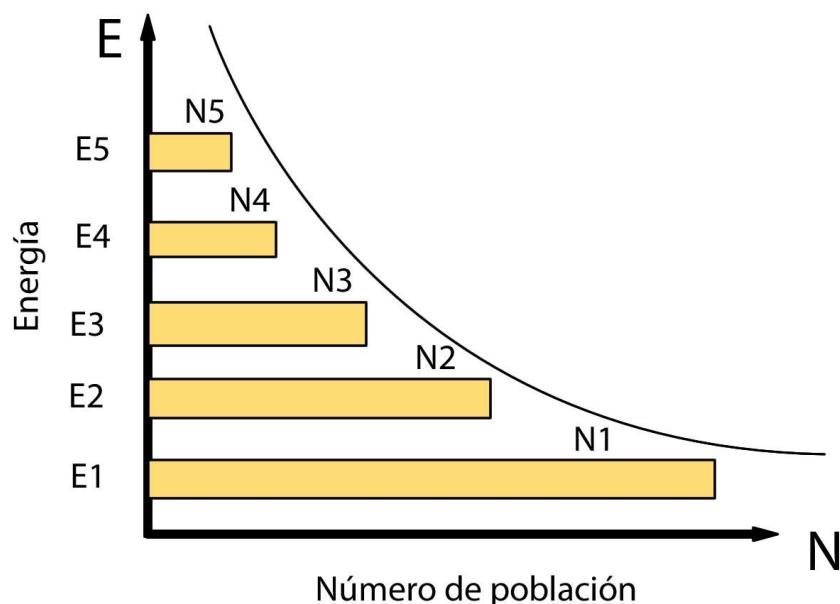
$N_i$  = concentración de átomos por unidad de volumen.

$E_i$  = nivel de energía.

T = temperatura.

K =  $1.38 \times 10^{-23}$  Julios/ $^{\circ}\text{K}$  = constante de Boltzman.

La ecuación de Boltzman demuestra lo dicho anteriormente, en equilibrio termodinámico, la mayor parte de los átomos de una población se encuentran en estado de baja energía, mientras que los estados energéticos mayores son ocupados por menor número de átomos a medida que el nivel energético es mayor, de modo que la población normal cumple  $N_1 > N_2 > N_3$  siendo  $E_3 > E_2 > E_1$ , correspondiendo  $N_1$  y  $E_1$  al nivel de mínima energía.

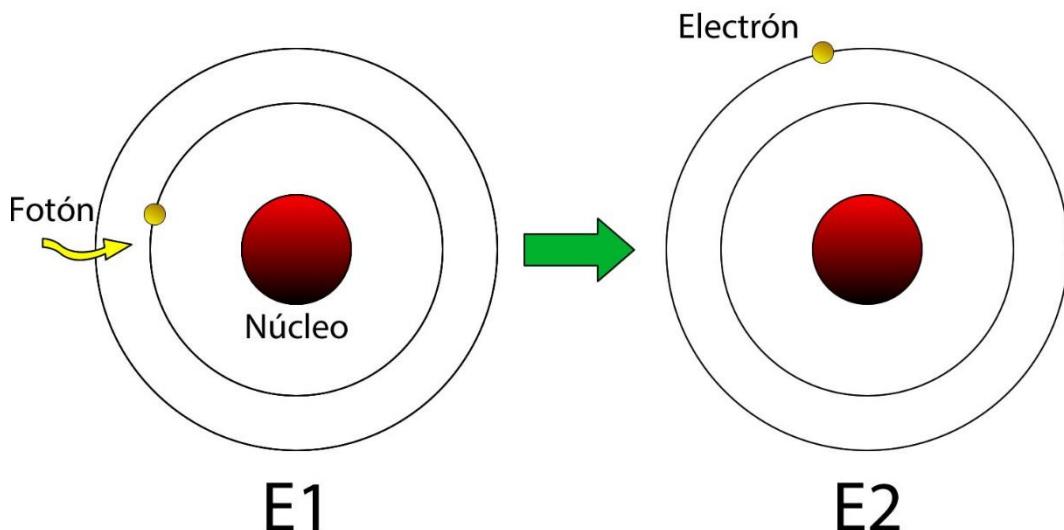


**Figura A.3. Representación de la población de los diferentes niveles energéticos en estado de equilibrio termodinámico.**

El nivel energético de un átomo puede variarse según los mecanismos de absorción y emisión.

- Absorción: cuando se tiene un átomo con sus electrones en niveles de baja energía y se le suministra una cantidad de energía determinada, un electrón que está en un orbital cercano al núcleo, al ser excitado, pasa a un orbital superior de mayor energía.

Si se suministra la energía adecuada a un grupo de átomos, se puede conseguir que el número de átomos excitados sea mayor que la población en su estado de baja energía, produciéndose el estado de inversión de población ( $N_2 > N_1$ ).



**Figura A.4. Esquema del proceso de absorción.**

- Emisión espontánea: cuando un electrón se encuentra en un estado excitado, se encuentra en una situación energéticamente inestable, con lo que la tendencia es volver a su estado de mínima energía. Cuando esto ocurre, al pasar el electrón de un estado de máxima energía a uno de mínima energía, se emite un fotón incoherente, con una dirección y fase aleatorias. Este fenómeno no es inmediato, ocurre a una velocidad determinada, expresada por la ecuación de velocidad de decaimiento (Ecuación A.2):

$$\frac{dN_1}{dt} = -A_{21}N_2$$

Donde  $N_2$  es la población de átomos excitados y  $A_{21}$  es el coeficiente de Einstein. El número de átomos decae desde el estado excitado al estado normal de forma exponencial, siguiendo la siguiente ecuación (Ecuación A.3):

$$N(t) = N(0) \exp(-t/\tau_{21})$$

Donde  $\tau_{21}$  es el tiempo de vida media de transición, que es el tiempo después del cual  $1/e$  átomos todavía permanecen en estado excitado.

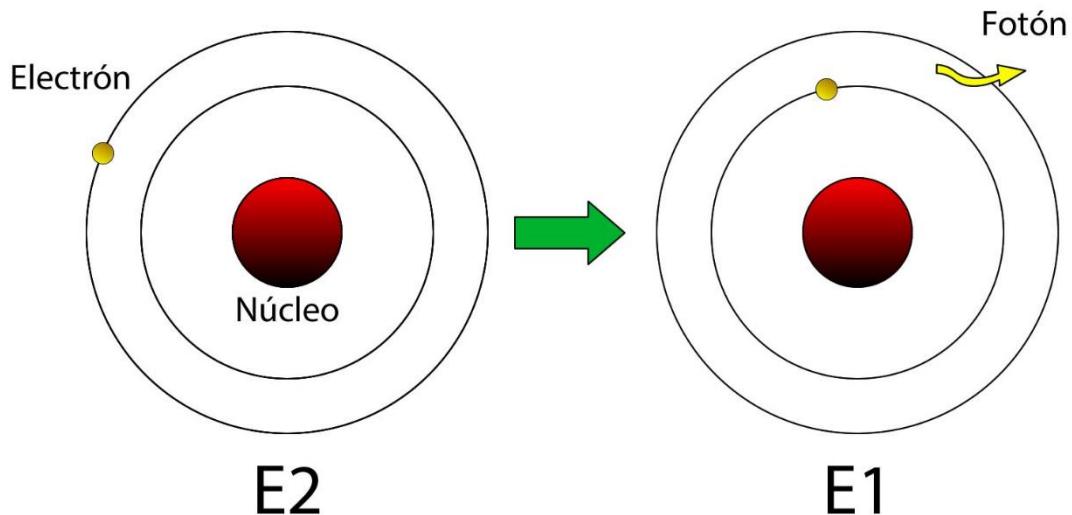


Figura A.5. Esquema del proceso de emisión espontánea.

- Emisión estimulada: es el proceso mediante el cual un electrón excitado vuelve a un orbital de mínima energía, forzado por la incidencia de un fotón. Al realizar esta transición electrónica se produce un segundo fotón idéntico al incidente en cuanto a energía, fase, dirección y polarización. Este proceso se considera como una amplificación coherente, ya que a partir de un fotón y un estado excitado se obtienen dos fotones iguales.

El fenómeno de emisión estimulada es el que se busca en los equipos láser para formar el haz de luz, ya que puede generar grandes cantidades de energía coherente, puede focalizarse y controlarse.

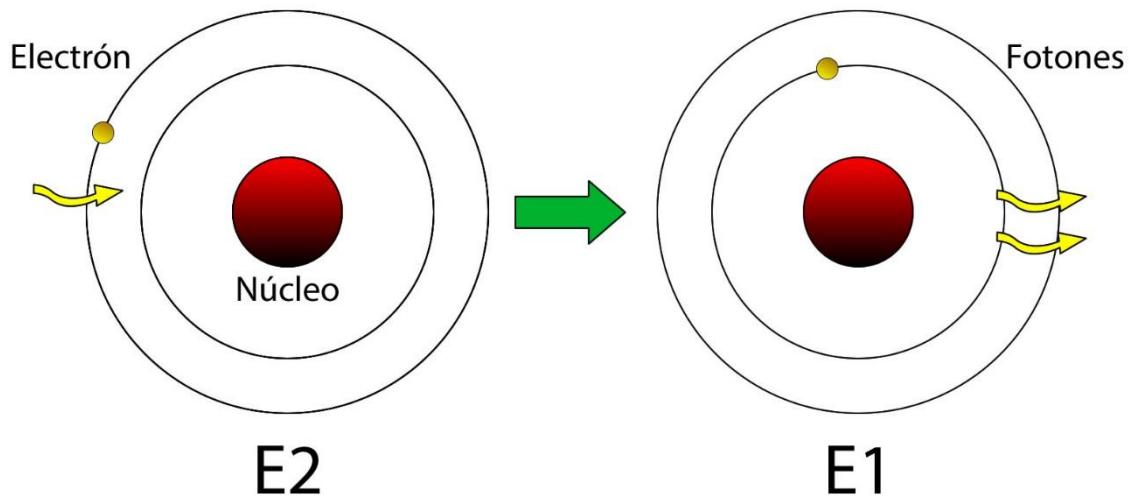


Figura A.6. Esquema del proceso de emisión controlada.

El que se dé el fenómeno de emisión espontánea o emisión estimulada dependerá de los niveles de población de los estados de energía  $N_1$  y  $N_2$  del medio activo. En condiciones normales, el número de población  $N_1$  es mucho mayor que  $N_2$ , de modo que al hacer incidir fotones se produce el proceso de absorción. En caso de que el medio activo se encuentre en estado de inversión de la población, al ser bombardeados los átomos con fotones, se produce el proceso de emisión estimulada, y la emisión de fotones se verá amplificada formando el haz láser, de modo que el flujo de salida sea mayor que el de entrada.

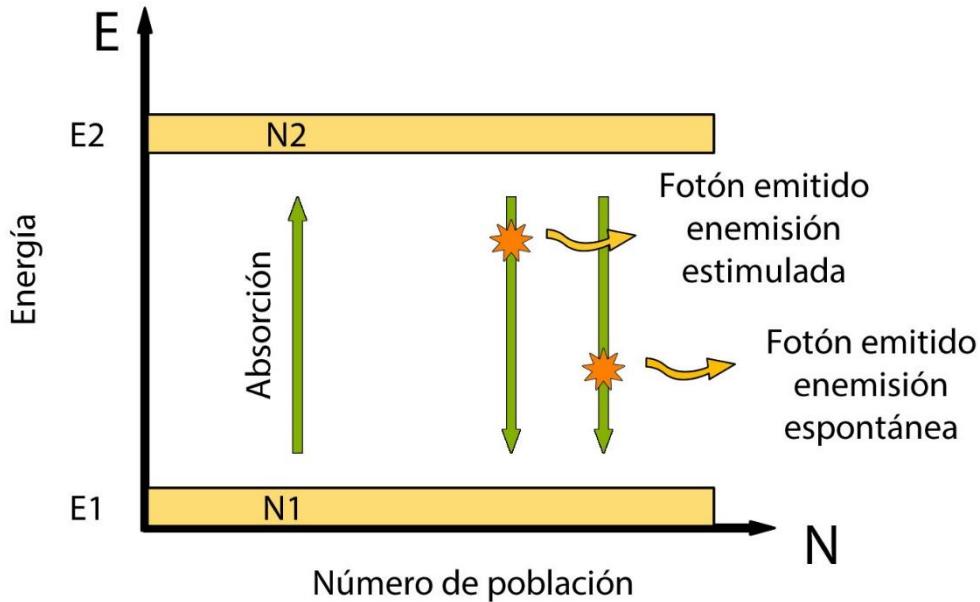


Figura A.7. Diagrama de niveles de energía.

Por ello, para que pueda formarse el haz láser es necesario que exista un elevado número de átomos excitado, y por ello se busca la inversión de población en el medio activo. Además, para poder realizar una emisión estimulada es necesario que el proceso se realice rápidamente, de modo que el medio activo se mantenga en estado excitado el tiempo suficiente para que no se produzca la emisión espontánea y dé tiempo a los fotones a que incidan y se produzca la emisión estimulada. Los láseres suelen tener entre 3 y 4 niveles de energía, aunque el proceso de emisión estimulada sólo se produce entre los niveles 1 y 2. En el caso de un láser con 3 niveles de energía, con unos tiempos de transición entre sus niveles de  $\tau_{32}$ ,  $\tau_{31}$  y  $\tau_{21}$ , debe cumplirse que  $\tau_{32} < \tau_{31} \ll \tau_{21}$  para que exista estabilidad al producirse la inversión de población.

### A.3. Características del haz

El haz láser presenta una serie de características:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): el haz láser es un haz de luz monocromática, correspondiente a una única longitud de onda.

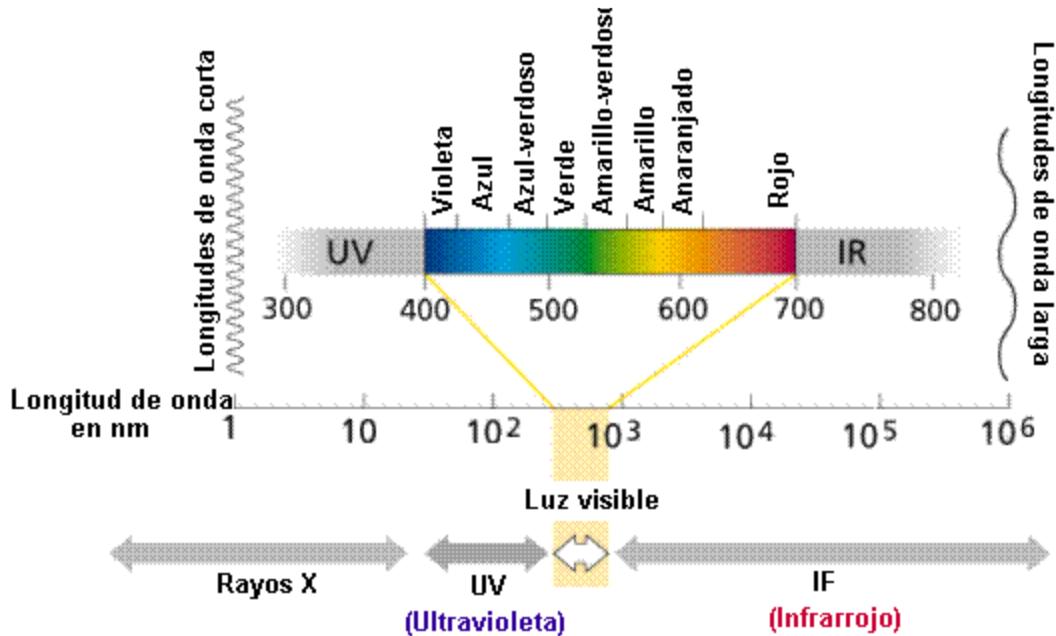


Figura A.8. Espectro de la luz.

- Coherencia: tanto temporal como espacial, permite obtener una radiación controlada y no aleatoria.
- Modos transversales de operación: la distribución de intensidad de la radiación láser no es uniforme, sino que varía con la distancia respecto al eje óptico. La geometría se clasifica según el patrón que sigue la onda transversal, según unos patrones de modos electromagnéticos transversales (TEM). Los diferentes modos se designan de la forma  $TEM_{ij}$ , donde i y j son números enteros no negativos. Un láser puede operar en varios modos transversales, de forma que la energía se distribuye según la superposición de todos sus modos.

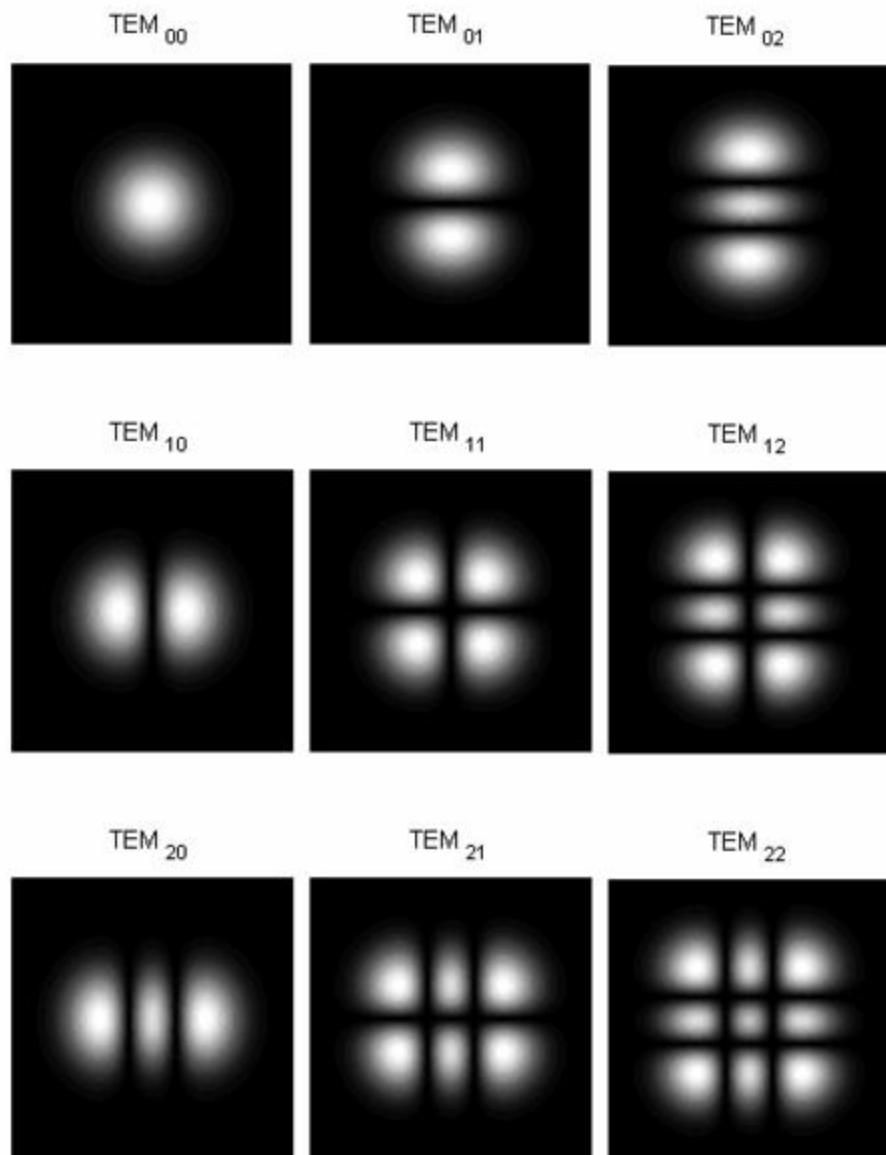


Figura A.9. Algunos ejemplos de modos electromagnéticos transversales (TEM).

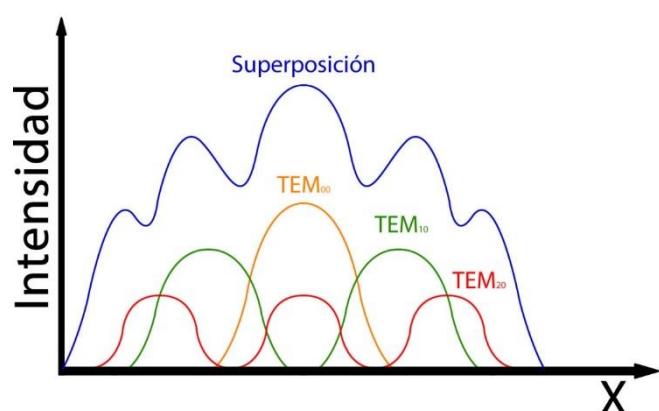


Figura A.10. Superposición de modos transversales.

El modo de operación más apropiado es el modo transversal fundamental, o modo gaussiano ( $\text{TEM}_{00}$ ), ya que es el modo que presenta mayor coherencia espacial y menor divergencia, concentrando la mayor cantidad de energía en un punto de menor diámetro en comparación con los otros modos. Para conseguir que se opere en el modo gaussiano se suele introducir un dispositivo limitante, de forma que solamente lo puede atravesar este modo, atenuando todos los demás.

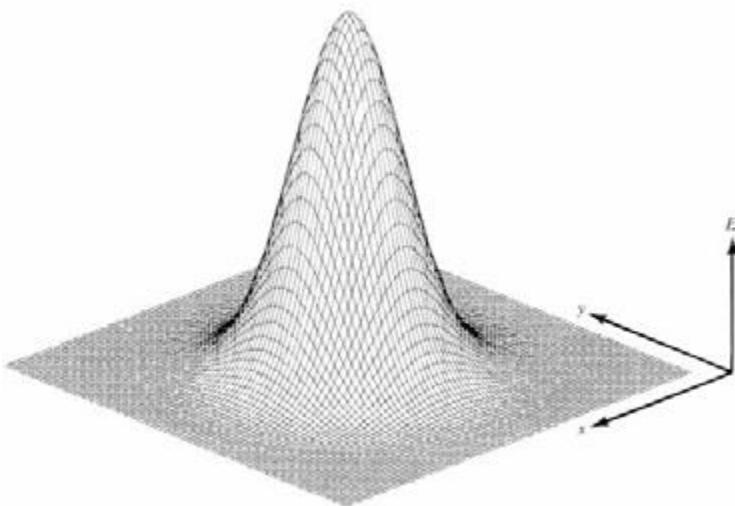
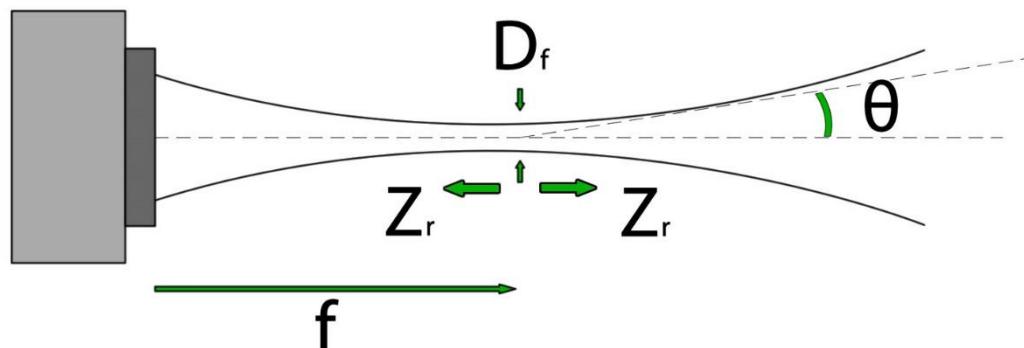


Figura A.11. Modo transversal fundamental ( $\text{TEM}_{00}$ ).

- Focalización del haz: en algunos procesos es necesario concentrar la luz en un punto para que la densidad de energía sea mayor, como por ejemplo en los procesos de corte. Para ello se utilizan una serie de medios ópticos, lentes y espejos de focalización, que hacen que el diámetro del haz se estreche hasta llegar a un mínimo, que corresponde con la distancia focal, y presenta la mayor densidad de potencia.

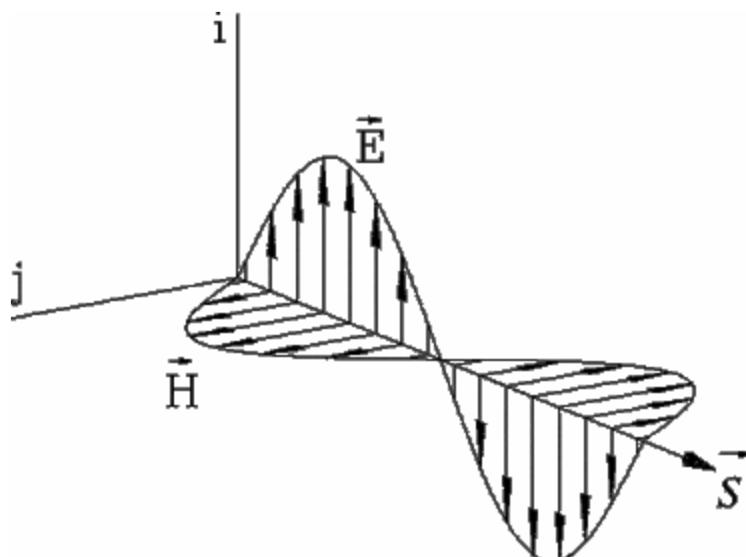
Existe un parámetro importante, llamado el rango de Rayleigh, que es la distancia en dirección del eje, desde el punto focal, que corresponde a  $\sqrt{2} D_{\text{focal}}$ , y en la que se considera que la variación del diámetro del haz es mínima y por tanto equivalente al diámetro del punto focal.

A partir del punto focal el haz diverge con la distancia y acaba abriéndose con un ángulo prácticamente constante.



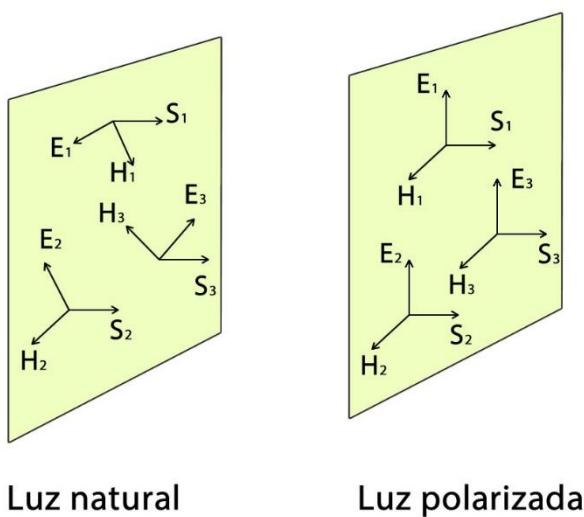
**Figura A.12. Representación del haz láser donde se pueden ver los distintos parámetros.  $D_f$  es el diámetro del haz en el foco;  $f$  es la distancia focal;  $Z_r$  es el rango de Rayleigh;  $\theta$  es el ángulo de divergencia.**

- Polarización del haz: la luz está compuesta por dos ondas transversales, perpendiculares entre sí, una correspondiente al campo eléctrico  $E$  y otra correspondiente al campo magnético  $H$ , ambas van en fase. La dirección de propagación de la luz es normal al plano formado por  $E$  y  $H$ , según el vector  $S$ , denominado vector de Poynting.



**Figura A.13.** Representación espacial de del vector de campo eléctrico  $E$ , el vector de campo magnético  $H$  y su vector asociado de dirección  $S$ .

Cuando un grupo de ondas electromagnéticas se propagan en una dirección, si los vectores eléctricos están orientados al azar se dice que es luz natural. Si el vector eléctrico oscila siempre en la misma dirección se dice que es luz polarizada. Se llama polarizador al mecanismo que permite que la luz pase a través de él cuando está polarizada en una dirección determinada, aunque en la práctica no existe un polarizador perfecto.



**Figura A.14.** Representación esquemática de la luz natural y la luz polarizada.

Cuando se superponen dos ondas electromagnéticas, sus vectores eléctricos  $E_1$  y  $E_2$ , también se superponen dando lugar a un nuevo vector  $E$  coplanario a ellos, que varía en el tiempo tanto en dirección como en módulo. La trayectoria que describe este vector resultante determina el tipo de luz polarizada, que puede ser lineal, circular o elíptica, dependiendo esto únicamente del desfase entre las dos ondas electromagnéticas originales.

La polarización del haz láser determina la calidad del mecanizado, de modo que si la polarización es longitudinal, se obtendrá mejor calidad de corte en la dirección perpendicular a la vibración de polarización, y si la polarización es circular, la calidad será independiente de la dirección de corte.

## A.4. Tipos de láseres

Un sistema láser se puede clasificar según diferentes criterios, como pueden ser el modo de operación (Continuo o pulsado), el medio activo, el mecanismo de excitación, longitud de onda del haz, el tipo de resonador, características de la radiación, número de niveles de energía, etc.

La clasificación más utilizada es según el tipo de medio activo, que puede ser un gas, un sólido, un líquido o un plasma. Dependiendo de qué tipo de medio activo se utilice, la longitud de onda del haz láser quedará determinada.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Espectro	Tipo de láser	Medio activo
0,03-0,39	Ultravioleta	Excímero	Gas de excímeros
0,39-0,622	Visible	Colorante	Colorante orgánico
0,622-0,780	Rojo (Visible)	He-Ne Diodo baja potencia Colorante	Mezcla de gases He y Ne Unión P-N de semiconductor Colorante orgánico
0,780-3000	Infrarrojo	Diodo alta potencia Nd-YAG CO <sub>2</sub>	Unión P-N de semiconductor Cristal YAG con impurezas Nd <sup>3+</sup> CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , He

Tabla A.1. Resumen de tipos de láseres.

### A.4.1. Modos de operación

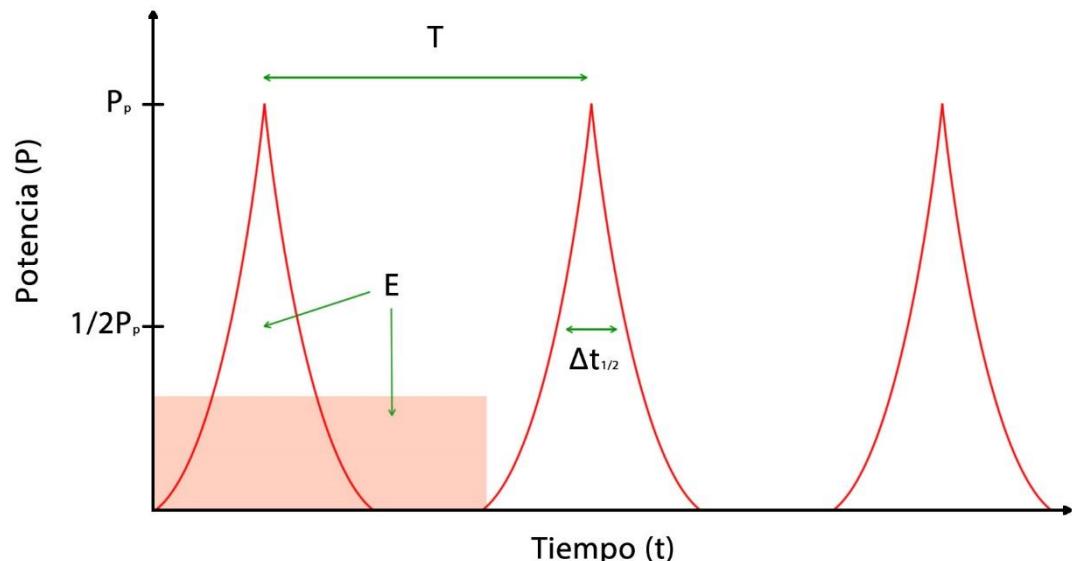
- **Modo continuo:** en este modo de operación la potencia de salida es continua en el tiempo, con una estabilidad entorno al 98%, para lo que se requiere un bombeo del medio activo también continuo. Se utiliza para aplicaciones de corte, soldadura y modificación superficial.
- **Modo pulsado:** en este modo la potencia de salida no es continua respecto al tiempo y se da en forma de pulsos repetidos o de un único pulso. Se utilizan en operaciones que requieren una gran potencia de pico, como mecanizado, marcaje, etc.

Los parámetros que caracterizan al tren de pulsos son los siguientes:

- Energía de pulso,  $E_p$ .
- Duración del pulso,  $\Delta t_{1/2}$ .
- Potencia máxima de pico,  $P_p$ .
- Frecuencia,  $f$ .

Con ello se puede definir la potencia media como la potencia equivalente a la que produciría un láser en modo continuo, según la expresión (Ecuación A.4):

$$P_m = E_p * f$$



**Figura A.15. Representación de un tren de pulsos.  $T$  es el periodo;  $\Delta t_{1/2}$  es la duración del pulso;  $P_p$  es la potencia de pico;  $E$  es la energía de pulso.**

Para generar los pulsos se pueden utilizar diferentes mecanismos:

- Bombeo en forma pulsada: suministrando la energía del mecanismo de excitación de forma pulsada se consigue que el láser emita en forma de pulsos.
- Conmutador Q-Switch: se introduce un interruptor dentro de la cavidad óptica que mediante la conmutación de su estado permite dejar pasar la radiación a través de él. Permite almacenar gran cantidad de energía en la cavidad láser y cuando se abre el conmutador emite un pulso corto, del orden de nanosegundos, y de elevada potencia.
- Mode-Locking: se utiliza para aplicaciones que requieren pulsos de duraciones inferiores a los nanosegundos, realizando un bloqueo de los modos longitudinales del láser. Dentro de la cavidad láser se pueden producir varios modos, superponiéndose a la salida y obteniendo un pulso que contiene varias frecuencias, de forma que la potencia instantánea de salida fluctúe aleatoriamente. Con el mecanismo de bloqueo de modos se consigue que todos los modos tengan la misma fase, obteniéndose un pulso de corta duración y elevada potencia de pico.

## A.4.2. Láser Nd:YAG

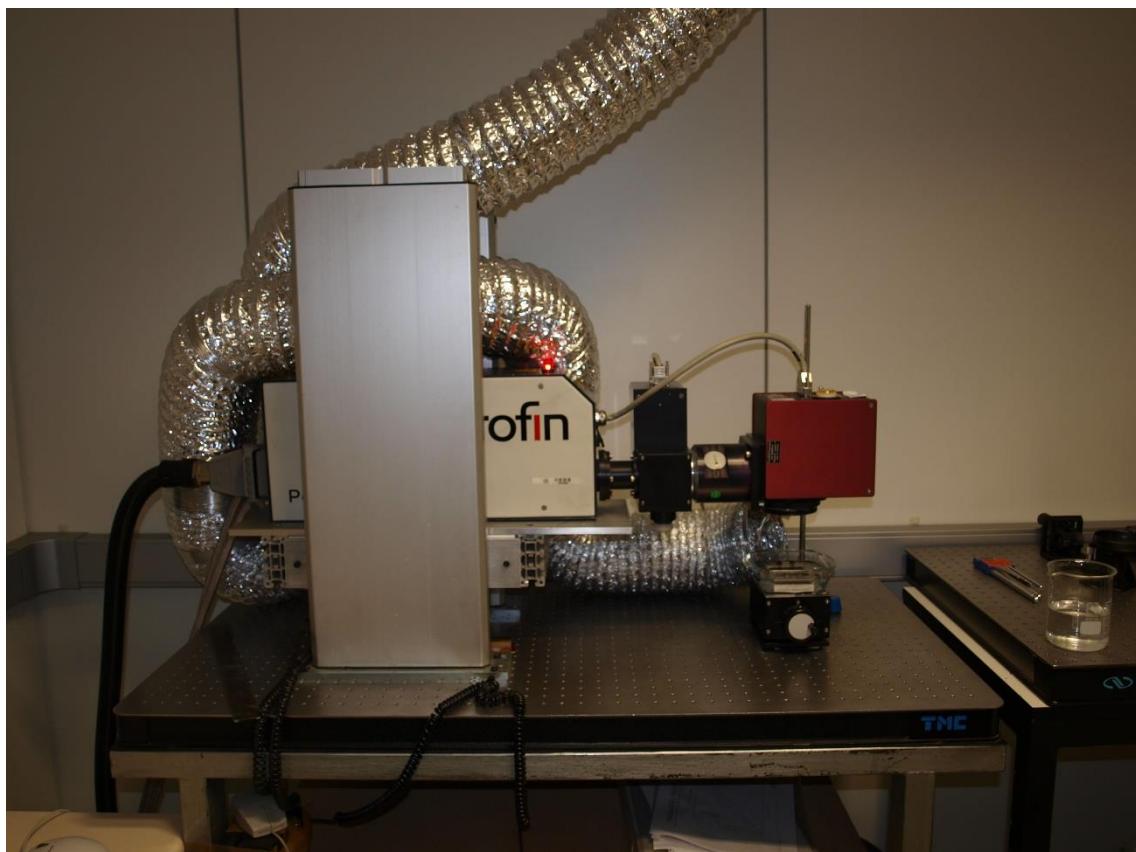
El medio activo de un láser Nd:YAG está formado por una matriz de cristal YAG (Barras de 2 a 15 mm de diámetro y longitud de 2 a 30cm) dopada con iones de neodimio Nd<sup>3+</sup> (Entre un 1 y un 4% en peso), que se monta en una cavidad elíptica y se excita mediante una lámpara de criptón o diodos con una longitud de onda de 808 nm.

La matriz YAG es adecuada para alojar los iones Nd<sup>3+</sup>, debido al gran número de huecos que contiene. Además presenta una alta conductividad térmica en comparación con el vidrio, así pues, en aplicaciones con alta velocidad de repetición de pulsos resultan muy apropiadas.

Son equipos de fiabilidad alta y con elevadas potencias, entre 10 y 20 W. Generalmente trabajan en modo pulsado, obteniendo una elevada energía de pulso, aunque el rendimiento es bajo, en torno al 0.1-2%.

Características principales:

- Son láseres de estado sólido.
- Emiten en la región del espectro del infrarrojo cercano ( $1.06 \mu\text{m}$ ).
- Son bombeados ópticamente.
- Operan en modo pulsado o continuo.
- Son láseres de cuatro niveles.



**Figura A.16. Imagen de un equipo láser Nd:YAG.**

# Anexo B. Principios del procesado láser asistido por líquidos

## B.1. Introducción

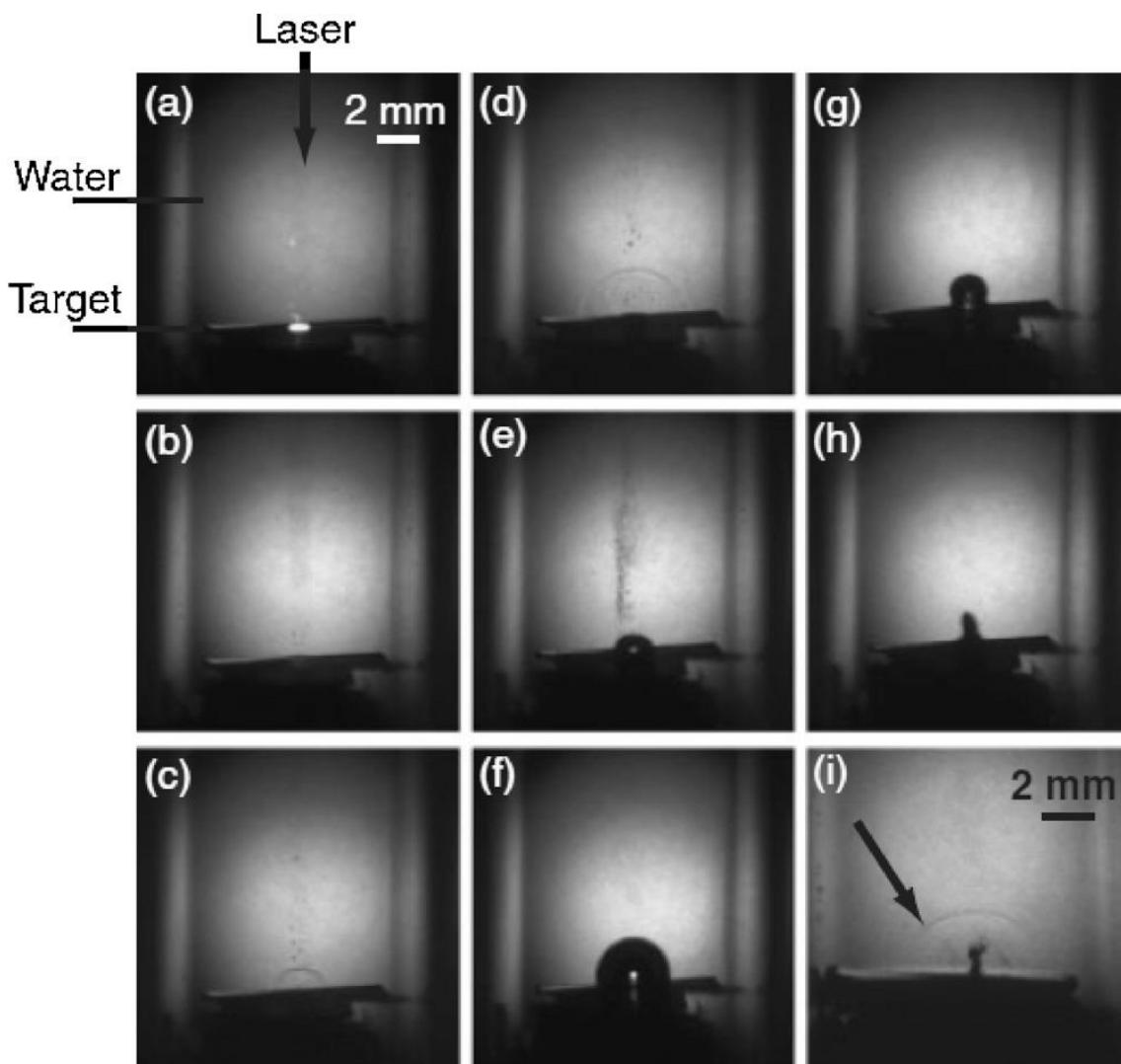
En algunas ocasiones las piezas de trabajo deben estar en contacto con líquidos, ya sea porque los contengan en su estado natural (Como puede ser la madera) o porque se le aplique a la pieza de trabajo con intención de obtener un efecto determinado. El líquido más común es el agua, debido a que es abundante y no presenta riesgos para la salud, aunque en ocasiones también se utilizan disolventes orgánicos [2].

En el procesado láser asistido por líquidos (LPAL, Laser Processing Assisted by Liquids) entran en juego una serie de mecanismos que no se dan en el mecanizado láser en aire, y cuyo origen se encuentra en los diferentes fenómenos que se producen en el líquido al ser atravesado por el haz láser.

Durante el mecanizado láser asistido por líquidos, la presencia de un gas o un líquido atenúa la potencia del haz que llega a la pieza por procesos de reflexión, absorción y reflexión [7], aunque no de forma crítica, de manera que llega con la intensidad suficiente para mecanizar su superficie.

Cada pulso produce los siguientes fenómenos en el interior del líquido [8]:

1. Se genera una onda de choque.
2. Seguidamente se produce por cavitación una burbuja contenida en la pluma de ablación.
3. La burbuja colapsa.
4. El material arrancado se libera en el líquido y se genera una segunda onda de choque.



**Figura B.1.** Imágenes de los la secuencia de fenómenos producidos por un pulso láser (Láser Nd:YAG de longitud de onda de 1064 nm) en un medio líquido. (a-b) Incidencia del láser, (c-d) formación de la onda de choque, (e-g) formación de una burbuja por cavitación, (h) colapso de la burbuja, (i) el material arrancado de la pieza es arrastrado dentro del líquido y se forma una segunda onda de choque.

## B.2. Mecanismos fundamentales en el líquido

A continuación se definen los principios básicos y los fenómenos que se producen en el líquido.

### B.2.1. Penetración del haz en el líquido

Al cambiar de medio, el haz láser sufrirá una refracción debido a que el índice de refracción del líquido será diferente al del aire, así pues, la distancia focal aumentará y el foco cambiará de posición. Considerando un haz de luz lineal, su distancia focal se incrementará según la expresión [9] (Ecuación B.1):

$$\Delta f = l \left( 1 - \frac{f}{\sqrt{n^2 f^2 + (n^2 - 1)r^2}} \right)$$

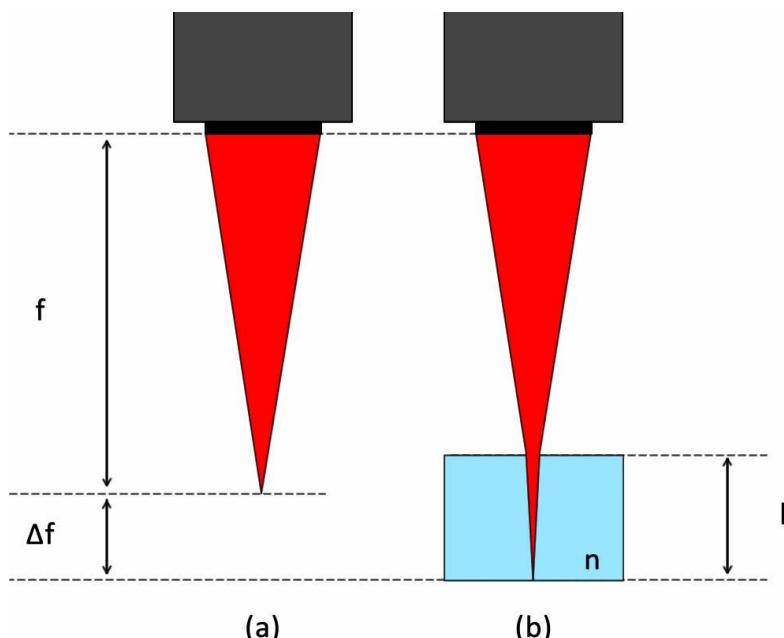
Donde:

- $f$  es la distancia focal en el aire.
- $l$  es el espesor de la capa líquida.
- $n$  es el índice de refracción del medio.
- $r$  es el radio del haz láser fuera del foco.

Si se supone que  $r \ll f$ , se puede simplificar a la siguiente expresión (Ecuación B.2):

$$\Delta f = l \left( 1 - \frac{1}{n} \right)$$

Este  $\Delta f$  es el incremento que sufrirá la distancia focal al atravesar el haz láser una capa de líquido, y debe ser tenido en cuenta a la hora de mecanizar, ya que será necesario corregir la posición de la pieza.



**Figura B.2. Distancia focal en aire (a) y distancia focal en un medio líquido de índice de refracción  $n$  y profundidad  $l$  (b).**

Además de la refracción del haz en el líquido puede haber otros efectos que modifiquen la distancia focal durante el mecanizado, como la vaporización del líquido, la presencia de burbujas y fenómenos de auto enfocado.

La potencia del haz láser se verá atenuada al atravesar una capa de líquido debido a la absorción de fotones y a la dispersión de las moléculas del líquido.

En sistemas donde el fenómeno de absorción predomina, la atenuación en la intensidad de la luz puede calcularse mediante la ley de Beer-Lambert (Ecuación B.3):

$$I_v = I_{v0} \exp(-\alpha x)$$

Donde:

- $I_v$  es la intensidad de la luz.
- $I_{v0}$  es la intensidad de la luz antes de entrar en el líquido.
- $\alpha$  es el coeficiente de absorción.
- $x$  es la profundidad de la capa.

Cuando un líquido es transparente se considera que  $\alpha$  es aproximadamente cero, con lo que generalmente la absorción es un fenómeno que se asume como despreciable en el mecanizado láser asistido por líquidos.

Otro fenómeno que sí que puede afectar a la intensidad del haz es la presencia de partículas procedentes de la ablación que quedan suspendidas en el líquido. Cuanto mayor es el tiempo de mecanizado, mayor es la concentración de partículas en el líquido. Estas partículas dispersan energía, ya que al encontrarse entre el equipo y la pieza, son atravesadas por el haz láser, y se producen fenómenos de dispersión y absorción, que reducen la energía neta que llega a la superficie a mecanizar.

## B.2.2. Emisión de ondas de choque

Al atravesar la capa de líquido, el haz láser llega a la superficie sólida de la pieza [9]. Al incidir en la superficie se generan ondas de choque, para disipar el exceso de energía. Las ondas de choque se definen como la formación de discontinuidades en las variables de flujo del líquido, como puede ser la densidad. Se generan ondas compresivas en el líquido y en el sólido y se propagan. En el sólido se produce una rápida expansión, y en el líquido se

produce un cambio en el índice de refracción. La onda de choque en el líquido disipa una gran cantidad de energía mientras se propaga, por lo que el líquido se calienta mucho. Este fenómeno puede producir burbujas por cavitación acústica a lo largo del camino del haz láser. La explosión de estas burbujas al colapsar puede formar a su vez más ondas de choque.

### **B.2.3. Formación de burbujas**

Existen dos mecanismos de formación de burbujas, por un lado se producen por vaporización explosiva, cuando la temperatura se eleva a presión constante, por otro, se producen por cavitación, cuando la presión del líquido disminuye a temperatura constante [9, 10 , 11].

La nucleación de burbujas durante el procesado puede ocurrir en la capa de líquido sobrecalentada, pero también puede darse en la entrefase entre el líquido y el sólido mediante nucleación heterogénea. Las burbujas crecen y se convierten en una única burbuja de mayor tamaño que se expande a lo largo de la pluma de ablación.

Durante la expansión de la burbuja, la presión y la temperatura en su interior decrecen rápidamente, de forma que cuando ésta colapsa, se produce un aumento de la presión y la temperatura hasta sus valores originales. Esto produce la expansión de una nueva burbuja y la emisión de una onda de choque secundaria. La burbuja secundaria crece y se convierte en una burbuja esférica, que al colapsarse explota y provoca daño por cavitación en la superficie a mecanizar, lo que ayuda a eliminar material.

En función de la viscosidad del líquido se puede ver afectado el fenómeno de formación de burbujas, de modo que incrementando la viscosidad del medio decrecerán los ratios de formación y colapso de burbujas.

La formación, crecimiento y colapso de la primera burbuja suele durar entre 100 y 200  $\mu\text{s}$ .

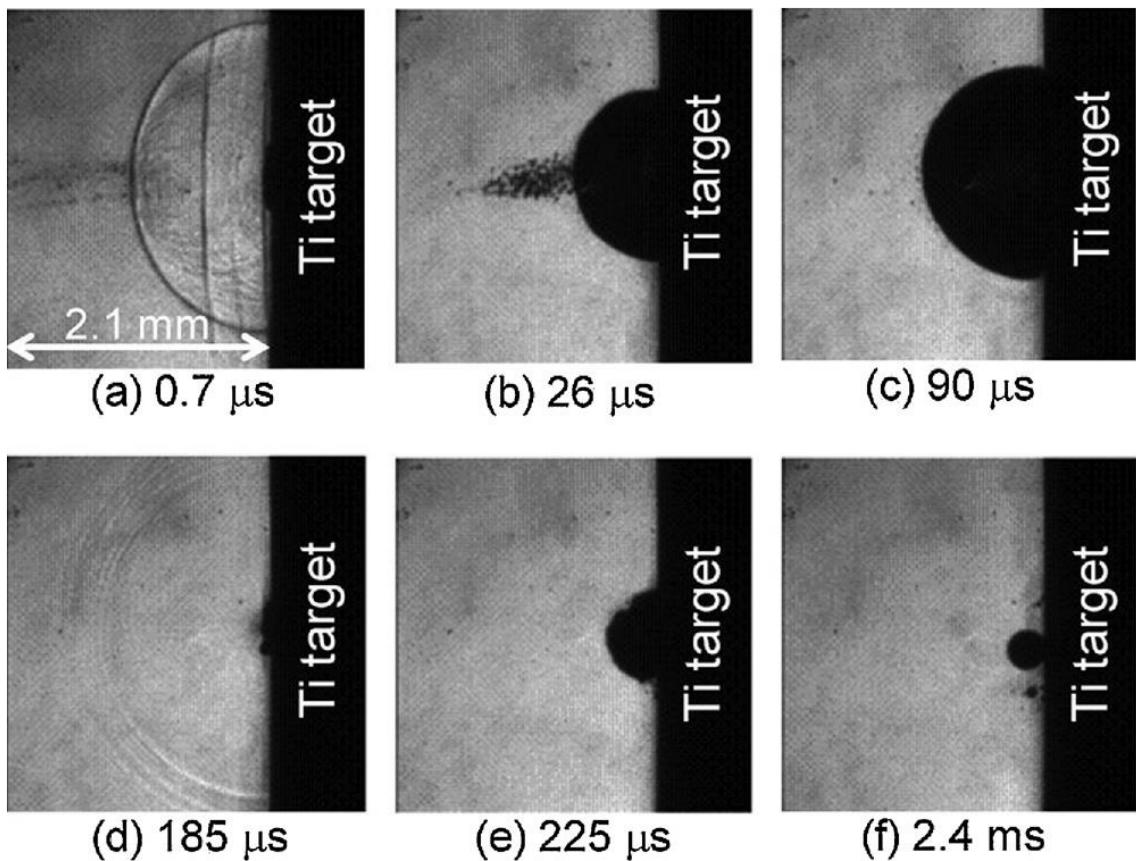


Figura B.3. (a) Onda de choque, (b-c) burbuja formada por cavitación, (d) colapso y onda de choque producida, (e-f) formación de la segunda burbuja.

## B.2.4. Formación de nanopartículas

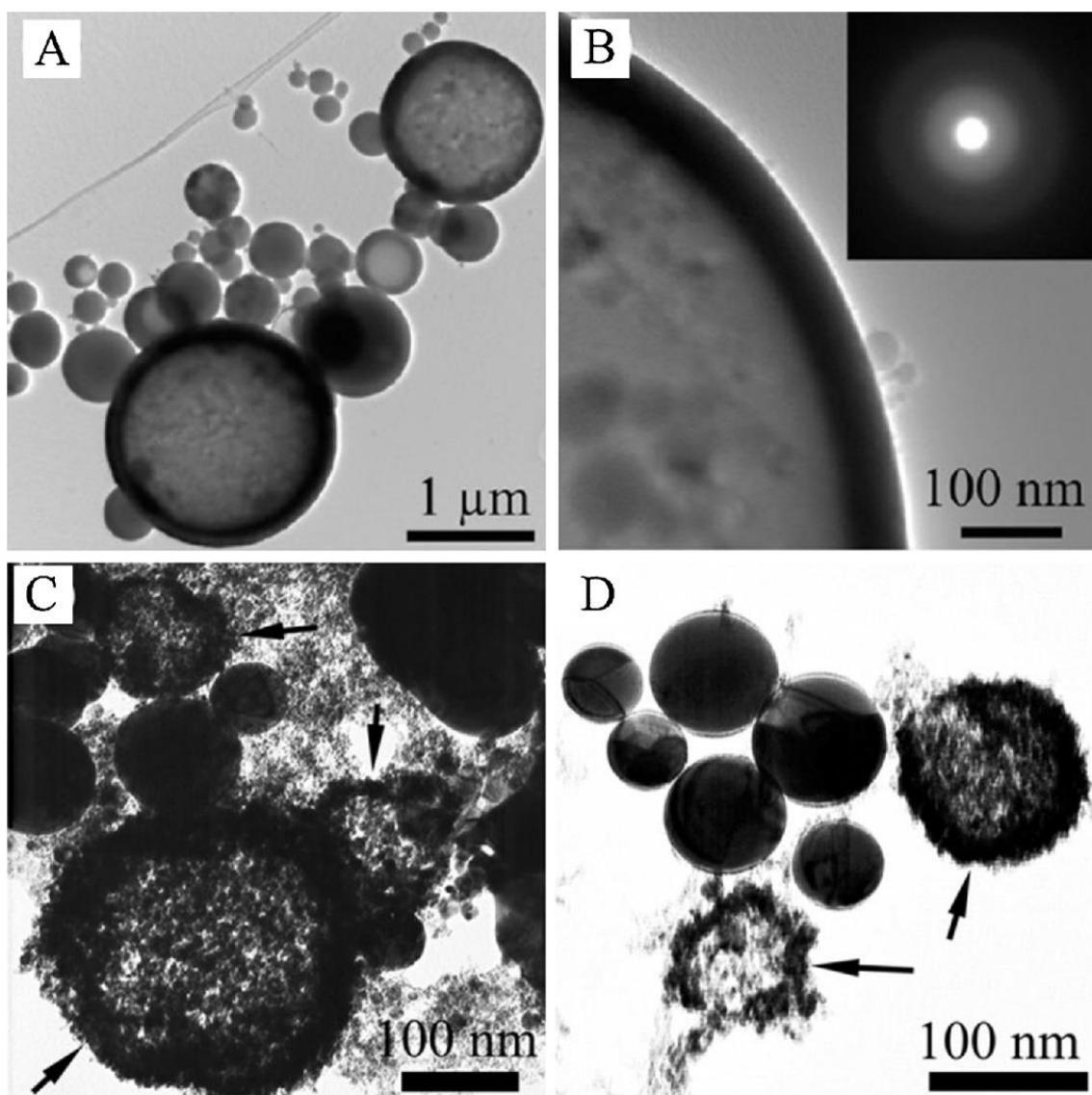
Durante la fase de expansión de burbujas, la pluma de ablación se enfriá rápidamente, provocando que el líquido que se evapora condense. La condensación se produce en dos pasos, la formación de núcleos y su crecimiento. La expansión de las burbujas inducidas y de la pluma de ablación es distinto, con lo que el interior de la pluma no es homogéneo.

El ratio de nucleación cambia extremadamente con el enfriamiento, de modo que al condensar la pluma en el líquido es muy diferente a lo que ocurre en vacío o en gas. Debido a la vida finita de las burbujas y al comportamiento oscilatorio, el tiempo de nucleación disminuye y se forman nanopartículas y micropartículas [12].

Durante la oscilación de las burbujas, la materia que está cercana a la pluma se acumula en la superficie de las mismas. Cuando se produce el colapso, los impulsos que se produce en

las cercanías de la pluma y en la superficie de la burbuja están en direcciones opuestas, de modo que parte de la materia que hay suspendida en el líquido se disuelve formando una solución, que puede producir tanto formación de nanopartículas como reacciones químicas en el líquido cercano. Durante el colapso de la segunda burbuja se libera la materia, es decir, partículas, nanopartículas y vapor, dentro del líquido.

Además, se pueden producir reacciones químicas si se utiliza un líquido reactivo, debido a que el láser produce iones que reaccionan con las moléculas del líquido.



**Figura B.4. Distintas imágenes de nanopartículas producidas por ablación láser asistida por líquidos. (A-B) son partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (C-D) son partículas de Pt.**

## B.3. Ventajas e inconvenientes

A continuación se enumeran una serie de ventajas y desventajas del mecanizado láser asistido por líquidos en comparación con el procesado láser convencional en atmósfera gaseosa o en vacío, así como con otros tipos de procesado. Únicamente se consideran para ello líquidos neutros en condiciones normales, como agua, disolventes orgánicos, etc.

➤ Ventajas [2]:

- ✓ No requiere contacto directo con la pieza, con lo que no existen cargas mecánicas.
- ✓ Es un proceso flexible y rápido.
- ✓ Hay muchos parámetros de control disponibles, con un gran rango de variación: longitud de onda del haz, frecuencia de pulso, densidad de energía, propiedades del líquido, temperatura del líquido...
- ✓ Se puede aplicar a superficies inclinadas y curvadas.
- ✓ Se puede aplicar en tubos y agujeros.
- ✓ Se puede aplicar bajo el agua (Como en reactores nucleares y bajo el mar) ya que no requiere de una zona seca.
- ✓ Gran eficiencia energética si se utilizan pulsos cortos.
- ✓ Se reduce la carga térmica en la pieza de trabajo, ya que el líquido disipa calor. Con ello se reduce el daño en biomateriales.
- ✓ Se reduce el riesgo de contaminar la atmósfera, debido a que las partículas y gases quedan captados por el líquido.
- ✓ El líquido puede servir como guía de la luz.
- ✓ El líquido puede servir como fuente a partir de la cual se pueden conseguir nuevos materiales (Como carbono, nitrógeno, oxígeno...) y también como reactivo ( $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ).
- ✓ A temperaturas y presiones elevadas la solubilidad de sólidos en líquidos se incrementa de forma considerable, con lo que las partículas se disuelven.
- ✓ La dinámica de las burbujas y su migración generan fuerzas hidrodinámicas que arrastran las partículas que no se disuelven.
- ✓ El tiempo de relajación térmica de la pieza se reduce respecto al mecanizado convencional o con vacío.

- ✓ La longitud de onda del láser es menor que en vacío o gases.
- ✓ El autoenfocado que se produce en líquidos puede ser utilizado para concentrar la luz.

➤ Desventajas [2]:

- ⊗ Los equipos son caros (Equipos láser).
- ⊗ Se necesita un sistema auxiliar para manejar los líquidos.
- ⊗ Existe peligro de producir daños oculares por la luz láser, especialmente en las longitudes de onda infrarrojas. Para evitarlo se deben utilizar equipos de protección como gafas o pantallas.
- ⊗ Pérdida de potencia debido al enfriamiento de los líquidos.
- ⊗ Existe peligro de explosión, intoxicación y daño eléctrico debido a los vapores del líquido.
- ⊗ Existe peligro de explosión de los productos producidos a partir del líquido (Como por ejemplo O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>).
- ⊗ Pérdidas en la superficie del fluido debidas a la reflexión.
- ⊗ Se produce dispersión de la luz por los vapores, superficies en desnivel, gradientes térmicos en el líquido, partículas suspendidas y burbujas.
- ⊗ Las salpicaduras del líquido pueden contaminar los componentes ópticos del equipo.
- ⊗ La dispersión y absorción de la luz es superior en líquidos que en gases.
- ⊗ Se puede producir oxidación/corrosión en caso de líquidos que contienen oxígeno o halógenos.
- ⊗ Se puede contaminar la muestra con carbono, nitrógeno, etc. procedentes del líquido de trabajo.
- ⊗ Se puede incorporar hidrógeno a la pieza de trabajo si se utilizan líquidos que lo contengan. Esto puede producir fragilidad, y debe ser tenido en cuenta en caso de metales.
- ⊗ Se puede producir polimerización de líquidos orgánicos.
- ⊗ Los choques térmicos y mecánicos inducidos por el láser son más intensos que los producidos en gases o en vacío, de modo que producen más dislocaciones, deformaciones y rotura de material.

- ⊗ El colapso de las burbujas puede producir daño superficial en las piezas de trabajo.
- ⊗ La simulación del proceso es mucho más complicada que en vacío o en gases.
- ⊗ El umbral de optical-breakdown es inferior que en gases (Agua-Gas).

## B.4. Aplicaciones

A la hora de realizar un mecanizado láser asistido por un líquido se busca la formación de burbujas y ondas de choque, ya que éstas producen presiones mucho mayores que las que se producen en vacío o en gases, y que al transmitirse a la pieza de trabajo producen dislocaciones e inducen a la deformación plástica del material, lo que sumado a la vaporización y fusión producidas por el haz láser hace que el rendimiento de ablación sea mayor.

Otra razón por la que el mecanizado láser puede ser asistido por líquidos es que al producirse las partículas y gases propios del mecanizado se disuelven y queda más limpia la zona mecanizada, evitando que se vuelva a depositar material en ella y se pueda volver a fusionar con la pieza formando rebabas. Con ello también se consigue eliminar la contaminación ambiental producida por los gases y partículas que podrían de otra forma quedar en el aire, reduciendo el riesgo para el operario.

Además los agujeros y marcas así mecanizados presentan menor conicidad.

Algunas aplicaciones [2, 13]:

- Limpieza de superficies: la presencia de líquidos puede facilitar la retirada de partículas de una superficie debido a que se reducen las fuerzas de adhesión de las mismas, se generan vapores que las pueden arrastrar y se generan ondas acústicas que ayudan a la eliminación de impurezas.
- Endurecimiento de materiales: se pueden utilizar las ondas de choque y las presiones producidos en los líquidos para formar dislocaciones en la superficie de piezas, de modo que se endurezcan superficialmente manteniendo sus propiedades mecánicas en el interior. Este proceso puede tener muchas aplicaciones en el campo de la aeronáutica a la hora de fabricar componentes de aviones o para fabricar componentes de reactores nucleares.

- Reducción de la porosidad superficial: el procedimiento es el mismo que en el caso anterior, pero si la pieza tiene porosidad se puede reducir en algunas de sus caras o en su superficie, manteniéndola en su interior. Esto puede ser utilizado para fabricar filtros o recubrimientos aislantes.
- Revestimientos, formación de capas delgadas: se pueden utilizar las presiones producidas durante el proceso para adherir una capa protectora a una pieza.
- Micro conformado: pueden aprovecharse las presiones para deformar plásticamente pequeñas zonas en láminas metálicas finas.
- Procesos subtractivos: son los procesos de mecanizado normal y de corte, en los que se obtienen mejores rendimientos y acabados.
- Generación y modificación de partículas: como ya se ha dicho, las partículas arrancadas de la pieza quedan disueltas en el líquido de trabajo, de forma que puede utilizarse el proceso para obtener pequeñas partículas a partir de una pieza original. También se puede utilizar el líquido para contener las partículas que desean ser modificadas, de forma que con la energía del haz láser se modifiquen o reaccionen con el propio líquido.
- Modificación superficial: se puede fundir o evaporar la superficie de una pieza, provocando reacciones químicas con el ambiente.

# Anexo C. Materiales

A continuación se incluye una lista de los materiales utilizados para la experimentación y sus propiedades más importantes [14].

## C.1. Vítrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema

Las vitrocerámicas se forman a partir de una nucleación y cristalización controlada de una fase vítreo inicial, obteniéndose un material compuesto por una mezcla de fases vítreas y cristalinas.

Su composición más común es la siguiente [1]:

- Sílice ( $\text{SiO}_2$ ): material vitrificante → 69-74%.
- Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ): fundente → 12-16%.
- Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ): estabilizante → 5-12%.
- Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) → 0-6%.
- Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) → 0-3%.

Para su fabricación se vierte el vidrio fundido en un molde con la forma deseada, y se solidifica, obteniendo la matriz vítreo. Posteriormente se realiza un proceso térmico a distintas temperaturas para que nucleen los cristales y crezcan, formando la fase cristalina.

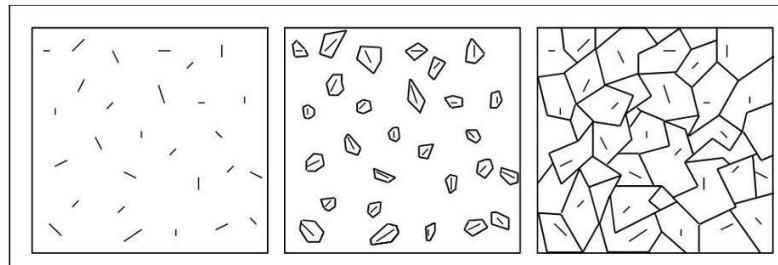


Figura C.1. Esquema del proceso de cristalización controlada.

Según la composición química del material de partida se puede controlar la facilidad con la que se forma el vidrio y determina el proceso de nucleación. La estructura final de la vitrocerámica depende de la composición del fundido.

Las vitrocerámicas tienen propiedades que las hacen adecuadas para su uso como materiales de cocina [14].

- Propiedades térmicas: tienen coeficientes de expansión cercanos a cero y presentan una elevada resistencia al choque térmico.
- Propiedades ópticas: pueden fabricarse vitrocerámicas transparentes, translúcidas y opacas, según se deseé.
- Propiedades químicas: influenciadas por la propia naturaleza del material, dependen de la microestructura final del vidrio fabricado y de la composición de sus fases.
- Propiedades biológicas: algunas vitrocerámicas son bioactivas y pueden utilizarse para aplicaciones médicas.
- Propiedades mecánicas: dependen de las fisuras microscópicas que se encuentran en la superficie del vidrio, que actúan como concentradores de tensiones y como iniciación de posibles fracturas. La resistencia a compresión es muy superior a la resistencia a tracción, como ocurre con los materiales cerámicos.
- Propiedades eléctricas y magnéticas: se pueden conseguir materiales compuestos por vitrocerámicas y metales que presentan un buen comportamiento eléctrico y magnético.

Vitroceraámica	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.5
Resistencia a flexión (MPa)	110
Dureza Vickers	800
Conductividad térmica (W/mK)	1.7
Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-6</sup> )	0.85
Temperatura de fusión (K)	1498
Absorción óptica (cm <sup>-1</sup> )	3.52

Tabla C.1. Propiedades de la vitrocerámica SCHOTT Ceran® Suprema [3, 15].

## C.2. Cerámicas avanzadas

En las últimas décadas se ha incrementado el uso de cerámicas avanzadas en componentes funcionales y estructurales, debido a sus excepcionales características, como su elevada ligereza, dureza resistencia al desgaste y estabilidad química a altas temperaturas. En particular, la circonia estabilizada con itrio en un 8% molar, 8YSZ, se utiliza como electrolito en aplicaciones energéticas, y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), empleada como material biocerámico en prótesis, debido a su compatibilidad biológica [3].

8YSZ	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	5.85
Resistencia a flexión (MPa)	265
Dureza Vickers	1200
Conductividad térmica (W/mK)	2.5
Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-6</sup> )	1.07
Temperatura de fusión (K)	2950
Absorción óptica (cm <sup>-1</sup> )	9.34

Tabla C.2. Propiedades de la circonia 8YSZ [3, 15].

Alúmina	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.88
Resistencia a flexión (MPa)	500
Dureza Vickers	1500
Conductividad térmica (W/mK)	25
Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-6</sup> )	7.58
Temperatura de fusión (K)	2327
Absorción óptica (cm <sup>-1</sup> )	10.9

Tabla C.3. Propiedades de la alúmina [3, 15].

## C.3. Fluidos utilizados

Se han utilizado los siguientes líquidos como fluido auxiliar para realizar los experimentos.

- **Agua destilada:** se utiliza en laboratorios, para análisis, investigación y química fina. No es tóxica ni su manipulación requiere peligro para salud. Es incombustible.

Agua	
Fórmula	H <sub>2</sub> O
Peso molecular (g/mol)	18.016
Aspecto	Transparente e incoloro
Olor	Inodoro
Punto ebullición (ºC)	100
Punto fusión (ºC)	0
Presión de vapor a 20ºC (mmHg)	17.546
Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) a 20ºC	996.58
Dureza (ppm)	<1.0
Índice de refracción	1.33
Viscosidad dinámica (Pa s) a 20ºC	8.68 x10 <sup>-4</sup>
Conductividad térmica (K)	0.61
Calor específico (J/KgK)	4072.71
Número de Prandtl	5.78

Tabla C.4. Propiedades del agua destilada.

- **Etilenglicol:** se utiliza como anticongelante. Puede resultar tóxico, produce enrojecimiento de la piel, irritación ocular y es nocivo si se ingiere. Para su manipulación se requieren guantes y gafas ajustadas de seguridad. Es un líquido combustible y ecotóxico y reactivo en laboratorio. Presenta un peligro de incendio leve a moderado cuando se expone al calor o las llamas y puede ser explosivo.

Etilenglicol	
<b>Fórmula</b>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
<b>Peso molecular (g/mol)</b>	62.068
<b>Aspecto</b>	Líquido incoloro
<b>Olor</b>	Característico
<b>Punto ebullición (ºC)</b>	197
<b>Punto fusión (ºC)</b>	-13
<b>Presión de vapor a 20ºC (mmHg)</b>	0.06
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>) a 20ºC</b>	1112.13
<b>Índice de refracción</b>	1.427
<b>Viscosidad dinámica (Pa s) a 20ºC</b>	1.72 x10 <sup>-2</sup>
<b>Conductividad térmica (K)</b>	0.25
<b>Calor específico (J/KgK)</b>	2408.62
<b>Número de Prandtl</b>	164.58

Tabla C.5. Propiedades del etilenglicol.

## Anexo D. Tablas

A continuación se incluyen las tablas que no se han podido incluir en la memoria, para que se pueda acudir a ellas en caso de que sea necesario comprobar algún valor.

### D.1. 8YSZ en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	σZ(μm)
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
108,90	64,93	69,00	68,80	66,90	67,78	74,08	67,69	71,14	70,95	69,03	2,70
108,70	104,27	109,77	104,25	107,85	111,67	107,22	108,31	113,66	110,25	108,58	3,15
108,50	139,12	140,22	138,56	136,41	137,05	134,00	138,64	138,24	139,21	137,94	1,87
108,30	160,55	163,63	162,02	162,12	160,55	160,83	160,91	168,51	163,37	162,50	2,54
108,10	173,51	179,97	174,32	173,47	177,09	179,52	179,81	181,31	181,33	177,81	3,28
107,90	208,71	206,17	213,93	209,24	212,46	211,28	209,14	207,84	208,57	209,71	2,42
107,70	221,79	219,02	223,10	219,73	215,12	217,46	223,10	223,77	224,78	220,87	3,24
107,50	227,36	228,62	229,58	231,11	229,23	229,45	230,22	230,83	229,58	229,55	1,13
107,30	228,45	222,07	229,70	228,70	224,96	223,76	226,23	229,68	233,32	227,43	3,49
107,10	216,65	216,42	215,17	217,12	221,65	218,81	217,66	219,20	221,17	218,21	2,19
106,90	189,50	193,16	189,56	184,88	186,17	181,09	181,74	185,59	182,14	185,98	4,10
106,70	109,03	113,85	110,27	108,80	105,94	108,33	115,00	111,78	113,19	110,69	2,97
106,50	47,10	48,39	46,64	45,65	49,35	47,36	50,16	51,28	48,46	48,26	1,79
106,30	25,50	25,58	22,96	24,15	22,79	20,01	25,76	24,78	24,04	23,95	1,84
106,10	24,31	24,12	24,17	23,42	26,10	25,99	26,32	28,71	26,35	25,50	1,65
105,90	61,37	63,24	62,74	62,32	59,76	62,32	59,52	64,39	58,58	61,58	1,93
105,70	111,68	111,11	109,16	101,54	110,47	108,93	105,22	109,43	108,70	108,47	3,19
105,50	157,09	164,78	152,94	150,86	153,42	150,62	151,70	155,44	159,23	155,12	4,64
105,30	216,46	219,49	217,30	213,81	216,49	221,00	216,99	209,44	216,02	216,33	3,30
105,10	250,91	250,59	246,83	240,85	237,50	238,25	234,75	236,51	233,60	241,09	6,69
104,90	258,61	251,47	258,73	248,18	250,27	249,04	252,97	254,89	248,94	252,57	4,05
104,70	260,40	261,05	255,90	259,57	258,24	265,18	252,99	257,54	252,63	258,17	3,99
104,50	250,47	250,49	252,31	251,56	251,52	249,47	249,31	251,05	251,93	250,90	1,05
104,30	223,83	226,45	232,28	228,25	225,88	229,96	230,97	233,14	228,93	228,85	3,08
104,10	194,75	197,96	196,10	188,06	186,58	189,45	188,38	191,87	187,31	191,16	4,19
103,90	139,31	142,77	146,26	150,82	148,72	148,80	156,08	159,80	156,25	149,87	6,67
103,70	109,51	107,24	108,49	107,98	105,24	108,17	106,21	105,92	108,91	107,52	1,46
103,50	64,10	63,68	65,23	68,06	62,75	58,54	55,18	57,09	62,13	61,86	4,14

## D.2. 8YSZ en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
108,90	605,90	632,46	595,94	589,30	620,84	592,62	564,40	595,94	541,16	593,17	27,47
108,70	541,16	572,70	544,48	571,04	549,46	519,58	549,46	556,10	519,58	547,06	18,97
108,50	534,52	526,22	541,16	517,92	512,94	519,58	564,40	552,78	514,60	531,57	18,10
108,30	498,00	512,94	527,88	529,54	524,56	506,30	514,60	544,48	522,90	520,13	13,84
108,10	481,40	521,24	481,40	498,00	496,34	511,28	496,34	517,92	511,28	501,69	14,68
107,90	486,38	473,10	466,46	489,70	481,40	483,72	476,42	493,02	468,12	479,81	9,39
107,70	433,26	434,92	441,56	459,82	438,24	423,30	424,96	444,88	436,58	437,50	10,92
107,50	401,72	381,80	390,10	413,34	393,42	385,12	415,00	390,10	419,98	398,95	14,09
107,30	351,92	343,62	381,80	330,34	358,56	375,16	355,24	376,82	315,40	354,32	22,15
107,10	275,56	322,04	313,74	325,36	293,82	380,14	310,42	273,90	346,94	315,77	33,78
106,90	355,24	328,68	297,14	348,60	350,26	370,18	346,94	363,54	366,86	347,49	22,65
106,70	360,22	348,60	355,24	360,22	366,86	345,28	350,26	355,24	330,34	352,47	10,63
106,50	363,54	353,58	356,90	370,18	363,54	360,22	360,22	358,56	341,96	358,74	7,85
106,30	341,96	340,30	335,32	343,62	340,30	333,66	346,94	353,85	358,56	343,83	8,15
106,10	336,98	348,60	338,64	338,64	353,58	351,92	358,56	381,80	345,28	350,44	13,92
105,90	355,24	351,92	338,64	360,22	365,20	358,56	355,24	365,20	351,92	355,79	8,13
105,70	346,94	365,20	373,50	381,80	336,98	355,24	351,92	361,88	371,84	360,59	14,20
105,50	341,96	385,15	383,46	363,54	336,98	328,68	353,58	378,48	350,26	358,01	20,84
105,30	303,78	327,02	400,06	371,84	360,22	336,98	345,28	341,96	320,38	345,28	28,91
105,10	434,92	373,50	356,90	322,04	366,86	360,22	415,00	401,72	405,04	381,80	35,02
104,90	403,38	416,66	449,86	396,74	398,40	410,02	375,16	403,38	413,34	407,44	19,99
104,70	423,30	405,04	403,38	429,94	438,24	410,02	423,30	415,00	448,20	421,82	15,18
104,50	474,76	473,10	476,42	444,88	443,22	448,20	436,58	449,86	446,54	454,84	15,42
104,30	509,62	483,06	481,40	464,80	498,00	478,08	466,46	486,38	479,74	483,06	14,09
104,10	527,88	506,30	517,92	534,52	479,74	521,24	516,26	527,88	521,24	517,00	16,14
103,90	534,52	541,16	517,92	524,56	522,90	524,56	557,76	517,92	502,98	527,14	15,71
103,70	541,16	592,62	541,16	499,66	587,64	517,92	534,52	542,82	536,18	543,74	29,75
103,50	504,64	556,10	590,96	571,04	564,40	571,04	516,26	599,26	547,80	557,94	31,36

### D.3. Alúmina en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
104,2	175	167,7	176,4	176,9	174,1	176,1	176,7	180,1	176,9	175,55	3,37
104,4	173,5	165	170,2	176,4	171,1	168,4	179,3	177,7	169,5	172,34	4,71
104,6	90,93	94,54	91,71	99,47	92,5	96,89	88,56	88,15	88,69	92,38	3,93
104,8	59,03	63,04	65,09	60,83	62,91	62,18	69,22	62,78	63,03	63,12	2,83
105,0	44,18	44,99	45,29	53,55	45,01	48,28	40,27	50,09	45,37	46,34	3,83
105,2	42,25	39,82	44,37	42,87	40,68	42,19	38,78	39,66	40,21	41,20	1,81
105,4	31,78	31,62	27,71	32,13	28,11	29,59	33,6	30,79	30,06	30,60	1,93
105,6	18,51	20,99	21,11	20,92	23,35	19,17	18,47	18,71	19,45	20,08	1,64
105,8	18,75	19,41	13,75	17,96	16,74	16,42	18,06	16,86	17,97	17,32	1,65
106,0	15,87	16,13	20,02	18,23	14,38	16,27	15,27	15,74	14,66	16,29	1,79
106,2	32,1	26,81	28,07	31,27	33,15	30,19	34,14	33,47	34,27	31,50	2,67
106,4	44,96	41,02	44,29	41,6	40,45	46,08	43,39	46,36	41,03	43,24	2,30
106,6	57,34	63,65	59,07	59,35	58,21	62,78	63,17	61,7	59,58	60,54	2,32
106,8	83,85	81,63	82,67	82,31	81,4	83,1				82,49	0,92
107,0	111,7	105,7	108	109,8	103,9	97,35	120,1	118,1	106,3	108,98	7,03
107,2	132,1	146,5	129,3	138,5	127,7	136,7	134,2	127,4	131,9	133,81	6,10
107,4	125,5	124	124,4	122,2	108,5	115,3	116,4	114,7	112,2	118,11	6,08
107,6	70,89	75,92	79,09	63,16	71,55	73,58	60,38	54,19	48,32	66,34	10,44

#### D.4. Alúmina en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(µm)	$\sigma A(\mu\text{m})$
	A1(µm)	A2(µm)	A3(µm)	A4(µm)	A5(µm)	A6(µm)	A7(µm)	A8(µm)	A9(µm)		
104,2	451,5	458,2	449,9	428,3	448,2	461,5	421,6	436,6	443,2	444,33	13,31
104,4	425	421,6	451,5	449,9	454,8	438,2	451,5	446,5	431,6	441,19	12,50
104,6	428,3	438,2	418,3	421,6	434,9	413,3	426,6	423,3	416,7	424,59	8,29
104,8	425	408,4	410	421,6	403,4	406,7	418,3	438,2	398,4	414,45	12,45
105,0	400,1	398,4	391,8	400,1	401,7	400,1	393,4	408,4	405	399,88	5,15
105,2	390,1	393,4	395,1	378,5	381,8	381,8	388,4	368,5	385,1	384,75	8,25
105,4	386,8	366,9	376,8	351,9	378,5	376,8	350,3	353,6	361,9	367,04	13,37
105,6	360,2	363,5	366,9	348,6	350,3	351,9	345,3	332	360,2	353,21	10,81
105,8	328,7	335,3	338,6	351,9	335,3	330,3	322	337	343,6	335,87	8,67
106,0	346,9	335,3	322	343,6	345,3	333,7	343,6	325,4	346,9	338,09	9,46
106,2	333,7	347	338,6	342	335,3	342	338,6	346,9	330,3	339,38	5,70
106,4	383,5	363,5	373,5	358,6	351,9	368,5	356,9	360,2	371,8	365,38	9,84
106,6	396,7	378,5	386,8	388,4	396,7	401,7	400,1	381,8	375,2	389,55	9,75
106,8	398,4	396,7	408,4	391,8	413,3	403,4				402,00	7,96
107,0	423,3	413,3	436,6	426,6	418,3	410	418,3	396,7	396,7	415,55	13,15
107,2	429,9	421,6	398,4	413,3	411,7	431,6	433,3	426,6	429,9	421,82	11,75
107,4	468,1	443,2	448,2	434,9	420	420	401,7	378,5	410	424,96	26,95
107,6	328,7	395,1	345,3	355,2	366,9	391,8	328,7	340,3	298,8	350,08	31,09

## D.5. Vitrocerámica en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,4	345,26	363,88	390,80	294,49	320,11	311,54	266,74	317,30	301,53	323,52	37,70
106,5	330,42	306,27	290,35	248,30	273,13	322,85	304,36	299,85	305,23	297,86	24,95
106,6	285,35	283,88	286,99	290,19	344,45	360,48	275,67	291,34	277,80	299,57	30,68
106,7	313,93	318,74	306,15	275,17	321,33	299,47	257,46	288,60	279,11	295,55	21,94
106,8	1203,70	1086,40	1196,90	1235,80	139,36	1528,90	1364,47	1142,80	1001,20	1099,95	391,65
106,9	1321,50	1159,20	1042,30	1446,50	1449,40	1468,10	1187,50	1329,30	1308,80	1301,40	146,76
107,0	1389,90	1362,10	1304,30	1467,80	1380,60	1303,60	1343,10	1342,20	1355,90	1361,06	49,79
107,1	1455,20	1493,40	1402,20	1513,40	1542,40	1516,40	1494,00	1324,10	1220,00	1440,12	106,64
107,2	1440,10	1322,90	1163,60	1260,20	1187,40	1222,50	1515,90	1380,90	1200,90	1299,38	123,49
107,3	888,45	973,26	1035,00	718,87	875,28	1081,80	736,34	895,53	913,14	901,96	121,01
107,4	905,23	907,27	827,25	871,37	946,18	883,84	893,21	893,49	906,00	892,65	32,06
107,5	691,49	760,79	771,65	731,07	872,74	879,17	643,70	700,09	712,67	751,48	80,06
107,6	445,60	508,83	501,66	717,08	684,68	596,37	587,61	532,68	531,77	567,36	88,37
107,7	492,16	547,45	588,73	626,51	637,31	538,48	391,78	318,63	333,70	497,19	121,82
107,8	412,71	367,15	349,85	422,68	444,37	457,83	449,11	437,05	338,83	408,84	45,28
107,9	406,18	547,52	512,24	741,69	619,72	535,14	579,42	632,62	653,49	580,89	96,02
108,0	219,89	332,63	300,65	383,58	302,15	323,39	173,76	152,07	170,83	262,11	84,11
108,1	247,67	275,13	283,79	526,96	531,13	476,28	270,31	315,98	298,99	358,47	117,26
108,2	279,30	300,54	292,12	349,41	385,06	349,36	225,06	235,70	248,60	296,13	55,75
108,3	343,20	363,94	348,18	368,32	377,18	429,19	301,61	293,26	297,27	346,90	44,50
108,4	355,54	323,89	359,98	392,46	470,40	423,77	365,39	346,86	370,23	378,72	44,42
108,5	295,28	317,97	226,81	420,33	345,95	398,35	341,88	360,46	371,32	342,04	57,62
108,6	409,40	420,50	377,21	313,13	345,91	324,85	217,53	266,07	272,03	327,40	68,31
108,7	304,44	271,66	281,18	273,79	287,35	287,48	227,43	227,71	259,88	268,99	26,52
108,8	286,21	339,30	279,43	284,25	270,63	295,85	213,41	209,45	188,23	262,97	48,91

## D.6. Vitrocerámica en aire, 4 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	$\sigma A(\mu m)$
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,4	564,40	511,28	461,48	421,64	413,34	415,00	504,64	483,06	517,92	476,97	53,02
106,5	400,06	433,26	438,24	454,84	436,58	413,34	423,30	493,02	419,98	434,74	26,99
106,6	496,34	474,76	416,66	456,50	453,18	448,20	486,38	496,34	444,88	463,69	26,78
106,7	502,98	478,08	476,42	451,52	431,60	421,64	499,66	473,76	481,40	468,56	28,18
106,8	715,46	810,08	708,82	929,60	844,94	888,10	755,30	795,14	750,32	799,75	76,35
106,9	833,32	735,38	828,34	815,06	810,08	828,34	673,96	788,50	685,58	777,62	63,07
107,0	964,46	889,76	786,84	780,20	665,66	768,58	886,44	908,02	831,30	831,25	90,85
107,1	747,00	833,32	856,56	687,24	791,82	670,64	630,80	773,56	793,48	753,82	76,50
107,2	687,24	683,92	785,18	931,26	876,48	984,38	790,16	668,98	931,26	815,43	120,33
107,3	597,60	690,56	557,76	927,94	697,20	904,70	831,66	735,38	738,70	742,39	126,78
107,4	758,62	587,64	604,24	680,60	584,32	866,52	659,02	584,32	722,10	671,93	96,94
107,5	707,16	562,74	640,76	647,40	667,32	763,60	507,96	667,32	577,68	637,99	77,93
107,6	584,32	551,12	571,04	670,64	640,76	685,58	448,20	615,86	557,76	591,70	72,38
107,7	594,28	577,68	524,56	604,24	559,42	592,62	552,78	710,48	614,20	592,25	52,49
107,8	481,40	489,70	539,50	506,30	576,02	512,94	597,60	556,10	549,46	534,34	39,54
107,9	424,96	431,60	418,32	551,12	584,32	564,40	544,48	463,14	612,54	510,54	75,71
108,0	660,68	619,18	640,76	491,36	531,20	590,96	449,86	423,30	400,06	534,15	98,14
108,1	509,62	524,56	527,88	526,22	474,76	549,46	516,26	504,64	502,98	515,15	20,83
108,2	468,12	453,18	502,98	469,78	531,20	483,06	395,08	338,64	476,42	457,61	57,90
108,3	436,58	400,06	481,40	410,02	413,34	534,52	418,32	451,52	449,86	443,96	42,46
108,4	468,12	464,80	466,46	473,10	380,14	502,98	463,14	501,32	507,96	469,78	38,22
108,5	486,38	438,24	501,32	446,54	519,58	441,56	416,66	368,52	494,68	457,05	47,85
108,6	375,16	361,88	478,08	471,44	483,06	471,44	466,46	479,74	461,48	449,86	46,71
108,7	448,20	383,46	449,86	390,10	388,44	398,40	368,52	313,74	390,10	392,31	40,80
108,8	441,56	419,98	434,92	416,66	348,60	370,18	330,34	355,24	338,64	384,01	43,98

## D.7. 8YSZ en aire, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	σZ(μm)
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,0	54,00	52,05	53,16	50,16	56,58	51,22	54,43	55,80	53,40	53,42	2,07
106,9	54,11	55,84	54,45	49,77	53,98	49,42	55,22	53,46	52,14	53,15	2,27
106,8	51,60	54,53	51,93	51,27	52,18	49,29	49,87	52,59	53,10	51,82	1,59
106,7	53,25	53,18	49,31	49,78	52,20	52,02	50,35	52,48	50,58	51,46	1,48
106,6	53,51	52,96	50,04	49,72	51,33	48,72	50,05	52,90	49,27	50,94	1,79
106,5	51,31	49,18	49,27	48,96	49,65	49,24	51,14	52,03	49,53	50,04	1,14
106,4	48,43	50,77	47,60	43,89	47,61	42,13	44,29	44,31	44,75	45,97	2,75
106,3	39,32	42,42	38,40	37,00	37,72	36,77	36,93	39,19	35,49	38,14	2,02
106,2	24,19	26,74	25,57	24,40	27,60	25,72	28,13	29,83	26,87	26,56	1,81
106,1	18,63	18,19	19,78	18,36	19,75	17,40	17,47	17,60	17,80	18,33	0,91
106,0	11,55	13,32	11,43	11,88	14,76	13,34	13,57	13,73	11,37	12,77	1,24
105,9	8,68	9,48	5,07	8,94	7,68	7,13	7,96	7,42	8,00	7,82	1,27
105,8	7,63	9,58	5,74	8,84	7,73	7,13	9,81	7,08	6,72	7,81	1,36
105,7	6,16	7,67	6,76	7,28	8,61	6,20	6,37	8,77	8,34	7,35	1,04
105,6	10,71	12,39	12,47	11,80	10,13	10,30	9,16	10,67	9,81	10,82	1,16
105,5	17,72	20,00	17,49	16,95	19,09	17,28	16,92	19,89	17,58	18,10	1,23
105,4	28,61	29,48	27,15	25,87	27,56	27,71	28,32	30,46	28,40	28,18	1,33
105,3	41,06	37,60	39,46	35,61	38,07	37,47	39,43	36,72	35,04	37,83	1,93
105,2	42,97	43,57	44,94	39,56	42,07	41,24	40,94	38,16	39,51	41,44	2,17
105,1	47,50	48,85	46,10	44,14	46,11	45,80	45,24	48,50	46,94	46,57	1,53
105,0	51,56	52,28	49,58	45,88	50,22	48,89	50,68	53,11	49,69	50,21	2,12
104,9	50,23	50,75	48,81	49,56	51,00	49,61	52,27	52,24	50,96	50,60	1,18
104,8	56,10	56,41	55,80	53,42	55,72	54,54	54,54	54,22	51,00	54,64	1,68
104,7	59,11	58,56	58,54	56,64	58,28	56,57	57,06	57,34	57,94	57,78	0,91
104,6	62,42	62,00	60,20	59,24	59,67	58,76	60,41	59,23	58,12	60,01	1,43
104,5	64,11	63,33	61,74	61,33	62,81	60,14	60,46	62,19	61,48	61,95	1,30
104,4	64,50	66,90	62,89	62,74	62,60	63,93	60,07	63,33	61,55	63,17	1,91
104,3	62,08	63,38	64,04	63,04	63,46	62,08	62,61	62,56	63,77	63,00	0,71
104,2	64,70	64,65	64,69	62,79	65,65	65,02	65,65	64,82	66,13	64,90	0,95
104,1	71,47	74,19	73,71	73,09	73,49	70,22	71,13	73,69	72,74	72,64	1,38
104,0	75,90	81,20	76,31	78,79	80,99	77,68	80,90	80,56	77,63	78,89	2,10
103,9	79,89	81,32	81,43	80,21	79,47	80,07	82,72	83,07	82,71	81,21	1,37
103,8	82,15	78,95	81,88	81,37	79,82	79,93	83,02	84,06	79,49	81,19	1,74
103,7	80,72	78,23	79,69	79,19	77,59	80,00	78,75	79,29	78,27	79,08	0,98
103,6	72,56	74,54	78,24	71,34	69,59	70,52	81,28	77,24	76,45	74,64	3,95

## D.8. 8YSZ en aire, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,0	436,00	484,72	434,92	471,44	441,56	434,92	446,54	471,44	429,94	450,16	20,19
106,9	411,68	458,16	434,92	453,18	461,48	433,26	441,56	479,74	448,20	446,91	19,55
106,8	461,48	471,44	446,54	449,86	441,56	453,18	438,24	449,86	448,20	451,15	10,09
106,7	416,66	438,24	413,34	433,26	464,80	431,60	448,20	463,14	439,90	438,79	17,96
106,6	426,62	411,68	419,98	400,06	439,90	424,96	424,96	441,56	413,34	422,56	13,26
106,5	419,98	415,00	411,68	396,74	403,38	398,40	406,70	418,32	413,34	409,28	8,43
106,4	375,16	398,40	390,10	406,70	373,50	396,74	390,10	408,36	401,72	393,42	12,53
106,3	365,20	376,82	380,14	378,48	371,84	376,82	380,14	363,54	371,84	373,87	6,20
106,2	366,86	351,92	355,24	378,48	350,26	351,58	338,64	365,20	348,60	356,31	11,90
106,1	348,60	343,62	328,68	325,36	360,22	335,32	348,60	341,96	345,28	341,96	10,79
106,0	332,00	330,34	328,68	341,96	348,60	335,32	336,98	332,00	327,02	334,77	6,89
105,9	333,66	346,94	330,34	338,64	351,92	333,66	345,28	355,24	340,30	341,78	8,64
105,8	340,30	345,28	350,26	338,64	351,92	335,32	332,00	346,94	351,92	343,62	7,38
105,7	343,62	348,60	335,32	340,30	346,94	336,98	340,30	356,90	356,90	345,10	7,94
105,6	325,36	373,50	350,26	298,80	395,08	352,92	335,32	343,62	352,56	347,49	27,45
105,5	320,38	323,70	341,96	338,64	365,20	360,22	350,26	348,60	335,32	342,70	15,15
105,4	343,62	341,96	365,20	345,28	348,60	346,94	335,32	338,64	335,32	344,54	9,10
105,3	346,94	358,56	353,58	355,24	360,22	356,90	350,26	356,90	346,94	353,95	4,89
105,2	361,88	365,20	368,52	363,54	358,56	361,88	375,16	353,58	361,88	363,36	6,07
105,1	381,80	370,18	361,88	380,14	366,86	361,88	366,86	368,52	366,86	369,44	7,10
105,0	371,84	380,14	385,12	376,82	386,78	380,14	390,10	368,52	373,50	379,22	7,24
104,9	373,50	378,48	365,20	383,46	373,50	378,48	381,80	376,82	381,80	377,00	5,66
104,8	376,82	385,12	395,08	378,48	398,40	391,76	381,80	388,44	380,14	386,23	7,65
104,7	410,02	419,98	396,74	410,02	405,04	398,40	400,06	396,74	421,64	406,52	9,59
104,6	403,38	401,72	396,74	403,38	423,30	408,36	405,04	418,32	413,34	408,18	8,56
104,5	418,32	426,62	416,66	418,98	423,30	421,64	413,34	428,28	423,30	421,16	4,80
104,4	429,94	444,88	426,62	429,94	423,30	431,60	419,98	416,66	421,64	427,17	8,34
104,3	426,94	433,26	431,60	441,56	439,90	434,92	438,24	424,96	439,90	434,59	5,92
104,2	441,56	443,22	446,54	426,62	446,54	453,18	433,26	454,84	446,54	443,59	8,97
104,1	454,84	461,48	454,84	458,16	459,82	469,78	459,82	464,80	448,20	459,08	6,22
104,0	458,16	471,44	466,46	448,20	489,70	459,82	454,84	453,18	446,54	460,93	13,43
103,9	486,38	449,86	496,34	501,32	483,06	499,66	466,46	511,28	449,86	482,69	22,56
103,8	474,76	486,38	507,96	483,06	493,02	443,22	499,66	486,38	454,84	481,03	20,71
103,7	481,40	511,28	521,24	526,22	512,60	469,78	501,32	529,54	522,90	508,48	20,72
103,6	483,06	494,68	512,94	496,34	512,94	488,04	499,66	473,10	456,50	490,81	18,24

## D.9. Alúmina en aire, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

No se han incluido valores de profundidad para estos parámetros en la alúmina, debido a que no se han obtenido profundidades, únicamente marcas superficiales.

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	$\sigma A(\mu m)$
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,7	318	335	313	310	333	292	313	333	313	317,78	13,94
106,6	295	320	312	335	350	303	317	335	325	321,33	17,12
106,5	317	340	313	325	348	318	392	330	288	330,11	28,85
106,4	288	302	298	283	305	307	295	312	305	299,44	9,40
106,3	293	310	288	290	312	293	290	308	290	297,11	9,84
106,2	277	285	293	278	283	277	290	282	280	282,78	5,70
106,1	268	277	277	272	277	268	283	285	273	275,56	5,96
106,0	275	278	267	272	272	273	267	272	263	271,00	4,58
105,9	272	270	272	268	273	273	273	272	258	270,11	4,83
105,8	270	271	277	265	253	253	267	280	297	270,33	13,65
105,7	273	290	282	283	285	273	282	282	277	280,78	5,56
105,6	283	278	277	282	292	295	283	283	267	282,22	8,20
105,5	297	300	283	293	297	277	280	283	287	288,56	8,40
105,4	288	315	282	285	292	278	287	305	287	291,00	11,73
105,3	307	318	305	307	313	297	310	313	310	308,89	5,95
105,2	292	310	302	293	310	303	293	307	295	300,56	7,47
105,1	297	313	297	288	318	310	290	338	312	307,00	15,82
105,0	303	336	302	312	335	303	302	332	303	314,22	15,43
104,9	315	335	320	323	343	322	327	340	330	328,33	9,46
104,8	330	356	350	322	338	328	317	355	351	338,56	14,93

## D.10. Vitrocerámica en aire, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,2	4,696	3,232	6,036	5,871	4,641	3,908	5,168	4,281	3,94	4,64	0,93
106,1	89,901	76,734	69,221	47,452	42,151	46,647	102,22	105,04	103,89	75,92	25,91
106,0	86,814	95,457	82,866	87,516	109,73	83,376	95,731	78,595	92,941	90,34	9,36
105,9	68,336	74,673	74,959	71,33	90,031	71,914	84,441	73,433	61,435	74,51	8,42
105,8	65,94	55,892	60,392	65,811	63,875	59,676	57,095	85,111	68,946	64,75	8,78
105,7	91,167	71,651	57,086	53,342	58,093	54,039	75,68	78,199	67,988	67,47	12,93
105,6	75,53	96,017	57,082	78,642	84,941	82,54	59,262	73,654	69,214	75,21	12,32
105,5	88,416	107,44	104,58	92,154	103,47	112,69	91,964	85,01	86,528	96,92	10,19
105,4	103,64	118,6	110,03	129,14	123,78	100,01	89,813	124,86	107,87	111,97	13,08
105,3	100,66	104,77	107,61	90,072	91,068	100,68	112,54	139,62	107,02	106,00	14,63
105,2	113,07	121,3	111,91	98,679	115,12	109,88	114,55	118,62	101,1	111,58	7,47
105,1	137,29	142,03	103,94	107,13	131,88	114,4	124,34	114,63	119,42	121,67	13,24
105,0	124,78	154,74	130,95	115,71	152,74	147,93	144,4	126,97	136,61	137,20	13,58
104,9	136,82	122,26	132,72	171,71	157,8	219,74	125,59	134,28	155,62	150,72	30,64

## D.11. Vitrocerámica en aire, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,2	268	255	280	250	267	277	257	252	325	270,11	23,20
106,1	171	217	237	152	151	201	426	336	351	249,11	98,66
106,0	330	345	322	323	363	335	378	456	355	356,33	41,86
105,9	358	370	340	353	371	350	391	345	318	355,11	20,94
105,8	336	336	328	327	340	375	365	363	363	348,11	18,24
105,7	401	341	355	383	333	348	357	368	373	362,11	21,42
105,6	378	388	330	416	345	411	401	376	386	381,22	28,57
105,5	368	400	353	453	408	361	408	371	348	385,56	34,20
105,4	433	378	398	393	410	400	403	376	391	398,00	17,16
105,3	370	405	360	393	376	381	371	365	390	379,00	14,61
105,2	380	368	415	373	418	380	391	393	415	392,56	19,23
105,1	415	421	433	428	386	400	408	424	424	415,44	15,02
105,0	449	433,26	395	415	418	421	365	458	380	414,92	30,64
104,9	403	433	439	549	446	415	466	421	398	441,11	45,76

## D.12. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 4 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,4	345,264	363,88	390,799	294,485	320,114	311,536	266,736	317,302	301,529	323,52	37,70
106,5	330,416	306,271	290,353	248,302	273,129	322,847	304,355	299,853	305,231	297,86	24,95
106,6	285,345	283,877	286,987	290,193	344,445	360,478	275,674	291,341	277,802	299,57	30,68
106,7	313,927	318,738	306,151	275,166	321,327	299,468	257,464	288,596	279,114	295,55	21,94
106,8	1203,7	1086,4	1196,9	1235,8	139,36	1528,9	1364,47	1142,8	1001,2	1099,95	391,65
106,9	1321,5	1159,2	1042,3	1446,5	1449,4	1468,1	1187,5	1329,3	1308,8	1301,40	146,76
107,0	1389,9	1362,1	1304,3	1467,8	1380,6	1303,6	1343,1	1342,2	1355,9	1361,06	49,79
107,1	1455,2	1493,4	1402,2	1513,4	1542,4	1516,4	1494	1324,1	1220	1440,12	106,64
107,2	1440,1	1322,9	1163,6	1260,2	1187,4	1222,5	1515,9	1380,9	1200,9	1299,38	123,49
107,3	888,45	973,257	1035	718,87	875,279	1081,8	736,335	895,525	913,138	901,96	121,01
107,4	905,23	907,273	827,252	871,365	946,18	883,841	893,213	893,493	905,998	892,65	32,06
107,5	691,485	760,785	771,65	731,072	872,738	879,173	643,699	700,09	712,669	751,48	80,06
107,6	445,595	508,828	501,662	717,083	684,68	596,366	587,608	532,679	531,767	567,36	88,37
107,7	492,158	547,448	588,733	626,509	637,31	538,477	391,784	318,628	333,699	497,19	121,82
107,8	412,707	367,146	349,853	422,68	444,37	457,827	449,107	437,049	338,826	408,84	45,28
107,9	406,179	547,518	512,237	741,69	619,717	535,135	579,419	632,617	653,491	580,89	96,02
108,0	219,89	332,629	300,646	383,583	302,151	323,394	173,761	152,065	170,831	262,11	84,11
108,1	247,668	275,133	283,788	526,957	531,128	476,283	270,307	315,977	298,991	358,47	117,26
108,2	279,299	300,541	292,118	349,408	385,057	349,361	225,055	235,695	248,601	296,13	55,75
108,3	343,197	363,937	348,176	368,317	377,184	429,186	301,605	293,255	297,269	346,90	44,50
108,4	355,543	323,891	359,977	392,457	470,397	423,771	365,391	346,861	370,225	378,72	44,42
108,5	295,275	317,966	226,811	420,331	345,946	398,353	341,88	360,462	371,323	342,04	57,62
108,6	409,402	420,502	377,213	313,128	345,906	324,85	217,525	266,074	272,031	327,40	68,31
108,7	304,442	271,661	281,178	273,79	287,345	287,477	227,432	227,712	259,882	268,99	26,52
108,8	286,208	339,298	279,432	284,248	270,627	295,849	213,409	209,448	188,23	262,97	48,91

## D.13. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 4 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,4	564,4	511,28	461,48	421,64	413,34	415	504,64	483,06	517,92	476,97	53,02
106,5	400,06	433,26	438,24	454,84	436,58	413,34	423,3	493,02	419,98	434,74	26,99
106,6	496,34	474,76	416,66	456,5	453,18	448,2	486,38	496,34	444,88	463,69	26,78
106,7	502,98	478,08	476,42	451,52	431,6	421,64	499,66	473,76	481,4	468,56	28,18
106,8	715,46	810,08	708,82	929,6	844,94	888,1	755,3	795,14	750,32	799,75	76,35
106,9	833,32	735,38	828,34	815,06	810,08	828,34	673,96	788,5	685,58	777,62	63,07
107,0	964,46	889,76	786,84	780,2	665,66	768,58	886,44	908,02	831,3	831,25	90,85
107,1	747	833,32	856,56	687,24	791,82	670,64	630,8	773,56	793,48	753,82	76,5
107,2	687,24	683,92	785,18	931,26	876,48	984,38	790,16	668,98	931,26	815,43	120,3
107,3	597,6	690,56	557,76	927,94	697,2	904,7	831,66	735,38	738,7	742,39	126,8
107,4	758,62	587,64	604,24	680,6	584,32	866,52	659,02	584,32	722,1	671,93	96,94
107,5	707,16	562,74	640,76	647,4	667,32	763,6	507,96	667,32	577,68	637,99	77,93
107,6	584,32	551,12	571,04	670,64	640,76	685,58	448,2	615,86	557,76	591,7	72,38
107,7	594,28	577,68	524,56	604,24	559,42	592,62	552,78	710,48	614,2	592,25	52,49
107,8	481,4	489,7	539,5	506,3	576,02	512,94	597,6	556,1	549,46	534,34	39,54
107,9	424,96	431,6	418,32	551,12	584,32	564,4	544,48	463,14	612,54	510,54	75,71
108,0	660,68	619,18	640,76	491,36	531,2	590,96	449,86	423,3	400,06	534,15	98,14
108,1	509,62	524,56	527,88	526,22	474,76	549,46	516,26	504,64	502,98	515,15	20,83
108,2	468,12	453,18	502,98	469,78	531,2	483,06	395,08	338,64	476,42	457,61	57,9
108,3	436,58	400,06	481,4	410,02	413,34	534,52	418,32	451,52	449,86	443,96	42,46
108,4	468,12	464,8	466,46	473,1	380,14	502,98	463,14	501,32	507,96	469,78	38,22
108,5	486,38	438,24	501,32	446,54	519,58	441,56	416,66	368,52	494,68	457,05	47,85
108,6	375,16	361,88	478,08	471,44	483,06	471,44	466,46	479,74	461,48	449,86	46,71
108,7	448,2	383,46	449,86	390,1	388,44	398,4	368,52	313,74	390,1	392,31	40,8
108,8	441,56	419,98	434,92	416,66	348,6	370,18	330,34	355,24	338,64	384,01	43,98

## D.14. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,8	132,14	113,89	113,43	156,1	159,59	167,71	155,77	164,71	165,05	147,60	21,87
107,7	167,85	158,18	179,38	165,34	186,65	177,81	149,08	156,22	166,8	167,48	12,11
107,6	219,41	209,55	220,59	183,54	202,57	197,4	191,69	181,35	188,54	199,40	14,67
107,5	290,43	301,94	296,71	298,93	303,9	307,94	242,17	265,86	272,09	286,66	22,00
107,4	308,21	292,88	296,67	264,46	284,08	320,73	280,2	276,78	271,82	288,42	18,01
107,3	355,16	338,42	346,39	368,43	350,08	371,91	363,15	346,05	355,97	355,06	11,11
107,2	428,16	417,97	434,08	428,78	447,27	433,68	390,95	407,54	399,01	420,83	18,41
107,1	443,36	418,85	490,18	462,19	483,5	498,05	441,9	427,75	489,39	461,69	29,77
107,0	427,31	408,17	418,75	513,57	487,58	514,63	466,86	432,91	462,81	459,18	40,08
106,9	358,99	307,86	251,9	386,24	369,3	378,07	383,73	345,48	375,95	350,84	44,41
106,8	180,58	195,65	168,88	196,17	196,56	231,38	189,59	179,79	179,63	190,91	17,90
106,7	405,23	381,79	436,87	386,28	369,75	351,43	275,44	283,48	271,58	351,32	60,66
106,6	249,55	230,53	215,31	211,46	199,53	196,12	240,8	232,77	277,78	228,21	25,97
106,5	200,08	217,19	215,38	187,81	196,73	239,59	246,7	224,99	306,19	226,07	35,75
106,4	188,56	216,29	204,84	203,8	210,54	194,76	198,17	206,73	197,39	202,34	8,51

## D.15. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,8	217	281,18	252,32	323,7	348,6	330,34	441,56	351,92	393,42	326,67	69,30
107,7	350,26	376,82	385,12	368,52	340,3	388,44	431,6	375,16	418,32	381,62	29,22
107,6	454,84	466,46	483,06	446,54	436,68	461,48	496,34	488,04	415	460,94	26,10
107,5	478,08	610,88	561,08	479,74	522,9	496,3	451,52	581	459,82	515,70	56,75
107,4	561,08	522,9	531,2	537,84	453,18	552,78	637,44	541,16	649,06	554,07	59,30
107,3	597,6	635,78	562,74	532,86	579,34	652,38	581	517,92	526,22	576,20	47,17
107,2	512,94	622,5	602,58	609,22	569,38	629,14	592,62	585,98	496,34	580,08	46,62
107,1	705,5	564,4	609,22	624,16	562,74	632,46	722,1	566,06	600,92	620,84	58,80
107,0	599,26	647,4	547,8	612,54	607,56	632,46	552,66	556,1	654,04	601,09	40,80
106,9	589,3	496,34	557,76	546,14	527,88	534,52	532,86	433,26	529,54	527,51	43,33
106,8	534,52	424,96	419,98	476,42	449,86	416,66	501,32	461,48	473,1	462,03	39,49
106,7	569,38	539,5	595,94	600,92	680,6	655,7	640,76	488,04	552,78	591,51	61,23
106,6	488,04	479,74	552,78	512,94	502,98	582,66	605,9	527,88	620,84	541,53	51,75
106,5	410,02	493,02	476,42	559,42	468,12	484,72	484,72	433,26	567,72	486,38	51,34
106,4	398,4	444,88	378,48	451,52	527,88	478,76	478,08	453,18	501,32	456,94	47,03

## D.16. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 1 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,7	201,62	196,58	200,24	205,05	193,54	193,11	193,56	187,54	188,64	195,54	5,87
107,6	210,13	214,98	236,85	244,41	242,97	245,86	210,92	228,28	199,23	225,96	17,54
107,5	250,24	232,1	231,42	246,77	257,09	270,26	239,27	237,47	230,98	243,96	13,42
107,4	206,06	210,47	235,8	262,57	265,25	227	241,82	258,8	230,87	237,63	21,64
107,3	283,35	288,77	287,2	294,65	302,02	293,96	260,01	280,31	276,61	285,21	12,25
107,2	423,96	392,61	378	358,26	374,07	361,32	317,55	310,5	325,85	360,23	37,25
107,1	364,44	346,31	358	374,64	386,24	384,24	300,03	282,44	301,4	344,19	39,53
107,0	233,79	252,19	196,16	260,22	251,2	256,6	247,49	264,51	258,72	246,76	20,96
106,9	166,19	178,2	174,26	169,28	183,34	207,64	173,99	174,78	177,59	178,36	12,05

## D.17. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 1 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	$\sigma A(\mu m)$
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,7	405,04	456,5	476,42	468,12	466,46	514,6	423,3	403,38	461,48	452,81	36,20
107,6	511,28	542,82	552,78	512,94	511,28	559,42	620,84	494,68	546,14	539,13	38,00
107,5	559,42	443,22	473,1	604,24	531,2	589,3	554,44	569,38	594,28	546,51	55,33
107,4	534,52	471,44	478,08	502,98	506,98	541,16	489,7	526,22	476,42	503,06	26,23
107,3	458,16	624,16	531,2	526,22	541,16	610,88	541,16	521,24	502,98	539,68	50,99
107,2	590,96	544,48	522,9	576,02	622,5	564,4	504,64	617,52	526,22	563,29	42,09
107,1	569,38	539,5	522,9	629,14	557,76	589,3	569,38	617,52	582,66	575,28	34,16
107,0	426,62	493,02	567,72	471,44	585,98	571,04	584,32	531,2	547,8	531,02	55,88
106,9	433,26	486,38	491,36	517,92	539,5	423,3	459,82	499,66	532,86	487,12	41,35

## D.18. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 5 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
108,1	210,58	206,16	189,06	232,67	222,97	225,69	211,06	220,27	205,82	213,81	13,11
108,0	226,24	202,72	205,64	237,37	218,71	238,31	217,7	213,24	235,7	221,74	13,48
107,9	222,77	193,46	211,32	211	225,25	209,71	197,64	177,94	186,48	203,95	16,11
107,8	211,97	231,35	216,38	252,35	250,32	238,73	279,75	246,18	278,13	245,02	23,78
107,7	266,91	276,74	284,94	317,96	316,86	332,86	286,38	297,92	299,62	297,80	21,49
107,6	293,28	273,91	302,18	347,62	360,35	323,7	339,53	328,33	335,18	322,68	27,79
107,5	243,45	264,36	241,53	305,33	303,37	299,44	305,97	345,83	302,07	290,15	33,90
107,4	276,32	273,66	268,74	254,76	262,21	237,99	324,12	296,8	269,76	273,82	24,72
107,3	402,36	371,24	373,45	403,28	388,33	378,91	324,62	342,77	446,81	381,31	35,59
107,2	426,37	392,39	373,07	345,59	360,9	354,4	360,28	393,73	381,33	376,45	25,05
107,1	347,86	365,48	335,62	386,01	359,02	342,57	400,99	416,06	402,47	372,90	29,33
107,0	284,55	329,4	273,23	340,65	337,52	302,16	292,24	260,96	300,41	302,35	28,33
106,9	184,69	197,65	202,25	184,15	177,52	177,56	211,33	191,16	180,6	189,66	11,86

## D.19. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 20 mm/s, 5 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	$\sigma A(\mu m)$
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
108,1	470	438	473	458	443	466	510	531	533	480,29	35,71
108,0	574	511	546	418	485	403	408	450	513	478,82	62,32
107,9	435	468	423	410	402	483	435	479	468	444,78	30,49
107,8	430	462	458	505	463	523	462	524	519	482,83	35,00
107,7	596	540	535	540	536	525	549	430	525	530,46	43,35
107,6	563	473	543	488	571	506	590	476	554	529,28	44,15
107,5	441	526	429	490	564	516	516	478	478	493,11	42,50
107,4	526	541	494	596	496	554	522	521	534	531,56	30,94
107,3	483	512	454	582	489	660	567	576	463	531,78	68,50
107,2	574	473	562	470	491	443	481	476	549	502,11	46,87
107,1	597	590	441	502	448	539	551	569	579	535,11	58,87
107,0	491	411	538	507	609	527	541	469	494	509,67	54,71
106,9	522	448	449	395	474	416	488	400	501	454,78	45,12

## D.20. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 10 mm/s, 1 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,4	137,54	110,16	108,43	136,13	126,96	136,87	163,77	154,86	137,15	134,65	18,11
107,3	214,83	222,41	196,96	186	213,16	210,39	144,36	157,09	145,6	187,87	31,18
107,2	246,82	244,24	251,08	301,97	252,66	250,98	229,54	255,26	270,92	255,94	20,37
107,1	318,6	309,65	327,47	381,98	330	372,26	332,64	359,26	356,11	343,11	25,09
107,0	421,25	386,14	395,34	461,18	488,61	461,33	440,7	475,08	461,24	443,43	35,51
106,9	573,86	555,63	560,87	516,13	512,77	496,84	566,53	567,22	549,22	544,34	28,20
106,8	624,37	584,39	580,74	680,28	652,33	617,93	582,99	591,13	583,95	610,90	35,83
106,7	678,49	696,18	675,26	724,31	719,06	721,14	711,98	691,54	663,84	697,98	22,29
106,6	762,53	785,43	771,28	796,06	785,63	767,45	746,07	749,82	751,06	768,37	17,82
106,5	508,17	460,63	524,33	401,54	353,19	488,24	545,59	575,83	536,64	488,24	72,04
106,4	682,8	690,3	695,96	753,28	781,73	771,18	515,33	467,95	504,49	651,45	122,45
106,3	450,91	375,74	502,05	510,52	567,99	670,04	528,04	459,52	551,31	512,90	82,96
106,2	242,04	228,55	238,32	254,25	267,69	248,72	274,59	267,09	320,96	260,25	27,34

## D.21. Vitrocerámica en 5 mm de agua, 10 mm/s, 1 kHz – Anchura

d (mm)	1			3			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,4	258,96	270,58	298,80	180,94	390,10	290,50	360,22	322,04	333,67	300,65	61,42
107,3	438,24	468,12	471,44	408,36	400,06	511,28	366,86	353,58	396,74	423,85	52,20
107,2	391,76	433,26	449,86	501,32	521,24	517,92	574,36	519,58	486,38	488,41	55,17
107,1	456,50	562,74	566,06	478,08	517,92	542,82	585,98	493,02	590,96	532,68	48,65
107,0	595,94	597,60	685,58	534,52	604,24	632,46	609,22	594,28	615,86	607,74	39,58
106,9	695,54	639,10	702,18	642,42	614,20	665,66	672,30	737,04	750,32	679,86	45,57
106,8	662,34	680,60	760,28	718,78	622,50	649,06	713,80	622,50	650,72	675,62	46,98
106,7	677,28	644,08	747,00	756,96	766,92	698,86	589,30	536,18	594,28	667,87	82,58
106,6	632,46	554,44	654,04	703,84	673,96	815,06	688,90	624,16	707,16	672,67	71,59
106,5	537,84	506,30	549,46	512,94	501,32	456,50	562,74	493,02	567,72	520,87	36,45
106,4	509,62	597,60	566,06	692,22	571,04	654,04	576,02	567,72	549,46	587,09	55,07
106,3	502,98	456,50	529,54	469,78	493,02	546,14	478,08	449,86	592,62	502,06	46,64
106,2	469,78	506,30	576,02	549,46	449,86	521,24	534,52	436,58	557,76	511,28	49,43

## D.22. Vitrocerámica en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,7	78,448	70,457	100,9	47,144	80,997	76,721	102	88,442	59,498	78,29	17,93
106,6	165,59	168,86	161,4	195,55	155,7	181,48	154,57	147,09	152,28	164,73	15,45
106,5	140,88	145,66	146,57	202,51	196,63	172,02	191,7	149,52	139,94	165,05	25,82
106,4	239,27	236,42	218,15	211,97	208,02	247,6	234,14	240,04	218,5	228,23	14,18
106,3	354,89	349,3	362,83	357,25	346,19	361,9	370	392,78	344,24	359,93	14,89
106,2	493,68	404,71	422,03	447,74	439,32	435,67	404,77	407,44	373,18	425,39	34,23
106,1	340,53	337,02	372,31	408,47	416,19	384,54	378,73	376,74	387,94	378,05	26,57
106,0	516,78	463,39	495,15	503,07	495,84	508,39	466,28	176,94	479,07	456,10	106,27
105,9	438,59	434,39	420,7	518,31	521,56	517,9	409,55	406,14	418,22	453,93	50,08
105,8	426,68	437,41	466	525,06	519,86	502,67	485,48	484,06	478,95	480,68	33,60
105,7	421,7	437,46	472,4	581,12	557,27	621,98	420,99	442,83	439,45	488,36	77,06
105,6	540,15	501,79	528,74	486,96	582,9	406,94	352,29	311,71	389,89	455,71	93,46
105,5	248,61	218,98	221,67	378,79	288,79	362,63	406,38	407,72	392,67	325,14	80,17

## D.23. Vitrocerámica en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,7	312	298	235	278	250	200	258	295	271	266,33	34,975
106,6	398	395	406	373	426	421	428	458	502	423	38,246
106,5	396	375	380	426	458	501	476	478	449	437,67	45,79
106,4	446	459	517	486	484	466	471	461	449	471	22,045
106,3	544	509	519	659	544	559	644	514	683	575	67,89
106,2	630	547	483	645	635	640	639	546	512	586,33	63,98
106,1	594	488	581	594	605	561	602	556	615	577,33	38,833
106,0	629	665	627	629	718	707	614	577	635	644,56	44,85
105,9	552	516	486	595	534	619	547	554	619	558	45,426
105,8	572	484	496	569,38	509	579	532	488	585	534,93	41,837
105,7	493	464	511	589	502	567	539	439	473	508,56	48,98
105,6	599	559	549	476	511	501	451	433	449	503,11	56,772
105,5	438	461	544	443	657	649	481	488	529	521,11	82,716

## D.24. Vitrocerámica en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz

### – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
108,9	233,33	237,71	227,41	216,38	193,09	204,79	157,5	179,95	159,64	201,09	30,52
108,8	192,08	182,39	228,29	231,47	222,47	220,92	160,55	196,64	192,46	203,03	24,10
108,7	278,83	298,1	301	306,23	289,8	285,75	280,32	280,87	330,25	294,57	16,59
108,6	308,1	304,46	310,06	359,14	355,79	345,01	323,71	333,12	343,47	331,43	20,86
108,5	281,96	304,38	325,93	313,49	325,27	317,91	304,21	303,49	296,79	308,16	14,14
108,4	334,39	315,62	296,24	301,69	323,78	338,52	302,37	303,3	322,61	315,39	15,37
108,3	329,74	344,98	337,91	396,85	366,06	365,39	327,91	318,29	325,2	345,82	25,55
108,2	386,48	358,08	379,01	369,19	351,39	397,14	342,7	371,98	370,75	369,64	17,06
108,1	394,15	387,79	435,98	401,3	359,98	372,91	460,48	456,02	491,3	417,77	44,87
108,0	419,24	442,53	437,13	454,3	428,61	435,45	465,24	446,69	420,2	438,82	15,25
107,9	496,7	481,16	465,9	499,65	520,85	535,17	501,05	490,11	505,41	499,55	20,39
107,8	528,51	537,75	542,02	542,52	546,6	533,98	569,19	573,2	567,23	549,00	16,56
107,7	581,46	537,22	582,02	508,6	542,63	537,2	523,02	510	503,16	536,15	29,38
107,6	499,06	509,06	490,29	475,2	474,48	476,16	455,47	476,94	470,36	480,78	16,13

## D.25. Vitrocerámica en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
108,9	491,36	484,72	464,80	463,14	493,02	511,28	380,14	375,16	356,90	446,72	59,13
108,8	454,84	481,40	471,44	424,96	373,82	473,10	453,18	415,00	428,28	441,78	34,52
108,7	506,30	517,92	448,20	629,14	571,04	527,88	574,36	434,92	576,02	531,75	63,26
108,6	566,06	562,74	489,70	551,12	459,82	572,70	527,88	576,02	542,82	538,76	39,98
108,5	556,10	456,50	498,00	552,78	512,94	567,72	537,84	526,22	498,00	522,90	35,33
108,4	444,88	499,66	541,16	491,36	476,42	539,50	512,94	433,26	489,70	492,10	37,23
108,3	536,18	556,10	566,06	479,74	451,52	514,60	491,36	501,32	529,54	514,05	37,03
108,2	501,32	521,24	557,76	537,84	496,34	647,40	574,36	594,28	544,48	552,78	47,81
108,1	604,24	494,68	602,58	498,00	551,12	547,80	493,02	571,04	542,82	545,03	43,30
108,0	652,38	499,66	564,40	577,68	502,98	615,86	584,32	524,56	610,88	570,30	52,87
107,9	581,00	634,12	532,86	690,56	574,36	635,78	657,36	639,10	654,04	622,13	49,37
107,8	622,50	574,36	617,52	564,40	509,62	569,38	552,78	546,14	664,00	580,08	46,77
107,7	512,94	582,66	552,78	590,96	582,66	615,86	502,98	512,94	532,86	554,07	40,71
107,6	554,44	539,84	627,48	502,98	620,84	484,72	476,08	498,00	585,98	543,37	57,75

## D.26. 8YSZ en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,7	7,37	14,35	5,66	37,47	38,20	33,06	11,60	24,02	11,89	20,40	13,01
106,6	37,64	35,58	26,38	34,35	40,52	43,44	28,23	36,87	29,43	34,71	5,74
106,5	45,03	34,52	37,18	45,54	63,32	54,88	43,26	35,08	37,66	44,05	9,69
106,4	57,04	50,87	58,05	72,46	64,58	66,38	49,40	49,31	47,92	57,33	8,81
106,3	65,62	49,25	50,87	74,40	81,42	72,79	42,74	44,03	41,80	58,10	15,46
106,2	55,72	62,52	58,73	80,67	73,66	58,75	56,96	56,61	58,49	62,45	8,73
106,1	99,65	79,34	88,58	90,36	91,34	98,27	82,75	90,15	91,01	90,16	6,44
106,0	94,28	98,75	98,67	109,71	97,29	104,11	83,76	85,78	96,57	96,55	8,10
105,9	90,12	99,75	92,16	112,96	102,15	124,95	96,17	85,71	87,41	99,04	12,86
105,8	99,06	90,81	90,45	103,09	104,86	93,40	77,40	94,56	81,16	92,75	9,19
105,7	85,01	91,14	85,46	106,38	92,44	93,35	92,88	89,49	92,67	92,09	6,21
105,6	92,72	104,08	100,93	100,92	91,18	90,79	90,87	83,61	94,84	94,44	6,46
105,5	125,89	127,37	116,77	103,13	112,92	114,36	131,05	127,32	110,54	118,82	9,48
105,4	130,10	114,55	116,75	109,18	134,84	120,39	113,42	118,16	119,25	119,63	8,11
105,3	85,51	85,73	86,73	92,38	98,71	99,27	83,30	103,19	97,88	92,52	7,42
105,2	40,92	73,49	77,13	68,38	68,41	71,06	68,77	67,44	76,76	68,04	10,81
105,1	35,49	41,50	48,64	38,36	40,43	35,34	44,83	49,75	43,84	42,02	5,22
105,0	56,11	63,30	51,14	50,22	52,78	37,69	52,13	71,25	55,03	54,41	9,23
104,9	39,41	27,65	50,57	36,79	26,22	31,51	21,08	39,95	34,46	34,18	8,81
104,8	29,11	28,20	25,96	25,52	29,50	27,78	34,02	40,37	36,97	30,82	5,14

## D.27. 8YSZ en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,7				325,00	307,00	313,00	273,00	288,00	275,00	296,83	21,36
106,6	317,00	305,00	310,00	338,00	348,00	360,00	346,00	312,00	322,00	328,67	19,72
106,5	348,00	317,00	313,00	315,00	366,00	360,00	302,00	307,00	308,00	326,22	24,68
106,4	360,00	343,00	351,00	386,00	370,00	390,00	323,00	323,00	371,00	357,44	24,61
106,3	330,00	333,00	330,00	350,00	398,00	363,00	322,00	307,00	336,00	341,00	26,60
106,2	350,00	375,00	348,00	340,00	363,00	375,00	361,00	346,00	341,00	355,44	13,57
106,1	396,00	360,00	413,00	396,00	416,00	415,00	423,00	393,00	393,00	400,56	19,06
106,0	360,00	376,00	441,00	395,00	408,00	406,00	381,00	411,00	393,00	396,78	23,50
105,9	393,00	370,00	398,00	403,00	431,00	408,00	376,00	398,00	386,00	395,89	18,07
105,8	371,00	343,00	385,00	431,00	373,00	416,00	346,00	366,00	388,00	379,89	29,23
105,7	371,00	386,00	378,00	406,00	385,00	361,00	403,38	368,00	431,00	387,71	22,19
105,6	365,00	338,00	378,00	370,00	410,00	373,00	363,00	361,00	361,00	368,78	19,10
105,5	380,00	328,00	393,00	385,00	361,00	366,00	361,00	376,00	351,00	366,78	19,68
105,4	368,00	343,00	390,00	378,00	386,00	391,00	403,00	385,00	391,00	381,67	17,41
105,3	363,00	375,00	423,00	388,00	380,00	376,00	380,00	376,00	396,00	384,11	17,19
105,2	360,00	375,00	358,00	386,00	371,00	406,00	383,00	390,00	346,00	375,00	18,51
105,1	368,00	350,00	327,00	358,00	356,00	395,00	356,00	351,00	358,00	357,67	17,85
105,0	373,00	350,00	375,00	388,00	378,00	413,00	400,00	325,00	424,00	380,67	30,59
104,9	333,00	345,00	346,00	375,00	376,00	366,00	365,00	343,00	373,00	358,00	16,26
104,8	390,00	330,00	360,00	375,00	383,00	338,00	406,00	371,00	307,00	362,22	31,70

## D.28. 8YSZ en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,5	21,58	38,11	32,24	32,55	41,34	31,74	27,76	23,45	30,49	31,03	6,31
107,4	33,73	34,75	35,99	45,04	38,10	38,59	29,30	27,36	22,52	33,93	6,73
107,3	10,67	5,22	5,18	27,93	26,89	21,59	27,02	21,81	31,54	19,76	10,14
107,2	16,06	14,64	21,00	26,42	26,70	33,69	12,93	16,51	7,04	19,44	8,26
107,1	38,91	40,23	31,12	48,34	45,17	53,21	44,98	41,79	39,10	42,54	6,34
107,0	55,03	58,31	56,71	54,80	66,69	51,11	43,32	47,80	41,55	52,81	7,84
106,9	35,12	35,81	50,80	39,36	39,87	45,11	30,06	31,02	30,87	37,56	7,01
106,8	71,53	61,38	58,47	77,29	89,02	71,80	44,26	57,47	60,51	65,75	13,11
106,7	130,43	117,05	107,06	116,62	116,46	125,52	106,42	106,24	101,41	114,13	9,68
106,6	90,82	98,42	90,61	86,15	91,34	88,11	81,83	90,30	101,97	91,06	6,04
106,5	105,44	130,32	117,27	108,40	127,93	120,80	121,36	127,38	127,41	120,70	8,88
106,4	92,65	105,35	108,73	122,37	129,17	134,39	121,08	127,91	127,74	118,82	13,68
106,3	123,58	132,67	128,35	147,23	142,03	177,93	138,20	144,24	156,34	143,39	16,35
106,2	106,92	105,28	109,78	108,47	104,18	128,06	102,22	108,60	104,51	108,67	7,67
106,1	115,11	107,55	112,33	87,09	91,69	95,44	108,74	106,07	112,48	104,06	10,09
106,0	112,97	109,62	112,24	113,44	106,75	104,02	108,92	107,97	118,28	110,47	4,24
105,9	117,93	124,05	120,77	115,93	122,88	115,88	124,35	110,14	112,83	118,30	5,06
105,8	68,69	76,55	84,77	56,42	54,97	55,65	64,27	86,14	70,20	68,63	12,02
105,7	69,22	42,60	36,81	40,99	31,01	38,05	46,50	66,56	60,48	48,02	13,89
105,6	72,23	69,47	86,37	90,35	74,62	72,19	80,55	79,38	86,08	79,03	7,40
105,5	54,46	54,07	48,34	54,56	52,68	45,38	37,76	34,77	50,67	48,08	7,39

## D.29. 8YSZ en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,5	307,10	278,88	340,30	320,38	358,56	353,58	345,28	295,48	272,24	319,09	32,40
107,4	307,10	322,04	370,18	380,14	376,82	361,88	358,56	333,66	380,14	354,50	27,08
107,3	267,26	277,22	270,58	336,98	293,82	303,78	303,78	315,40	325,36	299,35	24,41
107,2	282,20	273,90	320,38	323,70	307,10	368,52	272,24	258,96	278,88	298,43	34,64
107,1	351,92	338,64	332,00	390,10	361,88	373,50	366,86	348,60	366,86	358,93	18,07
107,0	380,14	360,22	346,94	375,16	370,18	373,50	370,18	366,56	333,66	364,06	14,93
106,9	343,62	355,24	350,26	383,46	343,62	353,58	338,64	363,54	355,24	354,13	13,36
106,8	322,04	341,96	330,34	353,58	360,22	366,86	370,18	375,16	365,20	353,95	18,59
106,7	411,68	386,78	421,64	415,00	421,64	395,08	408,36	393,42	400,06	405,96	12,70
106,6	403,38	431,60	436,58	428,28	413,34	418,32	381,80	378,48	419,98	412,42	20,82
106,5	436,58	444,88	434,92	429,94	400,06	436,36	421,64	408,36	371,54	420,48	23,36
106,4	401,72	405,04	386,78	426,62	418,32	393,42	395,08	453,18	439,90	413,34	22,73
106,3	434,92	416,66	429,94	506,30	383,46	421,64	428,28	410,02	468,12	433,26	35,39
106,2	429,94	366,86	378,48	433,26	436,58	443,22	393,42	385,12	380,14	405,22	29,97
106,1	363,54	366,86	403,38	426,62	393,42	386,78	383,46	383,78	391,76	388,84	18,88
106,0	413,34	386,78	395,08	378,48	366,86	361,88	391,76	371,84	398,40	384,94	16,63
105,9	385,12	391,76	373,50	378,48	391,76	390,10	371,84	391,76	371,84	382,91	8,98
105,8	390,10	345,28	396,74	370,18	335,32	403,38	370,18	405,04	400,06	379,59	25,86
105,7	390,10	376,82	415,00	345,28	353,58	330,34	415,00	386,78	358,56	374,61	29,95
105,6	388,44	449,86	398,40	395,08	416,66	360,22	380,14	388,44	410,02	398,58	25,29
105,5	375,16	356,90	408,36	393,42	396,74	361,88	368,52	401,72	398,40	384,57	19,05

## D.30. 8YSZ en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
109,4	42,57	55,95	45,41	51,16	48,65	51,61	37,21	37,20	27,47	44,13	8,97
109,3	37,20	50,30	52,06	57,49	53,82	52,84	52,51	48,46	47,79	50,27	5,70
109,2	74,55	70,04	72,77	55,15	64,12	52,94	63,95	73,50	57,00	64,89	8,35
109,1	66,37	62,04	62,27	57,14	57,94	59,93	76,38	71,11	75,23	65,38	7,29
109,0	64,11	66,89	63,06	66,33	62,80	61,47	61,93	64,91	60,25	63,53	2,23
108,9	77,37	69,66	68,27	58,12	63,31	61,34	63,28	71,34	60,40	65,90	6,19
108,8	51,72	58,53	49,92	61,09	53,11	55,91	59,97	54,62	63,65	56,50	4,61
108,7	52,00	56,63	51,34	67,32	66,69	65,04	58,89	62,65	63,86	60,49	6,07
108,6	73,39	77,75	69,42	80,78	69,06	83,63	78,10	96,30	71,00	77,71	8,64
108,5	66,71	82,13	67,35	81,37	85,22	77,91	87,70	80,32	84,20	79,21	7,47
108,4	96,21	99,52	97,77	101,99	95,71	97,04	93,73	89,18	99,98	96,79	3,78
108,3	92,04	99,38	101,04	98,87	113,03	97,38	96,55	104,88	97,74	100,10	5,95
108,2	79,27	86,70	86,43	100,12	96,82	84,74	89,42	88,12	87,33	88,77	6,25
108,1	96,46	98,18	95,84	105,19	99,29	96,30	100,39	102,76	102,06	99,61	3,26
108,0	96,14	86,73	94,06	96,79	103,27	85,08	86,13	81,68	85,74	90,62	7,16
107,9	109,59	104,07	103,01	94,72	96,10	92,43	93,93	94,96	90,28	97,68	6,38
107,8	100,80	102,24	100,08	91,36	91,14	88,70	108,56	100,78	112,34	99,55	7,99
107,7	78,38	81,60	86,54	80,73	75,13	80,27	91,36	96,23	93,39	84,85	7,35
107,6	87,24	75,72	89,69	69,29	80,80	75,32	88,11	88,81	91,14	82,90	7,86
107,5	89,44	83,65	86,11	80,92	74,99	76,93	95,71	97,67	95,04	86,72	8,32
107,4	86,59	100,94	91,13	84,80	87,65	84,18	95,99	103,63	95,98	92,32	7,14
107,3	89,31	104,06	95,63	73,44	86,43	82,35	85,70	91,80	99,89	89,85	9,32
107,2	55,36	48,80	48,68	41,26	49,56	52,33	54,33	60,01	61,06	52,38	6,17

### D.31. 8YSZ en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
109,4	341,96	312,08	287,18	385,12	388,44	365,20	305,44	257,30	312,08	328,31	44,96
109,3	287,18	308,76	280,54	366,86	336,98	345,94	341,96	308,76	297,14	319,35	29,68
109,2	395,08	385,12	363,54	373,50	366,86	416,66	426,62	376,82	360,22	384,94	23,56
109,1	378,48	400,06	413,34	416,66	375,16	396,74	395,08	405,70	393,42	397,18	14,03
109,0	375,16	378,48	365,20	390,10	400,06	393,42	390,10	381,80	355,24	381,06	14,31
108,9	400,06	398,40	408,36	391,76	406,70	388,44	415,00	376,82	393,42	397,66	11,59
108,8	368,52	360,22	336,98	371,84	370,18	373,50	346,94	386,78	361,88	364,09	14,87
108,7	353,58	360,22	350,26	363,54	353,58	368,52	388,44	361,88	368,52	363,17	11,49
108,6	371,84	351,92	391,76	390,10	385,12	390,10	398,40	380,14	393,42	383,64	14,24
108,5	378,48	410,02	383,46	386,78	398,40	395,63	421,64	378,48	405,04	395,33	14,97
108,4	398,40	396,74	424,96	410,02	415,00	388,44	426,62	383,46	395,08	404,30	15,55
108,3	433,26	418,32	436,58	431,60	448,20	426,62	410,02	428,28	436,58	429,94	11,07
108,2	421,64	371,84	401,72	400,06	396,74	410,02	413,34	391,76	396,74	400,43	14,27
108,1	410,02	421,64	424,96	408,36	401,72	433,26	415,00	413,34	421,64	416,66	9,64
108,0	401,72	431,60	421,64	419,98	416,66	400,06	423,30	410,02	416,66	415,74	10,24
107,9	396,74	391,76	416,66	395,08	415,00	403,38	405,04	423,30	416,66	407,07	11,25
107,8	406,70	381,80	411,68	396,74	413,34	423,30	415,00	395,08	429,94	408,18	14,95
107,7	421,64	370,18	378,48	368,52	400,68	386,78	419,98	403,38	418,32	396,44	21,27
107,6	343,62	395,08	365,20	391,76	383,46	370,18	388,44	368,52	358,56	373,87	17,11
107,5	375,16	380,14	398,40	378,48	383,46	403,38	405,04	390,10	375,16	387,70	11,94
107,4	390,10	381,80	403,38	400,06	391,76	373,50	396,74	395,08	385,12	390,84	9,43
107,3	345,28	355,24	400,06	366,86	360,22	400,06	355,24	366,86	386,78	370,73	20,14
107,2	386,78	350,26	371,84	360,22	366,86	390,10	400,06	370,18	413,34	378,85	20,19

## D.32. Alúmina en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,9	26,68	29,60	28,60	22,04	25,76	24,10	30,48	22,90	33,00	27,02	3,69
106,8	45,32	33,41	44,54	36,18	28,32	35,23	38,38	38,06	35,89	37,26	5,26
106,7	43,31	43,39	47,83	53,76	42,87	40,58	43,13	42,26	37,43	43,84	4,62
106,6	41,82	40,17	41,94	57,60	47,50	40,58	43,22	45,85	43,16	44,65	5,40
106,5	49,84	45,46	44,78	46,05	49,41	47,48	38,52	50,28	48,57	46,71	3,65
106,4	39,89	46,60	48,71	48,80	45,86	49,80	45,01	44,29	38,97	45,33	3,82
106,3	43,40	43,49	38,93	44,59	39,40	51,42	50,95	45,60	41,45	44,36	4,46
106,2	50,84	62,92	52,01	51,89	52,15	55,12	57,58	49,32	50,62	53,60	4,29
106,1	50,73	53,04	51,29	50,57	59,00	56,07	54,24	65,41	53,89	54,92	4,78
106,0	54,32	53,09	58,07	58,37	66,46	62,27	51,04	49,66	55,54	56,53	5,39
105,9	53,52	55,06	49,73	52,75	54,43	49,83	51,07	52,24	55,80	52,72	2,20
105,8	60,82	66,34	59,51	68,26	68,02	70,84	58,30	57,99	74,30	64,93	5,95
105,7	58,15	59,64	55,71	51,53	60,66	62,63	60,21	57,68	54,79	57,89	3,42
105,6	58,47	64,00	55,13	71,73	72,74	68,09	69,26	63,03	66,75	65,47	5,90
105,5	68,41	65,90	71,51	63,51	75,22	58,38	72,37	76,93	69,55	69,09	5,83
105,4	87,00	89,44	83,61	84,05	84,91	89,63	76,19	83,23	88,85	85,21	4,23
105,3	92,30	97,61	101,22	97,91	92,47	96,79	95,71	91,67	94,77	95,61	3,15
105,2	84,18	64,62	52,21	99,67	103,63	103,03	66,46	82,41	105,98	84,69	19,90

## D.33. Alúmina en 3 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,9	287	310	272	308	332	336	320	318	346	314,33	23,53
106,8	380	363	365	400	353	353	345	341	371	363,44	18,48
106,7	361	365	390	385	373	346	310	360	335	358,33	25,04
106,6	312	348	366	350	380	353	398	348	396	361,22	27,17
106,5	327	368	348	335,32	353	343	348	351	356	347,70	11,85
106,4	370	395	378	381	346	371	366	325	385	368,56	21,31
106,3	348	380	353	348	375	356	351	345	386	360,22	15,65
106,2	368	375	376	381	363	361	370	335	355	364,89	13,83
106,1	371	388	373	378	371	371	356	400	363	374,56	13,03
106,0	370	358	360	353	380	386	350	383	383	369,22	14,24
105,9	421	383	398	360	363	356	380	348	373	375,78	22,89
105,8	351	355	351	385	385	388	348	322	365	361,11	21,86
105,7	405	366	378	361	390	380	345	358	378	373,44	18,07
105,6	351	327	356	365	353	350	360	366	348	352,89	11,65
105,5	341	363	366	371	338	351	375	355	340	355,56	13,98
105,4	325	318	345	391	348	345	332	327	322	339,22	22,29
105,3	335	336	375	356	371	360	320	283	278	334,89	35,60
105,2	185	240	376	302	410	345	380	332	396	329,56	75,42

## D.34. Alúmina en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
107,6	83,74	92,64	84,35	78,59	78,31	80,40	79,62	83,16	77,06	81,99	4,75
107,5	52,65	48,83	51,92	58,86	60,41	61,62	46,33	63,41	50,71	54,97	6,18
107,4	99,07	68,67	85,38	71,67	79,34	74,01	77,91	94,04	80,89	81,22	10,10
107,3	75,22	73,01	87,56	76,98	67,38	69,59	91,73	82,76	73,76	77,55	8,18
107,2	107,18	86,85	112,50	79,00	102,70	92,33	75,94	77,91	77,11	90,17	14,18
107,1	88,99	80,20	87,31	90,35	90,91	82,91	95,48	83,64	77,00	86,31	5,84
107,0	103,27	99,69	96,16	106,47	98,44	109,43	98,64	98,55	95,42	100,68	4,74
106,9	84,75	83,39	76,60	83,89	74,48	71,74	79,23	81,16	75,24	78,94	4,66
106,8	97,78	93,86	103,31	89,55	114,03	104,31	84,15	91,55	79,22	95,31	10,81
106,7	135,84	146,35	151,26	166,26	154,02	150,85	146,45	132,58	123,75	145,26	12,75
106,6	115,44	131,29	114,94	147,95	119,32	116,18	114,93	117,41	110,31	120,86	11,67
106,5	161,47	149,76	171,56	149,59	165,86	163,00	148,57	136,44	160,81	156,34	10,94
106,4	164,57	176,11	155,09	139,58	126,14	154,84	134,11	134,97	133,53	146,55	16,82
106,3	119,54	114,22	114,99	124,22	115,88	114,73	120,50	108,71	115,27	116,45	4,44
106,2	104,89	121,26	126,54	112,54	115,12	110,49	98,18	100,24	109,97	111,03	9,25
106,1	110,34	111,42	109,58	115,57	116,66	112,60	86,98	106,41	102,75	108,03	8,98
106,0	110,80	109,17	107,18	112,08	113,11	113,21	106,16	108,39	98,96	108,78	4,47
105,9	123,54	129,28	131,92	127,87	138,90	136,79	112,92	110,03	118,88	125,57	10,08
105,8	123,37	127,45	130,61	131,86	123,16	133,01	131,20	125,76	143,42	129,98	6,22

## D.35. Alúmina en 5 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
107,6	380,14	360,22	345,28	424,96	396,74	385,12	381,80	365,20	378,48	379,77	22,77
107,5	366,86	350,26	345,28	380,14	353,58	366,86	338,64	355,24	341,96	355,42	13,55
107,4	386,78	325,36	373,50	380,14	380,14	391,76	396,74	371,84	363,54	374,42	21,06
107,3	360,22	366,86	322,04	380,14	370,18	385,12	370,18	322,04	351,92	358,74	22,98
107,2	346,94	351,92	355,24	368,52	388,44	376,82	370,18	371,84	368,52	366,49	13,04
107,1	350,26	356,90	351,92	381,80	383,46	378,48	383,46	370,18	381,80	370,92	14,11
107,0	395,08	396,74	395,08	385,12	386,78	381,80	391,76	410,02	378,48	391,21	9,50
106,9	373,50	361,88	346,94	376,82	400,06	378,48	356,90	386,78	361,88	371,47	16,32
106,8	371,84	371,84	375,16	406,70	391,76	398,40	393,42	385,12	401,72	388,44	13,15
106,7	390,10	391,76	405,04	411,68	393,42	441,56	410,02	405,04	401,72	405,59	15,59
106,6	380,14	396,74	398,40	436,58	423,30	413,34	406,70	373,50	391,76	402,27	20,11
106,5	433,26	400,06	418,32	418,32	426,62	443,22	408,36	383,46	468,12	422,19	24,76
106,4	393,42	366,86	423,30	458,16	418,32	423,30	433,26	443,22	408,36	418,69	27,03
106,3	385,12	391,76	378,48	390,10	413,34	398,40	390,10	368,52	390,10	389,55	12,42
106,2	385,12	390,10	363,54	365,20	368,52	363,54	341,96	371,84	345,28	366,12	15,84
106,1	376,82	405,04	395,08	391,76	380,14	378,48	380,14	376,82	371,84	384,01	10,82
106,0	380,14	361,88	361,88	358,56	380,14	361,88	371,84	336,98	375,16	365,38	13,52
105,9	390,10	370,18	398,40	396,74	395,08	361,88	325,36	356,90	371,84	374,05	24,08
105,8	345,28	366,86	336,98	363,54	385,12	363,54	390,10	358,56	378,48	365,38	17,46

## D.36. Alúmina en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Profundidad

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu\text{m})$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
109,5	53,95	56,79	49,21	51,96	51,18	54,42	51,89	56,26	51,96	53,07	2,47
109,4	47,00	50,65	56,46	51,27	49,73	47,35	43,85	44,31	48,37	48,78	3,86
109,3	56,51	52,92	53,16	46,01	54,90	49,50	46,88	44,82	47,55	50,25	4,23
109,2	52,95	55,36	51,52	55,90	51,28	52,37	52,97	50,20	48,28	52,31	2,38
109,1	48,91	57,01	50,82	48,97	57,04	50,35	49,39	50,45	49,56	51,39	3,26
109,0	40,53	43,34	45,29	45,59	48,11	45,05	44,95	41,27	38,48	43,62	3,00
108,9	43,31	45,12	42,24	33,17	38,28	36,99	39,02	39,04	39,59	39,64	3,56
108,8	30,20	31,58	29,45	29,83	33,59	30,39	30,83	28,87	29,48	30,47	1,42
108,7	36,46	35,88	34,13	33,27	30,69	30,24	33,61	32,04	32,43	33,19	2,12
108,6	28,52	24,86	24,80	25,92	21,23	23,33	26,71	27,09	26,76	25,47	2,20
108,5	24,49	27,48	23,62	23,31	27,51	23,97	24,00	20,91	27,06	24,70	2,23
108,4	20,68	21,79	20,27	22,30	23,54	22,88	26,07	27,64	22,38	23,06	2,41
108,3	35,24	34,45	33,18	28,63	31,38	36,90	38,30	30,93	34,97	33,78	3,06
108,2	43,04	54,67	45,45	45,72	50,30	49,40	50,97	42,24	44,18	47,33	4,19
108,1	50,70	59,46	50,28	55,01	55,00	51,07	50,34	51,84	50,17	52,65	3,19
108,0	60,10	63,50	63,93	63,12	56,68	60,59	54,46	58,25	61,00	60,18	3,22
107,9	65,59	70,39	65,49	65,99	64,16	65,67	63,79	62,04	66,96	65,56	2,32
107,8	73,81	78,27	76,22	70,22	69,92	64,78	74,65	77,47	66,30	72,41	4,85
107,7	39,22	38,37	33,79	38,45	41,89	42,81	37,37	38,54	41,95	39,16	2,79
107,6	49,99	48,75	54,00	50,64	50,38	46,71	48,67	46,24	47,72	49,23	2,36
107,5	56,44	65,26	57,75	57,15	58,57	54,09	57,32	63,20	57,11	58,54	3,48
107,4	79,91	84,84	77,03	82,62	83,27	86,06	78,89	78,74	79,15	81,17	3,12
107,3	79,75	73,07	75,05	73,11	72,30	70,57	70,43	68,49	64,46	71,91	4,26

## D.37. Alúmina en 10 mm de agua, 20 mm/s, 2 kHz – Anchura

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	σA(μm)
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
109,5	365,20	381,80	371,84	405,04	383,46	398,40	390,10	348,60	360,22	378,30	18,44
109,4	360,22	371,84	365,20	368,52	376,82	366,86	356,90	370,18	356,90	365,94	6,85
109,3	366,86	385,12	390,10	363,54	380,14	388,44	390,10	356,90	371,84	377,00	12,57
109,2	376,82	378,48	386,78	391,76	385,12	378,48	370,18	368,52	385,12	380,14	7,74
109,1	363,54	356,90	345,28	388,44	381,80	400,06	371,84	356,90	370,18	370,55	17,25
109,0	351,92	361,88	346,94	366,86	375,16	373,50	356,90	360,22	351,92	360,59	9,81
108,9	353,58	345,28	351,92	356,90	355,24	368,52	353,58	348,60	345,28	353,21	7,08
108,8	360,22	351,92	348,60	325,36	340,30	322,04	340,30	336,98	358,56	342,70	13,46
108,7	340,30	358,56	346,94	332,00	348,60	350,26	351,92	345,28	348,60	346,94	7,47
108,6	351,92	333,66	325,36	336,98	322,04	328,68	330,34	346,94	338,64	334,95	9,81
108,5	327,02	317,06	333,66	335,32	313,74	328,68	338,64	338,64	335,32	329,79	9,09
108,4	333,66	330,34	336,98	333,66	327,02	330,34	333,66	312,08	327,02	329,42	7,29
108,3	355,24	330,34	323,70	376,82	346,94	343,62	333,66	350,26	360,22	346,76	16,40
108,2	350,26	383,46	370,18	356,90	346,94	336,98	363,54	356,90	381,80	360,77	15,62
108,1	340,30	360,22	360,22	396,74	371,84	350,26	358,56	360,22	350,26	360,96	16,05
108,0	361,88	358,56	363,54	371,84	368,52	350,26	356,90	355,24	356,90	360,40	6,77
107,9	345,28	345,28	356,90	358,56	358,56	343,50	356,90	380,14	386,78	359,10	15,18
107,8	371,84	350,26	365,20	398,40	375,16	383,46	368,52	375,16	355,24	371,47	14,39
107,7	350,26	348,60	348,60	361,88	348,60	358,56	345,28	358,56	348,60	352,10	5,90
107,6	365,20	356,90	361,88	368,52	356,90	360,22	373,50	375,16	355,24	363,72	7,35
107,5	355,24	360,22	348,60	351,92	380,14	375,16	346,94	351,92	361,88	359,11	11,65
107,4	346,94	373,50	358,56	360,22	371,84	373,50	370,18	378,48	375,16	367,60	10,20
107,3	376,82	363,54	358,56	390,10	378,48	408,36	348,60	356,90	355,24	370,73	19,39

## D.38. Vitrocerámica en 3 mm de etilenglicol, 20 mm/s, 2 kHz

Profundidad:

d (mm)	1			2			3			Zp(μm)	$\sigma Z(\mu m)$
	Z1(μm)	Z2(μm)	Z3(μm)	Z4(μm)	Z5(μm)	Z6(μm)	Z7(μm)	Z8(μm)	Z9(μm)		
106,4	47,977	83,208	95,273	111,06	80,03	119	73,232	75,898	69,593	83,92	21,76
106,3	142,39	111,76	113,94	139,4	137,87	130,57	122,36	107,28	120,46	125,12	12,97
106,2	113,21	129,45	119,85	143,37	137,48	132,51	110,08	122,92	112,94	124,64	11,76
106,1	102,82	70,43	117,01	69,654	89,48	63,316	63,312	87,859	80,91	82,75	18,47
106,0	53,707	66,641	58,168	85,303	70,311	64,6	73,511	59,592	57,406	65,47	9,84

Anchura:

d (mm)	1			2			3			Ap(μm)	$\sigma A(\mu m)$
	A1(μm)	A2(μm)	A3(μm)	A4(μm)	A5(μm)	A6(μm)	A7(μm)	A8(μm)	A9(μm)		
106,4	247	295	381	335	265	493	298	290	327	325,67	74,16
106,3	348	385	415	461	433	498	400	340	395	408,33	50,705
106,2	386	424	461	463	428	426	363	386	378	412,78	36,231
106,1	355	343	373	370	303	358	351	353	325	347,89	21,997
106,0	368	361	410	327	368	385	343	356	340	362	25,03

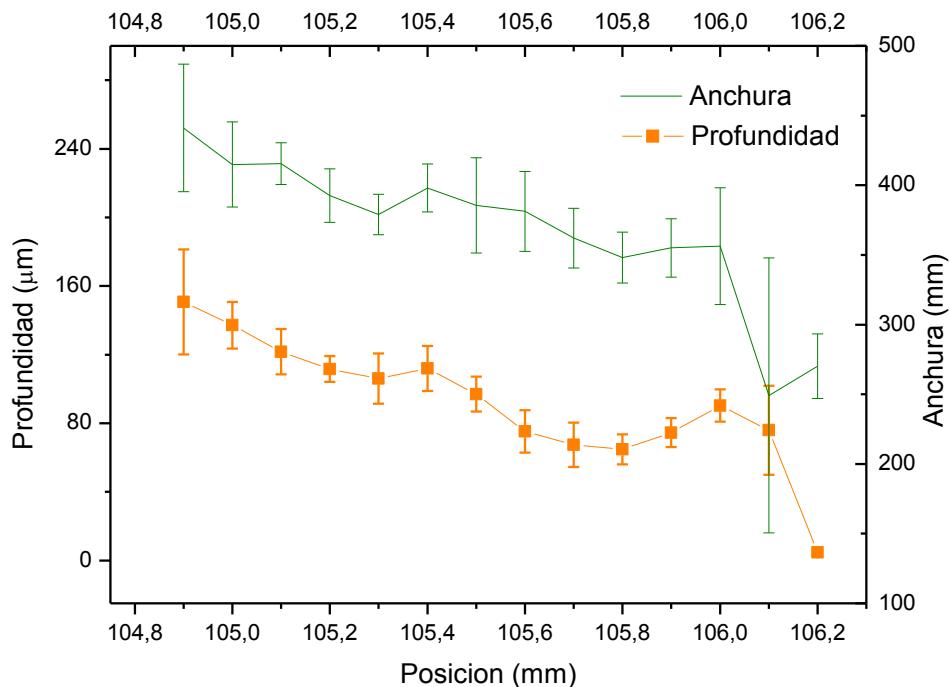
# Anexo E. Gráficas

En el presente anexo se incluyen todas las gráficas que no han podido incluirse en la memoria y que sirven para mejorar el análisis de los datos y la comprensión global de los resultados.

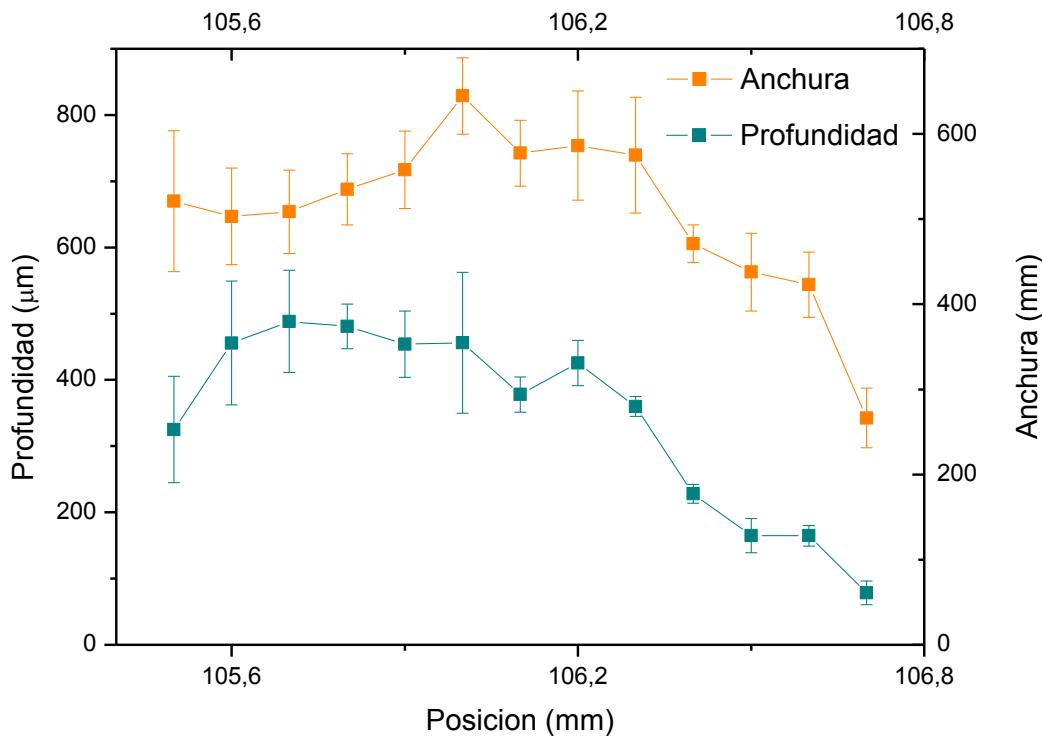
## E.1. Gráficas individuales de la vitrocerámica

A continuación se incluyen las gráficas correspondientes a la vitrocerámica en función de la profundidad de la capa de líquido utilizada. Se representa la profundidad de marca y la anchura.

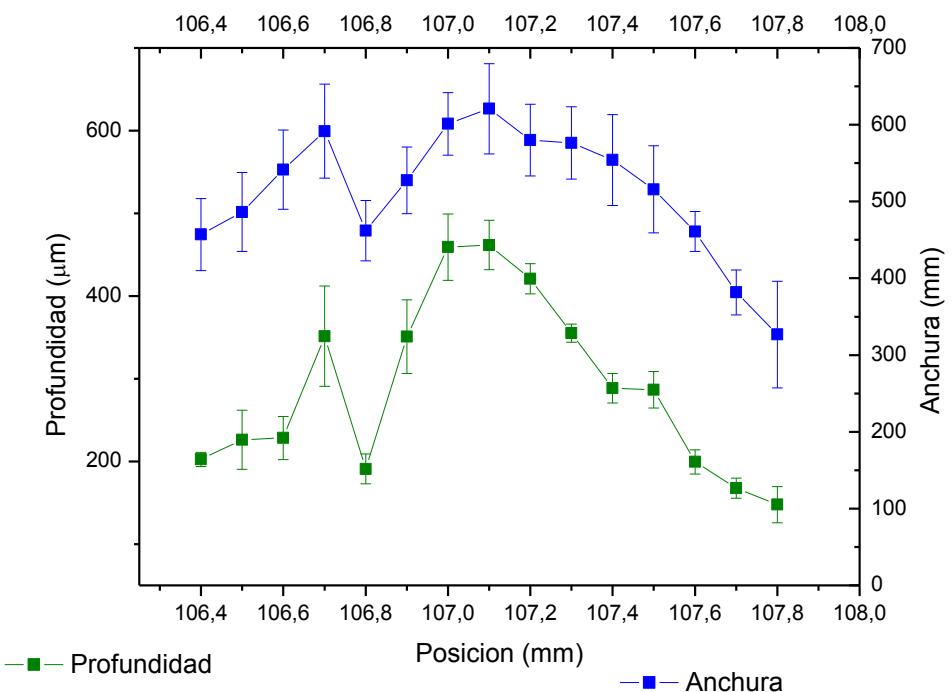
En aire:



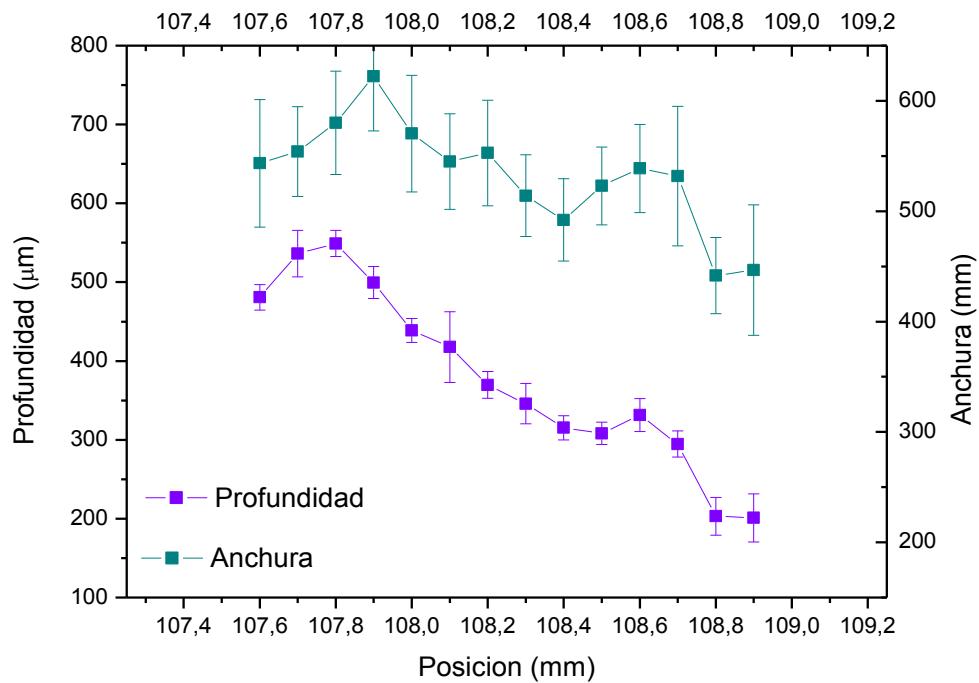
**Con 3 mm de agua:**



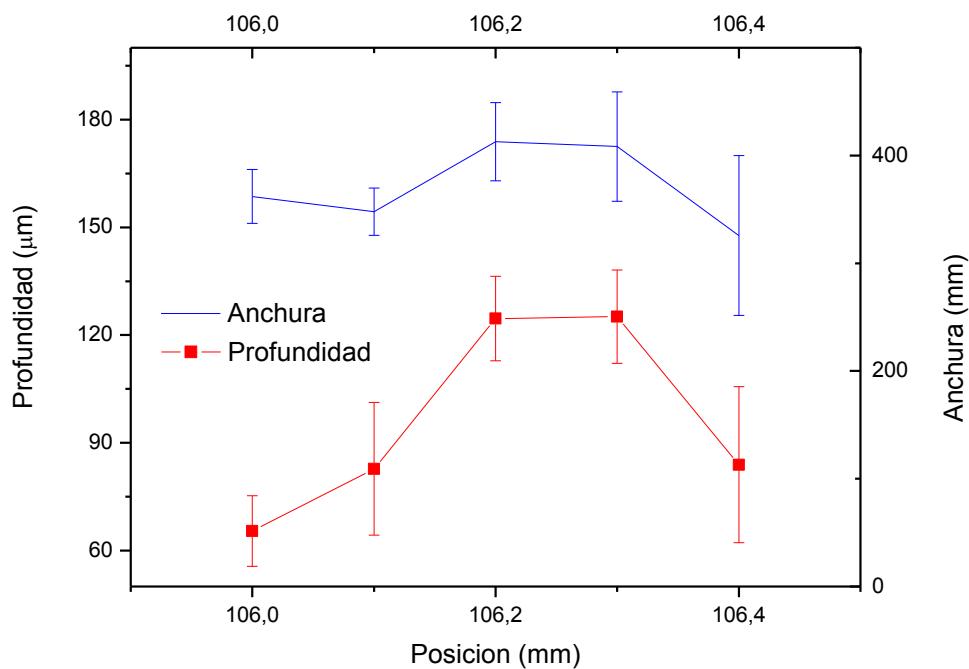
**Con 5 mm de agua:**



**Con 10 mm de agua:**



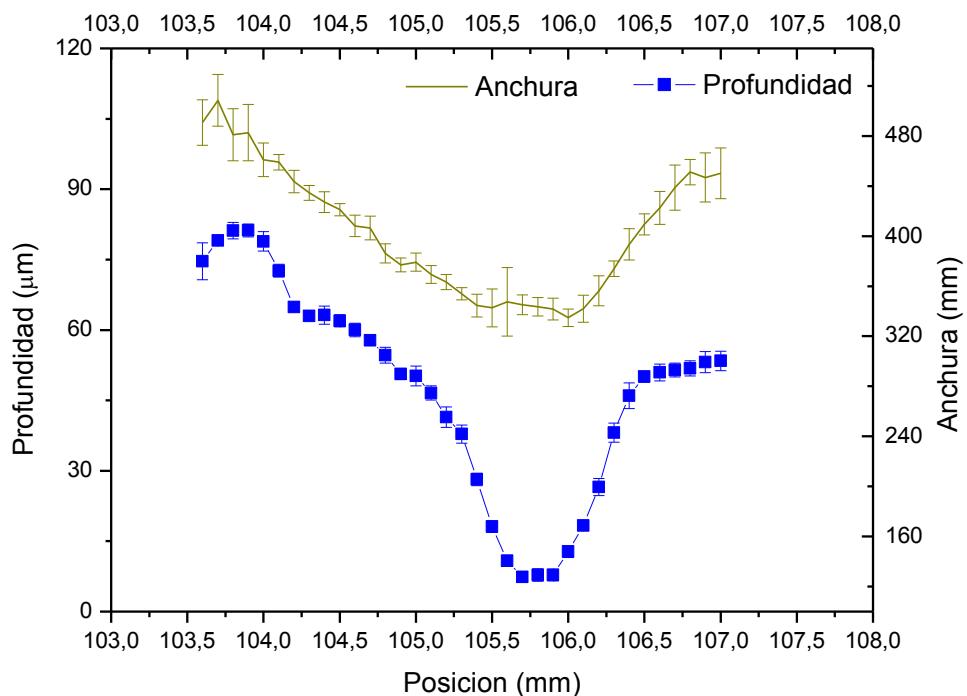
**Con 3 mm de etilenglicol:**



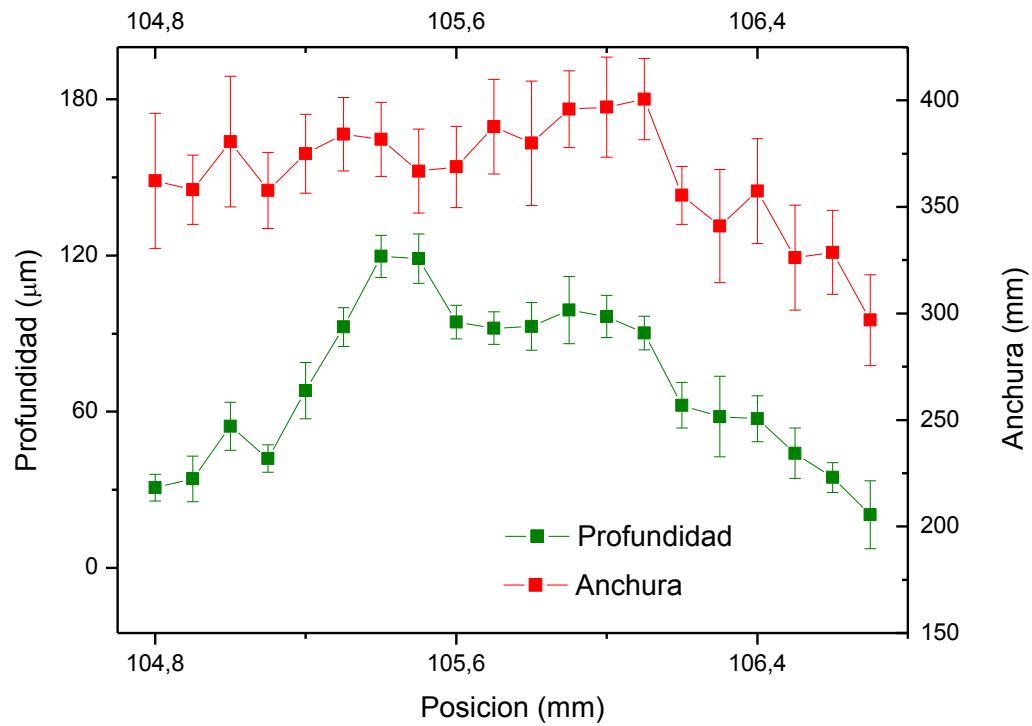
## E.2. Gráficas individuales de la circona 8YSZ

A continuación se incluyen las gráficas correspondientes a la circona 8YSZ en función de la profundidad de la capa de líquido utilizada. Se representa la profundidad de marca y la anchura.

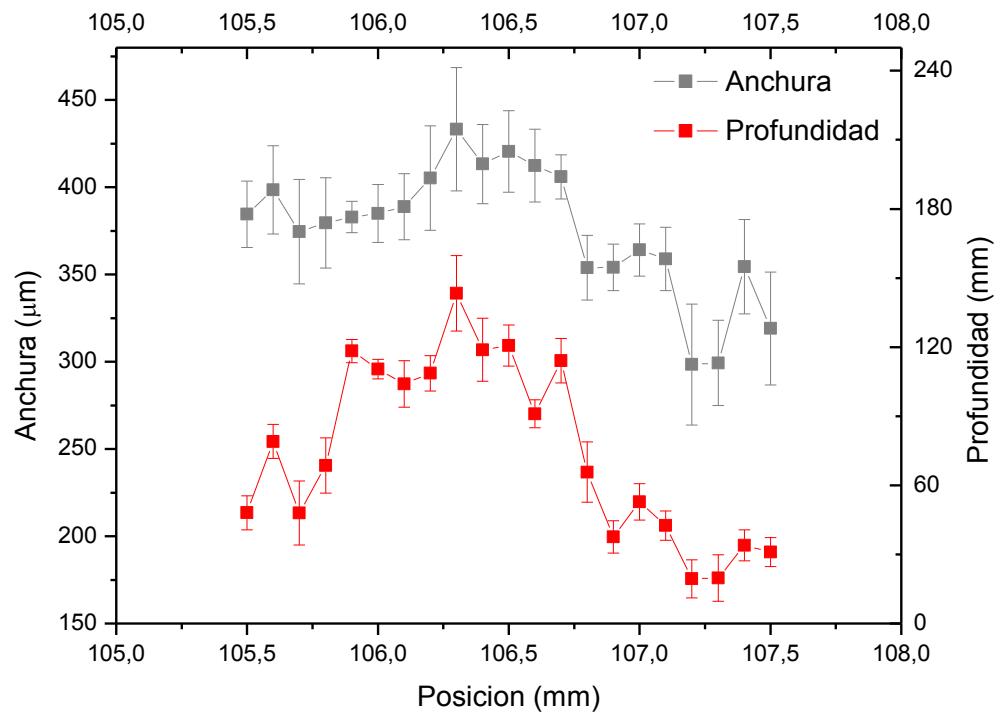
En aire:



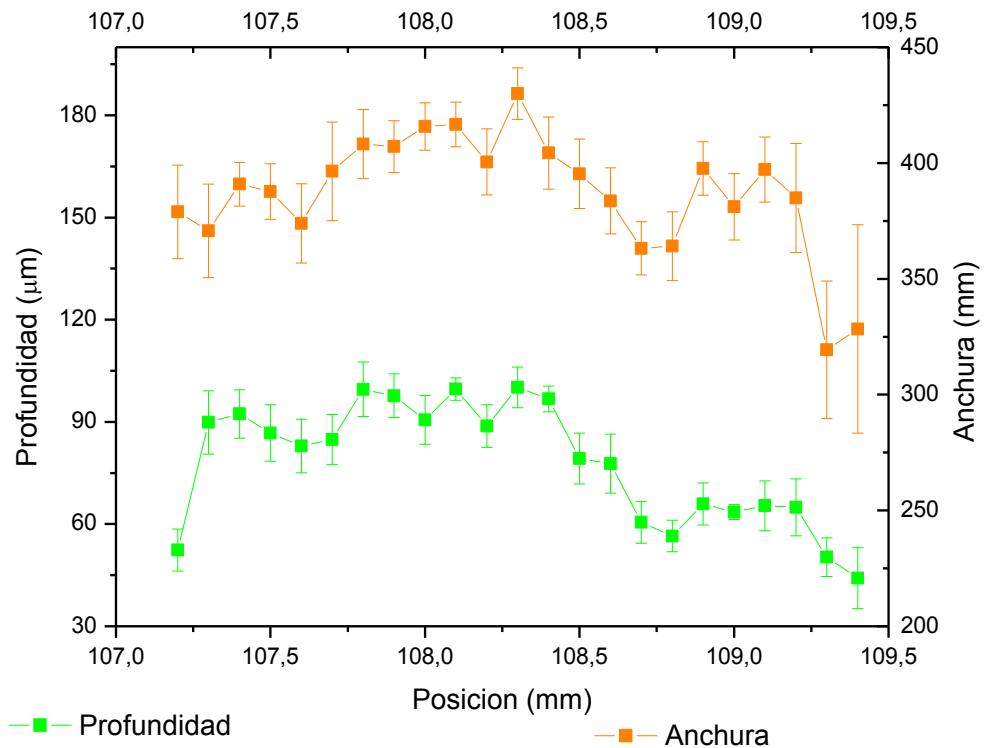
**8YSZ con 3 mm de agua:**



**8YSZ con 5 mm de agua:**



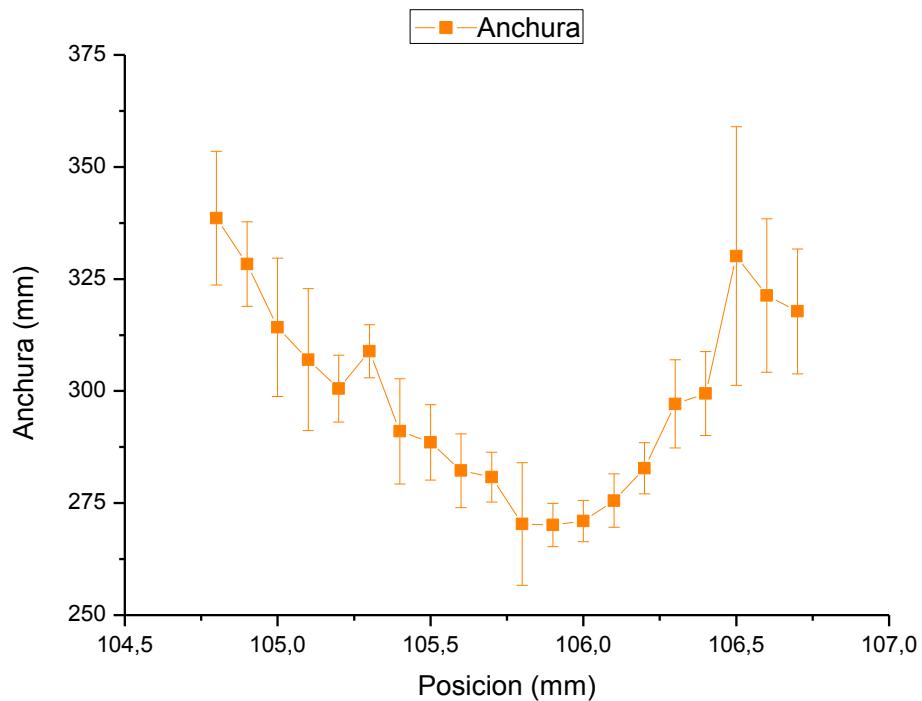
**8YSZ con 10 mm de agua:**



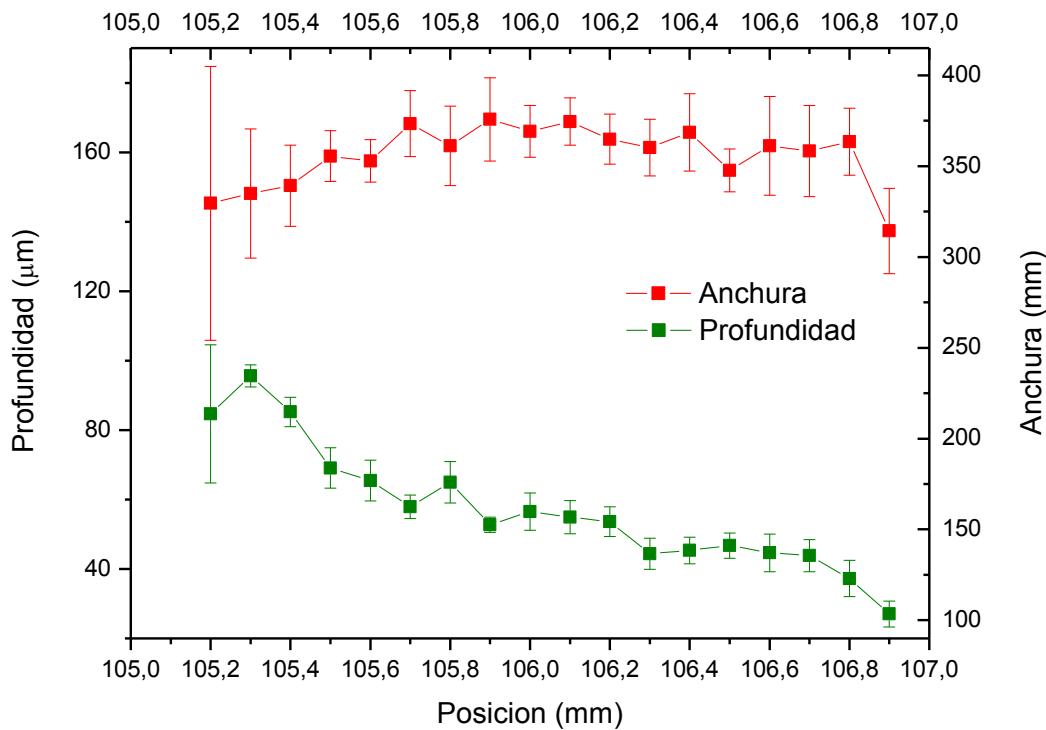
### E.3. Gráficas individuales de la alúmina

A continuación se incluyen las gráficas correspondientes a la alúmina en función de la profundidad de la capa de líquido utilizada. Se representa la profundidad de marca y la anchura.

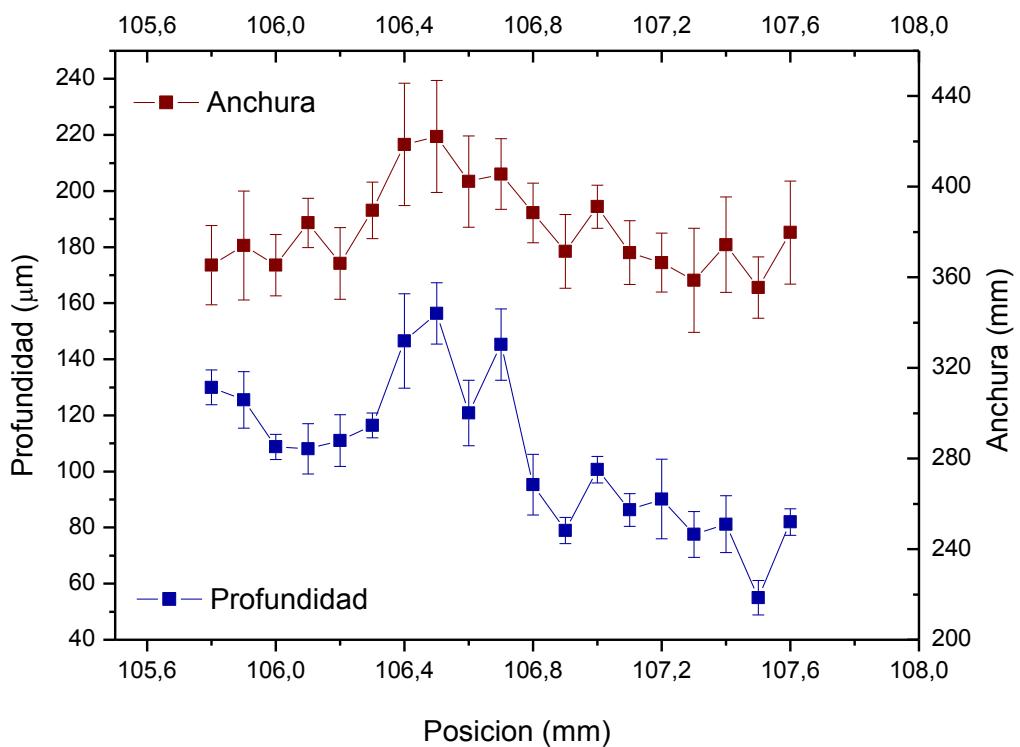
En aire:



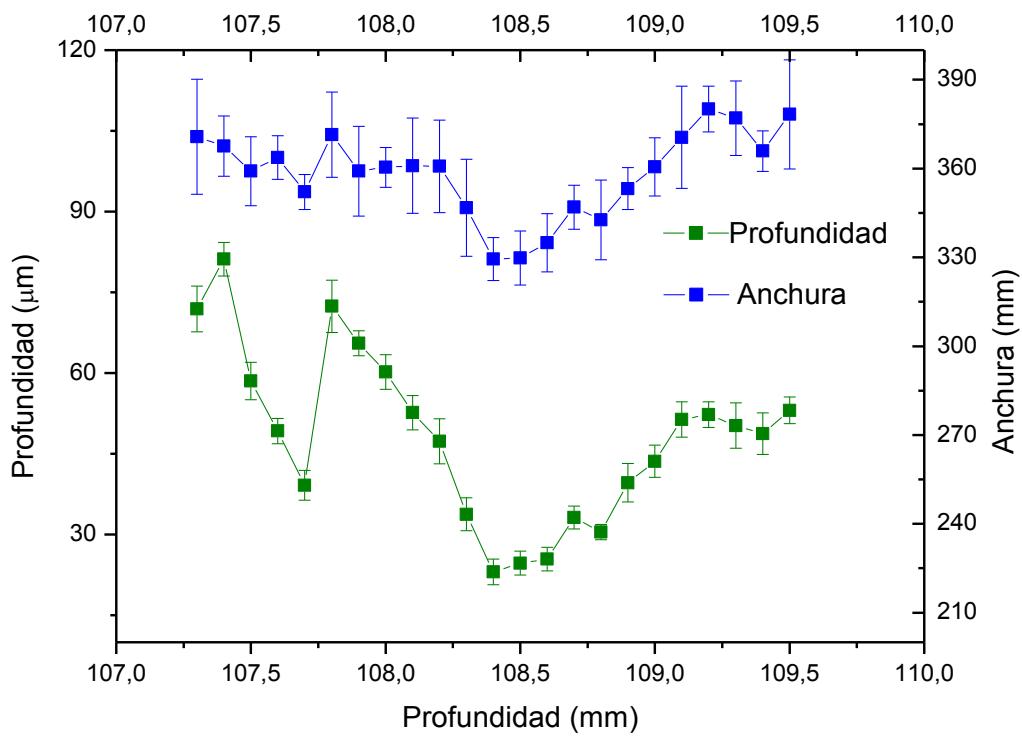
**Alúmina con 3 mm de agua:**



**Alúmina con 5 mm de agua:**



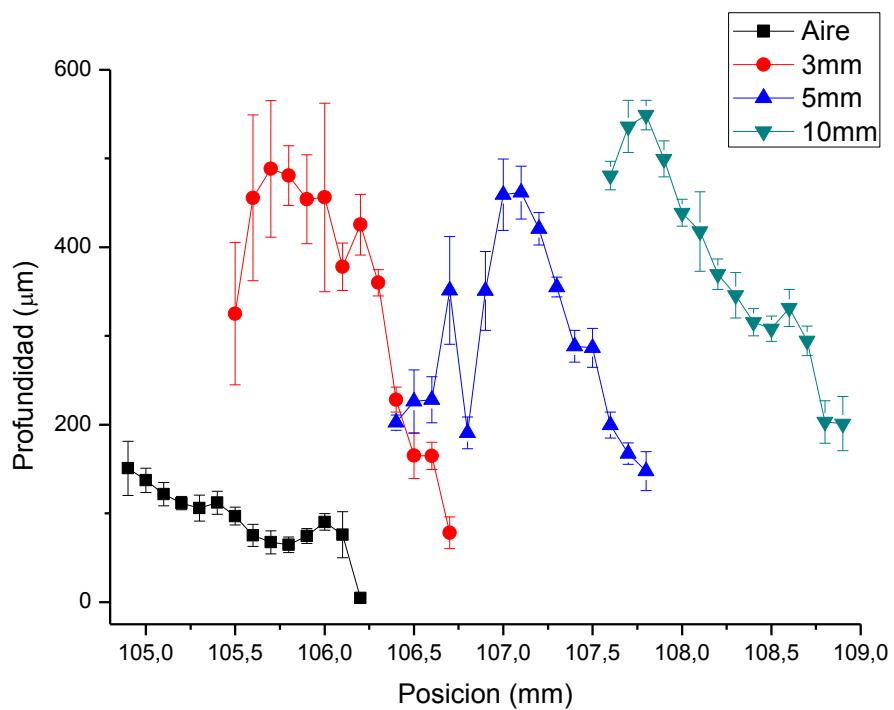
**Alúmina con 10 mm de agua:**



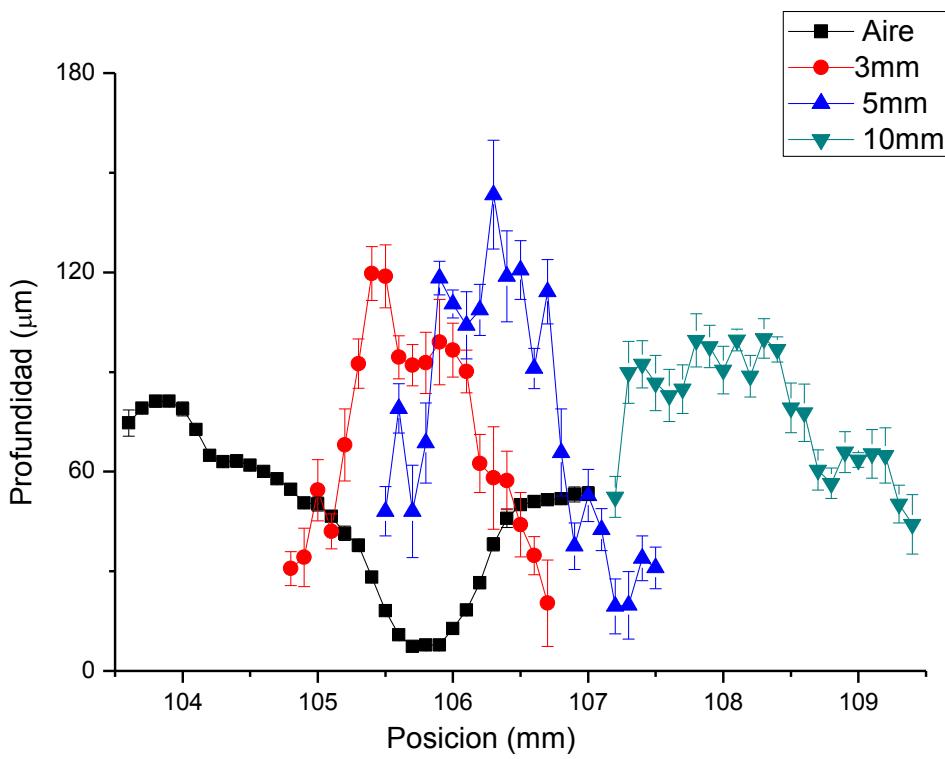
## E.4. Gráficas comparativas por material, según la capa de líquido

En las siguientes gráficas se representa la profundidad de cada material en función de los diferentes espesores de capa de líquido utilizados.

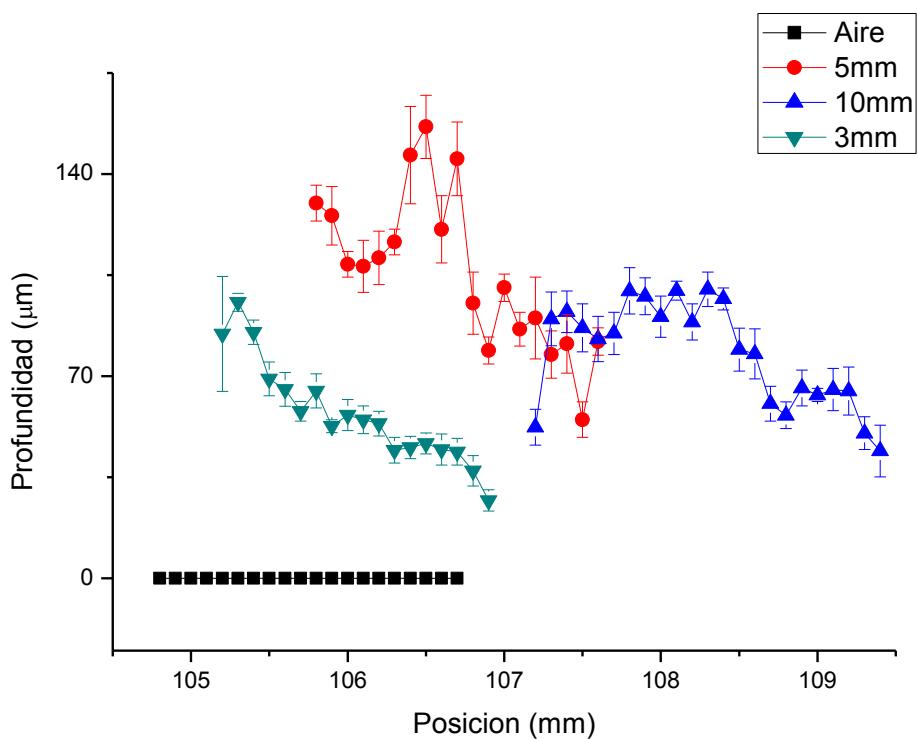
Vitrocerámica:



**Circonia 8YSZ:**



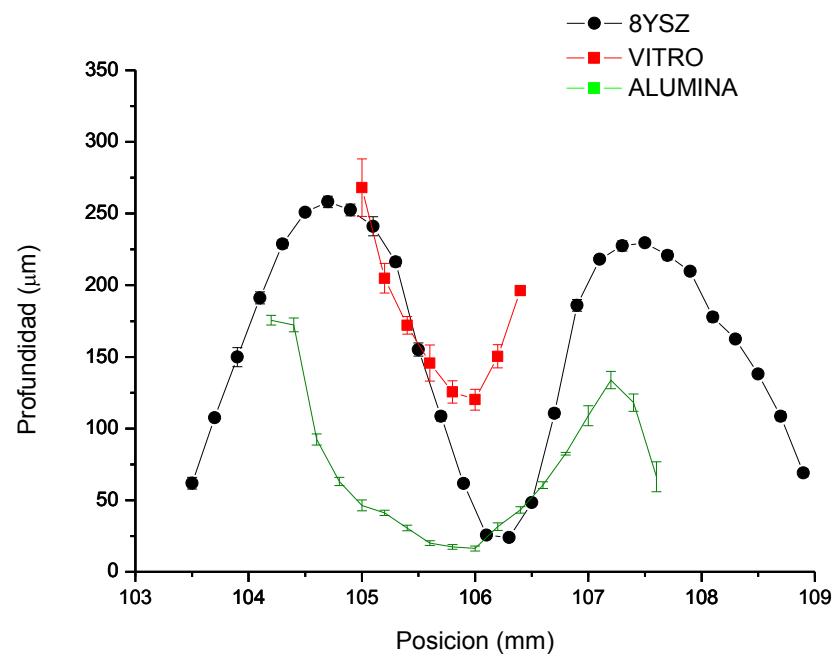
**Alúmina:**



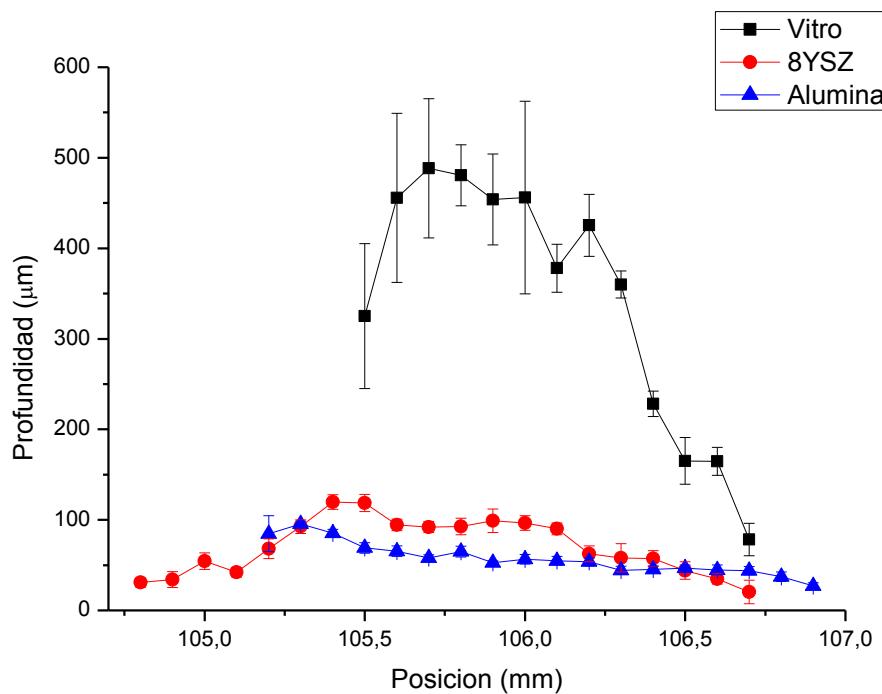
## E.5. Gráficas comparativas por profundidad de capa de líquido, según el material

En las siguientes gráficas se representan las profundidades de los diferentes materiales juntos, para cada espesor de capa de líquido.

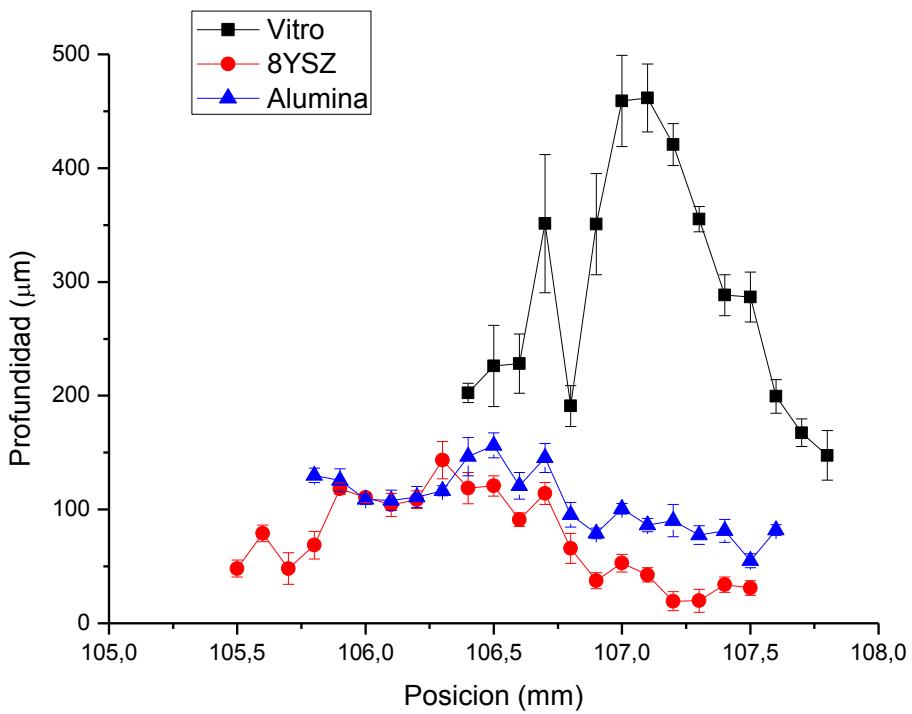
En aire:



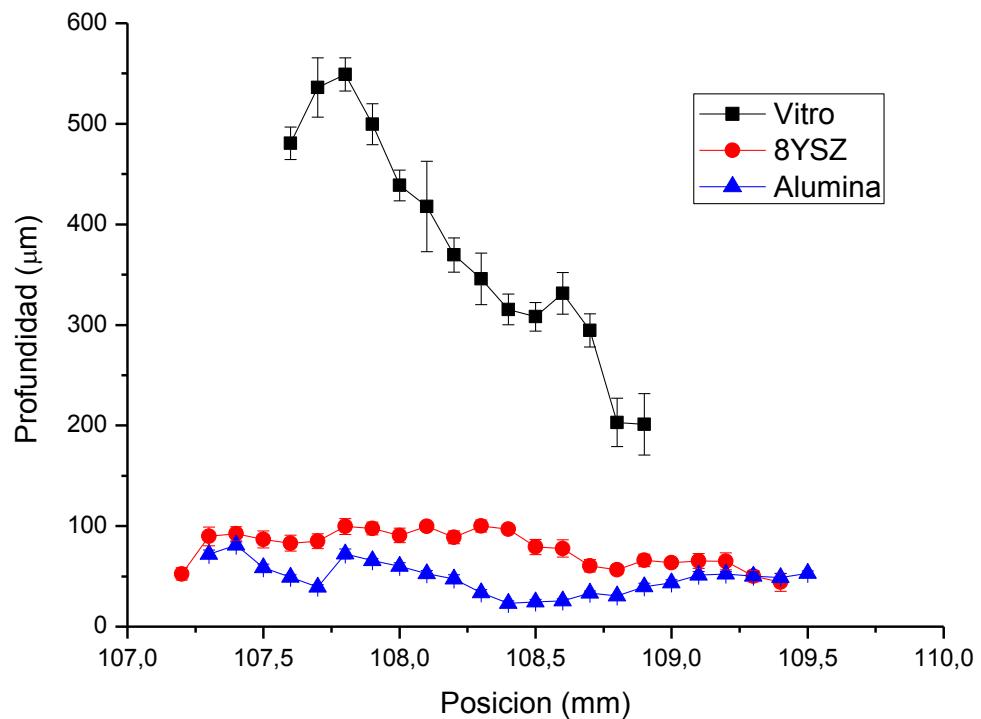
Con una capa de líquido de 3 mm de espesor:



Con una capa de líquido de 5 mm de espesor:



Con una capa de líquido de 10 mm de espesor:



# Bibliografía

- [1] Sola D, "Mecanizado por Láser de Materiales Cerámicos y Vitrocerámicos", Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza 2010.
- [2] Kruusing A, "Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing", 1<sup>st</sup> edition, 2007.
- [3] Sola D, Escartín A, Cases R, Peña J I, "Laser ablation of Advanced Ceramics and Glass-Ceramic Materials: Reference position dependence", Universidad de Zaragoza, 2010.
- [4] Martí-López L, Ocaña R, Piñeiro E, Asensio A, "Laser Peening Induced Shock Waves and Cavitation Bubbles in Water Studied by Optical Schlieren Visualization", 2011.
- [5] Alamán J, "Tecnología Láser Aplicada a Nuevos Materiales en Cocinas de Inducción", PFC, Universidad de Zaragoza, 2010.
- [6] Majumdar J, Manna I, "Laser Processing of Materials", Metallurgical and Materials Engineering Department, Indian Institute of Technology, Kharagpur, 2003.
- [7] Markolf H, "Laser-Tissue Interactions Fundamentals and Applications", 3<sup>rd</sup> edition, 2007.
- [8] Boulais E, Lachaine R, Meunier M, "Basic mechanisms of the femtosecond laser interaction with a plasmonic nanostructure in water", Montréal.
- [9] Zijie Y, Douglas B, "Pulsed laser ablation in liquid for micro-/nanostructure generation", Department of Materials Science and Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA, 2012.
- [10] Masayoshi T, Eiji I, Jiro E, Tomoyuki O, "Kinetic Characteristic of Bubble Nucleation in Superheated Water using Fluid Inclusions", 2002.
- [11] Vogel A, Noack J, Hüttman G, Paltauf G, "Mechanisms of femtosecond laser nanosurgery of cells and tissues", 2005.
- [12] Salmien T, "Production of Nanomaterials by Pulsed Laser Ablation", Tampere University of Technology, 2013.
- [13] Ogale S B, "Laser-induced synthesis, deposition and etching of materials", India, 1988.
- [14] Höland W, Beall G H, "Glass-Ceramic Technology", 2<sup>nd</sup> edition, 2012.

- [15] Sola D, Peña J I, "Study of the Wavelength Dependence in Laser Ablation of Advanced Ceramics and Glass-Ceramic Materials in the Nanosecond Range", Universidad de Zaragoza, 2013.

