

ANEXOS

Anexo A. Principios de la tecnología láser

A.1 Definición y origen

El Láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es un dispositivo que emite un haz de luz unidireccional, monocromático y coherente. Los orígenes del láser se encuentran en los postulados de Albert Einstein sobre la emisión espontánea de 1916. El primer láser fue construido en 1960, sin embargo, su creador Theodore Maiman no fue el primero en patentarlo sino que fueron Townes y Arthur Leonard Schawlow ese mismo año, por lo que todos ellos son considerados inventores del Láser. Hasta el día de hoy la investigación y el desarrollo del láser sigue en auge con nuevas aplicaciones y usos, sin duda es una tecnología que formará parte del futuro industrial y científico.

A.2 Principios fundamentales

El principio físico que rige un láser está basado en la interacción atómica. Un átomo es capaz de cambiar entre dos estados de energía (E_1 , estado base, y E_2 , estado excitado) gracias a la absorción o emisión de fotones. Este cambio en su estado energético puede ser producido por tres mecanismos de interacción:

- 1) **Absorción.** Consiste en la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado base. La energía proporcionada por el fotón es absorbida por el átomo, que pasa a un estado excitado.

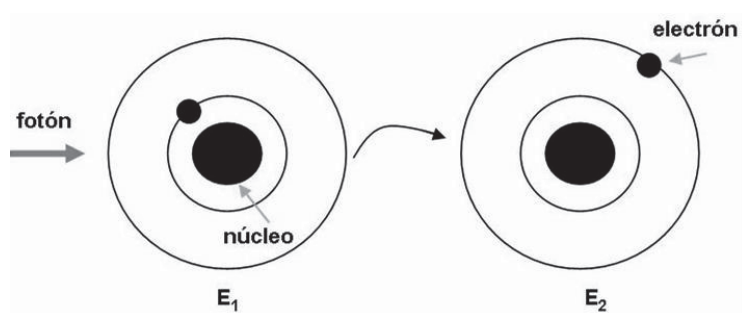


Figura A.1 Fenómeno de absorción

- 2) **Emisión espontánea.** Un átomo en su estado excitado emite espontáneamente un fotón, perdiendo energía. Esto provoca que el átomo vuelva a su estado base. Esta emisión es incoherente, es decir, el fotón emitido tiene unas características incontrolables, tanto su dirección como su fase.

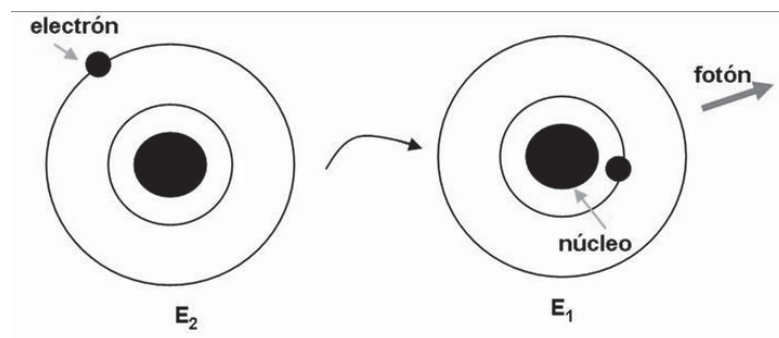


Figura A.2 Emisión espontánea

- 3) **Emisión estimulada.** Un átomo en su estado excitado es incidido por un fotón. Como resultado de la interacción entre ambos el átomo emite un segundo fotón con las mismas características (dirección, fase y estado de polarización) que el incidente y cambia a su estado base. Este proceso tiene las características de ser pues, amplificador, ya que de un fotón que incide, se emiten dos, y coherente, puesto que los fotones emitidos poseen las mismas características que el incidente.

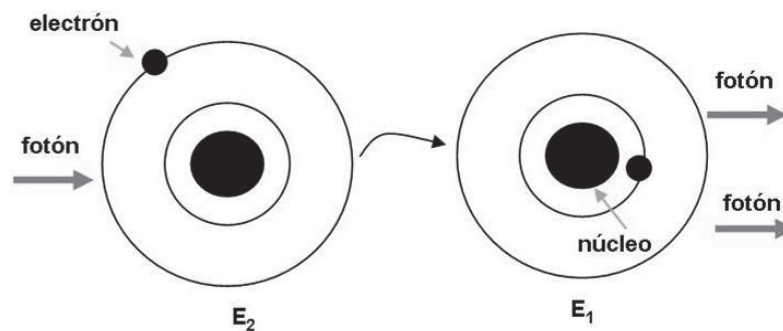


Figura A.3 Emisión estimulada

La tecnología láser se basa en el control de este último mecanismo, la emisión estimulada. Esto es debido a que, ya que es amplificador, puede generar grandes cantidades de energía y al ser coherente, esta energía puede ser controlada y focalizada en una dirección y con unas características, tanto energéticas como geométricas, concretas.

El hecho de que se dé un mecanismo u otro dependerá de los niveles de población (N) de cada uno de los niveles de energía, es decir la cantidad de electrones en cada uno de los niveles. Habitualmente, el número de población en el nivel inferior (N_1) es mayor que en el nivel energético superior (N_2), por lo tanto, se producirá un proceso de absorción cuando se hagan incidir fotones, con el fin de llegar a un estado de equilibrio.

Sin embargo, si el sistema se encuentra en un estado de inversión de población ($N_2 > N_1$), la señal con la que se incide se verá amplificada, proporcionalmente a la diferencia de población entre los niveles y a la densidad de fotones. Por ello interesa encontrarse en un estado de inversión de población para generar la onda de luz que definirá el haz láser.

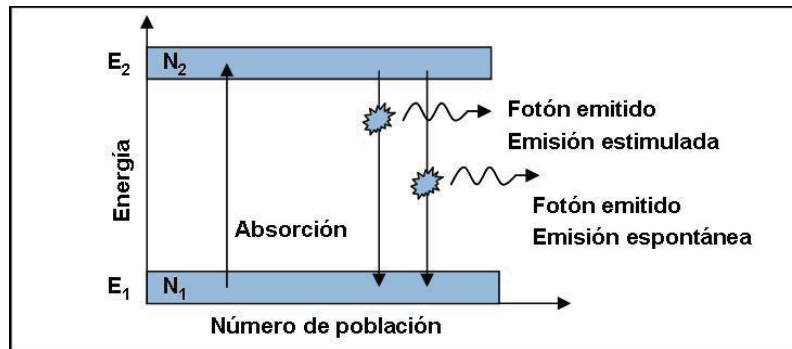


Figura A.4 Diagrama de niveles de energía en un sistema de dos niveles

Un átomo, por sí solo, excitado, producirá una emisión espontánea rápidamente. Es decir se debe mantener un átomo con inversión de población el tiempo suficiente como para que pueda interactuar con un fotón incidente.

Para ello, se han de cumplir una serie de condiciones. Los láseres pueden ser de 3 o 4 niveles de energía. Por ejemplo, en un sistema de tres niveles de energía como el de la Figura A.5, el proceso de emisión estimulada se produce entre los niveles 1 y 2. Si el sistema está caracterizado por unos tiempos de transición entre niveles τ_{32} , τ_{31} y τ_{21} respectivamente, ha de cumplirse que $\tau_{32} < \tau_{31} \ll \tau_{21}$ para que pueda existir una estabilidad en la inversión de población y conseguir posteriormente la emisión estimulada. Es decir, los electrones han mantenerse en los estados de máxima energía el tiempo suficiente para que lleguen fotones que provoquen la emisión estimulada antes de que caigan espontáneamente.

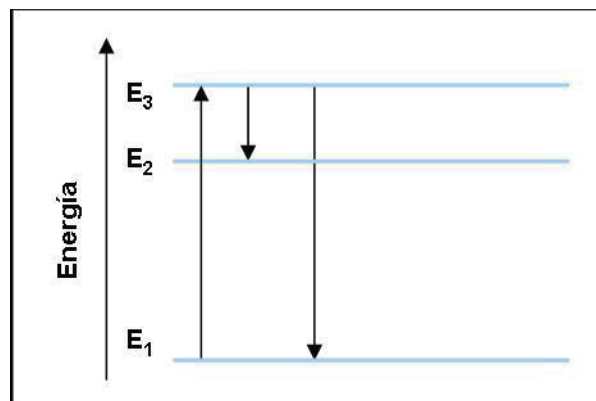


Figura A.5 Diagrama tres niveles de energía

A.3 Funcionamiento básico

Un láser básico consiste en dos espejos situados paralelamente uno enfrente del otro, formando una cámara en la que la luz oscilaría de forma permanente entre ellos. Entre los cristales aparece un medio activo, el cual, bombeado por un sistema de excitación, es capaz de amplificar estas oscilaciones [3]. A su vez, con el fin de permitir la salida de parte de la energía oscilante en forma de haz láser, uno de los espejos es parcialmente transparente.

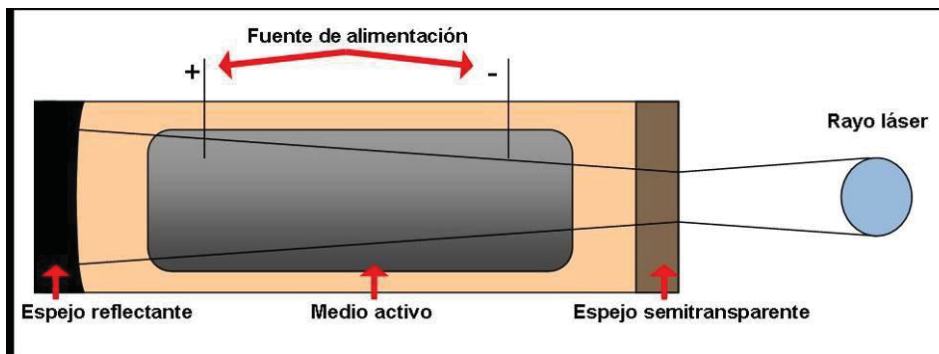


Figura A.6 Construcción básica de una cavidad láser

Por tanto, se pueden distinguir tres partes que definen un haz láser:

- 1) **Resonador:** Uno de los espejos, como se ha dicho, es semitransparente, el otro, para reducir las pérdidas por difracción de la energía oscilante, además de ser totalmente reflectante, es ligeramente curvado. En esta cavidad que forman los espejos se sitúa el medio activo y en ella es donde se producen los fenómenos para que se cree el haz láser.
- 2) **Medio activo:** Consiste en un grupo de átomos o moléculas, que son excitadas por una fuente de alimentación para alcanzar la deseada inversión de población en sus niveles energéticos. Este medio excitado genera la onda y hace a su vez de amplificador, ya que este haz de luz que forma, al oscilar entre los cristales, y pasar continuamente por él, amplifica su intensidad, gracias al fenómeno de emisión estimulada. Este medio es el principal factor usado para la clasificación de los distintos tipos de láser, ya que, además, es el que determina la longitud de onda que tendrá el láser, así pues, puede tener una naturaleza distinta dependiendo de las características buscadas en el láser, pudiendo ser tanto gases como sólidos, líquidos o plasma.
- 3) **Sistema de bombeo:** Puede tratarse, dependiendo del medio activo, de fuentes eléctricas o sistemas ópticos. Esta fuente de energía conduce a los átomos del medio activo desde estados de baja energía a estados excitados, haciendo que el número de población en el estado superior (N_2) sea superior al del estado inferior (N_1) y consiguiendo la inversión de población.

El proceso que se lleva a cabo para formar la onda del haz láser queda descrito esquemáticamente a continuación:

- 1) El sistema de bombeo excita el medio activo.
- 2) Se crea la inversión de población que permite la emisión estimulada y la creación de la onda.
- 3) La onda (coherente) formada oscila entre los espejos.
- 4) Durante esta oscilación, la onda atraviesa continuamente el medio activo, amplificándose.
- 5) Gracias a la semitransparencia del espejo, parte de esta onda sale al exterior en forma de haz láser.

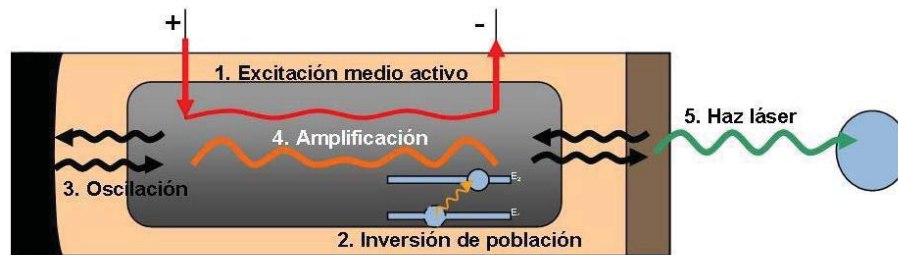


Figura A.7 Esquema formación haz láser

A.4 Caracterización del láser

A.4.1 Características haz láser

Un haz láser posee las siguientes características:

- 1) **Coherencia:** Tiene que ver, como se ha comentado anteriormente, con la interacción átomos – fotones, y consiste en la posibilidad de obtener una radiación controlada y no aleatoria, es decir existe coherencia temporal y espacial (λ).

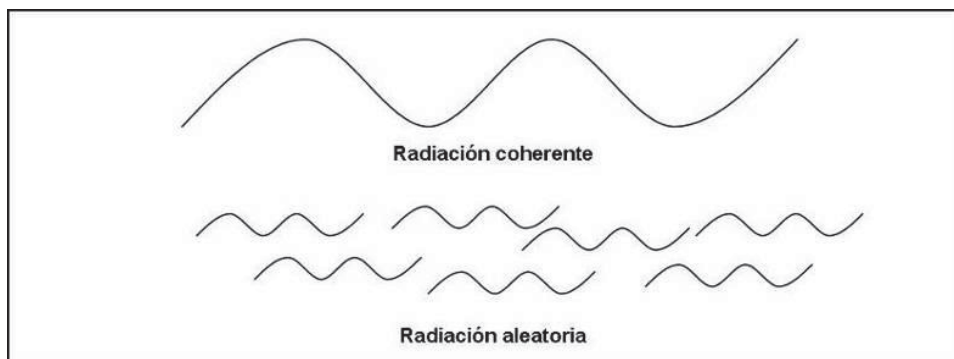


Figura A.8 Coherencia de las ondas de un haz láser

- 2) **Monocromaticidad:** al contrario que la luz natural, que es policromática, el haz láser es una luz monocromática, es decir, solo tiene una longitud de onda, y por lo tanto un solo color. Esta característica también es usada como criterio de clasificación, encontrándose láser ultravioleta, visible o infrarrojo. Esta propiedad también es gracias al fenómeno de emisión estimulada, ya que la onda que se forma no está desfasada y le permite tener una única longitud de onda constante.

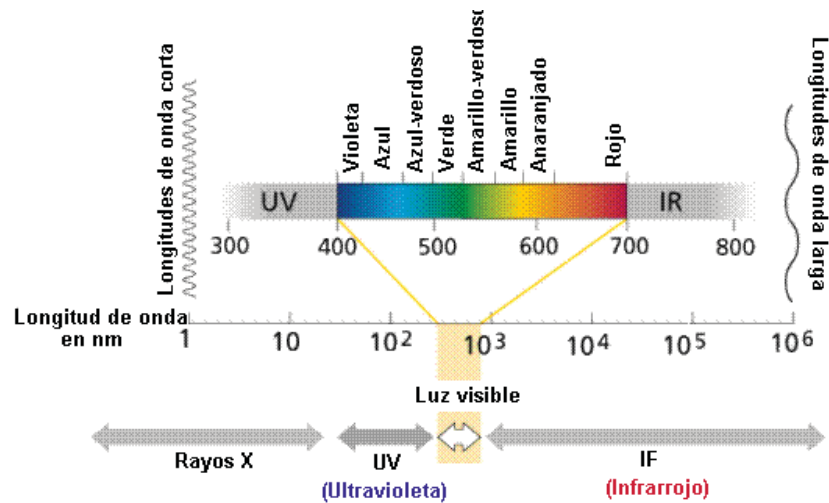


Figura A.9 Espectro de la radiación electromagnética

- 3) **Geometría y modos del haz:** La cámara láser, donde se forma el haz, es un oscilador óptico. En ella, existen un cierto número de ondas electromagnéticas longitudinales y estacionarias oscilando, diferenciadas unas de otras por pequeñas variaciones angulares. Éstas, a su vez, interfieren entre sí para formar otra onda estacionaria transversal que emerge desde la cavidad, dando forma al haz láser, definido por una serie de ecuaciones polinómicas y distribuciones Gaussianas. Esta geometría (modos) se clasifica según el patrón que sigue la onda transversal ($TEM_{p,l}$: transverse electromagnetic mode, siendo p y l son números enteros no negativos), y consecuentemente, la distribución de intensidad del haz láser, variará de un TEM a otro.

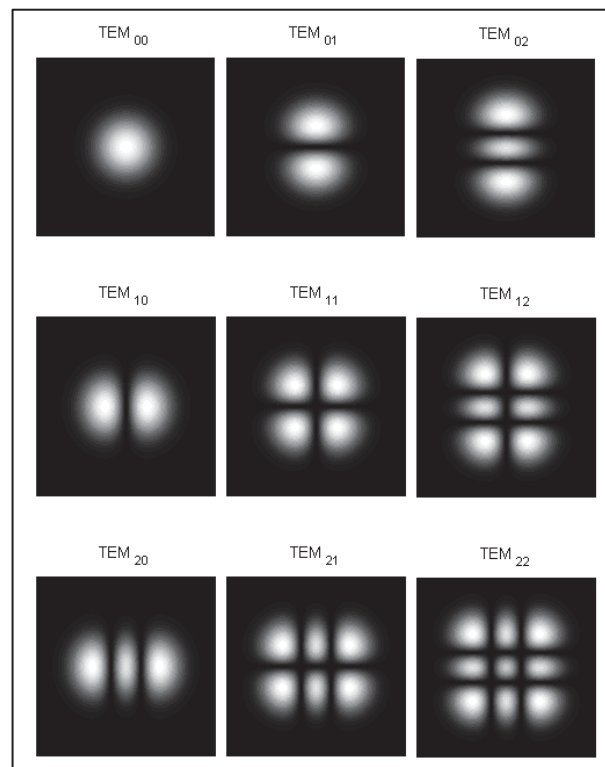


Figura A.10 Patrones geométricos provocados por los modos electromagnéticos transversales

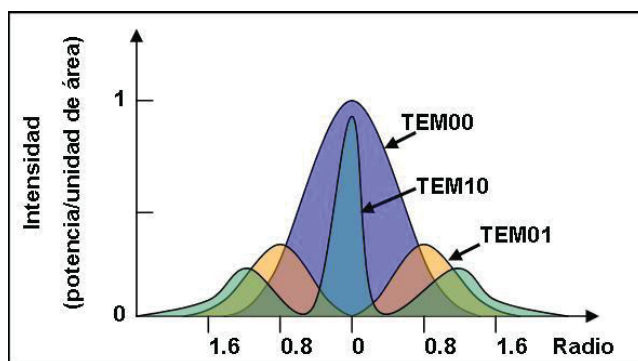


Figura A.11 Distribución de intensidad en función del TEM0

- 4) De entre todos estos modos, idóneamente, convendría tener el denominado TEM00. Como se puede ver en las gráficas anteriores, esto es debido a que en este modo el haz láser está concentrado en un solo punto de diámetro menor que el resto de modos, consiguiendo así una mayor densidad de energía. Además, éste es el modo en el que más intensidad de energía se concentra en el centro del spot, obteniendo una mayor energía por punto y homogeneidad en la distribución de la fuente de calor.

A.4.2 Características de la emisión de la onda

Según el modo de funcionamiento del láser, éste se puede clasificar en continuo o pulsado. El primero de ellos se caracteriza por proporcionar un nivel de potencia continuo en el tiempo. El pulsado, sin embargo, genera una potencia que varía en función del tiempo. Esto quiere decir que para conocer las características de la potencia del haz láser hay que conocer los parámetros que definen estos pulsos:

- 1) Energía por pulso: se define como potencia por unidad de tiempo

$$E_p = P_m / f = \Delta t_{1/2} * P_{max}.$$

- 2) Potencia (media y de pico): $P_m = P_{max}/2$.

- 3) Frecuencia: es lo mismo que decir “número de pulsos por segundo”, $f = 1/T$.

- 4) Duración de pulso ($\Delta t_{1/2}$): se considera como la anchura del pulso en el punto de potencia media.

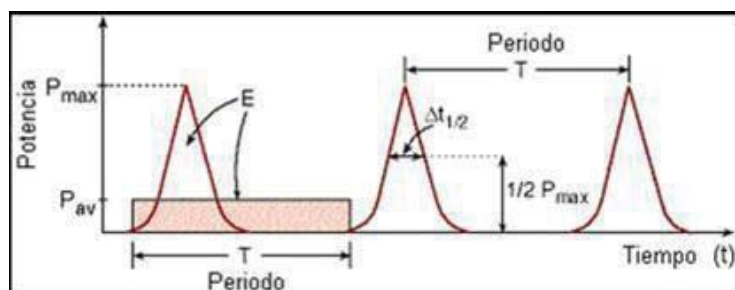


Figura A.12 Parámetros característicos de un pulso

Por lo tanto, cada uno de estos pulsos, genera una energía, que de manera controlada se hace incidir sobre el material sobre el que se dispone el haz láser. Esta energía es suficiente para llevar al

material hasta un punto de ablación, eliminando el material y generando un surco en la trayectoria que sigue el láser.

A.5 Tipos de láser industriales

La manera de clasificar los distintos tipos de tecnologías láser más comúnmente usadas, tal y como se va a exponer, es en función del medio activo que éste emplea, así como el modo de generar el haz.

- 1) **CO₂**: Están caracterizados por tener como medio activo una mezcla de gases (CO₂, N₂ y He). Este tipo de láser produce una elevada potencia de salida (hasta más de 10 KW) y un espectro que se sitúa en el infrarrojo, con un rendimiento por encima del 30%. Las transiciones energéticas en una molécula ocurren debido a los cambios que ésta realiza en la energía almacenada en forma vibracional o rotacional. En la Figura A.12 se pueden observar los distintos modos vibracionales de la molécula.

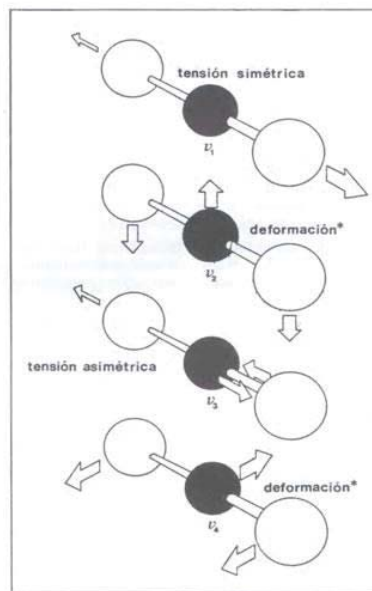


Figura A.13 Modos vibracionales láser CO₂

La energía de un oscilador existe solo en forma cuantificada y por tanto la energía de la molécula de CO₂ puede representarse por una tríada de números (i, j, k) en donde cada número representa la cantidad de energía asociada a cada modo. En el láser de CO₂, las moléculas son excitadas del estado base al estado de mayor energía (001). Con una excitación adecuada se puede producir la inversión de población entre el estado (001) y los estados (110) y (020).

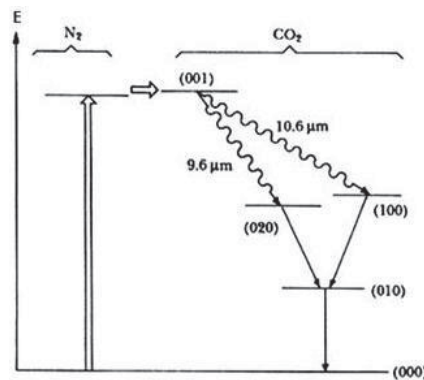


Figura A.14 Niveles energéticos de molécula CO_2 y N_2

- 2) **Nd-YAG:** El medio activo consta una matriz de cristal YAG dopada con iones de neodimio (Nd^{3+}), montadas en una cavidad elíptica, sobre la cual también se dispone una lámpara de criptón o diodos, cuya emisión se encarga de excitar a los iones Nd^{3+} . Alcanza una potencia de hasta 10-20 W. La matriz de YAG es especialmente adecuada para este tipo de láseres debido al gran número de huecos que tiene y que permiten alojar a los iones de neodimio y a su alta conductividad térmica en comparación con el vidrio, que lo hacen apropiado para láseres en los que es necesaria una alta velocidad de repetición de pulsos.

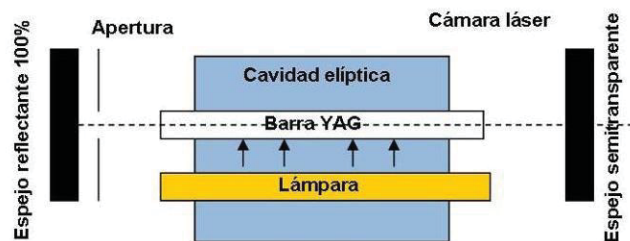


Figura A.15 Configuración básica de láser Nd: YAG

- 3) **Nd-YVO4:** Su mecanismo es fundamentalmente similar al que se encuentra en el láser Nd:YAG, excitando el medio activo, en este caso vanadato dopado con iones Nd^{3+} , mediante diodos. Éste, sin embargo, es más eficiente. En comparación con otros, tiene menos dependencia con la longitud de onda del bombeo y la temperatura que, por ejemplo, el láser de diodos. Estas ventajas lo hacen especialmente recomendado cuando es necesario un modo longitudinal individual (TEM00).
- 4) **Láser de diodos:** En este caso, el haz de luz se forma, no con gases, sino gracias a, principalmente, materiales semiconductores que se disponen en capas formando una estructura. Los materiales usados definen también la longitud de onda que tendrá el haz de luz, por ejemplo, usando GaAs y GaAlAs, se emite a una longitud de onda de 750 a 870 nm, y usando InGaAs, se emite a 900 – 1000 nm. El haz láser se consigue haciendo pasar corriente a través de la unión p – n del diodo, si ésta es suficientemente alta, se conseguirá romper el umbral y tendrá lugar la amplificación de la radiación, gracias al fenómeno de emisión estimulada, donde los fotones emitidos son controlados y se consigue un haz de luz coherente.

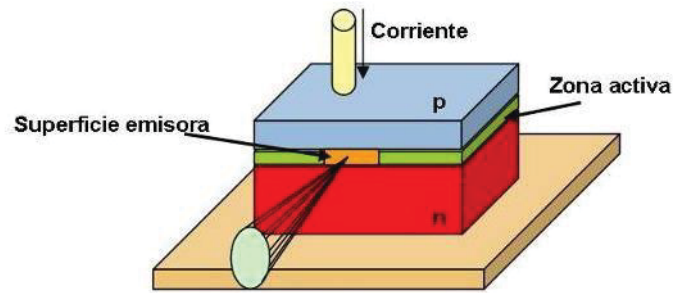


Figura A.16 Diodo láser

- 5) **Láser Excimer:** La excitación se produce debido a pulsos eléctricos a través de los electrodos dispuestos en una cámara de gas situada entre los espejos del resonador. La longitud de onda del haz láser puede cambiar en función de los gases que haya en el interior de la cámara. Esta mezcla de gases es típicamente una combinación de gases halógenos con Ar, Kr o Xe y He o Ne. En la Tabla A.1 se muestran las diferentes longitudes de onda que se pueden conseguir en función de distintas mezclas de gases.

Tabla A-1 Longitudes de onda en función de la mezcla de gases

| Mezcla de gas | Longitud de onda (nm) |
|---------------|-----------------------|
| KrF | 248 |
| ArF | 193 |
| XeF | 354 |
| KrCl | 222 |
| XeCl | 308 |

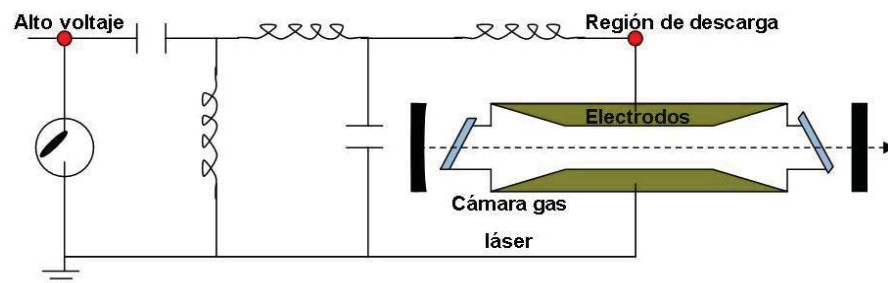


Figura A.17 Construcción básica de un láser Excimer

Además de los láseres analizados, existen otros tipos que merecen ser mencionados brevemente, y que pese a no estar tan industrializados o no ser tan útiles para las labores pertinentes está muy extendido su uso. Así pues, cabe destacar el láser de CO, láser de Rubí, láser de helio-neón y otras variaciones de los mencionados CO₂ y YAG.

Anexo B. Variables del marcaje láser

Acerca de la exploración del método de marcaje por concentración de radiación láser hay una serie de variables básicas, unas propias del equipo en cuestión, y otras de interfaz, que son las que maneja el usuario en los programas de marcaje, que dictaminan el resultado del marcaje en un material. Las primeras, las llamadas básicas, son las siguientes:

1. **Energía de impulso:** los láseres con los que se ha trabajado en este proyecto son de emisión pulsada, lo que significa que liberan radiación cada periodo (tiempo entre pulsos) y durante un breve instante de tiempo (tiempo de pulso). La afectación de un pulso sobre el material dependerá tanto de la energía total liberada como de cómo se libera en el espacio y en el tiempo (Ilustración 4.). Esta energía es intrínseca de cada láser y diferente para cada frecuencia utilizada.

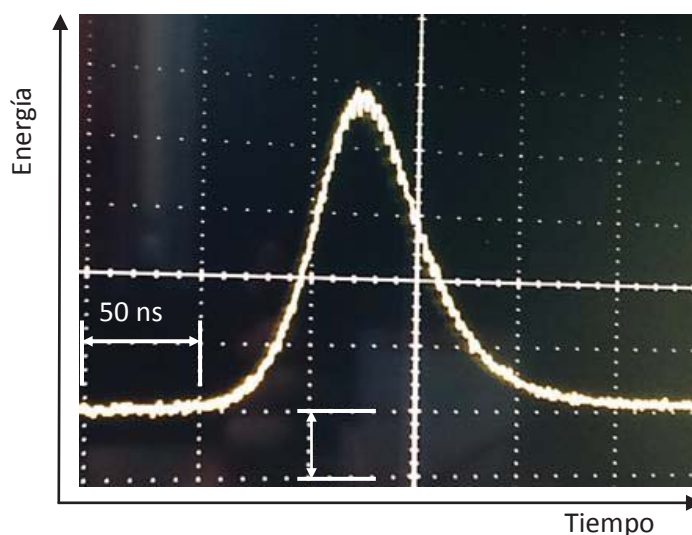


Figura B.1 Forma de la distribución de energía en el tiempo de un pulso del equipo láser Rofin E25.
Ancho del pulso: 60ns. Energía del pulso: 145 μ J

2. **Tamaño del spot:** al concentrarse la radiación láser en el campo de marcaje se obtiene la menor sección del haz, que llamamos spot. El spot es siempre circular en y dependiendo de su tamaño se concentra más o menos la energía que se deposita en el material.
3. **Densidad de impulsos en el espacio y en el tiempo:** agrupando impulsos en forma de líneas de puntos y agrupando líneas paralelamente se consigue depositar una energía en una superficie (Ilustración 5.) separando de una manera concreta los pulsos entre sí espacial y temporalmente.

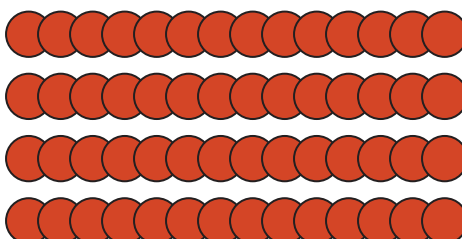


Figura B.2. Ejemplo de una posible manera de deposición de impulsos sobre un material

Ya que el usuario del equipo no tiene una manera directa de controlar estas variables básicas, se utilizan otras diferentes, y más sencillas de aplicar, que determinarán las variables básicas anteriormente citadas. Éstas son las variables de interfaz:

- I. **Frecuencia de deposición de impulsos:** el tiempo entre pulsos, t_{ep} , es por lo tanto inversamente proporcional a la frecuencia. La frecuencia de impulsos, junto con la potencia de bombeo del medio activo, determina también la energía de cada impulso, E_p .

$$t_{ep} = \frac{1}{F} \quad P_m = F \cdot E_p$$

- II. **Velocidad de escaneo:** los espejos que direccionan el haz hacia la posición requerida provocan que en el material el marcaje de cada línea se produzca a una velocidad determinada. La distancia entre impactos depositados en el eje de la velocidad, s_v , será por tanto proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la frecuencia:

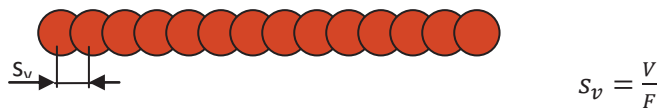


Figura B.3. Ejemplo de deposición de impulsos en una línea

- III. **Interlineado:** de los dos tipos de espaciado entre impulsos que depositamos en el material distinguimos dos ejes: el de la velocidad y el del interlineado. El espaciado en velocidad es s_v y el espaciado en interlineado lo llamamos s_H o "Hatch". Dicha palabra proviene del inglés, teniendo su significado aquí como "relleno" de manera que es agrupando líneas como rellenos las áreas que se marcan en el material:

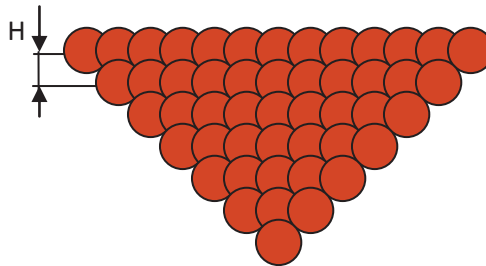


Figura B.4. Ejemplo del relleno a partir de líneas, de una punta de flecha

- IV. **Número de rellenos:** tras rellenar un área se puede repetir el proceso, cambiando la dirección de marcaje si se quiere. Al número de veces que se marca un área lo llamamos el número de rellenos (Ilustración 7.):

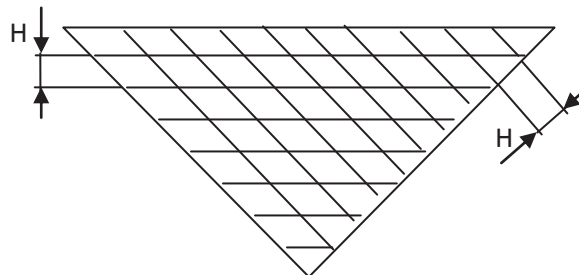


Figura B.5 Ejemplo de relleno de una punta de flecha, a partir de líneas, con dos rellenos y dos direcciones de relleno diferentes

- V. **Diámetro del spot láser:** el haz en su foco posee una geometría hiperbólica. Aplicando la fórmula de simulación hiperbólica de concentración del haz obtenemos el tamaño del spot fuera del foco.

$$w_z = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

Siendo w_0 el radio del spot en el foco, w_z , el radio del spot en un plano desenfocado y z_R el rango raileigh de un haz concentrado,

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$$

Obtenemos un cálculo realista del tamaño de nuestro spot si no trabajamos en el plano focal. Este aumento de área del spot en un plano desenfocado (Ilustración 8) conlleva una menor densidad de energía por unidad de superficie y acarrea, por tanto, un cambio drástico en la absorción de la energía por parte de la superficie del metal.

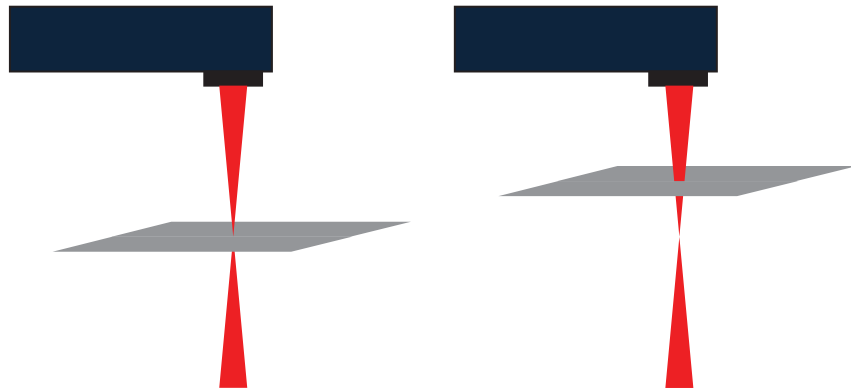


Figura B.6 Esquema del aumento de tamaño del spot en diferentes planos (enfoco y desenfocado)

Por considerar que la añadidura de esta variable a nuestro estudio tan solo entorpece la absorción del calor en la superficie y por tanto, no favorece los procesos de difusión que generan los compuestos que requerimos en la superficie, se eliminó la posibilidad de incluir la variable de desenfoco en nuestro estudio.

Cabe añadir sin embargo que cada equipo láser con cada configuración óptica produce spots de diferentes diámetros en sus respectivos focos, por lo que en este proyecto sea trabajado con diferentes tamaños de spot.

Anexo C. Acero inoxidable ferrítico 430

Se va a describir el acero inoxidable específico usado en la aplicación de marcaje de decoración por láser. Este acero en concreto es el utilizado para los frontales de lavavajillas de los modelos fabricados en la fábrica BSH Łódź, Polonia.

C.1 Descripción

Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos y contienen como aleante principal el cromo (ver Tabla C-1. Composición de los aceros inoxidables 430)[4]. El contenido de carbono es mucho menor que en los martensíticos, con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica. Debido a ello, estos aceros no responden a los tratamientos térmicos, aunque cuando se calientan a 1095°C crece el tamaño de grano y sólo puede regenerarse por trabajado en frío posterior.

Tabla C-1. Composición de los aceros inoxidables 430

| Grade | | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | Ni | N |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|----|------|---|
| 430 | min. | - | - | - | - | - | 16.0 | - | - | - |
| | max. | 0.12 | 1.00 | 1.00 | 0.040 | 0.030 | 18.0 | - | 0.75 | - |
| 430F | min. | - | - | - | - | 0.15 | 16.0 | - | - | - |
| | max. | 0.12 | 1.25 | 1.00 | 0.06 | - | 18.0 | - | - | - |

En relación a su comportamiento frente a la corrosión, ocupan un lugar intermedio entre los martensíticos y austeníticos. Una característica mecánica a destacar, común a los aceros ferríticos y martensíticos, es que al tener una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), poseen una temperatura de transición dúctil-frágil, por debajo de la cual la tenacidad se hace muy pequeña [5].

Tabla C-2. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables 430

| Grade | Tensile Strength (MPa) min | Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min | Elongation (% in 50mm) min | Hardness | |
|-------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| | | | | Rockwell B (HR B) max | Brinell (HB) max |
| 430 | 450 | 205 | 22 | 89 | 183 |
| 430F | 552 typical | 379 typical | 25 typical | - | 262 |

C.2 Problemas comunes del acero inoxidable 430

Los aceros inoxidables ferríticos presentan tres problemas que adquieren mayor importancia según sea la aplicación en la que se utilicen:

- 1) **Excesivo crecimiento de grano:** La falta de recrystalización del cambio alotrópico de ferrita a austenita de estos aceros hace que por encima de 950°C se intensifique el crecimiento de grano, dando lugar a un grano grueso con menor ductilidad y tenacidad que el grano fino. La única manera de afinar el tamaño de grano es con un tratamiento de recrystalización precedido de un proceso de deformación plástica. En el caso de las soldaduras este es un problema serio pues no puede realizarse este tratamiento.
- 2) **Sensibilización:** Los aceros inoxidables ferríticos pueden generar durante el calentamiento a más de 900°C algo de austenita en el borde de grano ferrítico, ya sea por segregación del cromo o por estar próximos al bucle gamma. Si esta transformación va seguida de un enfriamiento rápido, la austenita se transforma en martensita, disminuyendo la plasticidad y sobre todo la resistencia a la corrosión en el borde de grano. Por este motivo para estos aceros, debe tener lugar un enfriamiento lento a partir de 1000°C.
- 3) **Pérdida de ductilidad por presencia de fases:** A medida que aumenta la proporción de cromo de estos aceros, se acercan a la transformación de Fe- α ; a carburo σ . Esta fase es dura y frágil, y se forma durante el intervalo de enfriamiento de 870 a 530°C, lo cual fragiliza la estructura. Puede ser redisuelta con calentamientos del orden de 1100°C, o se puede evitar su formación con enfriamientos rápidos que retengan la fase α .

La segunda es muy interesante para nuestra aplicación en concreto, el marcaje láser. En las zonas cercanas al spot del haz láser las temperaturas que se alcanzan son superiores a 900°C. Se ha observado efectivamente que esto provoca la reducción de resistencia a la corrosión (figura C.4) y por tanto los problemas de oxidación que vemos en nuestras marcas sobre acero. Funcionalización de superficies metálicas mediante tecnología láser

Anexo D. Tecnologías de decoración tradicionales

Dado que la técnica láser de impresión digital se halla en la fase de desarrollo conviene analizar otras tecnologías de decoración que se utilicen o estén también en desarrollo actualmente para poder comparar unas tecnologías con otras.

D.1 Tampografía

La tampografía es, en la decoración, un proceso analógico de reproducción relativamente joven. Consiste en utilizar una placa metálica o plástica que presenta un huecograbado con la imagen deseada sobre el que se deposita la tinta que se transporta a continuación mediante una almohadilla de silicona al sustrato (Figura D.1). Actualmente este sistema se utiliza mucho en la decoración de piezas industriales y en la publicidad de material plástico.



Figura D.1 Máquina de tampografiado (izda.) y una almohadilla, elemento característico del proceso (dcha.)

Las propiedades únicas de la almohadilla de silicona hacen que se pueda recoger la imagen desde una superficie plana y transferirla a superficies con un gran número de geometrías diferentes.

D.1.1 Elementos del proceso

Los elementos que se pueden encontrar en un proceso de tampografiado tradicional son:

- 1) La almohadilla o tampón
- 2) Las placas de imagen
- 3) La tinta de impresión
- 4) El sustrato

La única parte con movimiento suele ser la almohadilla, ya que va a ser la encargada, mediante un brazo robótico, de transferir la tinta de las placas de imagen al sustrato.

Las almohadillas

Son objetos tridimensionales normalmente moldeados de caucho de silicona. Varían de forma y de dureza en función de la aplicación (Figura D.2).



Figura D.2 Distintos tipos de almohadillas para tampografiado

Presentan principalmente tres formas:

- **Almohadillas redondas:** Las más comúnmente usadas tienen una forma semiesférica. Se utilizan para todo tipo de impresiones siempre y cuando no presenten una elevada dificultad.
- **Almohadillas de bar:** Son estrechas y alargadas. Se utilizan para estampaciones alargadas o en sitios poco accesibles.
- **Almohadillas de pan:** Tienen formas muy variadas, cuadradas, rectangulares, etc. Se utilizan en geometrías muy complejas y se fabrican prácticamente a medida.

También es posible diseñar de forma personalizada las almohadillas para cumplir requisitos especiales.

Las placas de imagen

Sirven para utilizarse como soporte y presentan un huecograbado de la decoración deseada. Su función es mantener la tinta en esta cavidad grabada, lo que permite a la almohadilla recogerla y transferirla al sustrato (Figura D.3).



Figura D.3 Placas de imagen para tampografía

Hay dos tipos principales de materiales de plancha de impresión:

- **Fotopolímero:** Para pequeños lotes, ya que se desgasta con un número de usos relativamente bajo.

- **Acero:** Para grandes lotes, ya que la placa tiene que resistir un gran número de impresiones.

Las planchas de fotopolímeros son las más populares porque ofrecen una buena flexibilidad. Las planchas de acero son generalmente procesadas por el proveedor de planchas, ya que implica el uso de equipo especializado que sólo resulta rentable para grandes producciones.

La tinta

Se utiliza para decorar las piezas (Figura D.4). Las tintas se clasifican en diferentes familias químicas para que se haga coincidir el tipo de material a imprimir con la familia que tiene mayor afinidad.

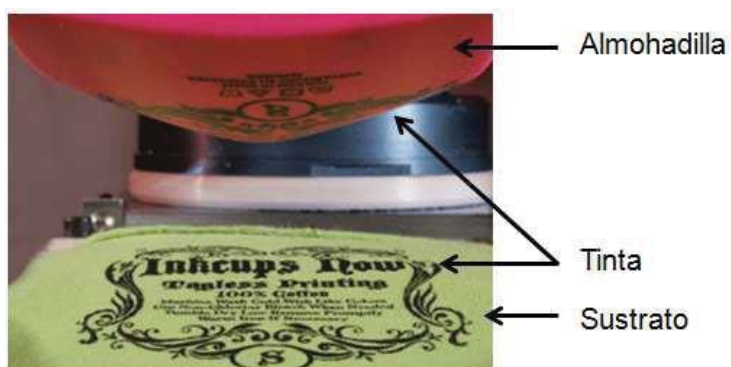


Figura D.4 Ejemplo de disposición de la tinta en el tampografiado

Las tintas empleadas principalmente son de base solvente y requieren mezclarse con aditivos antes de poder usarlas. Por lo general, en contacto con el aire se secan en segundos, aunque el secado completo (el curado) puede requerir mucho más tiempo.

Además existen las tintas de curado ultravioleta, que son convenientes para ciertas aplicaciones. Estas tintas no curan completamente hasta que la luz UV incide sobre ellas. De esta forma, por ejemplo, se puede borrar o retirar una tinta sobre una pieza cuando se comete un error y repetir el tampografiado. El curado puede durar tiempos inferiores a un segundo con estas tintas.

También hay tintas de curado térmico, que trabajan de forma muy parecida a las de curado ultravioleta salvo que el desencadenante del curado en este caso es una determinada temperatura. Una vez fabricadas estas tintas pueden tener vidas útiles de unas pocas horas, por eso deben ser utilizadas poco después de mezclar sus componentes básicos.

La elección de la tinta siempre se hace para conseguir aquella que se adhiera mejor a la superficie del sustrato. Hay que tener en cuenta que las condiciones climáticas afectan significativamente a la realización de cualquier proceso de tampografiado, especialmente a la tinta. Ambientes demasiado secos pueden conducir a la rápida evaporación de los solventes, que causan que la tinta se espese antes de tiempo, y una humedad excesiva puede llevar a problemas de mala adherencia y defectos como la aparición de burbujas o la falta de homogeneidad en la impresión.

D.1.2 Proceso de tampografiado

Básicamente el proceso de decoración mediante tampografiado consiste en la aplicación de tinta sobre el sustrato usando una almohadilla o tampón. La tinta adherida a la almohadilla está distribuida gracias a una placa de imagen, o patrón, con la forma que se desea tampografiar. El proceso consta de los pasos indicados en la Figura D.5:

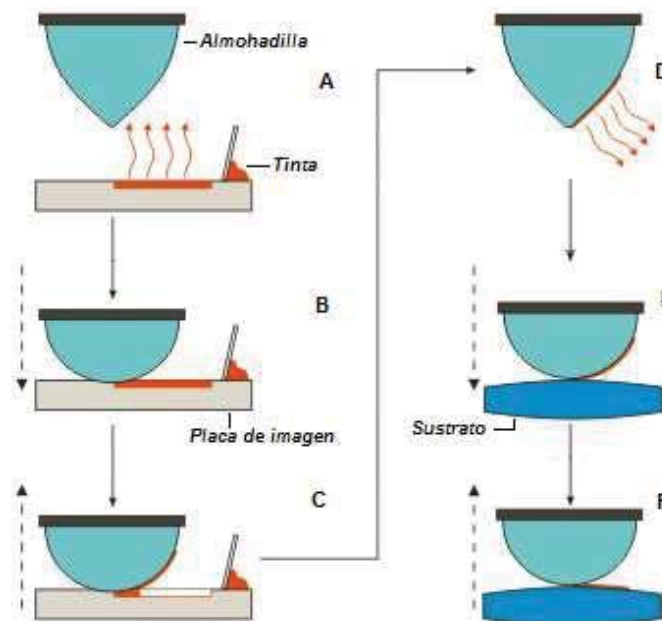


Figura D.5 Proceso de impresión por tampografía

- 1) Un aplicador coloca tinta en el grabado de la placa de imagen y el solvente comienza a evaporarse (A).
- 2) La almohadilla baja hasta la placa de la imagen (B).
- 3) La tinta se adhiere a la almohadilla (C).
- 4) Se sigue evaporando el solvente mientras la almohadilla se mueve hacia su posición (D).
- 5) La almohadilla se presiona sobre el sustrato. En este punto todo el solvente ha sido evaporado y la tinta presenta su mayor adherencia (E).
- 6) La tinta se adhiere al sustrato, la almohadilla se retira y se repite el proceso desde el principio (F).

D.2 Serigrafía

La serigrafía es uno de los procesos analógicos de decoración más versátiles. Consiste en imprimir aplicando una ligera presión sobre una malla tensada en un marco a la que se denomina pantalla serigráfica.

La malla es plana y permeable. Se trata de un tamiz tensado a través del cual pasa la tinta. El paso de la tinta se bloquea con una emulsión o barniz en las áreas donde no habrá imagen, dejando libre la zona por donde sí debe pasar para crear la imagen en el sustrato.

Este sistema, con el cuidado de no aplicar una sobrepresión, permite la transferencia de tinta o de cualquier recubrimiento técnico que se desee sobre una superficie sin lesionarla. Hoy en día se emplea mucho en artes gráficas y en la industria de estampación en general.

D.2.1 Elementos del proceso

Dentro del proceso de impresión de serigrafía, cabe mencionar como sus principales componentes:

- 1) El marco
- 2) La malla o tela
- 3) La plantilla
- 4) La rasqueta

El marco

Es el dispositivo que mantiene tensa y sujeta la tela. Se fabrican de distintos materiales, aunque la madera y el aluminio son los más comunes. Este marco va encajado en unos bastidores a ambos lados para garantizar una sujeción total de la pantalla (Figura D.6). La estabilidad de este bastidor resulta vital para la calidad de la impresión.



Figura D.6 Marco de serigrafía ensamblado al bastidor de la máquina

La malla

El tipo de tejido empleado sólo depende de los requisitos derivados del proceso. El material de la tela empleada debe ser lo suficientemente flexible para permitir un buen contacto entre la plantilla y el sustrato. Asimismo, no debe verse afectado por la tinta ni el disolvente o agente de limpieza que se emplee. Además debe ser suficientemente resistente a la abrasión para soportar las pasadas de la rasqueta.

Otro factor a tener en cuenta es el espesor de la malla. Este debe ser suficientemente grueso para garantizar un buen recubrimiento en el caso de tintas pigmentadas, que tienen una alta

viscosidad, o suficientemente delgado en el caso de que sean precisos pequeños detalles para la obtención de una imagen de calidad

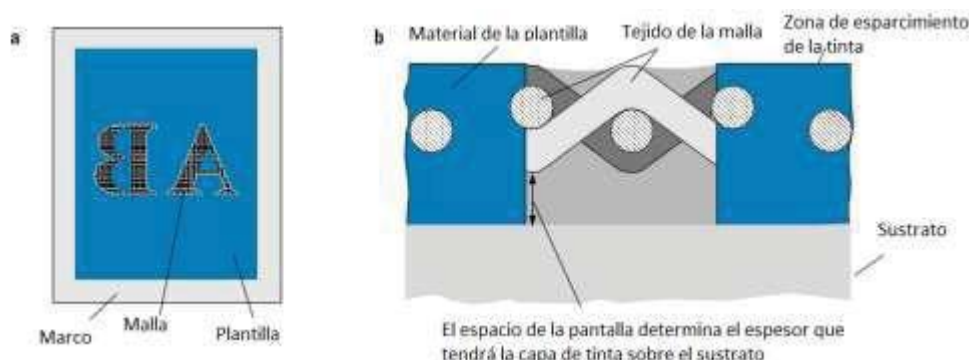


Figura D.7 Pantalla de impresión (a) y sección transversal de la pantalla (b)

Algunos de los parámetros fundamentales de una malla son el número de hilos por centímetro que forman el tejido, desde 10 hasta 200 en el mercado, y el espesor del hilo, que marca la calidad de la tela. Como se puede ver en la Figura D.8, el ancho de la malla (w) y, en consecuencia, el porcentaje de la zona abierta que presenta ésta respecto a su superficie total, depende del número de hilos/cm del tejido y el grosor de hilo (d). El ancho de la malla y el espesor marcado por la plantilla determinan la capa de tinta depositada.

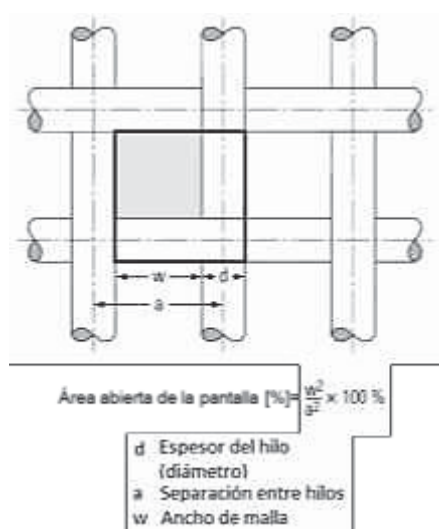


Figura D.8 Geometría de la malla

Plantilla

Es la portadora de la información impresa. Se crea un negativo con la imagen que se va a querer plasmar sobre el sustrato y se deposita una emulsión que sellará los espacios entre la malla que la tinta no debe pasar para crear dicha imagen (ver Figura D.7, (a)).

Existen distintos métodos de fabricación, pero la producción fotomecánica es la más común. En este caso, el material emulsionante es un barniz de curado UV. Este tipo de emulsionantes, una vez depositados, son sometidos a la irradiación de luz UV y quedan fijados a la malla como muestra la Figura D.9.

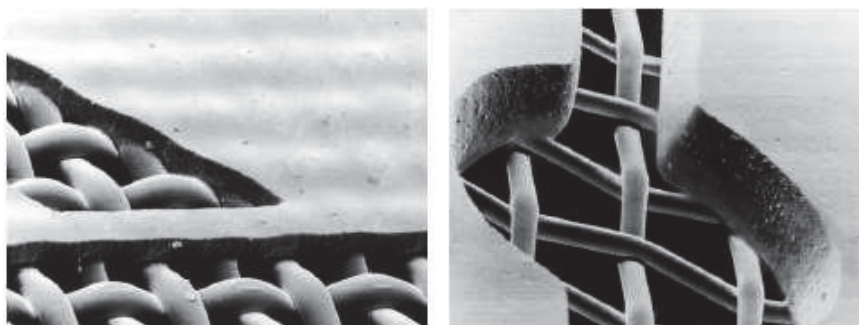


Figura D.9 Imagen de microscopía SEM de una pantalla producida mediante técnica fotomecánica

Rasqueta

Consiste en una lámina de caucho, neopreno, uretano o poliuretano sujeta a un mango o encabador de madera o aluminio (Figura D.10). Podemos escoger el tamaño adecuado según el diseño. La rasqueta debe cubrir completamente el diseño que se estampa.



Figura D.10 Rasqueta empleada en serigrafía

Su función es arrastrar la tinta por toda la malla, como se muestra en la Figura D.11, consiguiéndose así que la tinta pase a través del tejido y quede impresa sobre el material formando la imagen deseada.



Figura D.11 Aplicación de la rasqueta en la impresión por tampografía

Un buen estampado depende también del manejo correcto de la rasqueta. Después de arrastrar la tinta resulta fundamental que la malla quede limpia, opaca y sin gotas de tinta por la zona del estampado. Se debe ejercer por lo tanto una presión moderada sobre la rasqueta e aplicar esta última con una inclinación de unos 50° aproximadamente de tal forma que barra bien la tinta. Una inclinación excesiva de la rasqueta o una presión muy fuerte hacen que pase más tinta por la malla, quedando defectuoso el estampado y pudiendo incluso llegar a romper la malla.

D.2.2 Proceso de serigrafiado

Como muestra la Figura D.12, el proceso de serigrafiado consiste en extender uniformemente y mediante la aplicación de una ligera presión la tinta depositada sobre la pantalla con la ayuda de una rasqueta de goma. De esa manera se obliga a la tinta a fluir a través de los huecos entre los hilos de la malla con ayuda de la rasqueta, creando la imagen sobre el sustrato. Una vez la tinta esta homogéneamente repartida se puede retirar la pantalla del sustrato.

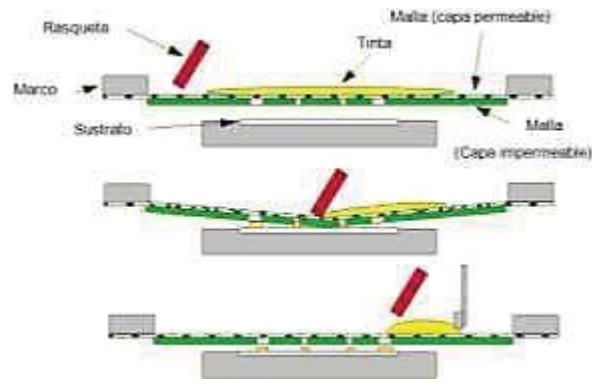


Figura D.12 Esquema del proceso de serigrafiado

Anexo E. Resultados de la experimentación con el equipo TruMark 5020

A fin de resumir los resultados de los ensayos de calidad de la TCD para el frontal de lavavajillas se ha realizado este anexo con imágenes de los resultados para su mejor entendimiento.

Tabla E-1. Tabla de resultados de las pruebas de la TCD para la experimentación con el equipo TruMark

| Tipo de ensayo | Ensayo | 250.700.60.2 | | 225.600.60.2 | | Observaciones |
|----------------------------|--|---|------------|--|------------|--|
| | | Imagen | Evaluación | Imagen | Evaluación | |
| Color | Coordenada L |  | 22,7 |  | 16,4 | |
| | Homogeneidad de color |  | 2 |  | 2 | |
| | Reflejos |  | 1 |  | 1 | |
| Resistencia a la corrosión | - Generales - | | | | | |
| | Disolvente |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Test de Vapor |  | OK |  | OK | Corrosión leve en el parámetro 225.600.60.2 |
| | - Productos de limpieza - | | | | | |
| | Don Limpio brisa marina |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Sidolin sin rayas al limón, marca Henkel |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Sidol, marca Henkel |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Limpiador de suelos, marca General |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Detergente para lavavajillas, marca Henkel |  | OK |  | OK | Ligera decoloración de la marca |
| | Abrillantador, marca Calgonit |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Abrillantador, marca Somat |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Agente de limpieza basado en vinagre, marca Frosch |  | OK |  | OK | Ligera decoloración de las marcas |
| | Agente de limpieza basado en limón, marca Frosch |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Solución buffer |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | - Manchas de comida y bebida - | | | | | |
| | Vino tinto |  | OK |  | OK | Ligera decoloración en el parámetro 250.700.60.2 |
| | Zumo de grosella |  | OK |  | OK | Ligera decoloración en el parámetro 250.700.60.2 |

| Tipo de ensayo | Ensayo | 250.700.60.2 | | 225.600.60.2 | | Observaciones |
|----------------|-----------------------------|---|------------|--|------------|--|
| | | Imagen | Evaluación | Imagen | Evaluación | |
| | Zumo de remolacha |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Papilla de patata |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Mantequilla |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Brandy |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Ácido cítrico al 10% |  | OK |  | OK | Ligera decoloración de las marcas debido al ataque del ácido |
| | Pulpa de cebolla |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Agua saturada de sal |  | OK |  | OK | Picaduras despreciables en partes del símbolo |
| | Aceite de cocina |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Grasa de cerdo |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Mostaza |  | OK |  | OK | Defectos puntuales similares a picaduras |
| | Cocacola |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Cerveza |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| | Agua |  | OK |  | OK | Marcas inalteradas |
| R. Mecánica | Test de arañazos y adhesión |  | OK |  | OK | No se observan cambios |

Anexo F. Tablas de estudios de correlación

En el presente Anexo se muestran las tablas de resultados y variables de marcaje con las que se ha realizado el estudio de correlación del Capítulo 5. Conclusiones:

Tabla F-1 Tabla de variables de marcaje para los resultados inicialmente escogidos – TruMark 5020

| Parametros | Coordenada L | Frecuencia (kHz) | Velocidad (mm/s) | Interlineado (um) | Repeticiones | Densidad Spots /cm2 | Energía pulso (J) | Dens Energía (J/cm2) | Tiempo de pulso (s) | Dens Potencia (W/cm2) | Potencia pulso (W) | Densidad de irradiancia (W/cm^4) |
|---------------|--------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------------|
| 250.800.60.2 | 28,2 | 250 | 800 | 60 | 2 | 1,04E+06 | 8,00E-05 | 8,33E+01 | 2,30E-08 | 3,62E+09 | 3,48E+03 | 4,18E+13 |
| 250.700.60.2 | 22,7 | 250 | 700 | 60 | 2 | 1,19E+06 | 8,00E-05 | 9,52E+01 | 2,30E-08 | 4,14E+09 | 3,48E+03 | 4,78E+13 |
| 250.800.50.2 | 23,6 | 250 | 800 | 50 | 2 | 1,25E+06 | 8,00E-05 | 1,00E+02 | 2,30E-08 | 4,35E+09 | 3,48E+03 | 5,02E+13 |
| 250.1000.40.2 | 28 | 250 | 1000 | 40 | 2 | 1,25E+06 | 8,00E-05 | 1,00E+02 | 2,30E-08 | 4,35E+09 | 3,48E+03 | 5,02E+13 |
| 250.600.60.2 | 18,6 | 250 | 600 | 60 | 2 | 1,39E+06 | 8,00E-05 | 1,11E+02 | 2,30E-08 | 4,83E+09 | 3,48E+03 | 5,58E+13 |
| 250.900.40.2 | 21,9 | 250 | 900 | 40 | 2 | 1,39E+06 | 8,00E-05 | 1,11E+02 | 2,30E-08 | 4,83E+09 | 3,48E+03 | 5,58E+13 |
| 250.700.50.2 | 17,1 | 250 | 700 | 50 | 2 | 1,43E+06 | 8,00E-05 | 1,14E+02 | 2,30E-08 | 4,97E+09 | 3,48E+03 | 5,74E+13 |
| 250.600.50.2 | 16,6 | 250 | 600 | 50 | 2 | 1,67E+06 | 8,00E-05 | 1,33E+02 | 2,30E-08 | 5,80E+09 | 3,48E+03 | 6,69E+13 |
| 225.700.70.2 | 27,5 | 225 | 700 | 70 | 2 | 9,18E+05 | 8,90E-05 | 8,17E+01 | 2,60E-08 | 3,14E+09 | 3,42E+03 | 3,63E+13 |
| 225.700.60.2 | 18,6 | 225 | 700 | 60 | 2 | 1,07E+06 | 8,90E-05 | 9,54E+01 | 2,60E-08 | 3,67E+09 | 3,42E+03 | 4,24E+13 |
| 225.600.70.2 | 20,8 | 225 | 600 | 70 | 2 | 1,07E+06 | 8,90E-05 | 9,54E+01 | 2,60E-08 | 3,67E+09 | 3,42E+03 | 4,24E+13 |
| 225.800.50.2 | 17,3 | 225 | 800 | 50 | 2 | 1,13E+06 | 8,90E-05 | 1,00E+02 | 2,60E-08 | 3,85E+09 | 3,42E+03 | 4,45E+13 |
| 225.1000.40.2 | 23,6 | 225 | 1000 | 40 | 2 | 1,13E+06 | 8,90E-05 | 1,00E+02 | 2,60E-08 | 3,85E+09 | 3,42E+03 | 4,45E+13 |
| 225.600.60.2 | 16,4 | 225 | 600 | 60 | 2 | 1,25E+06 | 8,90E-05 | 1,11E+02 | 2,60E-08 | 4,28E+09 | 3,42E+03 | 4,94E+13 |
| 225.900.40.2 | 16,7 | 225 | 900 | 40 | 2 | 1,25E+06 | 8,90E-05 | 1,11E+02 | 2,60E-08 | 4,28E+09 | 3,42E+03 | 4,94E+13 |
| 225.700.50.2 | 12,6 | 225 | 700 | 50 | 2 | 1,29E+06 | 8,90E-05 | 1,14E+02 | 2,60E-08 | 4,40E+09 | 3,42E+03 | 5,08E+13 |
| 225.800.40.2 | 11,7 | 225 | 800 | 40 | 2 | 1,41E+06 | 8,90E-05 | 1,25E+02 | 2,60E-08 | 4,81E+09 | 3,42E+03 | 5,56E+13 |
| 225.600.50.2 | 15,7 | 225 | 600 | 50 | 2 | 1,50E+06 | 8,90E-05 | 1,34E+02 | 2,60E-08 | 5,13E+09 | 3,42E+03 | 5,93E+13 |
| 200.800.50.2 | 20,7 | 200 | 800 | 50 | 2 | 1,00E+06 | 1,00E-04 | 1,00E+02 | 3,00E-08 | 3,33E+09 | 3,33E+03 | 3,85E+13 |
| 200.1000.40.2 | 22,7 | 200 | 1000 | 40 | 2 | 1,00E+06 | 1,00E-04 | 1,00E+02 | 3,00E-08 | 3,33E+09 | 3,33E+03 | 3,85E+13 |
| 200.500.60.2 | 13,1 | 200 | 500 | 60 | 2 | 1,33E+06 | 1,00E-04 | 1,33E+02 | 3,00E-08 | 4,44E+09 | 3,33E+03 | 5,13E+13 |
| 200.500.30.1 | 17,5 | 200 | 500 | 30 | 1 | 1,33E+06 | 1,00E-04 | 1,33E+02 | 3,00E-08 | 4,44E+09 | 3,33E+03 | 5,13E+13 |
| 175.700.60.2 | 19,1 | 175 | 700 | 60 | 2 | 8,33E+05 | 1,14E-04 | 9,50E+01 | 3,50E-08 | 2,71E+09 | 3,26E+03 | 3,13E+13 |
| 175.800.50.2 | 21,9 | 175 | 800 | 50 | 2 | 8,75E+05 | 1,14E-04 | 9,98E+01 | 3,50E-08 | 2,85E+09 | 3,26E+03 | 3,29E+13 |
| 175.500.70.2 | 14,25 | 175 | 500 | 70 | 2 | 1,00E+06 | 1,14E-04 | 1,14E+02 | 3,50E-08 | 3,26E+09 | 3,26E+03 | 3,76E+13 |
| 175.700.40.2 | 10,8 | 175 | 700 | 40 | 2 | 1,25E+06 | 1,14E-04 | 1,43E+02 | 3,50E-08 | 4,07E+09 | 3,26E+03 | 4,70E+13 |
| 175.600.40.2 | 7,5 | 175 | 600 | 40 | 2 | 1,46E+06 | 1,14E-04 | 1,66E+02 | 3,50E-08 | 4,75E+09 | 3,26E+03 | 5,49E+13 |
| 175.500.40.2 | 8 | 175 | 500 | 40 | 2 | 1,75E+06 | 1,14E-04 | 2,00E+02 | 3,50E-08 | 5,70E+09 | 3,26E+03 | 6,58E+13 |

Tabla F-2 Tabla de variables de marcaje para los resultados inicialmente escogidos – Rofin PowerLine E25

| Parametros | Coordenada L | Frecuencia (kHz) | Velocidad (mm/s) | Interlineado (um) | Repeticiones | Densidad Spots /cm2 | Energía de pulso (J) | Densidad de Energía (J/cm2) | Tiempo de pulso (ns) | Densidad de Potencia (W/cm2) | Potencia de pulso (W) | Densidad de irradiancia (W/cm²4) |
|---------------|--------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 75.500.72.2 | 16,1 | 75 | 500 | 72 | 2 | 4,17E+05 | 3,33E-04 | 1,39E+02 | 3,10E+01 | 4,48E+09 | 1,08E+04 | 4,31E+13 |
| 65.600.60.2 | 16,6 | 95 | 550 | 42 | 2 | 8,23E+05 | 2,63E-04 | 2,16E+02 | 3,70E+01 | 5,85E+09 | 7,11E+03 | 5,63E+13 |
| 60.650.42.2 | 18,2 | 65 | 600 | 60 | 2 | 3,61E+05 | 3,85E-04 | 1,39E+02 | 3,05E+01 | 4,55E+09 | 1,26E+04 | 4,38E+13 |
| 65.650.50.2 | 18,9 | 66 | 380 | 86 | 2 | 4,04E+05 | 3,79E-04 | 1,53E+02 | 3,05E+01 | 5,02E+09 | 1,24E+04 | 4,83E+13 |
| 66.380.120.3 | 19 | 60 | 650 | 42 | 2 | 4,40E+05 | 4,17E-04 | 1,83E+02 | 3,05E+01 | 6,00E+09 | 1,37E+04 | 5,78E+13 |
| 66.650.60.3 | 19 | 65 | 650 | 50 | 2 | 4,00E+05 | 3,85E-04 | 1,54E+02 | 3,05E+01 | 5,04E+09 | 1,26E+04 | 4,86E+13 |
| 77.350.100.2 | 19,1 | 66 | 380 | 120 | 3 | 4,34E+05 | 3,79E-04 | 1,64E+02 | 3,05E+01 | 5,39E+09 | 1,24E+04 | 5,19E+13 |
| 65.380.50.1 | 19,5 | 79 | 650 | 72 | 3 | 5,06E+05 | 3,16E-04 | 1,60E+02 | 3,10E+01 | 5,17E+09 | 1,02E+04 | 4,98E+13 |
| 66.420.120.3 | 19,7 | 66 | 650 | 60 | 3 | 5,08E+05 | 3,79E-04 | 1,92E+02 | 3,05E+01 | 6,31E+09 | 1,24E+04 | 6,07E+13 |
| 75.450.50.1 | 19,7 | 77 | 350 | 100 | 2 | 4,40E+05 | 3,25E-04 | 1,43E+02 | 3,10E+01 | 4,61E+09 | 1,05E+04 | 4,44E+13 |
| 86.790.50.3 | 20,4 | 65 | 380 | 50 | 1 | 3,42E+05 | 3,85E-04 | 1,32E+02 | 3,05E+01 | 4,31E+09 | 1,26E+04 | 4,15E+13 |
| 85.460.42.1 | 21,6 | 66 | 420 | 120 | 3 | 3,93E+05 | 3,79E-04 | 1,49E+02 | 3,05E+01 | 4,88E+09 | 1,24E+04 | 4,70E+13 |
| 70.850.42.2 | 22,3 | 90 | 540 | 86 | 3 | 5,81E+05 | 2,78E-04 | 1,61E+02 | 3,70E+01 | 4,36E+09 | 7,51E+03 | 4,20E+13 |
| 65.420.86.2 | 22,3 | 66 | 380 | 100 | 2 | 3,47E+05 | 3,79E-04 | 1,32E+02 | 3,05E+01 | 4,31E+09 | 1,24E+04 | 4,15E+13 |
| 60.260.86.1 | 22,6 | 75 | 450 | 50 | 1 | 3,33E+05 | 3,33E-04 | 1,11E+02 | 3,10E+01 | 3,58E+09 | 1,08E+04 | 3,45E+13 |
| 66.320.120.2 | 22,8 | 86 | 790 | 50 | 3 | 6,53E+05 | 2,91E-04 | 1,90E+02 | 3,10E+01 | 6,12E+09 | 9,38E+03 | 5,90E+13 |
| 65.350.60.1 | 22,8 | 77 | 450 | 86 | 3 | 5,97E+05 | 3,25E-04 | 1,94E+02 | 3,10E+01 | 6,25E+09 | 1,05E+04 | 6,02E+13 |
| 72.220.86.1 | 23,55 | 85 | 460 | 42 | 1 | 4,40E+05 | 2,94E-04 | 1,29E+02 | 3,10E+01 | 4,17E+09 | 9,49E+03 | 4,02E+13 |
| 65.420.86.2 | 23,8 | 65 | 420 | 86 | 2 | 3,60E+05 | 3,85E-04 | 1,38E+02 | 3,05E+01 | 4,54E+09 | 1,26E+04 | 4,37E+13 |
| 60.260.86.1 | 23,9 | 60 | 260 | 86 | 1 | 2,68E+05 | 4,17E-04 | 1,12E+02 | 3,05E+01 | 3,67E+09 | 1,37E+04 | 3,53E+13 |
| 66.320.120.2 | 23,9 | 66 | 320 | 120 | 2 | 3,44E+05 | 3,79E-04 | 1,30E+02 | 3,05E+01 | 4,27E+09 | 1,24E+04 | 4,11E+13 |
| 35.1250.35.2 | 24,28 | 35 | 1250 | 35 | 2 | 1,60E+05 | 7,14E-04 | 1,14E+02 | 1,85E+01 | 6,18E+09 | 3,86E+04 | 5,95E+13 |
| 65.350.60.1 | 24,5 | 65 | 350 | 60 | 1 | 3,10E+05 | 3,85E-04 | 1,19E+02 | 3,05E+01 | 3,90E+09 | 1,26E+04 | 3,76E+13 |
| 72.220.86.1 | 24,6 | 72 | 220 | 86 | 1 | 3,81E+05 | 3,47E-04 | 1,32E+02 | 3,10E+01 | 4,26E+09 | 1,12E+04 | 4,10E+13 |
| 90.650.60.2 | 24,96 | 90 | 650 | 60 | 2 | 4,62E+05 | 2,78E-04 | 1,28E+02 | 3,70E+01 | 3,47E+09 | 7,51E+03 | 3,34E+13 |
| 75.350.72.1 | 25,03 | 75 | 350 | 72 | 1 | 2,98E+05 | 3,33E-04 | 9,92E+01 | 3,10E+01 | 3,20E+09 | 1,08E+04 | 3,08E+13 |
| 65.300.72.1 | 25,42 | 65 | 300 | 72 | 1 | 3,01E+05 | 3,85E-04 | 1,16E+02 | 3,05E+01 | 3,79E+09 | 1,26E+04 | 3,65E+13 |
| 65.260.86.1 | 25,8 | 65 | 260 | 86 | 1 | 2,91E+05 | 3,85E-04 | 1,12E+02 | 3,05E+01 | 3,67E+09 | 1,26E+04 | 3,53E+13 |
| 90.380.86.2 | 25,9 | 90 | 380 | 86 | 2 | 5,51E+05 | 2,78E-04 | 1,53E+02 | 3,70E+01 | 4,14E+09 | 7,51E+03 | 3,98E+13 |
| 79.420.100.2 | 26 | 79 | 420 | 100 | 2 | 3,76E+05 | 3,16E-04 | 1,19E+02 | 3,10E+01 | 3,84E+09 | 1,02E+04 | 3,70E+13 |
| 79.860.50.3 | 26,3 | 79 | 860 | 50 | 3 | 5,51E+05 | 3,16E-04 | 1,74E+02 | 3,10E+01 | 5,63E+09 | 1,02E+04 | 5,42E+13 |
| 77.540.86.3 | 26,6 | 77 | 540 | 86 | 3 | 4,97E+05 | 3,25E-04 | 1,61E+02 | 3,10E+01 | 5,21E+09 | 1,05E+04 | 5,02E+13 |
| 75.420.50.2 | 27,23 | 75 | 420 | 50 | 2 | 7,14E+05 | 3,33E-04 | 2,38E+02 | 3,10E+01 | 7,68E+09 | 1,08E+04 | 7,39E+13 |
| 110.320.86.2 | 27,8 | 110 | 320 | 86 | 2 | 7,99E+05 | 2,27E-04 | 1,82E+02 | 4,20E+01 | 4,33E+09 | 5,41E+03 | 4,16E+13 |
| 90.380.100.3 | 27,9 | 90 | 380 | 100 | 3 | 7,11E+05 | 2,78E-04 | 1,97E+02 | 3,70E+01 | 5,33E+09 | 7,51E+03 | 5,14E+13 |
| 90.790.50.3 | 28 | 90 | 790 | 50 | 3 | 6,84E+05 | 2,78E-04 | 1,90E+02 | 3,70E+01 | 5,13E+09 | 7,51E+03 | 4,94E+13 |
| 90.205.72.1 | 28,08 | 90 | 205 | 72 | 1 | 6,10E+05 | 2,78E-04 | 1,69E+02 | 3,70E+01 | 4,58E+09 | 7,51E+03 | 4,41E+13 |
| 77.150.120.1 | 29,1 | 77 | 150 | 120 | 1 | 4,28E+05 | 3,25E-04 | 1,39E+02 | 3,10E+01 | 4,48E+09 | 1,05E+04 | 4,31E+13 |
| 33.850.50.2 | 29,99 | 33 | 850 | 50 | 2 | 1,55E+05 | 7,58E-04 | 1,18E+02 | 1,85E+01 | 6,36E+09 | 4,10E+04 | 6,12E+13 |
| 22.200.86.1 | 30 | 22 | 200 | 86 | 1 | 1,28E+05 | 1,14E-03 | 1,45E+02 | 1,85E+01 | 7,86E+09 | 6,14E+04 | 7,56E+13 |
| 20.220.60.1 | 30,99 | 220 | 220 | 60 | 1 | 1,67E+06 | 1,14E-04 | 1,89E+02 | 6,80E+01 | 2,79E+09 | 1,67E+03 | 2,68E+13 |
| 26.170.120.1 | 31,2 | 26 | 170 | 120 | 1 | 1,27E+05 | 9,62E-04 | 1,23E+02 | 1,85E+01 | 6,62E+09 | 5,20E+04 | 6,38E+13 |
| 32.180.120.1 | 31,2 | 32 | 180 | 120 | 1 | 1,48E+05 | 7,81E-04 | 1,16E+02 | 1,85E+01 | 6,26E+09 | 4,22E+04 | 6,02E+13 |
| 66.790.72.3 | 31,3 | 66 | 790 | 72 | 3 | 3,48E+05 | 3,79E-04 | 1,32E+02 | 3,05E+01 | 4,32E+09 | 1,24E+04 | 4,16E+13 |
| 100.200.86.1 | 32,1 | 100 | 200 | 86 | 1 | 5,81E+05 | 2,50E-04 | 1,45E+02 | 3,70E+01 | 3,93E+09 | 6,76E+03 | 3,78E+13 |
| 20.200.72.1 | 32,4 | 20 | 200 | 72 | 1 | 1,39E+05 | 1,25E-03 | 1,74E+02 | 1,85E+01 | 9,38E+09 | 6,76E+04 | 9,03E+13 |
| 100.190.100.1 | 32,8 | 100 | 190 | 100 | 1 | 5,26E+05 | 2,50E-04 | 1,32E+02 | 3,70E+01 | 3,56E+09 | 6,76E+03 | 3,42E+13 |
| 65.450.100.3 | 34,4 | 65 | 450 | 100 | 3 | 4,33E+05 | 3,85E-04 | 1,67E+02 | 3,05E+01 | 5,46E+09 | 1,26E+04 | 5,26E+13 |
| 100.200.100.1 | 35,3 | 100 | 200 | 100 | 1 | 5,00E+05 | 2,50E-04 | 1,25E+02 | 3,70E+01 | 3,38E+09 | 6,76E+03 | 3,25E+13 |
| 60.200.100.1 | 44,1 | 60 | 200 | 100 | 1 | 3,00E+05 | 4,17E-04 | 1,25E+02 | 3,05E+01 | 4,10E+09 | 1,37E+04 | 3,95E+13 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Electrodomésticos del grupo BSH | 1 |
| Figura 1.2. Ejemplo de la decoración de un frontal de lavavajillas de la marca Bosch..... | 2 |
| Figura 1.3. Fábrica de lavadoras, lavavajillas y secadoras de BSH en Łódź, Polonia | 4 |
| Figura 2.1. Ejemplo de la gama de colores conseguido con el equipo TruMark 5020..... | 6 |
| Figura 2.2. Líneas finas marcadas con láser miradas a través de una lupa calibrada | 6 |
| Figura 2.3. Diseño del frontal de lavavajillas con la línea más extensa (500mm) y el campo de marcaje más grande disponible. | 7 |
| Figura 2.4. Haz láser dirigido a los extremos del campo permitidos por el sistema óptico y al centro.. | 8 |
| Figura 2.5. Cuadrado inscrito que supone el actual campo de marcaje de un equipo láser | 8 |
| Figura 2.6. Ejemplo de varios errores presentes en el solapamiento de líneas..... | 9 |
| Figura 2.7. Esquema del procedimiento de fragmentación de la decoración. | 9 |
| Figura 2.8. Corte inducido en la decoración de un frontal con línea extensa..... | 10 |
| Figura 2.9. Solapamiento sin error apreciable de dos líneas | 10 |
| Figura 2.10. Uso de un campo de marcaje que cubra toda la decoración del frontal. | 10 |
| Figura 3.1. Marcaje de un frontal mediante fragmentación de los diseños | 13 |
| Figura 3.2. Equipo láser TruMark Station 5020 | 14 |
| Figura 3.3. Palet con las piezas de acero utilizadas..... | 14 |
| Figura 3.4. Ejemplos de logos de los frontales de lavavajillas del grupo | 14 |
| Figura 3.5. Partes diferenciadas de la óptica de un equipo láser..... | 15 |
| Figura 3.6. Probeta de errores en los dos ejes del campo de marcaje. Rango de 1-10, 10-100 y 100-1000 micras. | 15 |
| Figura 3.7. Errores de 10, 20 y 30 micras detectables por el ojo humano..... | 16 |
| Figura 3.8. Cabezal del Equipo Trumpf 5020, su eje z y su mesa de trabajo de 1 eje (x)..... | 16 |
| Figura 3.9. Esquema de la ampliación del campo de marcaje gracias al uso de una distancia focal mayor | 18 |
| Figura 3.10. Equipo láser Rofin PowerLine E25 y detalle del cuerpo y cabezal | 19 |
| Figura 3.11. Ajuste exponencial de los puntos tomados para el barrido..... | 20 |
| Figura 3.12. Abrasímetro lineal utilizado | 22 |
| Figura 3.13. Esquema del procedimiento de ensayo | 23 |
| Figura 3.14. Probetas falcon con los productos de limpieza, y bebidas de los puntos 2) y 3) de la TCD | 23 |
| Figura 3.15. Cámara de vapor de la sección de lavavajillas | 23 |
| Figura 3.16. Cinta adhesiva Tesafilm® 4104 PVC transparente..... | 24 |
| Figura 3.17. Calificación de los resultados del ensayo de adhesión | 25 |
| Figura 3.18. Esfera de color CIELAB..... | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.19. Ejemplos de colores con $a=0$, $b=0$ y $L= 0, 5, 10, 15, 20, 25$ y 30 . | 28 |
| Figura 3.20 Ejemplo de marca con numerosos reflejos metálicos. | 28 |
| Figura 3.21. Ejemplo de marca con escasos reflejos metálicos | 28 |
| Figura 3.22. Procedimiento de la evaluación de las muestras | 30 |
| Figura 4.1. Frontal de lavavajillas marcado con parámetro 225.600.60.2 con el equipo TruMark 5020 | 35 |
| Figura 4.2. Ejemplo de la desaparición de una marca en la zona afectada por el medio ácido | 39 |
| Figura 4.3. Ejemplo de marca afectada por picaduras tras test de gota salada | 39 |
| Figura 4.4 Ejemplo de corrosión de marcas tras test de vapor | 40 |
| Figura A.1 Fenómeno de absorción. | 47 |
| Figura A.2 Emisión espontánea | 48 |
| Figura A.3 Emisión estimulada | 48 |
| Figura A.4 Diagrama de niveles de energía en un sistema de dos niveles | 49 |
| Figura A.5 Diagrama tres niveles de energía | 49 |
| Figura A.6 Construcción básica de una cavidad láser. | 50 |
| Figura A.7 Esquema formación haz láser | 51 |
| Figura A.8 Coherencia de las ondas de un haz láser | 51 |
| Figura A.9 Espectro de la radiación electromagnética | 52 |
| Figura A.10 Patrones geométricos provocados por los modos electromagnéticos transversales | 52 |
| Figura A.11 Distribución de intensidad en función del TEM ₀ | 53 |
| Figura A.12 Parámetros característicos de un pulso | 53 |
| Figura A.13 Modos vibracionales láser CO ₂ | 54 |
| Figura A.14 Niveles energéticos de molécula CO ₂ y N ₂ | 55 |
| Figura A.15 Configuración básica de láser Nd: YAG | 55 |
| Figura A.16 Diodo láser | 56 |
| Figura A.17 Construcción básica de un láser Excimer | 56 |
| Figura B.1 Forma de la distribución de energía en el tiempo de un pulso del equipo láser Rofin E25. Ancho del pulso: 60ns. Energía del pulso: 145 μ J | 57 |
| Figura B.2. Ejemplo de una posible manera de deposición de impulsos sobre un material | 57 |
| Figura B.3. Ejemplo de deposición de impulsos en una línea | 58 |
| Figura B.4. Ejemplo del relleno a partir de líneas, de una punta de flecha | 58 |
| Figura B.5 Ejemplo de relleno de una punta de flecha, a partir de líneas, con dos rellenos y dos direcciones de relleno diferentes. | 58 |
| Figura B.6 Esquema del aumento de tamaño del spot en diferentes planos (enfoco y desenfocado) | 59 |
| Figura D.1 Máquina de tampografiado (izda.) y una almohadilla, elemento característico del proceso (dcha.) | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura D.2 Distintos tipos de almohadillas para tampografiado | 66 |
| Figura D.3 Placas de imagen para tampografía..... | 66 |
| Figura D.4 Ejemplo de disposición de la tinta en el tampografiado..... | 67 |
| Figura D.5 Proceso de impresión por tampografía | 68 |
| Figura D.6 Marco de serigrafía ensamblado al bastidor de la máquina..... | 69 |
| Figura D.7 Pantalla de impresión (a) y sección transversal de la pantalla (b)..... | 70 |
| Figura D.8 Geometría de la malla..... | 70 |
| Figura D.9 Imagen de microscopía SEM de una pantalla producida mediante técnica fotomecánica . | 71 |
| Figura D.10 Rasqueta empleada en serigrafía..... | 71 |
| Figura D.11 Aplicación de la rasqueta en la impresión por tampografía | 71 |
| Figura D.12 Esquema del proceso de serigrafiado | 72 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1-1. Comparativa de los tecnologías de impresión tradicionales y la de marcaje digital láser | 3 |
| Tabla 2-1. Esquema de la dificultad esperada relativa a los requerimientos planteados | 7 |
| Tabla 2-2. Resumen de las soluciones planteadas en la fase inicial del proyecto | 11 |
| Tabla 3-1. Medios activos y longitudes de onda de los equipos láser disponibles al principio del proyecto | 13 |
| Tabla 3-2. Error mínimo apreciado por la población encuestada | 16 |
| Tabla 3-3. Rangos elegidos para las 4 variables en la experimentación con el equipo TruMark 5020. | 18 |
| Tabla 3-4. Ejemplos de distancias focales estándares y sus respectivos campos de marcaje | 19 |
| Tabla 3-5. Evolución de los puntos tomados en el barrido | 21 |
| Tabla 3-6. Rangos elegidos para las 4 variables en la experimentación con el equipo Rofin PowerLine E25 | 21 |
| Tabla 4-1. Evaluación de los parámetros elegidos inicialmente. | 32 |
| Tabla 4-2. Pruebas críticas de la TCD realizadas a los parámetros seleccionados en el bloque de evaluación estética | 33 |
| Tabla 4-3. Totalidad de resultados de ensayos de color y de la TCD realizados sobre los 2 parámetros seleccionados | 34 |
| Tabla 4-4. Evaluación de los parámetros elegidos inicialmente. | 37 |
| Tabla 4-5. Pruebas críticas de la TCD realizadas a los parámetros seleccionados en el bloque de evaluación estética | 38 |
| Tabla 4-6. Media y desviación típica de los valores de la densidad de energía para ambos equipos .. | 41 |
| Tabla 4-7 Media y desviación típica de los valores de la densidad de irradiancia para ambos equipos | 42 |
| Tabla 5-1. Resumen de resultados de los parámetros óptimos hallados. | 43 |
| Tabla 5-2. Ejemplos de parámetros con mejores cualidades estéticas | 45 |
| Tabla A-1 Longitudes de onda en función de la mezcla de gases | 56 |
| Tabla C-1. Composición de los aceros inoxidables 430 | 61 |
| Tabla C-2. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables 430 | 61 |
| Tabla E-1. Tabla de resultados de las pruebas de la TCD para la experimentación con el equipo TruMark | 73 |
| Tabla F-1 Tabla de variables de marcaje para los resultados inicialmente escogidos – TruMark 5020 | 75 |
| Tabla F-2 Tabla de variables de marcaje para los resultados inicialmente escogidos – Rofin PowerLine E25 | 76 |

Índice de gráficas

| | |
|---|----|
| Gráfica 4.1 Representación de la dependencia de la coordenada L de color con respecto de la densidad de energía | 41 |
| Gráfica 4.2 Representación de la dependencia de la coordenada L de color con respecto de la densidad de irradiancia | 42 |

Bibliografía

- [1] Memoria de actividades 2010, 2011 y 2012: Propiedad industrial y empresa. Oficina Española de Patentes y Marcas.
- [2] A. John Sedriks. Corrosion of Stainless Steel. Second Edition. 1996
- [3] Urrutia, David, “Funcionalización superficial de electrodomésticos de línea blanca mediante tecnología láser de marcado”.
- [4] AZoM™ - The A to Z of Materials and AZojomo. <http://www.azom.com/>
- [5] W. D. Callister, Jr., “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Ed. Reverté S.A., Tercera edición, 1995.