



Universidad Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera



Ingeniería Industrial

Marcaje digital láser aplicado a la decoración de frontales de lavavajillas

Autor: Carlos Concheso Doria



Departamento de Ciencia y
Tecnología de Materiales y Fluidos

Universidad de Zaragoza

Ponente del proyecto:
Dr. D. José Ignacio Peña Torre

Doctor en Ciencias

B/S/H/

Departamento de Tecnología Corporativa

BSH Electrodomésticos España S.A.

Director del proyecto:
Dr. D. Francisco Javier Ester Sola

Doctor en Ciencias

Codirector del proyecto:
D. Manuel Gimeno Asín

Ingeniero Industrial

Zaragoza
Abril de 2014

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Miguel Ángel Buñuel la oportunidad de poder realizar este proyecto en BSH Electrodomésticos España, S.A.

También quiero dar las gracias a mis directores de proyecto, José Ignacio Peña, Francisco Javier Ester y Manuel Gimeno, por su completa dedicación y asesoramiento.

Igualmente agradezco a todos los miembros de RTI el compañerismo mostrado durante estos meses y todo lo que me ha enseñado cada uno de ellos.

Asimismo quiero agradecer a mi familia la dedicación y apoyo que me han dado no solo durante este proyecto sino durante toda mi vida.

Resumen

“Marcaje digital láser aplicado a la decoración de frontales de lavavajillas”

La tecnología del marcaje digital láser está siendo cada vez más desarrollada e implementada en la industria. Su uso anteriormente se restringía al marcaje de códigos de piezas cuya finalidad era únicamente la del seguimiento de los productos a lo largo de la línea de montaje, y no consistían por tanto en una parte estética para el cliente sino meramente funcional para los procesos industriales de fabricación. Con el desarrollo de esta tecnología el uso del láser se expande a campos nuevos como puede ser los productos alimenticios, donde las tintas tienen su uso restringido por motivos de salud; la joyería, y también el campo donde se trabajará en este proyecto: los electrodomésticos.

En este proyecto se va a realizar un estudio enfocado a la implantación de la tecnología de marcaje digital láser en la cadena de producción de lavavajillas de BSH Lódz, Polonia. El alcance de este trabajo va a ser la realización de pruebas que permitan optimizar los parámetros de funcionamiento del láser adecuados para su uso. El marcaje conllevará la necesidad de una calidad suficiente, produciendo una serie de requerimientos técnicos y estéticos. Los requerimientos técnicos vendrán dados por las normativas internas de la propia compañía y los estéticos serán examinados por los diseñadores encargados de evaluar su calidad. El objetivo final es la sustitución de los métodos de tampografiado y serigrafiado de los frontales de los lavavajillas producidos en Lódz, por un proceso de marcaje láser más limpio, económico y flexible.

En este trabajo nos centraremos esencialmente en los lavavajillas de la compañía y, de éstos, en la parte frontal del mismo, de acero inoxidable. El marcaje en acero inoxidable tiene múltiples usos como son la fabricación de redes de difracción por procesos de “engraving” en la superficie del material, la producción de marcas de agua o bajo contraste, muy usada en cubertería, por procesos de “anealing” en la superficie, o la producción de marcas de alto contraste, lo cual se consigue tanto con procesos de “anealing” como de “engraving” y tiene un valor puramente estético y cuyo uso es la reproducción de símbolos, letras, logos, imágenes, etc. Esta última aplicación es la que interesa para este proyecto ya que se pretende reproducir la simbología del frontal de todo lavavajillas producido en la fábrica. Es comprensible por tanto que los requerimientos estéticos sean críticos, ya que su incumplimiento supondría la incorrecta visualización de la decoración por parte del usuario.

Se realizará un estudio posterior para comprender la fenomenología de este proceso de marcaje láser en acero inoxidable. Para tal fin se llevarán a cabo experimentos y mediciones para obtener una información más científica de los procesos internos del acero al ser tratado con láser.

Finalmente, tras haber estudiado todas las posibilidades contempladas de marcaje láser en acero con los equipos disponibles se harán todos los ensayos pertinentes para asegurar el cumplimiento de los requisitos necesarios para que esta tecnología pueda ser implantada en la cadena de montaje de la fábrica de Lódz.

PROYECTO FIN DE CARRERA

Marcaje digital láser aplicado a la decoración de frontales de lavavajillas

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Comparativa de los métodos de impresión de decoración	2
Capítulo 2. Planificación del proyecto	5
2.1 Definición de los requerimientos	5
2.1.1 Pruebas de calidad de la TCD	5
2.1.2 Evaluación de la calidad estética	5
2.2 Análisis de la problemática del método	7
2.2.1 Problemática de la resistencia a corrosión	7
2.2.2 Problemática de las líneas extensas	7
2.3 Soluciones propuestas	8
2.3.1 Soluciones 1a y 1b: Fragmentación de la decoración	8
2.3.2 Solución 2: Uso de un sistema óptico no estándar	10
Capítulo 3. Metodología de la experimentación	13
3.1 Soluciones 1a y 1b: Fragmentación de diseños extensos	13
3.1.1 Recursos	13
3.1.2 Exploración de las variables	17
3.2 Solución 2: Uso de un sistema óptico no estándar	18
3.2.1 Recursos	19
3.2.2 Exploración de las variables	20
3.3 Evaluación de la calidad de las marcas	22
3.3.1 Pruebas de calidad de la TCD	22
3.3.2 Selección de las pruebas más críticas de la TCD	25

3.3.3	Evaluación de la calidad estética	27
3.3.4	Procedimiento de evaluación de las muestras	29
Capítulo 4.	Resultados	31
4.1	Resultados de la experimentación con el equipo TruMark Station 5020	31
4.2	Resultados de la experimentación con el equipo Rofin PowerLine E25	36
4.3	Resultados científicos	39
4.3.1	Conclusiones relativas a las marcas	39
4.3.2	Conclusiones relativas a la interacción láser-material	40
Capítulo 5.	Conclusiones	43
5.1	Objetivos conseguidos	43
5.1.1	Resultados con el equipo TruMark 5020	43
5.1.2	Resultados con el equipo Rofin PowerLine E25	43
5.1.3	Soluciones propuestas	44
5.2	Líneas futuras	44
5.2.1	Implantación en la fábrica de Łódź	44
5.2.2	Mejoras futuras para el marcaje láser en acero inoxidable 430	44
Anexo A.	Principios de la tecnología láser	47
A.1	Definición y origen	47
A.2	Principios fundamentales	47
A.3	Funcionamiento básico	49
A.4	Caracterización del láser	51
A.4.1	Características haz láser	51
A.4.2	Características de la emisión de la onda	53
A.5	Tipos de láser industriales	54
Anexo B.	Variables del marcaje láser	57
Anexo C.	Acero inoxidable ferrítico 430	61

C.1 Descripción	61
C.2 Problemas comunes del acero inoxidable 430	62
Anexo D. Tecnologías de decoración tradicionales	65
D.1 Tampografía	65
D.1.1 Elementos del proceso	65
D.1.2 Proceso de tampografiado	68
D.2 Serigrafía	68
D.2.1 Elementos del proceso	69
D.2.2 Proceso de serigrafiado	72
Anexo E. Resultados de la experimentación con el equipo TruMark 5020	73
Anexo F. Tablas de estudios de correlación	75
Índice de figuras	77
Índice de tablas	80
Índice de gráficas	81
Bibliografía	82

Capítulo 1. Introducción

El presente Proyecto de Fin de Carrera se ha llevado a cabo en el marco de la colaboración de la empresa BSH Electrodomésticos España S.A. (en adelante BSH) y la Universidad de Zaragoza. Los departamentos en los que se ha trabajado son:

- Por parte de la Universidad de Zaragoza: Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA).
- Por parte de BSH: Regional Technology Innovation (RTI). Un departamento transversal que apoya tecnológicamente, especialmente en el ámbito de los materiales, tanto a los departamentos de desarrollo como a las fábricas que el grupo tiene en España, Alemania, Turquía, Francia y Polonia.



Figura 1.1. Electrodomésticos del grupo BSH

BSH es líder europeo en producción y venta de electrodomésticos de línea blanca, desde frigoríficos o lavavajillas hasta el pequeño electrodoméstico. Además, ha sido la primera empresa en número de patentes publicadas en 2010, 2011 y 2012 en España [1], y el segundo organismo por detrás del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Así mismo se encuentra entre las cinco primeras empresas en el ranking europeo de patentes.

El sector del electrodoméstico es altamente competitivo, por lo que, para mantener su posición como líder, BSH busca en sus productos unas características muy específicas:

- Segmentación: BSH produce productos en todas las gamas económicas, estéticas y funcionales para llegar a todo tipo de clientes.
- Diferenciación: La compañía busca la exclusividad y fomenta la calidad de sus productos.
- Seguridad: Los productos de BSH pasan las más estrictas pruebas de calidad que aseguran que ningún daño pueda derivarse del correcto uso de los aparatos.
- Eficiencia energética: La concienciación de la compañía con el medio ambiente hace que sus electrodomésticos sean líderes en consumo eficiente de agua y electricidad.
- Personalización: Los electrodomésticos de BSH se adaptan a las necesidades y gustos de cada consumidor.

- Complejidad inteligente: Máxima funcionalidad con la mayor facilidad de uso.

En el departamento de RTI se trabaja en diversos campos para alcanzar estas características. Uno de los más avanzados es la tecnología de marcaje láser. El presente proyecto fin de carrera se centra en el marcaje estético de acero inoxidable ferrítico para su futura implantación en la producción de lavavajillas en la fábrica de Łódź, Polonia.

A continuación se explicará la elección del método de impresión de decoración, es decir, el uso del marcaje láser para esta aplicación en concreto frente a los métodos tradicionales.

1.1 Comparativa de los métodos de impresión de decoración

Uno de los métodos más novedosos en las tecnologías de impresión de decoraciones es la tecnología de marcaje láser.

Esta tecnología se basa en la aplicación de altas densidades de energía en forma de luz a la superficie de un material para conferirle una nueva apariencia estética. La transformación de la apariencia del material se consigue mediante la concentración de la radiación láser que fomenta procesos químicos y cambios estructurales en su superficie.

Esta nueva apariencia estética tomará la forma de diseños que podrán ser logos, símbolos, letras, números, etc.

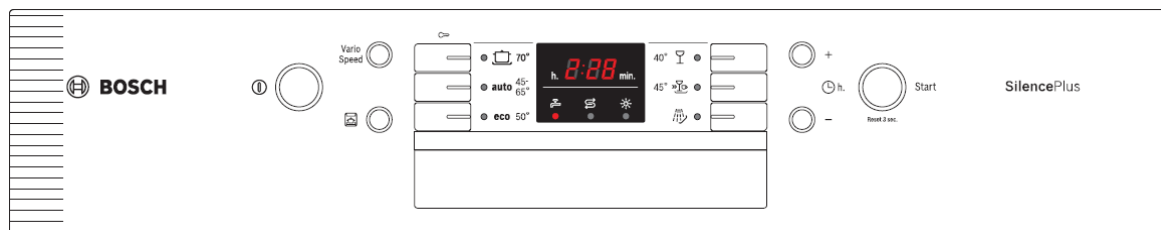


Figura 1.2. Ejemplo de la decoración de un frontal de lavavajillas de la marca Bosch

Este proceso de impresión de decoración se lleva a cabo tradicionalmente mediante los procesos de serigrafía o tampografía en la mayoría de las fábricas del grupo BSH. Estos procesos tradicionales, realizados actualmente en casi la totalidad de los electrodomésticos del grupo, consisten en una sencilla deposición de tinta mediante una plancha o tampón sobre la superficie a decorar (Anexo D: Tecnologías de decoración tradicionales). De esta manera se aporta un material adicional que posee unas cualidades estéticas y físicas diferentes a las del material base.

Las principales ventajas del presente método de marcaje láser frente a las tecnologías tradicionales de tampografiado y serografiado se exponen en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Comparativa de los tecnologías de impresión tradicionales y la de marcaje digital láser

	Marcaje digital láser	Tecnologías tradicionales
Flexibilidad	✓ La flexibilidad del marcaje es muy alta al tardarse menos de un segundo en cargar un nuevo archivo de marcas	✗ Se necesitan movimientos y operaciones mecánicas para cambiar los diseños a imprimir por lo que se consume tiempo y mano de obra.
Costes variables	✓ No hay mayor coste que el del consumo de la electricidad	✗ Las tintas usadas y los tampones o planchas utilizadas y remplazadas suponen un gasto continuo.
Necesidad de mantenimiento	✓ Bajo un uso normal no necesita de mantenimiento. El equipo se automantiene.	✗ Se necesita una limpieza de los utensilios de trabajo tras cada uso de un diseño y una limpieza periódica de los elementos del equipo
Complejidad de geometrías	✓ Se pueden marcar geometrías complejas, ángulos agudos o trazos muy cortos	✓ Se pueden marcar geometrías complejas, ángulos agudos o trazos cortos
Límite de grosor de líneas	✓ Se pueden efectuar líneas de menos de 100 micras de grosor	✗ No se puede bajar de las 350 micras de grosor de líneas
Conocimiento de la tecnología	✗ Tecnología novedosa y poco conocida y aplicada	✓ Tecnología consolidadas y optimizadas y muy utilizadas
Producción de fallos	✓ El método no genera fallos en la decoración. Supone un ahorro sustancial con respecto a las tecnologías tradicionales.	✗ El método genera errores que hacen que la pieza decorada se deseché suponiendo un gasto adicional.
Velocidad del proceso	✗ Dependiente de la decoración a marcar y el material utilizado.	✓ Dependiente de los útiles. Puede llegar a hacerse muy rápido, aun necesitando un curado posterior
Necesidad de útiles adicionales	✓ Tras el marcaje no se necesita post-tratamiento alguno	✗ Se necesitan útiles adicionales de curado de las tintas
Consumo de espacio fabril	✓ El espacio consumido es el de la máquina de marcaje	✗ El espacio consumido es el de la máquina de impresión, el de la máquina de curado y el del almacenaje de tampones o planchas y las tintas.
Limitación del tamaño de la decoración	✗ El tamaño de los diseños es limitante, ya que sólo se puede marcar aquellos diseños que puedan encuadrarse en el campo de marcaje	✓ El tamaño de los diseños no es problema, al poder usar mayor número de tampones o planchas mayores sin cambiar la técnica utilizada

Haciendo balance de ventajas e inconvenientes y aceptándose los posibles contratiempos que la tecnología pudiera causar se decidió abogar por la tecnología láser. Desde el departamento de RTI y la fábrica del grupo BSH en Łódź se decidió iniciar el presente proyecto en dicho departamento para el desarrollo de esta tecnología y su futura implantación.



Figura 1.3. Fábrica de lavadoras, lavavajillas y secadoras de BSH en Łódź, Polonia

Este proyecto se realizar para posibilitar la implantación de esta nueva tecnología en los lavavajillas producidos en dicha fábrica. Por tanto, ya que el material del que principalmente está compuesta la superficie decorada es acero inoxidable, solo se centrará este proyecto en el marcaje láser en dicho material.

Capítulo 2. Planificación del proyecto

El objetivo principal de este proyecto consiste en la sustitución de un método tradicional de impresión de decoración por otro nuevo más flexible y económico. Esto implica que en un principio no se contempla mayor necesidad que la de imitar los resultados que se consiguen con el primer método. Aunque las posibilidades del marcaje láser son más extensas que las del método de serigrafía el objetivo perseguido se centrará en reproducir los mismos resultados que los obtenidos con los métodos tradicionales.

2.1 Definición de los requerimientos

En las primeras etapas de la planificación del proyecto se definieron por tanto los objetivos del mismo clasificándolos en dos bloques:

- Resistencia mecánica y a la corrosión.
- Calidad estética.

El grupo BSH establece ciertas normas a seguir para asegurar que el aparato que se vende, usado en las condiciones que recomienda, no produce ningún daño al usuario y logrará un correcto funcionamiento. Al conjunto de estas normas se le llama TCD (Technical Checking Directive).

Estando ya definidas en la TCD una serie de pruebas para cada pieza se tomaron los requisitos de dichas pruebas para nuestra pieza como objetivos a cumplir en este proyecto. De no asegurarse el cumplimiento de los requisitos de la TCD la presente aplicación no podría ser aplicada a esta pieza.

2.1.1 Pruebas de calidad de la TCD

Dentro de dichas pruebas de la TCD se encuentran los siguientes tests:

- 1) Test de arañados y adhesión.
- 2) Resistencia al ataque de disolvente.
- 3) Resistencia al ataque de productos de limpieza.
- 4) Resistencia al ataque de manchas de comida y bebida.
- 5) Resistencia al vapor.

De esta manera se asegura que el frontal de lavavajillas que se integra en el electrodoméstico final podrá ser utilizado y limpiado por el usuario conservando su apariencia, propiedades y funciones originales.

2.1.2 Evaluación de la calidad estética

Por otra parte, se tuvo en cuenta que la decoración marcada por el láser debería ser visualmente lo más similar posible a la provocada con el serigrafiado por considerarse los resultados del último como los óptimos se identificaron dos requerimientos estéticos diferenciados:

- 1) La reproducción del color negro de la decoración:

El único color que se ha buscado en nuestra aplicación ha sido el negro por ser el propio de los diseños de los lavavajillas producidos en la fábrica.

En todo proceso de marcaje con láseres especiales para marcaje en metal se espera obtener una gama amplia de colores, incluyendo escalas de grises, por lo que no se tomó como factor limitante.

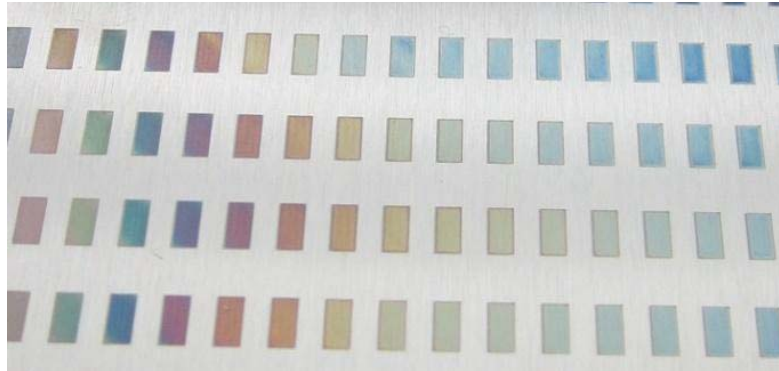


Figura 2.1. Ejemplo de la gama de colores conseguido con el equipo TruMark 5020

Más adelante, en el apartado 3.3.1 Evaluación de la calidad estética, se explicará el proceso de selección de color.

2) La reproducción de la forma de los diseños:

Al igual que las tecnologías tradicionales de impresión de iconos, la tecnología de marcaje láser es capaz de realizar diseños complejos, tanto finos como gruesos, tanto extensos como reducidos. Cuanto más pequeño el diámetro de su spot, más finos son los que símbolos es capaz de reproducir, pudiendo reproducirse líneas de hasta 100 micras de grosor en nuestro caso.

En extensión y grosor no se encuentran límites en la tecnología de marcaje láser más que las propias dimensiones del campo de marcaje, siendo éste la superficie más extensa que se puede marcar con un sistema óptico determinado.

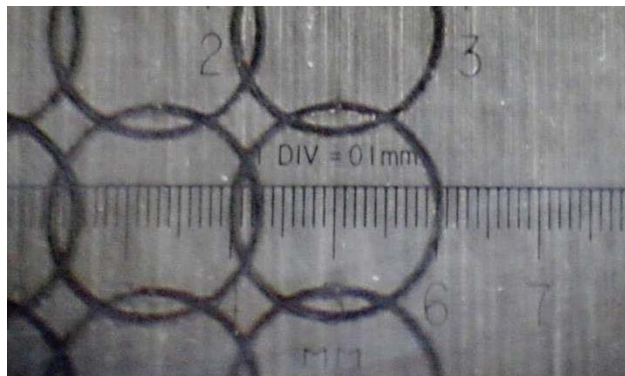


Figura 2.2. Líneas finas marcadas con láser miradas a través de una lupa calibrada

Los diseños de la decoración de un frontal de lavavajillas se pueden clasificar esencialmente en tres tipos en función de su forma:

- a. Logos de la marca del electrodoméstico.
- b. Letras y símbolos pequeños y medianos.
- c. Diseños extensos y líneas.

2.2 Análisis de la problemática del método

Una vez expuestos los objetivos por los que se ha trabajado en este proyecto se analizó la viabilidad y la problemática de cada uno de ellos.

Tabla 2-1. Esquema de la dificultad esperada relativa a los requerimientos planteados

		Problemática
Pruebas de la calidad de la TCD	Resistencia mecánica	✓ Dado que las marcas producidas por el láser se componen del mismo material que el propio acero se espera que tengan similares propiedades físicas y que éste no sea un requerimiento limitante.
	Resistencia a la corrosión	✗ El marcaje láser cambia las propiedades de la capa superficial del acero por lo que es posible que los compuestos generados sean más débiles y no resistan a corrosión.
Pruebas de calidad estética	Reproducción del color negro	✓ Se espera obtener una amplia gama de colores, entre los cuales el negro, por usarse equipos específicamente dedicados al marcaje.
	Reproducción de las formas	✗ De entre las formas a reproducir existen diseños extensos que superan las dimensiones de los campos de marcaje estándares.

2.2.1 Problemática de la resistencia a corrosión

Tal y como se ha planteado este proyecto se han centrado los esfuerzos en obtener unos parámetros de marcaje que generen marcas resistentes a la corrosión. En el capítulo siguiente se explica cómo se han escogido los ensayos más críticos de la TCD y se han elegido como criterios de evaluación de la resistencia a corrosión.

2.2.2 Problemática de las líneas extensas

Respecto al criterio de reproducción de las formas existe un factor limitante que es la longitud de las líneas de la decoración de algunos frontales. La razón de tal limitación es que, mientras que las dimensiones habituales de los campos de marcaje con las que se trabaja en estos equipos es de entre 30mm x 30mm hasta los 300mm x 300mm mientras, existen en los diseños que se quieren marcar líneas de hasta 500 mm.

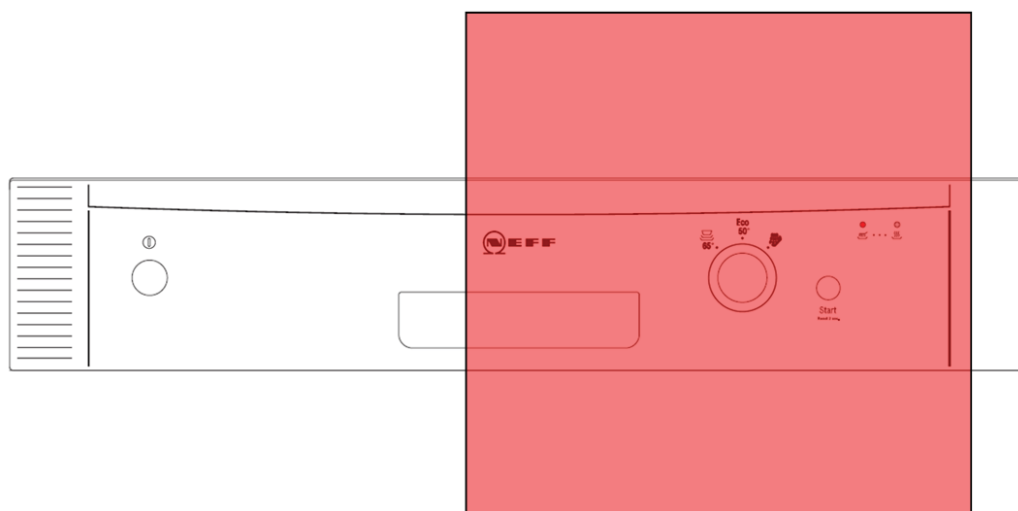


Figura 2.3. Diseño del frontal de lavavajillas con la línea más extensa (500mm) y el campo de marcaje más grande disponible.

En la actualidad el campo de marcaje no se toma como el área circular a la cual puede proyectarse el haz láser teniendo en cuenta los límites impuestos por el sistema óptico sino tan solo el cuadrado inscrito en esta (Figura 2.5) por razones de simplicidad de uso del software de marcaje.

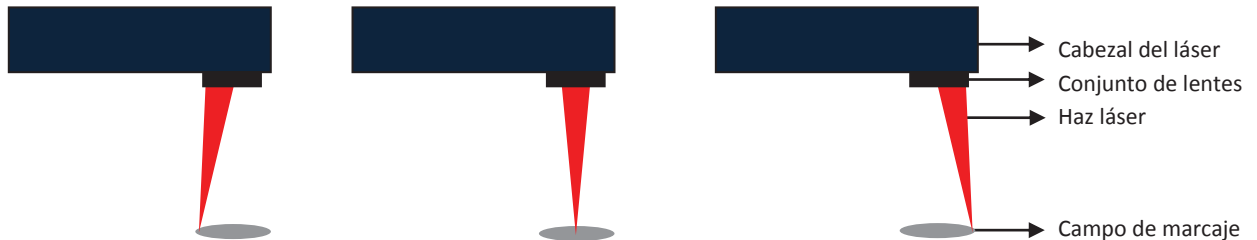


Figura 2.4. Haz láser dirigido a los extremos del campo permitidos por el sistema óptico y al centro

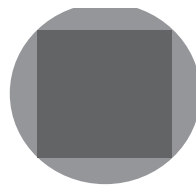


Figura 2.5. Cuadrado inscrito que supone el actual campo de marcaje de un equipo láser

De esta manera una línea, un logo o cualquier otro símbolo que se marque deberá poder encuadrarse dentro del propio campo de marcaje. Por esta razón se entiende que las soluciones estándar de los proveedores de equipos de marcaje láser no satisfacen nuestros requerimientos, ya que no pueden reproducir la totalidad de la decoración a marcar.

Las soluciones planteadas en la planificación de este proyecto han sido alternativas propuestas a los productos estándares que las compañías de marcaje láser ofrecen.

2.3 Soluciones propuestas

Llegados a este punto y habiendo entendido los objetivos que se quieren alcanzar en este proyecto nos encontramos con que el requerimiento que necesita de una aproximación especial es el del campo de marcaje. Se necesitaba encontrar una forma de modificar el procedimiento estándar de marcaje, que sería el de la impresión de un conjunto de iconos dentro del campo de marcaje, para poder reproducir los diseños más extensos y las líneas más largas.

Por tanto, cuando tratamos de reproducir líneas mayores que los campo de marcaje estándares se planteamos tres soluciones al respecto.

2.3.1 Soluciones 1a y 1b: Fragmentación de la decoración

El problema de las dimensiones del campo de marcaje radica en la dificultad de fragmentar una decoración y reproducirla a tramos.

Si la precisión de los elementos móviles de nuestro equipo fuera la suficiente como para asegurar que un diseño extenso se puede marcar en varias secciones, cada una tal que se pudiera encuadrar dentro de un campo de marcaje, no induciría en el marcaje dificultad

alguna. Teniendo sin embargo nuestros equipos de marcaje una precisión de 100 micras en el movimiento de las piezas, el problema surge en la fácil percepción de los errores cometidos.

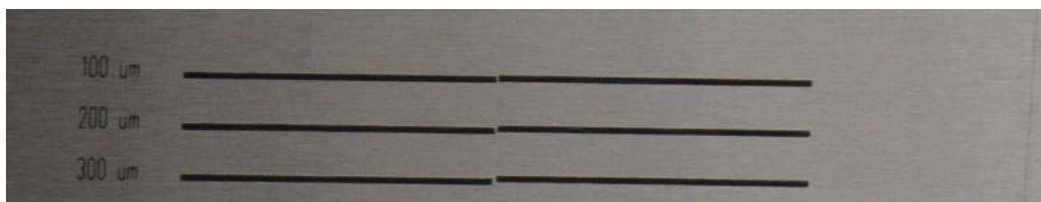


Figura 2.6. Ejemplo de varios errores presentes en el solapamiento de líneas

A continuación se esquematiza gráficamente el método pensado para la fragmentación de los símbolos más extensos de la decoración:

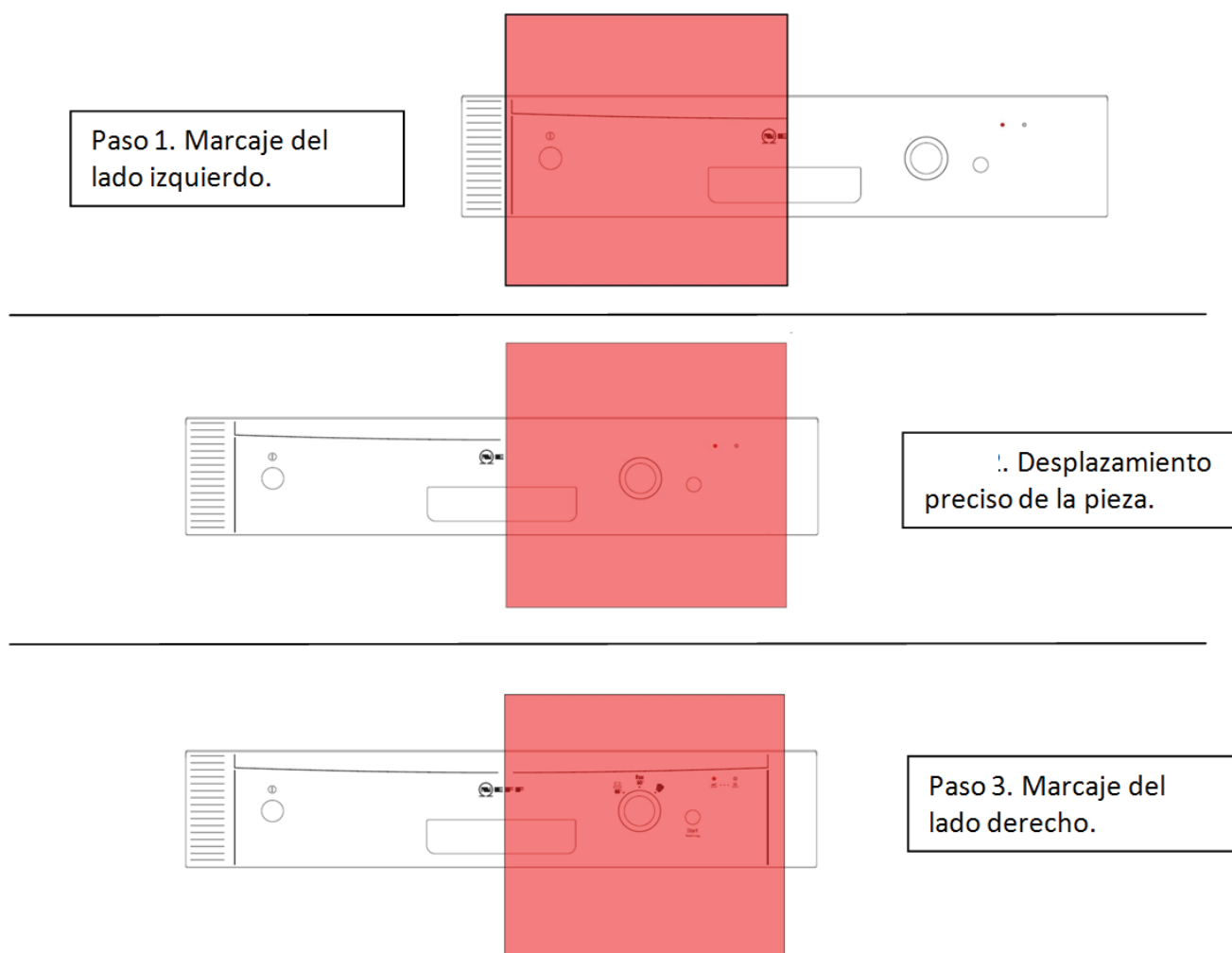


Figura 2.7. Esquema del procedimiento de fragmentación de la decoración.

Se sugirieron por tanto dos opciones que se realizarían con un mismo equipo láser, pero con una integración de la superficie de trabajo diferente:

- a. **Corte visible de los diseños extensos:** Se provocaría un espacio en blanco visible entre ambos fragmentos, tomando el resultado no como un defecto sino como una característica.

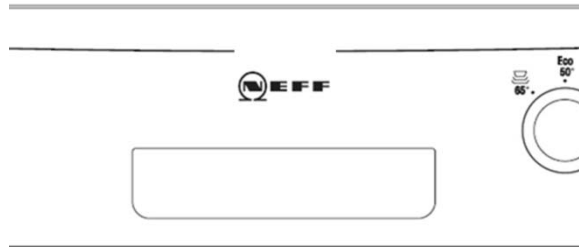


Figura 2.8. Corte inducido en la decoración de un frontal con línea extensa

De esta forma, aunque uno de los fragmentos estuviera desfasado con respecto del otro este error no se podría percibir al no estar en contacto ambos lados.

- b. **Solapamiento de los diseños extensos:** Se aseguraría un mínimo espacio no reconocible por el ojo humano en el solapamiento de los diseños fragmentados. Esta solución requiere una precisión mayor que la que se disponía al principio del proyecto con los equipos disponibles.



Figura 2.9. Solapamiento sin error apreciable de dos líneas

Estas dos opciones conllevan la solución más sencilla de todas ya que la tecnología de marcaje láser está actualmente más desarrollada para campos de marcaje menores y no habría necesidad alguna de desarrollar una solución alternativa especial.

2.3.2 Solución 2: Uso de un sistema óptico no estándar

El problema se soluciona de raíz si se usa una lente convergente que proporcione un campo de marcaje de mayores dimensiones que la más larga línea que existe en los diseños de los lavavajillas de la compañía. De esta manera en vez de usar soluciones que suponen tan solo parches se evita la aparición del problema desde la raíz.



Figura 2.10. Uso de un campo de marcaje que cubra toda la decoración del frontal.

Ésta supone nuestra primera opción ya que no se modifica ningún diseño ni implica ningún coste adicional al propio del equipo sin embargo al no tratarse de una solución que ofrezcan nuestros proveedores da lugar a mayores complicaciones.

Tabla 2-2. Resumen de las soluciones planteadas en la fase inicial del proyecto

	Solución sugerida	Procedimiento	Consecuencia	Preferencia
Láser 1	1a. Corte visible de diseños extensos	Dado que la superficie de trabajo normal produce unos errores visibles se efectúa un corte visible mayor como parte de la estética.	Ningún coste económico añadido. Modificación de gran número de los diseños de los frontales.	↓ Baja
	1b. Solapamiento de diseños extensos	Se implementa una superficie de trabajo de precisión superior que solape los diseños de la decoración sin defecto aparente.	Coste económico adicional.	→ Media
Láser 2	2. Uso de un sistema óptico no estándar	Se adquiere un equipo con un sistema óptico especial con el que se pueda marcar en un solo paso todas las variantes de diseños.	Necesidad de un proveedor que suministre un equipo con el sistema óptico especial requerido.	↑ Alta

En el capítulo siguiente se expondrá cómo se han enfocado estas 3 opciones y cuáles han sido los equipos utilizados para llevar a cabo las pruebas.

Capítulo 3. Metodología de la experimentación

A continuación se explican y desarrollan los métodos utilizados en la experimentación con los equipos láser de marcaje en las tres opciones sugeridas.

3.1 Soluciones 1a y 1b: Fragmentación de diseños extensos

Como se ha comentado en el capítulo anterior estas soluciones consisten en la fragmentación de los diseños más extensos presentes en la decoración de los frontales. El método radica en fragmentar la decoración del frontal y marcarla en varios pasos, moviendo la pieza y quedando inmóvil el campo de marcaje.

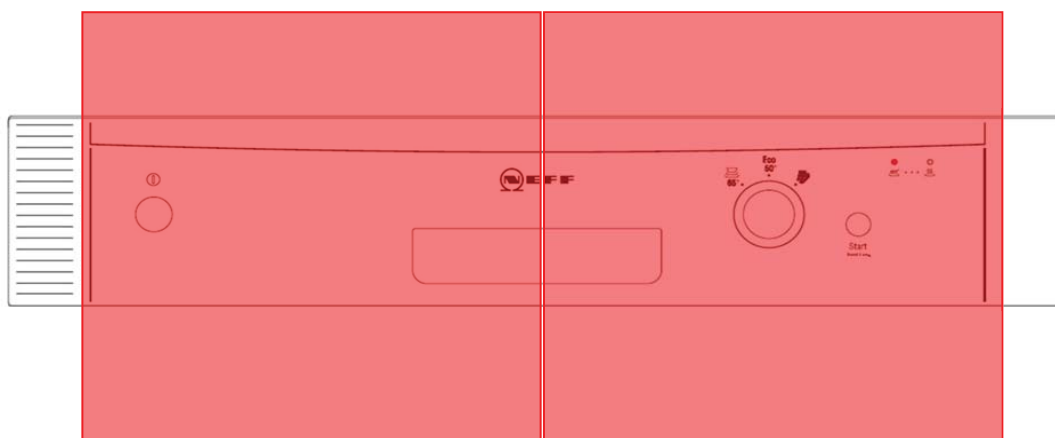


Figura 3.1. Marcaje de un frontal mediante fragmentación de los diseños

A continuación se explicarán los recursos utilizados en el proyecto, el método de exploración de las variables de marcaje y la forma de evaluar los resultados obtenidos en dicha exploración. Se hará una distinción entre las soluciones 1a, Corte visible de los diseños extensos y 1b, Solapamiento de los diseños extensos, en la sección de superficie de trabajo ya que es a priori la única diferencia en el método.

3.1.1 Recursos

Para situar al lector en la situación en la que se ha trabajado se introducen los utilizados para la consecución de estas soluciones.

Equipo de marcaje

En el departamento de RTI se dispuso desde el principio del proyecto de varios equipos de marcaje láser de varios medios activos y longitudes de onda:

Tabla 3-1. Medios activos y longitudes de onda de los equipos láser disponibles al principio del proyecto

Medio activo	Longitud de onda emitida		
Fibra óptica dopada con Nd	1064 nm	532 nm	355 nm
YAG (Y3Al5O12) dopado con Nd	1064 nm		

Después de una breve experimentación en la que se pudo distinguir la mayor calidad estética de las marcas del láser de fibra con respecto del resto de los equipos y siguiendo el consejo de los fabricantes de los mismos se optó por llevar a cabo el marcaje con dicho equipo.

El equipo en cuestión es un láser TruMark Station 5020 con las siguientes características:

- **Categoría:** láser de fibra pulsado bombeado con diodos
- **Aplicaciones comunes:** estructurado, preparación y pulido de superficies y marcaje
- **Potencia media:** 20W
- **Longitud de onda:** 1064 nm
- **Calidad de haz M^2 :** 2
- **Rango de frecuencias de trabajo:** 1 kHz - 1000 kHz
- **Configuración óptica elegida:** lente de 254mm de foco
- **Campo de marcaje:** 180x180 mm²
- **Diámetro de spot:** 105 μ m



Figura 3.2. Equipo láser TruMark Station 5020

Material base

El material base en el cual se ha trabajado durante todo el proyecto ha sido el acero inoxidable utilizado en los frontales de lavavajillas de la fábrica de Łódź, Polonia.

Las características de dicho acero son las siguientes:

- **Aleación:** acero ferrítico 430
- **Dimensiones:** 0.5 mm de espesor (ancho y largo varían con los modelos de frontal)
- **Gratado:** BA (Bright Annealed)
- **Proveedor:** Tadinox

En el Anexo D., se explica más detalladamente las características de este material

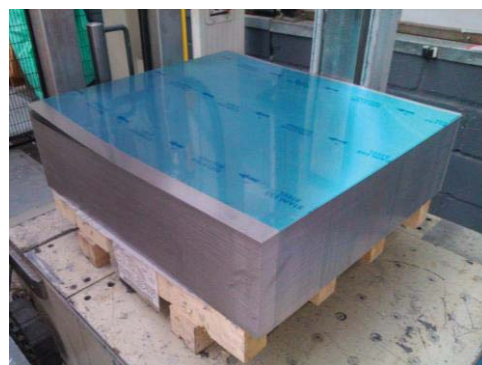


Figura 3.3. Palet con las piezas de acero utilizadas

Diseños

Toda la experimentación realizada ha sido llevada a cabo teniendo en cuenta los diseños del conjunto de iconos del frontal del electrodoméstico. Dichos diseños vienen establecidos por los diseñadores del grupo y determinan la apariencia final del frontal.



Figura 3.4. Ejemplos de logos de los frontales de lavavajillas del grupo

En nuestro caso nos han servido para tomar en cuenta las limitaciones de nuestro marcaje y obtener una idea de la apariencia final del frontal.

Superficie de trabajo (específico para solución 1b)

A la hora de resolver la solución 1b, Solapamiento de diseños extensos, planteada en el apartado 2.3.1 Soluciones 1a y 1b, se decidió realizar un breve estudio de la capacidad del ojo humano para reconocer defectos en el solapamiento de dos líneas. La solución 1a, Corte visible de diseños extensos, no necesita de este apartado adicional ya que con la precisión habitual de 100 micras de las superficies de trabajo estándares resulta suficiente para situar la decoración en su posición.

La razón de dicho estudio radica en el procedimiento utilizado para solapar diseños en los láseres de marcaje. Las superficies de trabajo con las que habitualmente se trabaja en los láseres del departamento se desplazan en los dos ejes del plano horizontal de marcaje e inducen a un error del orden de las 100 micras que podrían producir un defecto visible en el solapamiento de las líneas.

Para la preparación de este estudio se marcaron dos líneas solapadas, imponiendo un error en el eje X e Y del campo de marcaje, desde 1 μm hasta 1000 μm . Estos errores entre las marcas se realizaron imponiéndolos desde el archivo de marcas del software, directamente relacionado con el movimiento de los espejos galvanométricos del cabezal, y no con el movimiento de la superficie de trabajo. Con dichos espejos se puede alcanzar una precisión de en torno a 1 μm para una configuración óptica estándar por lo que el propio error de los espejos no influyó de manera significativa en los errores o desfases de por sí impuestos.



Figura 3.5. Partes diferenciadas de la óptica de un equipo láser

De esta manera se realizó la probeta de encuesta, con errores en los 2 ejes del plano y se evaluó a una distancia de 30 cm a una iluminancia de 700 ± 100 lux en posición frontal a la muestra. Se tomaron estas condiciones de evaluación por ser las utilizadas en el departamento de lavavajillas para evaluar los defectos de las piezas decoradas.



Figura 3.6. Probeta de errores en los dos ejes del campo de marcaje. Rango de 1-10, 10-100 y 100-1000 micras.

Se tomó una población de 20 individuos escogidos aleatoriamente de entre el personal de la fábrica de Montañana con un rango de edades de entre los 23 y los 65 años para determinar cuál sería el error mínimo que se detecta en estas condiciones de observación. El resultado del breve estudio fue el siguiente:

Tabla 3-2. Error mínimo apreciado por la población encuestada

Error mínimo apreciado	Número de personas
Menos de 10 micras	0
10 micras	4
20 micras	6
30 micras	6
40 o más micras	3

Se tomó, por tanto, el menor valor del mínimo error perceptible como el requisito de error provocado en los movimientos de ambos ejes de la superficie de trabajo: 10 micras. Con estos datos se contactó con el fabricante de integraciones con más experiencia en obras realizadas en la fábrica: Ergomac 97.



Figura 3.7. Errores de 10, 20 y 30 micras detectables por el ojo humano.

Como tal, este estudio sirvió para estimar la viabilidad de esta solución, ya que posteriormente la instalación del equipo se haría en Łódź, Polonia, y se necesitaría una integración propia de una empresa de la zona dedicada a integraciones industriales.

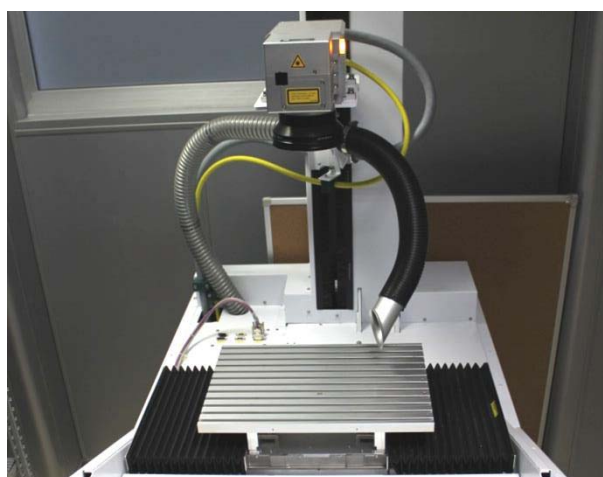


Figura 3.8 Cabecal del Equipo Trumf 5020, su eje z y su mesa de trabajo de 1 eje (x).

Se planteó por tanto con las especificaciones definidas un modelo de superficie de trabajo como la de la Figura 3.8 Cabecal del Equipo Trumf 5020, su eje z y su mesa de trabajo de 1 eje (x). y se estimó su presupuesto en caso de necesidad de llevarse a cabo por elegirse la solución 1b, Solapamiento de diseños extensos, como la definitiva.

3.1.2 Exploración de las variables

En los métodos de marcaje láser hay una serie de variables básicas y de interfaz con las que se trabaja usualmente (Anexo 1. Variables del marcaje láser) para provocar unos determinados cambios superficiales de los materiales. El método de marcaje láser se reduce en su esencia a una deposición organizada de energía concentrada y pulsada en forma de luz coherente y monocromática sobre la superficie de un material.

Esta deposición de energía provoca una transformación de los compuestos más superficiales del metal tratado, que le confieren una nueva apariencia. Se pretende por tanto encontrar la forma de depositar esta energía de manera que proporcione la calidad adecuada.

Las variables que consideramos en nuestro estudio se reducen a 4 que determinan dicha deposición organizada en el tiempo y el espacio sobre el material:

- 1) V: La **Velocidad** de Escaneo
- 2) F: La **Frecuencia** de deposición de impulsos
- 3) H: La **distancia** entre líneas marcadas
- 4) N: El **número** de rellenos de un área

Tras una experimentación previa con el equipo para entender el funcionamiento del mismo y la forma en que afectaba la radiación al acero se decidieron los límites en los cuales se iba a explorar las 4 variables anteriores. A continuación vienen explicados los resultados de dicha experimentación:

1) Acerca de la velocidad de escaneo (V):

Se observó inicialmente que por encima de los 1000 mm/s el contraste de las líneas marcadas individualmente se tornaba bajo. Por debajo de los 250 mm/s los colores de las marcas se tornan anaranjados y rojizos.

2) Acerca de la frecuencia de deposición de impulsos (F):

Se observó inicialmente que por debajo de los 100 kHz los colores obtenidos distaban del negro buscado, tornándose dorados, verdosos y plateados. Por encima de los 250 kHz el marcaje pierde definición de color.

3) Acerca de la distancia entre líneas (H):

Dado que el ancho de una línea marcada con este equipo es de aproximadamente 100 micras se tomaron los límites entre el aproximadamente el 25% de este valor y el 125%. Se entiende que las líneas marcadas han de repasarse para lograr un contraste más definido de la línea y no se debería dejar espacios entre las líneas, ya que conllevaría a espacios "en blanco" que reduciría la intensidad global del color de conjunto marcado.

4) Acerca del número de rellenos (N):

Habitualmente con un solo relleno de un área se pudo lograr el contraste requerido, sin embargo se consideró la posibilidad de aumentar el número de rellenos hasta 3 para provocar una deposición de energía más progresiva.

A continuación vienen resumidos los rangos de exploración de dichas 4 variables:

Tabla 3-3. Rangos elegidos para las 4 variables en la experimentación con el equipo TruMark 5020

Variable	Rango	Paso
V	200 mm/s -1250 mm/s	50 mm/s
F	75 kHz - 300 KHz	25 kHz
H	30 μ m - 120 μ m	10 μ m
N	1 - 3	1

Se ha dado en estas 4 variables una extensión del rango con respecto del inicialmente pensado por considerarse que las conclusiones de la experimentación previa resultan tan solo una aproximación al estudio y no reflejan los resultados absolutos del marcaje sobre el acero tratado.

Para agilizar el manejo de la información durante la experimentación se definió al principio del proyecto una forma específica de mostrar los datos recopilados. De esta forma, a cada conjunto de valores de las 4 diferentes variables anteriores lo llamaremos parámetros de marcaje y cada conjunto de parámetros de marcaje tendrá asociado un código de fácil identificación.

Dicho código tiene la siguiente forma siguiendo los nombres definidos anteriormente:

F(kHz).V(mm/s).H(μ m).N

Por ejemplo, un marcaje de 75 kHz de frecuencia, 500 mm/s de velocidad, 40 micras de interlineado y un solo relleno tendrá por código "75.500.40.1".

3.2 Solución 2: Uso de un sistema óptico no estándar

Para posibilitar la solución 2, Uso de un sistema óptico no estándar, se iniciaron durante la fase de planificación del proyecto conversaciones con los proveedores de los equipos láser con los que el departamento ha trabajado hasta ahora en marcaje láser: Trumpf, RoFin, Macsa y Foba. El objetivo fue la adquisición de un equipo de marcaje láser que tuviese un sistema óptico de focal más larga que los estándares tomando un valor mínimo de campo de marcaje de 500x500 mm².

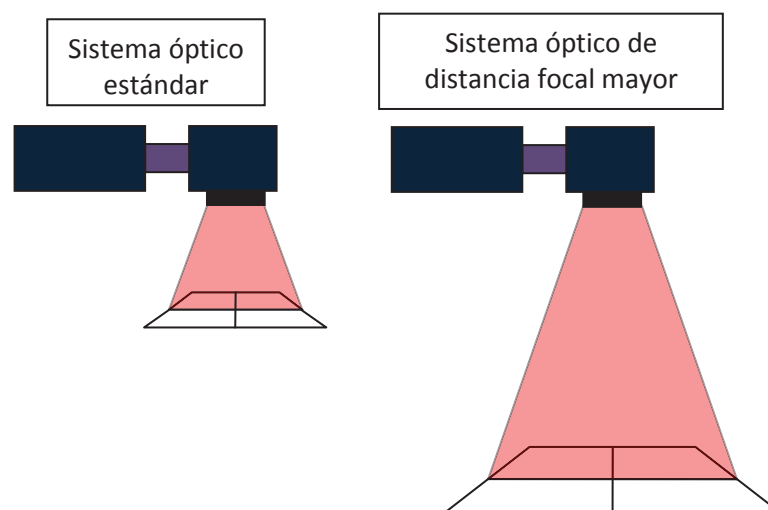


Figura 3.9. Esquema de la ampliación del campo de marcaje gracias al uso de una distancia focal

La razón de la necesidad de un sistema óptico de mayor focal reside en que cuanto mayor es la distancia focal del sistema óptico instalado, mayor campo de marcaje se obtiene, tal y como se muestra en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Ejemplos de distancias focales estándares y sus respectivos campos de marcaje

Distancias focales (mm)	100	160	254	330	420	511
Campo de marcaje (mmxmm)	55x55	110x110	180x180	210x210	290x290	340x340

Pasadas unas semanas de conversación se concluyó que solo uno de los proveedores estaba dispuesto a ofrecer una solución alternativa: Rofin Baasel. El equipo se arrendó en vez de ser adquirido por desconocerse si podría llegar a utilizarse como equipo definitivo para la aplicación. A continuación se explican con mayor detalle las características del equipo.

3.2.1 Recursos

Para situar al lector en la situación en la que se ha trabajado se introducen los recursos utilizados para la consecución de esta solución. Las secciones de “material base” y “diseños” se omiten por ser idénticas a las de las soluciones 1a y 1b, Fragmentación de diseños extensos.

Equipo de marcaje

Anteriormente se ha señalado al equipo prestado por Rofin-Baasel como el que haría posible la ejecución de esta solución. El equipo en cuestión es un láser Rofin PowerLine E25 con las siguientes características:

- **Categoría:** láser de vanadato (YVO4) dopado con Nd, pulsado y bombeado con diodos
- **Aplicaciones comunes:** marcaje de plásticos y metales y ablación de superficies.
- **Potencia media:** 25W
- **Longitud de onda:** 1064 nm
- **Calidad de haz M^2 :** 1.3
- **Rango de frecuencias de trabajo:** 1 kHz - 400 kHz
- **Configuración óptica elegida:** lente de 815 mm de foco
- **Campo de marcaje:** 600x600 mm²
- **Diámetro de spot:** 115 μ m

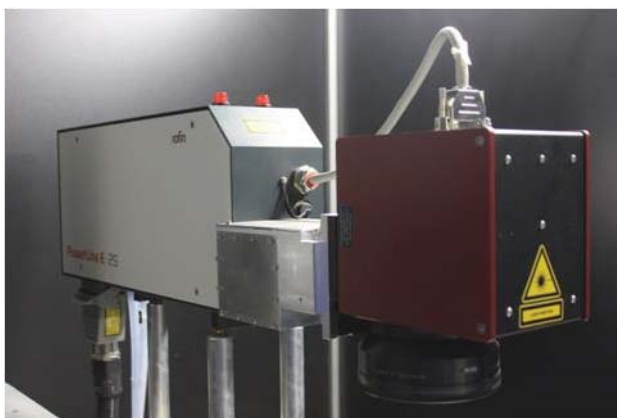


Figura 3.10 Equipo láser Rofin PowerLine E25 y detalle del cuerpo y cabezal

Gracias al préstamo de este equipo se pudo disponer en el departamento de los 3 de los 4 medios activos más comunes usados para el tratado y marcaje de superficies: fibra óptica, vanadato y Nd-YAG.

Se ha planificado en el departamento la compra de un nuevo equipo de CO2, completando así la gama de equipos más utilizado para el marcaje de superficies disponibles en el departamento para futuros estudios.

3.2.2 Exploración de las variables

Tal y como se ha trabajado en la experimentación con el láser de fibra de las soluciones 1a y 1b, Fragmentación de diseños extensos, igualmente se han considerado 4 variables de interfaz que usaremos para la experimentación con este láser de vanadato:

- 1) V: La **Velocidad** de Escaneo
- 2) F: La **Frecuencia** de deposición de impulsos
- 3) H: La **distancia** entre líneas marcadas
- 4) N: El **número** de rellenos de un área

Igualmente, tras una experimentación previa con el equipo para entender el funcionamiento del mismo y la forma en que afectaba la radiación al acero se decidieron los límites en los cuales se iba a explorar las 4 variables anteriores.

En la experimentación con este nuevo equipo se quiso dar un enfoque diferente al usado para el equipo TruMark 5020 de las soluciones 1a y 1b, Fragmentación de diseños extensos. Al tratarse el equipo láser Rofin de un equipo con el que no se había trabajado en el departamento no se tenía conocimiento de en qué rangos se obtendrían unos parámetros adecuados. Por esta razón, de llevarse a cabo un barrido lineal de las 4 variables seleccionadas con la suficiente resolución y unos rangos más amplios debidos al citado desconocimiento, la experimentación se haría más lenta de lo que se pretendía.

Por ello, con el láser de fibra se eligió trabajar con pasos lineales, pero para el láser de vanadato se decidió trabajar con pasos logarítmicos. Esta idea obedece a un criterio de eficiencia de tiempos de experimentación, ya que el muestreo logarítmico permitió una identificación rápida de las magnitudes de los parámetros requeridos para el marcaje con este equipo.

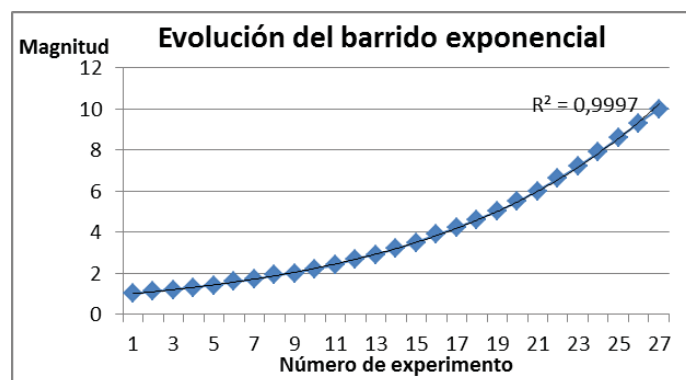


Figura 3.11. Ajuste exponencial de los puntos tomados para el barrido

Se tomaron dos dígitos significativos para aportar sencillez a la experimentación, manteniendo el ajuste logarítmico aun así.

Tabla 3-5. Evolución de los puntos tomados en el barrido

Valores tomados para el barrido exponencial (repetición al llegar a la base 10)																										
1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2	2,4	2,7	2,9	3,2	3,5	3,9	4,2	4,6	5	5,5	6	6,6	7,2	7,9	8,6	9,3	10

Tras una experimentación previa con el equipo para entender el funcionamiento del mismo y la forma en que afectaba la radiación al acero utilizado se decidieron los límites en los cuales se iba a explorar las 4 variables anteriores. A continuación vienen explicados los resultados de dicha experimentación:

1) Acerca de la velocidad de escaneo (V):

Se observó inicialmente que por encima de los 1250 mm/s el contraste de las líneas marcadas individualmente se tornaba muy bajo. Por debajo de los 300 mm/s los colores de las marcas se tornan verdosos y anaranjados.

2) Acerca de la frecuencia de deposición de impulsos (F):

Se observó inicialmente que por debajo de los 60 kHz los colores obtenidos distaban del negro buscado, tornándose grisáceos y verdosos. Por encima de los 250 kHz el marcaje pierde definición de color.

3) Acerca de la distancia entre líneas (H):

Dado que el ancho de una línea marcada con este equipo es de aproximadamente 115 micras se tomaron los límites entre el aproximadamente el 25% de este valor y el 100%. Se entiende que las líneas marcadas han de repasarse para lograr un contraste más definido de la línea y no se debería dejar espacios entre las líneas, ya que conllevaría a espacios "en blanco" que reduciría la intensidad global del color de conjunto marcado.

4) Acerca del número de rellenos (N):

Habitualmente con un solo relleno de un área se puede lograr el contraste requerido, sin embargo se consideró la posibilidad de aumentar el número de rellenos hasta 3 para provocar una deposición de energía más progresiva.

Tabla 3-6. Rangos elegidos para las 4 variables en la experimentación con el equipo Rofin PowerLine E25

Variable	Rango	Paso
V	100 mm/s -1700 mm/s	10%
F	10 kHz - 400 KHz	10%
H	35 μ m - 120 μ m	10%
N	1 - 3	1

Se ha dado en estas 4 variables una extensión del rango con respecto del inicialmente pensado por considerarse que las conclusiones de la experimentación previa resultan tan solo una aproximación al estudio y no reflejan los resultados absolutos del marcaje sobre el acero tratado.

Se identificó igual que para las soluciones 1a y 1b, Fragmentación de diseños extensos, un código con el que reconocer fácilmente los parámetros utilizados en el marcaje:

F(kHz).V(mm/s).H(μ m).N

3.3 Evaluación de la calidad de las marcas

Tal y como se explica en el capítulo 2 de esta memoria, Requerimientos del proceso, al principio del proyecto se definieron una serie de ensayos y evaluaciones a realizar sobre las marcas obtenidas de tal manera que se asegurara la calidad requerida para el proceso final de marcaje. Todos los ensayos que se exponen a continuación han sido llevados a cabo para las muestras marcadas con ambos equipos láser.

3.3.1 Pruebas de calidad de la TCD

Como ensayos de vida acelerada se propone desde la sección de lavavajillas una serie de pruebas o ensayos que simulen el entorno en el que se va a ver sometido la pieza del frontal del lavavajillas. Al conjunto de estos ensayos se le da el nombre de TCD (Technical Checking Directive). Tales ensayos consisten en varias pruebas de diferente carácter:

- 1) **Resistencia al ataque de disolvente:** la muestra se somete a un ensayo de 1000 ciclos de abrasión con un paño mojado en isopropanol con una presión al menos 1 kPa. En este caso se utiliza un abrasímetro lineal como el de la Figura 3.11. Si no se aprecian cambios en la imagen del resultado tras la prueba éste se puede tomar como válido.



Figura 3.12 Abrasímetro lineal utilizado

- 2) **Resistencia al ataque de productos de limpieza:** la muestra se somete a un ensayo de 48 horas en contacto con una pequeña cantidad de producto de limpieza bajo un vidrio de reloj. Esta forma de realiza el ensayo asegura que los productos de limpieza no se evaporarán con el paso de las horas.

A continuación se expone la lista de los productos de limpieza a los que se ensayaron las muestras:

- Don Limpio brisa marina
- Sidolin sin rayas al limón, marca Henkel
- Sidol, marca Henkel
- Limpiador de suelos, marca General
- Detergente para lavavajillas, marca Henkel
- Abrillantador, marca Calgonit
- Abrillantador, marca Somat
- Agente de limpieza basado en vinagre, marca Frosch
- Agente de limpieza basado en limón, marca Frosch
- Solución buffer (solución amortiguadora)

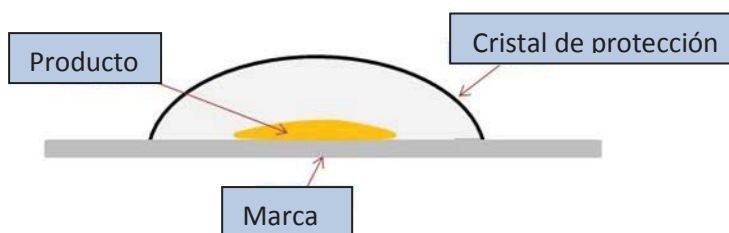


Figura 3.13. Esquema del procedimiento de ensayo

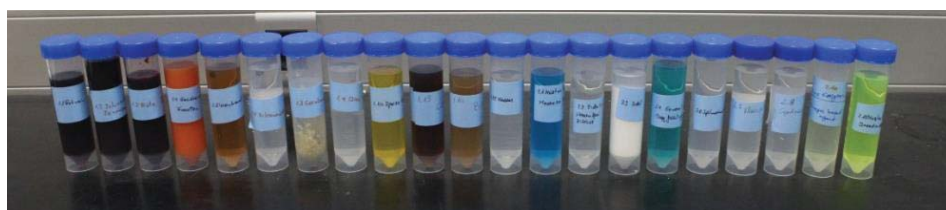


Figura 3.14. Probetas falcon con los productos de limpieza, y bebidas de los puntos 2) y 3) de la TCD

- 3) **Resistencia al ataque de manchas de comida y bebida:** la muestra se somete a un ensayo de 48 horas en contacto con una pequeña cantidad de comida o bebida bajo un vidrio de reloj de igual manera que con los productos de limpieza (Figura 3.12). Este ensayo simula el efecto que tienen sobre la decoración los posibles restos de alimentos que se depositen en el frontal del electrodoméstico.

A continuación se expone la lista de los productos a los que se sometieron las muestras:

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| ➤ Vino tinto | ➤ Agua saturada de sal de cocina |
| ➤ Zumo de grosella | ➤ Aceite de cocina vegetal |
| ➤ Zumo de remolacha | ➤ Grasa de cerdo |
| ➤ Papilla de patata | ➤ Mostaza |
| ➤ Mantequilla | ➤ Coca-Cola |
| ➤ Brandy | ➤ Cerveza |
| ➤ Ácido cítrico al 10% | ➤ Agua |
| ➤ Pulpa de cebolla | |

- 4) **Resistencia al vapor:** este ensayo simula de una forma acelerada el fenómeno que se da cuando se abre la puerta de un lavavajillas tras el fin de un programa. La salida del vapor desde el interior del electrodoméstico se simula en este ensayo con una cámara de vapor. Las muestras se someten en dicha cámara a la presencia de una atmósfera saturada en agua a 80°C durante 5 horas.



Figura 3.15. Cámara de vapor de la sección de lavavajillas

La forma de evaluar los resultados de las anteriores pruebas (a, b, c y d) consiste en la inspección visual de las muestras ensayadas. El criterio para considerar un resultado como satisfactorio consiste en no apreciar cambios o ser éstos poco significativos. En caso de duda se postula el criterio de $\Delta E \leq 1$ siendo $\Delta E = 1$ el mínimo cambio de color apreciable por el ojo humano.

5) **Test de arañados y adhesión:** la finalidad de este ensayo consiste en comprobar si la decoración marcada resiste arañazos y otras sollicitaciones similares y simular el estrés o los impactos a los que se va a someter la pieza y su decoración en su uso habitual. Consiste en dos partes:

- i. Corte: la muestra se somete a dos cortes continuados perpendiculares mediante una cuchilla de cinco dientes de acero que provocan surcos paralelos en la decoración.



- ii. Adhesión: El ensayo se realiza fijando una cinta adhesiva sobre la superficie a ensayar y retirándola a continuación.

Se debe utilizar una cinta adhesiva con una fuerza adhesiva de entre 6 N y 10 N por cada 25 mm de anchura. En este caso se empleó una cinta adhesiva Tesafilm® 4104 PVC transparente con especificación 2.5 N/cm, que son exactamente 6,25 N/25 mm.



Figura 3.16. Cinta adhesiva Tesafilm® 4104 PVC transparente

Esta segunda parte del ensayo tiene especial significado en decoraciones de tinta, ya que la adhesión es un factor crítico. En nuestro caso, al ser la misma superficie del metal la que se transforma en decoración la adhesión es perfecta.

La forma de evaluar el resultado de esta prueba consiste en una inspección visual y la comparación del estado de las muestras con unos patrones establecidos (Figura 3.16). De esta forma se refleja cuanta superficie de la decoración ha sido levantada en la segunda parte del ensayo. Únicamente si la muestra sufre daños que se puedan incluir en los niveles 0 y 1 será considerado el resultado como apto.







Clasificación	Descripción	Aspecto de la superficie de la zona cuadrículada con presencia de descamación (ejemplo para 6 incisiones paralelas)
0	Los bordes de las incisiones son perfectamente lisos: ningún cuadrado del enrejado se ha desprendido	
1	Se observan ligeros desprendimientos del recubrimiento en las intersecciones de las incisiones. El área de enrejado afectada no es superior al 5%.	
2	Se observan desprendimientos del recubrimiento en los bordes y/o en las intersecciones de las incisiones. El área de enrejado afectada es mayor del 5% pero no mayor del 15%.	
3	El recubrimiento se ha desprendido parcial o totalmente en grandes bandas a lo largo de los bordes de las incisiones y/o se ha desprendido parcial o totalmente en distintas partes de los cuadrados. El área de enrejado afectada es mayor del 15% pero no mayor del 35%.	
4	El recubrimiento se ha desprendido en grandes bandas a lo largo de los bordes de las incisiones y/o algunos cuadrados se han desprendido parcial o totalmente. El área de enrejado afectada es mayor del 35% pero no mayor del 65%.	
5	Se observa un grado de desprendimiento superior al de la clasificación 4.	

Figura 3.17. Calificación de los resultados del ensayo de adhesión

De todos los ensayos descritos en esta sección de Pruebas de calidad de la TCD se seleccionaron en la fase de planificación del proyecto aquellos que pudieran ser más dañinos para nuestras marcas, de manera que se pudieran considerar como los más críticos y basar nuestra experimentación en la superación de estos ensayos.

3.3.2 Selección de las pruebas más críticas de la TCD

Considerándose que las formas más típicas de fallo del acero inoxidable son la corrosión y las sollicitaciones mecánicas y que la pieza está diseñada para no tener que soportar cargas mecánicas se estudió tan solo la posibilidad del fallo a corrosión.

A continuación se explican las formas de corrosión que serían más acusadas en nuestro metal marcado con láser. Las formas más típicas de corrosión del acero inoxidable [2] son:

- 1. Corrosión General:** Este tipo de corrosión produce un desgaste homogéneo de la superficie de la pieza. Este tipo de corrosión solo sucede cuando un ácido fuerte entra en contacto con la superficie del acero.

Considerando que algunos de los productos con los que se ensayan las muestras son ácidos se consideró que posiblemente nos encontraríamos con este tipo de corrosión.

- 2. Picaduras:** El caso de las picaduras se da bajo ciertas condiciones, particularmente en medios con alta concentración de cloruros (como el cloruro sódico del agua del mar), con moderadas temperaturas y acentuado por un pH bajo. Se trata de un tipo de corrosión muy localizada y puede provocar perforaciones en las piezas de acero.

El número PRE (Pitting Resistance Equivalent number) proporciona una indicación acerca de la resistencia a las picaduras de un determinado acero. Valores por encima de 32 significan una buena resistencia al agua del mar.

Considerando la composición de nuestro acero inoxidable 430 (Anexo C. Propiedades del acero Inoxidable 430) el PRE equivalente obtenido es de entre 16 y 18 se esperó que éste fuera un posible modo de corrosión en nuestro acero.

$$PREN = 1 \times \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N = 1 \cdot \%Cr + 3.3 \cdot 0 + 16 \cdot 0 = \%Cr = [16,18]$$

3. **Corrosión Intergranular:** La corrosión intergranular es un tipo de corrosión relativamente rápida y localizada asociada a una microestructura defectuosa conocida como los precipitados de carburos. Cuando los aceros ferríticos se exponen durante un cierto tiempo a temperaturas superiores a los 900°C, o cuando el acero ha sido calentado a temperaturas mayores y se le ha dejado enfriar a ese rango de temperaturas a un ritmo relativamente bajo, como ocurre en las soldaduras o en el enfriamiento en el aire tras un annealing, el cromo y el carbono del acero se combinan formando precipitados de carburos de cromo en las fronteras de grano. La formación de estos carburos merma la concentración de cromo de los granos adyacentes, reduciendo su resistencia a la corrosión, propiciando la corrosión del acero en las fronteras de grano. A los aceros en estas condiciones se les llama sensibilizados.

Dado que es precisamente annealing lo que provocamos en la superficie del acero, se consideró que era probable sufrir este tipo de defecto en nuestras muestras.

4. **Erosión – corrosión:** Los efectos combinados de la corrosión y la erosión se potencian cuando la velocidad del fluido erosivo es elevada y cuando se produce un desgaste de la superficie debido a la abrasión de las partículas suspendidas en el medio.

Siendo que nuestra pieza no se encontrará en contacto con medios fluidos erosivos a altas velocidades se consideró que los efectos de este tipo de corrosión serían despreciables.

5. **Corrosión por fatiga:** Bajo el efecto combinado de tensión y ciertos ambientes corrosivos el acero inoxidable puede sufrir este tipo de corrosión muy rápida y severamente.

Para el presente caso no se ha dado el efecto combinado de tensión y corrosión por lo que no se consideró como un modo posible de corrosión en nuestras muestras.

6. **Corrosión por temperatura:** Con el aumento de la temperatura, la contribución del efecto de los cloruros aumenta mientras que el efecto del hidrógeno disminuye debido al aumento de movilidad en la matriz ferrítica. El efecto neto resultante es el más agresivo en el rango de temperaturas de entre 60-100°C.

Dado que en los ensayos las muestras debían ser ensayadas en este rango de temperaturas se determinó que el efecto sería significativo.

7. **Corrosión fisurante (crevice):** Este tipo de corrosión es muy parecida a la corrosión por picadura. En este caso el agente corrosivo debe encontrarse en una fisura o rendija en la que producirá la corrosión, por lo que ésta debe ser lo suficientemente ancha para permitir la entrada del agente y lo suficientemente estrecha para asegurar que el agente corrosivo permanece estancado.

Dado que este tipo de corrosión sucede esencialmente en grietas pequeñas y en nuestra pieza no se consideró la posibilidad de tener este tipo de defecto se consideró que no sería relevante, aunque por su naturaleza similar a las picaduras pueda darse en el material.

Conociendo ya las formas de corrosión más típicas del acero inoxidable se evaluó la naturaleza de los diferentes ensayos descritos en el apartado 3.3.1 Pruebas de calidad de la TCD, y se concluyó que los ensayos más críticos serían:

- | | |
|---|------------------------------|
| ➤ Test de vapor: | Corrosión por temperatura |
| ➤ Resistencia al ataque de gota saturada en sal: | Corrosión por picadura |
| ➤ Resistencia al ataque de ácido cítrico al 10%: | Corrosión general por pH 1.4 |
| ➤ Resistencia a agente limpiador basado en vinagre: | Corrosión general por pH 1.8 |

Se incluyeron dos productos ácidos en vez de uno representativo por apreciarse que tenían comportamientos diferentes en las marcas, siendo con algunas más agresivo el ácido cítrico y con otras más el acético.

3.3.3 Evaluación de la calidad estética

Consideramos en este bloque que nuestro objetivo estético es provocar una marca lo más similar posible a la provocada con los métodos de serigrafiado y tampografiado.

De esta manera definimos 3 aspectos diferentes de la calidad estética que evaluamos en cada una de las marcas realizadas:

- a) **La intensidad del color:** con la ayuda de un colorímetro se han analizado las muestras obtenidas en coordenadas Lab (espacio CIELAB). Considerando que cuanto menor la coordenada L, más oscuro se torna un color, se ha considerado un objetivo de obtener la menor coordenada L posible.

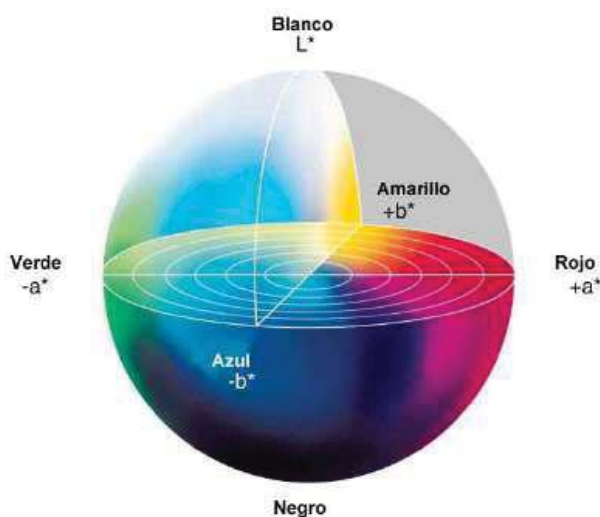


Figura 3.18. Esfera de color CIELAB

Para dar una idea al lector de los colores obtenidos en la experimentación mostramos en la Figura 3.18 tres ejemplos de color en coordenadas Lab, con 4 valores L diferentes:



Figura 3.19. Ejemplos de colores con $a=0$, $b=0$ y $L=0, 5, 10, 15, 20, 25$ y 30 .

Para la selección de las marcas realizadas por el láser se tomó un umbral de 25 en la coordenada L, considerándose el mínimo contraste que se puede tolerar en la decoración. Este valor fue acordado con los diseñadores del grupo y se estima que aunque es un contraste inferior al de la serigrafía es aun así satisfactorio.

Las coordenadas a y b no se han registrado por ser siempre cercanas al 0, considerándose que el color de las muestras evaluadas se encuentra en la escala de grises.

- b) **La homogeneidad del color:** se ha buscado a lo largo del proyecto que las marcas realizadas tengan siempre un color homogéneo, que no varíe con el ángulo desde el que se miren ni con el grosor de los diseños marcados. Se definió por tanto una calificación de la homogeneidad del color igual al número de colores diferentes identificables en una marca, buscándose siempre que esa calificación fuera la menor posible.
- c) **Los reflejos:** una decoración por serigrafía se considera en nuestro caso el ejemplo de una decoración mate. Definimos por tanto una calificación de los reflejos tal que sea igual al número de reflejos metálicos detectados en la muestra al observarla desde 0° , 20° , 40° , 60° y 80° con unas condiciones lumínicas de 700 ± 100 lux de iluminación superior a 30 cm del ojo humano.



Figura 3.20 Ejemplo de marca con numerosos reflejos metálicos



Figura 3.21. Ejemplo de marca con escasos reflejos metálicos

3.3.4 Procedimiento de evaluación de las muestras

Tras considerar la dificultad de cada evaluación y el tiempo que cada una consumiría se eligió el siguiente orden para la consecución de los ensayos:

1) Evaluación de calidad estética:

- a. **Descarte visual:** De todas las marcas inicialmente obtenidas se seleccionaron únicamente las visualmente similares a una decoración por serigrafía, mate y oscura.
- b. **Evaluación de color:** De todos los resultados obtenidos solo se seleccionaron para los ensayos del bloque 2 de pruebas de calidad aquellos que cumplieron las siguientes condiciones:
 - i. Calificación 0 en reflejos, calificación 2 o 3 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.
 - ii. Calificación 0 o 1 en reflejos, calificación 2 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.

2) Pruebas de calidad de la TCD:

a. **Ensayos críticos de resistencia a la corrosión:**

- i. Test de vapor
- ii. Resistencia al ataque de gota saturada en sal
- iii. Resistencia al ataque de ácido cítrico al 10%
- iv. Resistencia a agente limpiador basado en vinagre

b. **Resto de ensayos de la TCD**

El orden seguido obedece una cuestión de eficiencia en el método de evaluación de la calidad. La evaluación de la calidad estética supone un tiempo de ensayo de aproximadamente 1 minuto para cada muestra mientras que cada ensayo de la TCD dura de entre 1 y 48 horas para cada muestra.

El bloque 1, Evaluación de la calidad estética, supone un descarte de la mayoría de las marcas obtenidas. Una inspección visual permite la elección de las marcas de mejor apariencia al ojo humano y un análisis del color permite la selección de las más oscuras. El bloque 2 supone un segundo descarte con las pruebas más críticas de nuestra TCD y una comprobación con el resto de las pruebas de la TCD

En la Figura 3.21 se esquematiza el orden de los ensayos, mostrando el estado del que se parte y la acción que se lleva a cabo en cada uno de los pasos.

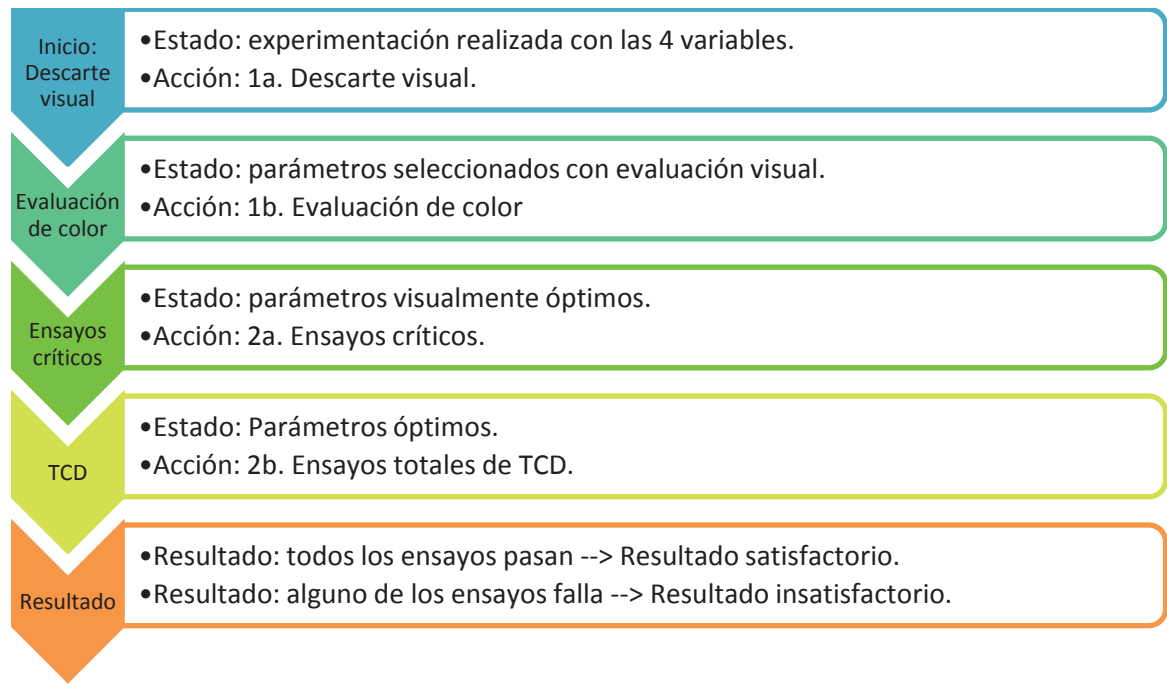


Figura 3.22. Procedimiento de la evaluación de las muestras

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos al efectuar todos los ensayos explicados en el capítulo anterior. Se separarán los resultados por equipo utilizado para mayor sencillez de la exposición de datos. Por tanto:

- El equipo TruMark 5020 corresponderá a las soluciones 1a y 1b, Fragmentación de diseños extensos.
- El equipo Rofin PowerLine E25 corresponderá a la solución 2, Uso de un sistema óptico no estándar.

4.1 Resultados de la experimentación con el equipo TruMark Station 5020

Tras haberse realizado el barrido planeado de las 4 variables principales con el láser de fibra TruMark Station 5020 se muestra a continuación, a través de todo el proceso de la experimentación y evaluación, los datos obtenidos en cada etapa.

Tras la experimentación se obtuvo el siguiente volumen de marcas:

- 22 Velocidades diferentes
 - 10 Frecuencias diferentes
 - 10 interlineados diferentes
 - 3 Repeticiones
- } 6600 marcas diferentes

Inicio:
Descarte
visual

- Estado: experimentación realizada con las 4 variables.
- Acción: 1a. Descarte visual.

De todas las marcas realizadas se seleccionaron como visualmente buenas las siguientes:

- | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| ➤ 175.600.40.2 | ➤ 225.800.40.2 | ➤ 250.600.50.2 |
| ➤ 175.500.40.2 | ➤ 225.700.50.2 | ➤ 250.700.50.2 |
| ➤ 175.700.40.2 | ➤ 225.600.60.2 | ➤ 250.600.60.2 |
| ➤ 175.700.60.2 | ➤ 200.500.30.1 | ➤ 250.700.60.2 |
| ➤ 175.800.50.2 | ➤ 225.900.40.2 | ➤ 250.900.40.2 |
| ➤ 200.500.60.2 | ➤ 225.800.50.2 | ➤ 250.800.50.2 |
| ➤ 175.500.70.2 | ➤ 225.700.60.2 | ➤ 250.1000.40.2 |
| ➤ 225.600.50.2 | ➤ 225.600.70.2 | ➤ 250.800.60.2 |
| ➤ 200.800.50.2 | ➤ 225.1000.40.2 | |
| ➤ 200.1000.40.2 | ➤ 225.700.70.2 | |

Tal y como se ha definido en la sección 3.1.2, Exploración de las variables, se debe interpretar estos códigos como: Frecuencia(kHz).Velocidad(mm/s).Interlineado(μ m).Repeticiones

Evaluación
de color

- Estado: parámetros seleccionados con evaluación visual.
- Acción: 1b. Evaluación de color

Tras medirse sus coordenadas de color y evaluar su homogeneidad y reflejos se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 4-1. Evaluación de los parámetros elegidos inicialmente.

Parámetros	Coordenada L	Homogeneidad	Reflejos
175.600.40.2	7,5	2	1
175.500.40.2	8	2	1
175.700.40.2	10,8	2	1
175.700.60.2	17,5	3	0
175.800.50.2	19,1	3	0
200.500.60.2	13,1	2	1
175.500.70.2	13,6	3	1
225.600.50.2	13,8	3	1
200.800.50.2	18,6	3	0
200.1000.40.2	22,7	2	1
225.800.40.2	11,7	2	1
225.700.50.2	12,6	2	1
225.600.60.2	14,25	2	1
200.500.30.1	16,9	3	1
225.900.40.2	16,4	2	1
225.800.50.2	16,7	2	0
225.700.60.2	17,3	2	0
225.600.70.2	18,6	2	0
225.1000.40.2	20,8	2	1
225.700.70.2	27,5	2	0
250.600.50.2	15,7	2	1
250.700.50.2	16,6	2	1
250.600.60.2	17,1	2	1
250.700.60.2	20,7	2	0
250.900.40.2	21,9	2	1
250.800.50.2	23,6	2	0
250.1000.40.2	28	2	0
250.800.60.2	28,2	3	0

Capítulo 4. Resultados

Fueron seleccionadas para las siguientes pruebas todas aquellas marcas que cumplieron una de las siguientes condiciones:

1. Calificación 0 en reflejos, calificación 2 o 3 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.
2. Calificación 0 o 1 en reflejos, calificación 2 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.

**Ensayos
críticos**

- Estado: parámetros visualmente óptimos.
- Acción: 2a. Ensayos críticos.

Pruebas críticas realizadas en los parámetros seleccionados:

Tabla 4-2. Pruebas críticas de la TCD realizadas a los parámetros seleccionados en el bloque de evaluación estética

Parametros	Coord L	Homogeneidad	Reflejos	Test vapor	Test gota salada	Ácido cítrico 10%	Agente pH 1,8
175.600.40.2	7,5	2	1	OK	OK	NOK	NOK
175.500.40.2	8	2	1	OK	NOK	NOK	NOK
175.700.40.2	10,8	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
225.800.40.2	11,7	2	1	OK	OK	NOK	NOK
225.700.50.2	12,6	2	1	OK	OK	NOK	NOK
200.500.60.2	13,1	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
225.600.60.2	16,4	2	1	OK	OK	OK	OK
250.600.50.2	16,6	2	1	OK	OK	NOK	NOK
225.900.40.2	16,7	2	0	OK	NOK	NOK	NOK
250.700.50.2	17,1	2	1	OK	OK	NOK	NOK
225.800.50.2	17,3	2	0	OK	NOK	NOK	NOK
250.600.60.2	18,6	3	0	NOK	NOK	NOK	NOK
225.700.60.2	18,6	2	0	OK	NOK	NOK	NOK
175.700.60.2	19,1	3	0	OK	OK	NOK	NOK
200.800.50.2	20,7	2	0	OK	NOK	NOK	NOK
225.600.70.2	20,8	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
175.800.50.2	21,9	2	1	OK	OK	NOK	NOK
250.700.60.2	22,7	2	1	OK	OK	OK	OK
225.1000.40.2	23,6	2	0	OK	NOK	NOK	NOK
250.900.40.2	21,9	2	1	OK	NOK	NOK	NOK
200.1000.40.2	22,7	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
250.800.50.2	23,6	2	0	NOK	NOK	NOK	NOK

2 parámetros elegidos por pasar todos los ensayos y poseer cualidades visuales apropiadas:

- ✓ 250.700.60.2
- ✓ 225.600.60.2

TCD

- Estado: Parámetros óptimos.
- Acción: 2b. Ensayos totales de TCD.

Dichos 2 parámetros óptimos fueron ensayados en el resto de las pruebas de la TCD:

Tabla 4-3. Totalidad de resultados de ensayos de color y de la TCD realizados sobre los 2 parámetros seleccionados

Tipo de ensayo	Ensayo	250.700.60.2	225.600.60.
		Evaluación	Evaluación
Color	Coordenada L	22,7	16,4
	Homogeneidad de color	2	2
	Reflejos	1	1
Resistencia a la corrosión	- Generales -		
	Disolvente	OK	OK
	Test de Vapor	OK	OK
	- Productos de limpieza -		
	Don Limpio brisa marina	OK	OK
	Sidolin sin rayas al limón, marca Henkel	OK	OK
	Sidol, marca Henkel	OK	OK
	Limpiador de suelos, marca General	OK	OK
	Detergente para lavavajillas, marca Henkel	OK	OK
	Abrillantador, marca Calgonit	OK	OK
	Abrillantador, marca Somat	OK	OK
	Agente de limpieza basado en vinagre, marca Frosch	OK	OK
	Agente de limpieza basado en limón, marca Frosch	OK	OK
	Solución buffer	OK	OK
	- Manchas de comida y bebida -		
	Vino tinto	OK	OK
	Zumo de grosella	OK	OK
	Zumo de remolacha	OK	OK
	Papilla de patata	OK	OK
	Mantequilla	OK	OK
	Brandy	OK	OK
	Ácido cítrico al 10%	OK	OK
	Pulpa de cebolla	OK	OK
	Agua saturada de sal	OK	OK
	Aceite de cocina	OK	OK
	Grasa de cerdo	OK	OK
	Mostaza	OK	OK
	Cocacola	OK	OK
	Cerveza	OK	OK
	Agua	OK	OK
R. Mecánica	Test de arañazos y adhesión	OK	OK

En el Anexo E. Resultados de la experimentación con el equipo TruMark 5020, vienen detallados los resultados de los ensayos realizados, así como fotografías de la apariencia de la marca tras el test.

Resultado

- Resultado: todos los ensayos pasan --> Resultado satisfactorio.
- Resultado: alguno de los ensayos falla --> Resultado insatisfactorio.

El resultado final de la experimentación con el equipo TruMark 5020 induce a pensar que se puede implementar para la aplicación para la que se ha trabajado en este proyecto. Por tanto, las soluciones que podrían llevarse a cabo, tal y como se explica en el capítulo 2 de esta memoria serían:

- 1a) Fragmentación de diseños extensos.
- 1b) Solapamiento de diseños extensos.

Ambos parámetros de marcaje resultan satisfactorios para ambas soluciones:

✓ 250.700.60.2:

- Frecuencia de deposición de impulsos: 250 kHz
- Velocidad de escaneo: 700 mm/s
- Interlineado: 60 μm
- Número de repeticiones: 2

✓ 225.600.60.2:

- Frecuencia de deposición de impulsos: 250 kHz
- Velocidad de escaneo: 700 mm/s
- Interlineado: 60 μm
- Número de repeticiones: 2

Cabe destacar, sin embargo que se prefiere el uso del parámetro 225.600.60.2 por su mayor contraste con respecto al parámetro 250.700.60.2 (Figura 4.1. Frontal de lavavajillas marcado con parámetro 225.600.60.2 con el equipo TruMark 5020).



Figura 4.1. Frontal de lavavajillas marcado con parámetro 225.600.60.2 con el equipo TruMark 5020

4.2 Resultados de la experimentación con el equipo Rofin PowerLine E25

Tras haberse realizado el barrido planeado de las 4 variables principales con el láser de vanadato Rofin PowerLine E25 se muestra a continuación, a través de todo el proceso de la experimentación y evaluación, los datos obtenidos en cada etapa.

Tras la experimentación se obtuvo el siguiente volumen de marcas:

- 17 Velocidades diferentes
 - 22 Frecuencias diferentes
 - 8 interlineados diferentes
 - 3 Repeticiones
- } 8976 marcas diferentes

Inicio:
Descarte
visual

- Estado: experimentación realizada con las 4 variables.
- Acción: 1a. Descarte visual.

De todas las marcas realizadas se seleccionaron como visualmente buenas las siguientes:

- | | | |
|----------------|----------------|-----------------|
| ➤ 75.500.72.2 | ➤ 70.850.42.2 | ➤ 90.380.100.3 |
| ➤ 95.550.42.2 | ➤ 65.420.86.2 | ➤ 90.790.50.3 |
| ➤ 65.600.60.2 | ➤ 60.260.86.1 | ➤ 90.205.72.1 |
| ➤ 66.380.86.2 | ➤ 66.320.120.2 | ➤ 77.150.120.1 |
| ➤ 60.650.42.2 | ➤ 35.1250.35.2 | ➤ 33.850.50.2 |
| ➤ 65.650.50.2 | ➤ 65.350.60.1 | ➤ 22.200.86.1 |
| ➤ 66.380.120.3 | ➤ 72.220.86.1 | ➤ 20.220.60.1 |
| ➤ 79.650.72.3 | ➤ 90.650.60.2 | ➤ 26.170.120.1 |
| ➤ 66.650.60.3 | ➤ 75.350.72.1 | ➤ 32.180.120.1 |
| ➤ 77.350.100.2 | ➤ 65.300.72.1 | ➤ 66.790.72.3 |
| ➤ 65.380.50.1 | ➤ 65.260.86.1 | ➤ 100.200.86.1 |
| ➤ 66.420.120.3 | ➤ 90.380.86.2 | ➤ 20.200.72.1 |
| ➤ 90.540.86.3 | ➤ 79.420.100.2 | ➤ 100.190.100.1 |
| ➤ 66.380.100.2 | ➤ 79.860.50.3 | ➤ 65.450.100.3 |
| ➤ 75.450.50.1 | ➤ 77.540.86.3 | ➤ 100.200.100.1 |
| ➤ 86.790.50.3 | ➤ 75.420.50.2 | ➤ 60.200.100.1 |
| ➤ 77.450.86.3 | ➤ 110.320.86.2 | |
| ➤ 85.460.42.1 | | |

Tal y como se ha definido en la sección 3.1.2, Exploración de las variables, se debe interpretar estos códigos como: Frecuencia(kHz).Velocidad(mm/s).Interlineado(μm).Repeticiones

Evaluación de color

- Estado: parámetros seleccionados con evaluación visual.
- Acción: 1b. Evaluación de color

Tras medirse sus coordenadas de color y evaluar su homogeneidad y reflejos se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 4-4. Evaluación de los parámetros elegidos inicialmente.

Parámetros	Coordenada L	Homogeneidad	Reflejos	Parámetros	Coordenada L	Homogeneidad	Reflejos
75.500.72.2	16,1	2	1	75.350.72.1	25,03	2	1
95.550.42.2	16,6	3	1	65.300.72.1	25,42	3	1
65.600.60.2	18,2	2	1	65.260.86.1	25,8	2	0
66.380.86.2	18,9	3	1	90.380.86.2	25,9	2	1
60.650.42.2	19	2	1	79.420.100.2	26	2	0
65.650.50.2	19	2	1	79.860.50.3	26,3	3	0
66.380.120.3	19,1	2	1	77.540.86.3	26,6	3	1
79.650.72.3	19,5	3	1	75.420.50.2	27,23	2	1
66.650.60.3	19,7	2	1	110.320.86.2	27,8	3	1
77.350.100.2	19,7	2	1	90.380.100.3	27,9	2	0
65.380.50.1	20,4	2	0	90.790.50.3	28	2	1
66.420.120.3	21,6	2	1	90.205.72.1	28,08	2	0
90.540.86.3	22,3	3	0	77.150.120.1	29,1	2	1
66.380.100.2	22,3	3	1	33.850.50.2	29,99	2	1
75.450.50.1	22,6	3	0	22.200.86.1	30	3	1
86.790.50.3	22,8	2	1	20.220.60.1	30,99	3	0
77.450.86.3	22,8	3	1	26.170.120.1	31,2	2	0
85.460.42.1	23,55	2	0	32.180.120.1	31,2	3	1
70.850.42.2	23,74	2	1	66.790.72.3	31,3	2	0
65.420.86.2	23,8	2	1	100.200.86.1	32,1	2	0
60.260.86.1	23,9	2	1	20.200.72.1	32,4	2	1
66.320.120.2	23,9	2	0	100.190.100.1	32,8	2	0
35.1250.35.2	24,28	3	1	65.450.100.3	34,4	3	1
65.350.60.1	24,5	2	1	100.200.100.1	35,3	2	1
72.220.86.1	24,6	2	0	60.200.100.1	44,1	2	1
90.650.60.2	24,96	3	1				

TCD

- Estado: Parámetros óptimos.
- Acción: 2b. Ensayos totales de TCD.

Fueron seleccionadas para las siguientes pruebas todas aquellas marcas que cumplieron lo siguiente:

1. Calificación 0 en reflejos, calificación 2 o 3 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.
2. Calificación 0 o 1 en reflejos, calificación 2 en homogeneidad y coordenada L menor que 25.

Pruebas críticas realizadas en los parámetros seleccionados:

Tabla 4-5. Pruebas críticas de la TCD realizadas a los parámetros seleccionados en el bloque de evaluación estética

Parametros	Coord L	Homogeneidad	Reflejos	Test vapor	Test gota salada	Ácido cítrico 10%	Agente pH 1,8
75.500.72.2	16,1	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
65.600.60.2	18,2	2	1	OK	NOK	NOK	NOK
60.650.42.2	19	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
65.650.50.2	19	2	1	NOK	OK	NOK	NOK
66.380.120.3	19,1	2	1	OK	OK	NOK	NOK
66.650.60.3	19,7	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
77.350.100.2	19,7	2	1	OK	OK	NOK	NOK
65.380.50.1	20,4	2	0	NOK	NOK	NOK	NOK
66.420.120.3	21,6	2	1	OK	OK	NOK	NOK
75.450.50.1	22,6	3	0	NOK	NOK	NOK	NOK
86.790.50.3	22,8	2	1	OK	NOK	NOK	NOK
85.460.42.1	23,55	2	0	NOK	NOK	NOK	NOK
70.850.42.2	23,74	2	1	OK	NOK	NOK	NOK
65.420.86.2	23,8	2	1	OK	OK	NOK	NOK
60.260.86.1	23,9	2	1	NOK	NOK	NOK	NOK
66.320.120.2	23,9	2	0	NOK	NOK	NOK	NOK
65.350.60.1	24,5	2	1	OK	OK	NOK	NOK
72.220.86.1	24,6	2	0	OK	NOK	NOK	NOK

Llegado a este punto de la evaluación de la calidad de las marcas realizadas con el equipo Rofin PowerLine E25 se decidió no seguir adelante debido no se consiguió superar las pruebas con agentes ácidos.

Resultado

- Resultado: todos los ensayos pasan. Resultado satisfactorio
- Resultados: alguno de los ensayos falla. Resultado insatisfactorio

Dado que no se pudo asegurar la calidad de las marcas desde el punto de vista de resistencia a la corrosión se tomó por insatisfactorio y se abandonó la experimentación con este equipo. Por tanto, la 2ª solución propuesta en el capítulo 2 de esta memoria, “Uso de un sistema óptico no estándar”, no podrá ser realizada.

4.3 Resultados científicos

En este apartado se explican las conclusiones a las que se ha llegado acerca de la naturaleza de las marcas realizadas y la interacción entre la radiación láser y el material tratado.

4.3.1 Conclusiones relativas a las marcas

En el apartado 3.3.2 Selección de las pruebas más críticas de la TCD, se evaluaron las formas más típicas de corrosión en los aceros inoxidable. En este apartado resumimos los efectos observados en las marcas al ser ensayadas debido a las formas de corrosión citadas:

1) Corrosión general:

- a. **Causa:** Ataques de ácidos que causan un desgaste generalizado.
- b. **Observación:** Los productos basados en ácidos acéticos o cítricos atacaron de forma agresiva y uniforme a la marca, aunque no de una manera perceptible al material base. Los resultados han sido en múltiples casos la desaparición casi completa de la marca, dejando tan solo un brillo metálico.



Figura 4.2. Ejemplo de la desaparición de una marca en la zona afectada por el medio ácido

2) Picaduras:

- a. **Causa:** Ataque local concentrado de iones cloruro presentes en agua salada.
- b. **Observación:** La prueba de gota de agua saturada en sal resulta muy agresiva para la mayoría de las marcas, unas veces provocando puntos de corrosión concentrados, picaduras, y otras eliminando la marca, reduciendo notablemente su contraste.



Figura 4.3. Ejemplo de marca afectada por picaduras tras test de gota salada

3) Corrosión Intergranular:

- a. **Causa:** Debilitamiento de las fronteras de grano causada por la formación de precipitados al calentarse el acero a temperaturas de 900°C.
- b. **Observación:** se constata para todos los ensayos que las marcas realizadas resultan más débiles que el sustrato base, en relación a la resistencia a corrosión. Una de las causas por las que se cree que este hecho podría darse sería por la formación de precipitados intergranulares, aunque por falta de datos analíticos no se puede afirmar con rotundidad.

4) Corrosión por temperatura

- a. **Causa:** Efecto combinado de la debilitación por penetración de H^2 y el ataque de cloruros en el rango de entre los 60-100°C.
- b. **Observación:** El test realizado con vapor a 80°C produce en muchos casos una corrosión en forma de picaduras. Se relaciona por tanto a la mayor debilidad del acero en el rango de 60-100°C.



Figura 4.4 Ejemplo de corrosión de marcas tras test de vapor

4.3.2 Conclusiones relativas a la interacción láser-material

Tras la obtención de todos los resultados de calidad estética de las marcas realizadas con ambos equipos se pretendió utilizar dichos datos para extraer relaciones entre variables internas del láser y resultados medibles.

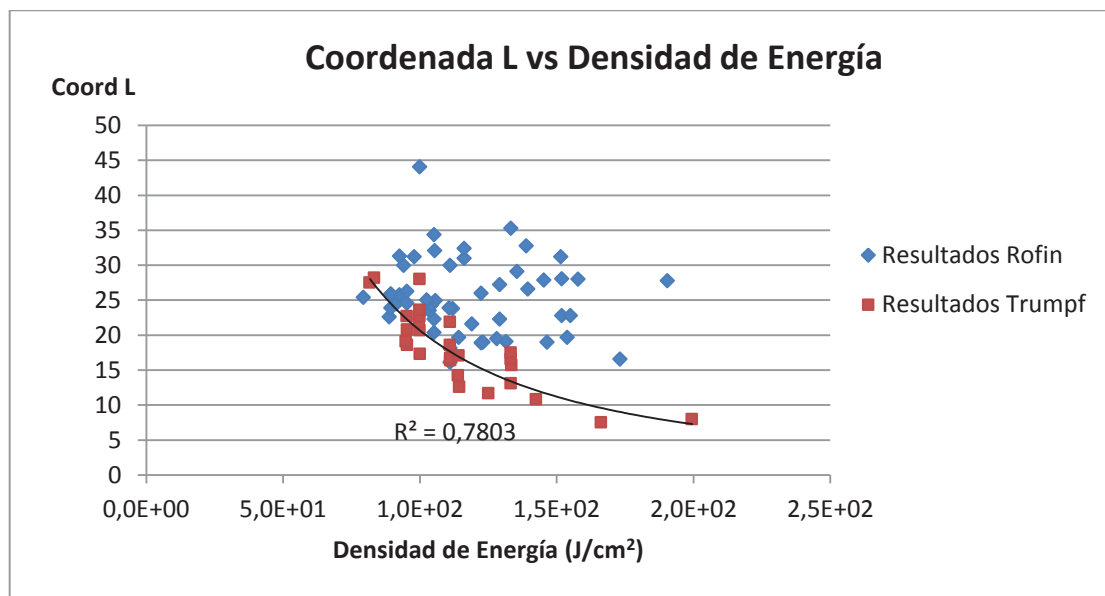
Como resultado seleccionado para evaluar su relación con otras variables se tomó la coordenada L de las marcas seleccionadas en la primera selección visual, de manera que los análisis han sido realizados considerando tan solo las marcas visualmente similares a la serigrafía.

Como variables de marcaje láser se quiso trabajar con variables más globales, que evaluaran el marcaje en su conjunto, y no solo a tramos, como habría sido evaluar la dependencia con respecto de la velocidad, la frecuencia o el tiempo de pulso. En el Anexo F. Tablas de estudios de correlación, se muestran los datos de las diferentes variables estudiadas.

Densidad de Energía

Se definió para tal fin la variable densidad de energía depositada como representativa del total de energía depositada por unidad de área. Esta variable contabiliza la energía total proyectada al material multiplicando el número de impulsos por unidad de área por la energía de cada pulso:

$$\text{Densidad de Energía} = \frac{\text{Número de impulsos}}{\text{cm}^2} \cdot \text{Energía de pulso} = \frac{F \cdot N}{V \cdot H} \cdot E_p$$



Gráfica 4.1 Representación de la dependencia de la coordenada L de color con respecto de la densidad de energía

Tabla 4-6. Media y desviación típica de los valores de la densidad de energía para ambos equipos

	Densidad de Energía (J/cm²)	
	Trumpf	Rofin
Media	114.3	119.1
Desviación estándar	25.29	24.42

Si bien para los valores de la densidad e energía obtenidos con el equipo Rofin no se puede deducir ninguna tendencia clara, para los valores obtenidos con el equipo TruMark se aprecia una tendencia decreciente de la coordenada L con el aumento de la densidad de energía.

Esta tendencia se ve pronunciada por dos datos anómalos de densidad de energía especialmente alta que no constituyen una población suficientemente elevada de densidad de energía alta como para afirmar que tal tendencia se extiende hasta ese rango. Sin embargo aun sin este par de datos, la tendencia descendiente se sigue observando.

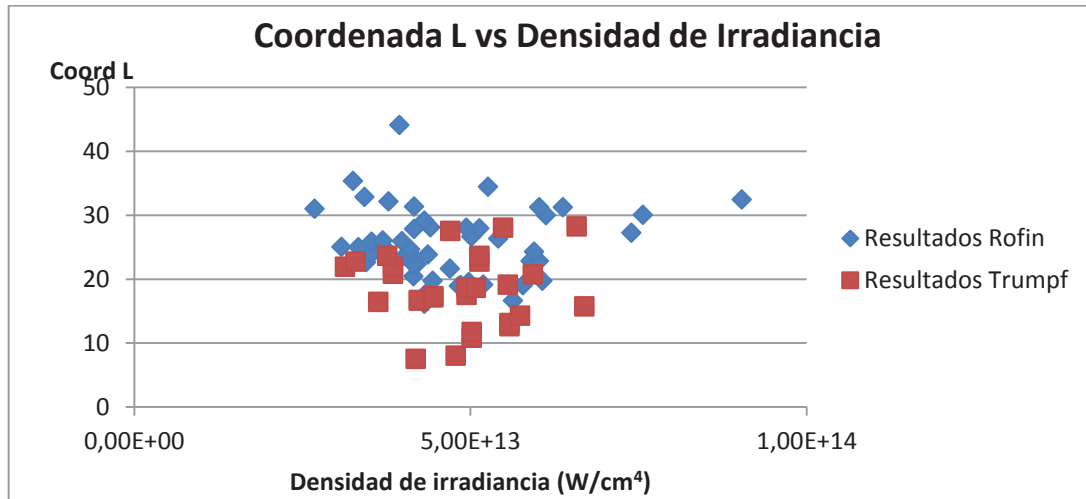
Adicionalmente, es importante constatar que incluso trabajando a diferentes frecuencias, y tiempos de pulso, la media y desviación típica de los datos obtenidos de densidad de energía son muy similares, aun cuando el equipo de Rofin no logra un decremento de la coordenada L con el incremento de la densidad de energía.

Este hecho induce a pensar que, como era de esperar, existe una cierta similitud entre el marcaje con uno y otro equipo, ya que, al fin y al cabo, emiten en la misma longitud de onda, aunque con tiempos de pulso y diámetro de spot diferente.

Densidad de Irradiancia

Se definió también una variable que diese una idea acerca de la densidad de potencia de cada pulso aplicada en un área marcada. Sin embargo para poder comparar los dos equipos láser entre sí, se dividió lo anterior por el área de un spot. A la variable resultante se le llamó densidad de irradiancia, por ser precisamente el valor de la irradiancia en un spot, multiplicado por la densidad de spots en un área:

$$\text{Densidad de Irradiancia} = \frac{\text{Potencia de pulso}}{\text{Área de un spot}} \cdot \frac{\text{Número de impulsos}}{\text{cm}^2} = \frac{E_p/t_p}{\pi \cdot \left(\frac{d_{spot}}{2}\right)^2} \frac{F \cdot N}{V \cdot H}$$



Gráfica 4.2 Representación de la dependencia de la coordenada L de color con respecto de la densidad de irradiancia

Tabla 4-7 Medi y desviación típica de los valores de la densidad de irradiancia para ambos equipos

	Densidad de Irradiancia (W/cm ⁴)	
	Trumpf	Rofin
Media	4.82E+13	4.73E+13
Desviación estándar	9.07E+12	1.24E+13

Se observa de nuevo en el caso de la densidad de irradiancia que, a pesar de no existir una tendencia en absoluto clara de la coordenada L con respecto de la densidad de irradiancia, los datos de ambos equipos láser son casi coincidentes en su media, aunque el equipo Rofin PowerLine E25 sufre mayor dispersión que el equipo TruMark 5020.

Al igual que en el caso de la densidad de energía se aprecia cómo, los dos equipos, en el mismo rango de densidad de energía o de irradiancia producen resultados asimilares, provocando además el equipo TruMark 5020 marcas de mayor contraste.

Cabe resaltar que ninguna de las demás variables estudiadas (Anexo F. Tablas de estudios de correlación) induce a una tendencia observable de R² mayor a 0.4 ni se equiparan entre los dos equipos láser.

Con los datos obtenidos en esta sección podemos afirmar que, en formas similares de deposición de la energía en el espacio y en el tiempo, el láser TruMark 5020 está mejor diseñado para un marcaje contrastado en el acero inoxidable 430 de nuestro caso.

Capítulo 5. Conclusiones

Se resumen en este capítulo una serie de conclusiones acerca de los objetivos cumplidos tras el proyecto y de la experimentación del marcaje láser en el acero inoxidable 430. También se sugieren unas posibles actuaciones futuras para mejorar los resultados finales de la aplicación.

5.1 Objetivos conseguidos

Tras la experimentación con los dos equipos utilizados, TruMark 5020 y Rofin PowerLine E25, se resumen a continuación los resultados obtenidos con ambos:

5.1.1 Resultados con el equipo TruMark 5020

Con el equipo TruMark 5020, láser pulsado de fibra de 20W, de radiación infrarroja cercana ($\lambda=1064$ nm) y tamaño de spot de 105 μm , se consiguieron los siguientes resultados:

- 1) **Respecto a la calidad estética:** Fueron seleccionados inicialmente 22 parámetros que cumplieron las especificaciones de intensidad de homogeneidad, reflejos e intensidad de color.
- 2) **Respecto a la calidad de la TCD:** De los 22 parámetros inicialmente seleccionados, finalmente 2 de ellos se designaron como los apropiados para realizar marcas realizadas que superaran todas las pruebas de la TCD.

Resumimos estos dos parámetros óptimos que pasaron todas las pruebas de calidad en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Resumen de resultados de los parámetros óptimos hallados.

	Parámetros utilizados				Resultados obtenidos			
	Frecuencia	Velocidad	Interlineado	Repeticiones	Coordenada L	Homogeneidad	Reflejos	TCD
Parámetro 1	225 kHz	600 mm/s	60 μm	2	16,4	2	1	Aprobada
Parámetro 2	250 kHz	700 mm/s	60 μm	2	22,7	2	1	Aprobada

5.1.2 Resultados con el equipo Rofin PowerLine E25

Con el equipo Rofin PowerLine E25, láser pulsado de vanadato de 25W, de radiación infrarroja cercana ($\lambda=1064$ nm) y tamaño de spot de 115 μm , se consiguieron los siguientes resultados:

- 1) **Respecto a la calidad estética:** Fueron seleccionados inicialmente 18 parámetros que cumplieron las especificaciones de intensidad de homogeneidad, reflejos e intensidad de color.
- 2) **Respecto a la calidad de la TCD:** De los 18 parámetros inicialmente seleccionados, ninguno superó todas las pruebas de la TCD, siendo gravemente afectados por las pruebas críticas.

Se deduce, por tanto que con el equipo Rofin PowerLine E25 no se pudo obtener los parámetros adecuados que superaran las pruebas de calidad, por lo que se descartó para su uso en la aplicación.

5.1.3 Soluciones propuestas

Dado que ha sido con el equipo TruMark 5020 el único equipo con el que se ha conseguido resultados positivos se deduce que las dos opciones sugeridas en el apartado 2.3 Soluciones propuestas, podrán ser llevadas a cabo para lograr la reproducción de los diseños más extensos de los lavavajillas:

- a) **Corte visible de la decoración:** Se provocaría un espacio en blanco visible entre fragmentos de diseños extensos, tomando el resultado no como un defecto sino como una característica.
- b) **Solapamiento de los diseños extensos:** Se aseguraría un mínimo espacio no reconocible por el ojo humano en el solapamiento de los diseños extensos fragmentados.

La decisión de la ejecución de una u otra solución queda en manos de los dirigentes de la fábrica de Łódź, Polonia, para la cual se inició esta aplicación.

5.2 Líneas futuras

Como actuaciones futuras se contemplan dos niveles diferentes: la actuación de la fábrica de Łódź en relación al marcaje en acero inoxidable investigado en este proyecto y los posibles estudios y mejoras que podrían implementarse para perfeccionar esta aplicación.

5.2.1 Implantación en la fábrica de Łódź

Dada por terminada mi tarea con respecto a esta aplicación las actuaciones futuras en relación a la implantación industrial del marcaje láser en acero inoxidable 430 serán responsabilidad de la dirección de la sección de Lavavajillas y la de la fábrica de Łódź, Polonia. Se espera que se sigan los siguientes pasos:

- 1) Aprobación por parte de los diseñadores de la calidad estética de las marcas.
- 2) Aprobación por parte del laboratorio de lavavajillas de las pruebas de la TCD de la pieza, ya que las realizadas en el departamento de RTI tienen tan solo carácter investigador.
- 3) Toma de decisión sobre la integración a superficie de trabajo precisa para evitar errores en la fragmentación de diseños extensos.
- 4) Puesta a punto de la instalación y de la integración y comienzo de la producción.

5.2.2 Mejoras futuras para el marcaje láser en acero inoxidable 430

Observando los resultados de este proyecto se puede deducir que los parámetros óptimos logrados con el equipo TruMark 5020 son las más resistentes a la corrosión pero no poseen las que mejores cualidades estéticas. Tal y como se muestra en la tabla 5-2 se han obtenido otros parámetros con este mismo equipo cuyo contraste es mayor, debido a una coordenada L menor.

Tabla 5-2. Ejemplos de parámetros con mejores cualidades estéticas

Parámetros	Coord L	Homogeneidad	Reflejos
175.600.40.2	<u>7,5</u>	2	1
175.700.40.2	<u>10,8</u>	2	1
225.800.40.2	<u>11,7</u>	2	1
225.600.50.2	15,7	2	1
225.700.60.2	18,6	2	0

Con el fin de lograr un marcaje de mejor calidad estética y preservando la marca de la corrosión se proponen algunas sugerencias para futuros estudios o trabajos:

- ❖ **Uso de recubrimientos:** Con el uso de recubrimientos poliméricos transparentes resistentes a la abrasión se prevendría cualquier tipo de corrosión de las marcas.
- ❖ **Uso de aceros inoxidable alternativos:** El uso de aceros inoxidables austeníticos por su mayor cromo equivalente reduciría la tendencia a la corrosión del sustrato y por tanto de las marcas que en éste se realizaran.
- ❖ **Uso de atmósferas protectoras o reductoras:** En el presente proyecto se ha experimentado con una atmósfera común, sin embargo, el uso de una atmósfera protectora reduciría la presencia del oxígeno en las proximidades de la marca, minimando la formación de nuevos óxidos en el material.

