

CAPÍTULO V:

REALIZACIÓN DE MOTIVOS DECORATIVOS CON LÁSER.

En los capítulos anteriores se ha realizado el estudio morfológico, composicional y estructural de los substratos de titanio irradiados con láser. El análisis de las muestras ha puesto de manifiesto que los tratamientos dan lugar a la oxidación superficial del titanio que provoca el cambio de su color. En función de los parámetros tecnológicos del proceso, las muestras pueden presentar colores muy vistosos, por lo que se podría aplicar esta técnica para cambiar el color del titanio utilizado en artículos de joyería y decoración. Además, la elevada resolución espacial, velocidad de procesado y versatilidad del tratamiento con láser hacen de éste una buena alternativa frente a las técnicas convencionales de coloración utilizadas en la industria decorativa del titanio. En este capítulo se realiza un estudio de las posibilidades de realizar motivos en color sobre titanio tratado con láser en función de los parámetros tecnológicos del proceso. Se distinguen tres tipos de tratamiento, cada uno de los cuales vinculado a un tipo específico de diseño: el tratamiento mediante trazas para realizar diseños vectoriales (a base de líneas), el solapamiento de trazas para efectuar imágenes con zonas rellenas de color y el marcado de píxeles de colores para realizar mapas de bits. El objetivo del estudio es la obtención de paletas de colores con cada uno de estos tipos de tratamiento. Las paletas se realizan variando distintos parámetros tecnológicos hasta encontrar las condiciones óptimas en las que se obtienen los colores más adecuados para su aplicación. A modo de ejemplo se efectúan motivos ornamentales con cada uno de estos modos de trabajo. De cara a una futura aplicación industrial, en todos los casos se ha trabajado en las condiciones más

energéticas y, en modo pulsado, con las frecuencias de repetición más elevadas, para conseguir el máximo efecto de coloración en el mínimo tiempo posible y, así, aumentar la eficiencia del proceso.

V.1 Procesado del titanio mediante trazas láser.

V.1.1 Características de las trazas.

El estudio llevado a cabo en el Capítulo III ha evidenciado que las trazas realizadas con láser sobre la superficie del titanio producen un cambio en el color que evoluciona con la fluencia acumulada. Tanto en modo continuo como pulsado, al aumentar la fluencia acumulada (disminuyendo la velocidad de barrido del haz láser), las trazas cambian progresivamente de color desde el plateado al dorado, marrón, púrpura, azul y, finalmente, gris-azulado. Las condiciones experimentales en las que se obtienen gradaciones de colores más atractivas tanto en modo continuo como en pulsado son las presentadas en la Sección III.3, esto es, en el plano focal de la lente de 160 mm, con una potencia media entorno a 55 W y variando la velocidad de barrido en el rango 25 – 350 mm/s.

Las imágenes de microscopia óptica de las series efectuadas en las condiciones experimentales óptimas tanto en modo continuo como en modo pulsado se muestran en la Fig. V.1. En ambos casos las trazas están compuestas por zonas micrométricas de diversos colores. Estos colores dependen del espesor y la distribución de los óxidos presentes en dichas zonas (*Capítulo IV*). Como se puede apreciar en la Fig. V.1A, al aumentar la fluencia acumulada en modo continuo, las zonas oxidadas forman bandas que evolucionan desde el color rojo al azul, azul claro, amarillo, rosa y, finalmente, verde. En modo pulsado, la evolución del color es parecida en ciertos aspectos, pues varía desde el plateado, al amarillo, rojo, azul, azul claro, amarillo pálido y, finalmente, gris con tonos rosados y verdes (Fig. V.1B). Una característica de las trazas realizadas en modo pulsado es que presentan una banda central de color amarillo que no muestran las series efectuadas en

modo continuo. El conjunto de las distintas micro-zonas de colores, que no son visibles a simple vista, da lugar al color macroscópico uniforme. De este modo, la densidad y distribución de estas zonas origina la gradación del color macroscópico de plateados – dorados (micro-zonas sin colorear y amarillas), a marrones (micro-zonas amarillas y rojas), púrpuras (básicamente micro-zonas rojas y azules), azules (micro-zonas azules con distinta saturación), verdes (micro-zonas azules y amarillo pálido) y, finalmente, grises con tonos rosados o verdosos (fondo de color gris con micro-zonas rojas y verdes).

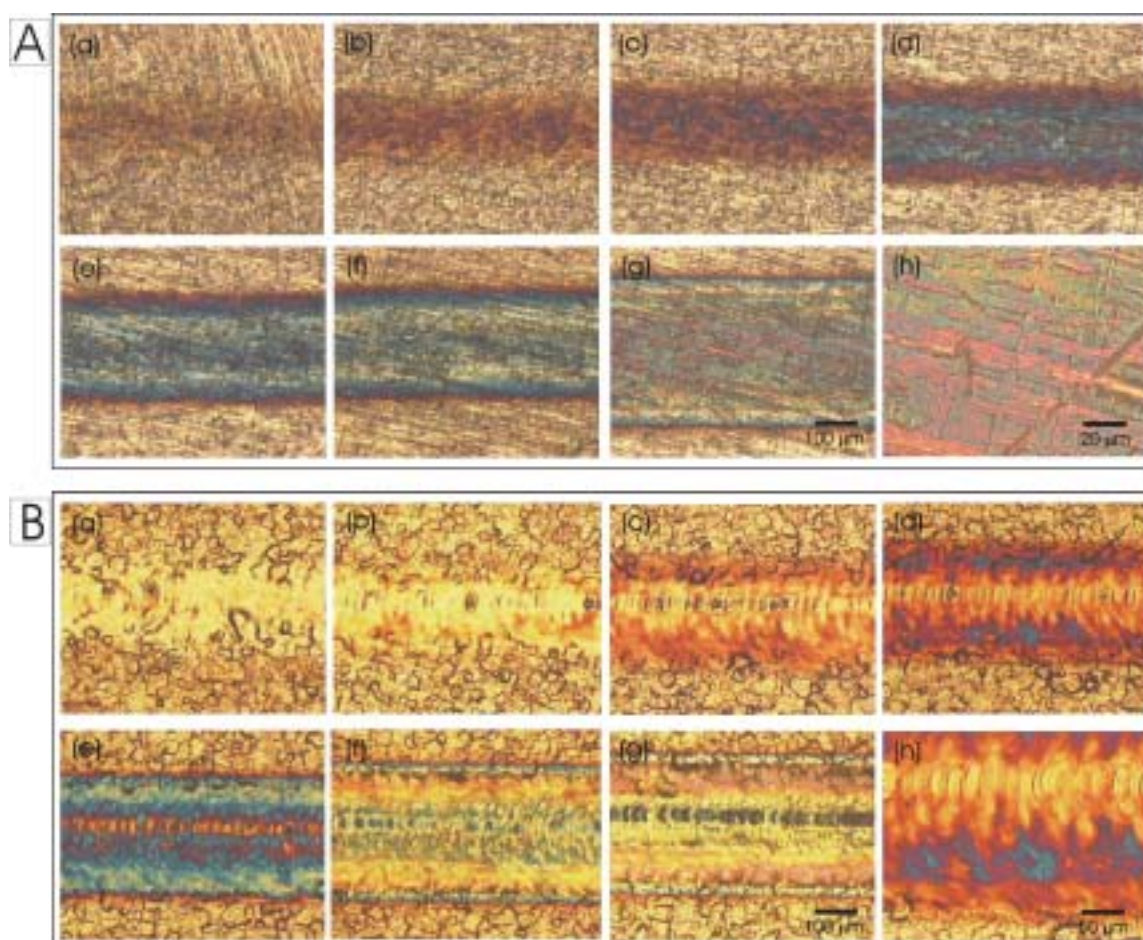


Fig. V.1. Imágenes de microscopía óptica de las trazas obtenidas (A) en modo continuo con (a) 43, (b) 58, (c) 63, (d) 108, (e) 151, (f) 189, (g) 606 J/cm² y (h) detalle de ésta última, y (B) en modo pulsado con (a) 54, (b) 90, (c) 135, (d) 184, (e) 294, (f) 540, (g) 648 J/cm² y (h) detalle de la imagen Bd. Todas las imágenes a – g están a la misma escala.

La anchura de las trazas en el plano focal de la lente de 160 mm de distancia focal aumenta con la fluencia acumulada en el rango 200 – 450 μm , aproximadamente (*Sección III.3.2.a*). Para realizar trazas de menor anchura se puede utilizar la lente de 100 mm de distancia focal e, incluso, se pueden introducir aperturas en el interior de la cavidad láser para disminuir el diámetro del haz. Para obtener trazas más anchas se puede recurrir al desenfoque del haz pero este método es poco efectivo ya que, con el aumento del desenfoque, la fluencia del haz disminuye rápidamente a valores con los que no se consigue el coloreado del titanio. Además, al desenfocar el haz sobre la muestra se obtienen colores muy pálidos y poco atractivos. Otra opción es realizar varias trazas paralelas ligeramente solapadas, aunque hay que tener en cuenta el cambio de color que éstas sufren al solaparse (Fig. V.2).

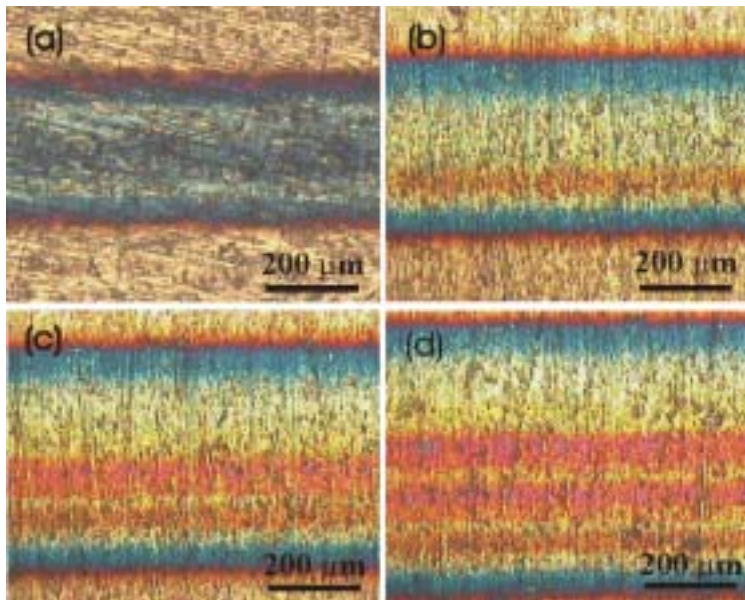


Fig. V.2. Imágenes de microscopía óptica de (a) una traza realizada en modo continuo con 151 J/cm^2 y del solapamiento de (b) dos, (c) tres y (d) cuatro trazas iguales separadas $100 \mu\text{m}$ entre sí.

V.1.2 Realización de motivos.

Los diseños vectoriales son imágenes formadas exclusivamente por líneas. En general, los sistemas de marcado con láser disponen de aplicaciones informáticas que permiten realizar diseños vectoriales de forma sencilla. Si la totalidad del diseño se realiza con una única velocidad se obtiene un motivo de un sólo color (Fig. V.3a y b) y si se modifica la velocidad en distintos tramos se obtienen motivos con varios colores (Fig. V.3c

y d). Hay que destacar que el modo de operación a base de trazas láser es el idóneo para escribir caracteres alfanuméricos de diversos colores sobre titanio.

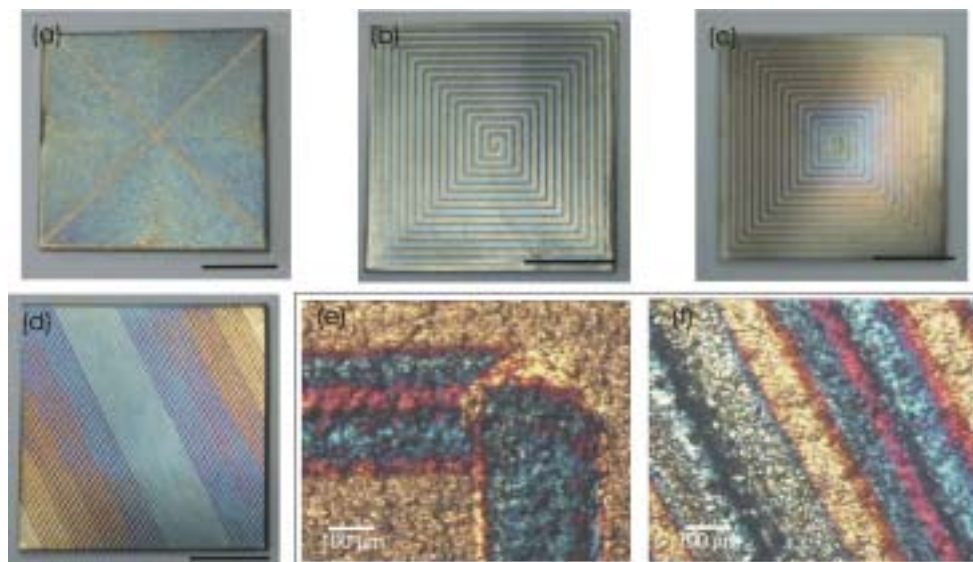


Fig. V.3. Imágenes de motivos realizados con trazas láser con (a) y (b) un solo color, (c) y (d) varios colores. Las escalas corresponden a 10 mm en todos los casos. Imágenes de microscopía óptica con detalles de (e) la imagen c y (f) la imagen d.

Como se puede apreciar en la Fig. V.3e, durante la realización de los motivos se producen errores de posicionamiento del haz láser del orden de las decenas de micras debidos a la inercia de los espejos galvanométricos. Además, se pueden producir cambios de color en las pequeñas zonas donde las trazas se solapan pues, como ya se ha descrito (*Sección IV.1.3.a*), la irradiación de una zona previamente oxidada produce una oxidación mayor y, por tanto, un cambio del color. Por otro lado, las trazas realizadas en distintas direcciones no presentan exactamente las mismas bandas de colores puesto que el haz láser no tiene simetría circular y el resultado del solapamiento de las huellas efectuadas por éste depende de la dirección de barrido. En cualquier caso, estos fenómenos no son relevantes en la realización de motivos a base de trazas ya que estos efectos no se aprecian a simple vista. Por otro lado, también se pueden colorear áreas extensas a base de trazas paralelas separadas entre sí, sin solapar. En este caso particular, el color del titanio comprendido

entre las trazas ofrece una matización del color macroscópico que puede ser controlado con la distancia de separación entre trazas consecutivas (Fig. V.3d y f).

Para finalizar, hay que comentar que un problema habitual en los sistemas que utilizan mesas móviles de control numérico (CNC), en las que no se consiguen aceleraciones muy elevadas, son los cambios de color producidos tanto en la aceleración al inicio como en la desaceleración al final de las trazas. En nuestro caso, sin embargo, dado que los espejos galvanométricos logran alcanzar grandes aceleraciones, estos efectos comprenden longitudes muy pequeñas y no son apreciables a simple vista. Con el sistema de marcado láser utilizado en este trabajo, el tiempo necesario para realizar un motivo vectorial de unos 10 cm^2 es del orden de un minuto, aunque este tiempo varía considerablemente dependiendo del diseño y del color deseado.

V.2 Procesado del titanio mediante el solapamiento de trazas láser.

V.2.1 Tratamiento con láser en modo continuo.

El tratamiento superficial de áreas extensas mediante el solapamiento de trazas láser paralelas realizadas en modo continuo da lugar a una variedad de colores característicos. Se realiza un estudio en el que, fijando los valores de la intensidad de la lámpara de excitación (y, por tanto, la potencia media) y la distancia de focalización, se realizan paletas de colores en las que se varía la velocidad de barrido del haz láser sobre la muestra y la distancia de separación entre trazas adyacentes. Así se obtienen diferentes paletas, dos ejemplos de las cuales, correspondientes a 100 y 200 μm de separación entre trazas y en el rango de velocidades de 25 a 300 mm/s, se presentan en la Fig. V.4. Como se puede observar, al disminuir la velocidad de barrido del haz, es decir, al aumentar la fluencia acumulada, el color de las áreas procesadas evoluciona desde el plateado al dorado, marrón, púrpura, azul,

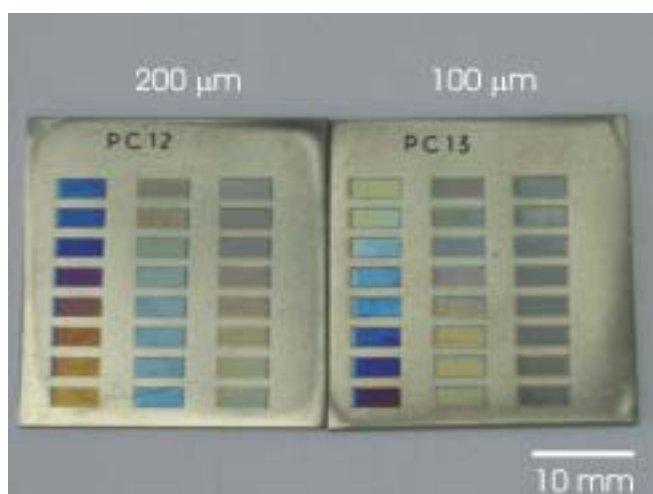


Fig. V.4. Paletas de colores realizada en modo continuo con 53 W de potencia y, con 200 y 100 μm de separación entre trazas. El rango de velocidades es 25 – 300 mm/s. En cada paleta, la velocidad de barrido aumenta de abajo arriba y de izquierda a derecha.

amarillo – verde, rosa – dorado, verde – rosa y, finalmente, gris. Las muestras utilizadas en el estudio de la Sección IV.1 corresponden a una elección representativa de la paleta utilizada en el plano focal de la lente de 160 mm, con una potencia media de 53 W y con 100 μm de distancia entre trazas consecutivas, que es la que presenta colores más uniformes. Para poder describir el color de forma objetiva, se calculan las coordenadas colorimétricas de estas muestras a partir de sus espectros de reflexión. Para ello se ha realizado el programa ‘Cromat’, descrito en el Apéndice D.3. El color, las coordenadas de cromaticidad y el valor triestímulo Y de las muestras obtenidas se presentan en la Tabla V.1. Asimismo, para poder valorar de forma visual las coordenadas de color, en la Fig. V.5 se encuentran representadas las coordenadas de cromaticidad en el diagrama cromático CIE1931. Como se puede apreciar en la Tabla V.1, la luminosidad de las muestras no sigue una dependencia monótona con la fluencia acumulada, siendo la muestra de color amarillo – verde la más luminosa de todas.

Estas muestras presentan un patrón de bandas de colores alternados en el rango sub-milimétrico que corresponden a zonas con distinto número de solapamientos y, por tanto, zonas con distinto espesor de la capa de TiO_2 transparente de la superficie

v [mm/s]	350	260	240	140	100	80	25
F _a [J/cm ²]	43	58	63	108	151	189	606
Color	Dorado	Púrpura	Azul	Amarillo-verde	Rosa-dorado	Verde-rosa	Gris
x	0.44	0.21	0.23	0.35	0.38	0.30	0.32
y	0.41	0.20	0.25	0.37	0.33	0.32	0.32
Y	235	138	188	465	312	269	274

Tabla V.1. Color, coordenadas de cromaticidad y valor triestímulo Y de la serie de muestras realizadas en modo continuo en función de la velocidad de barrido y de la fluencia acumulada.

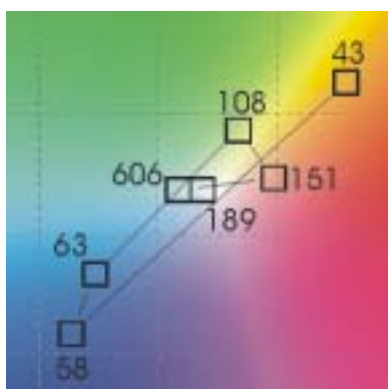


Fig. V.5. Representación de las coordenadas de cromaticidad de muestras tratadas con láser en modo continuo con 53 W de potencia, en el plano focal de la lente de 160 mm de distancia focal y con 100 μm de separación entre trazas. Los valores de la fluencia acumulada se muestran en la figura en J/cm².

(Sección IV.1.3). A medida que aumenta el espesor de esta capa, tanto por el aumento del número de solapamientos como por el aumento de la fluencia acumulada, la evolución del color de estas bandas es de amarillo a rojo, azul, azul claro, amarillo, rojo – rosa, una mezcla de rojizos, azules, verdes y amarillos y, finalmente, gris (Fig. V.6). Este patrón alternado de bandas de colores otorga a las muestras una tonalidad secundaria muy atractiva que no se obtiene con otras técnicas de coloración. Sin embargo, el color macroscópico que se observa a simple vista no es completamente homogéneo, pues se aprecian ligeras variaciones de la tonalidad a escala milimétrica. Estos cambios del color pueden ser causados por:

- 1- Pequeñas variaciones temporales de la potencia del haz láser que estarían relacionadas con fluctuaciones de la potencia de emisión de la lámpara de excitación del láser.

- 2- Cambios en el ritmo de disipación de la energía térmica acumulada en las muestras, ya sea por la proximidad de un borde lateral o por mal contacto en algunos puntos entre las muestras y el bloque de cobre que las sostiene. Estos efectos son especialmente importantes en modo continuo pues, en estas condiciones, la longitud de propagación térmica es considerable, del orden de las décimas de milímetro, y por tanto, la temperatura superficial depende en gran medida del contacto térmico entre el substrato de titanio y el bloque de cobre que lo sostiene.
- 3- Diferencias en la absorción de la radiación láser incidente debidas a cambios en la morfología superficial de distintas zonas de las muestras (rugosidad, impurezas...). Si se realiza un buen pulido de las muestras, estos efectos son secundarios y sólo se aprecian a escala micrométrica.

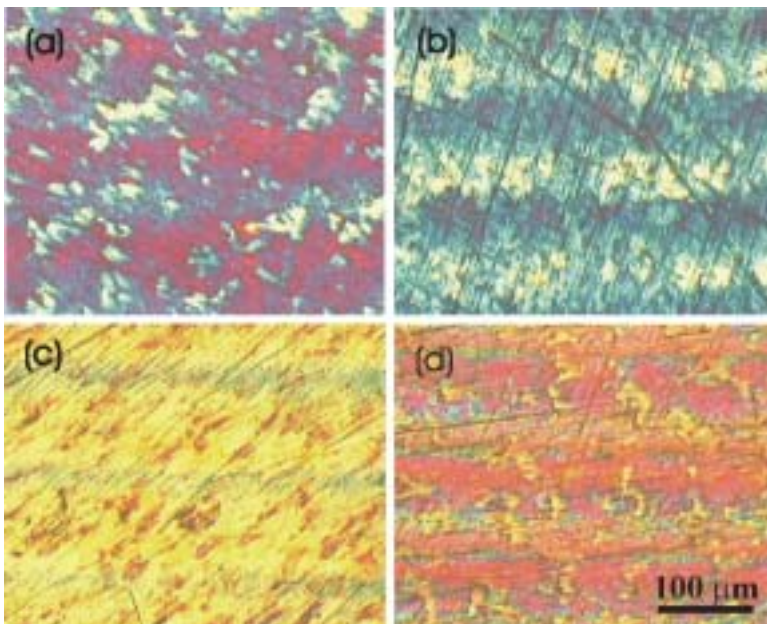


Fig. V.6. Imágenes de microscopia óptica de las muestras efectuadas en modo continuo con (a) 58, (b) 108, (c) 151 y (d) 189 J/cm². Todas las imágenes están a la misma escala.

Finalmente, es importante destacar que durante los tratamientos en modo continuo la temperatura media de las muestras puede aumentar mucho y ésta puede influir considerablemente en la máxima temperatura superficial alcanzada y, por tanto, en el color resultante. Además, es muy importante evitar la deriva térmica, pues ésta origina una gran variación del color de un extremo a otro de la pieza. Para ello basta con esperar unos segundos entre trazas consecutivas para que disminuya la temperatura media de la muestra en la región adyacente a la traza recién realizada hasta valores que no influyan sobre el

color. La necesidad de incluir tiempos de espera tan largos repercute negativamente en la eficiencia del proceso. Por tanto, el tratamiento en modo continuo no será el más adecuado para la mayoría de aplicaciones, especialmente si se debe trabajar con muestras pequeñas, donde estos tiempos serán más dilatados.

V.2.2 Tratamiento con láser en modo pulsado.

Para estudiar el cambio de color del titanio tratado con láser en modo pulsado se realizan paletas de colores en el plano focal de la lente de 160 mm, en las que se mantiene constante la frecuencia de repetición (30 kHz), la intensidad de la lámpara de excitación (19 A) y se varía la velocidad de barrido del haz láser sobre la muestra y la distancia de separación entre trazas adyacentes. En estas condiciones, la potencia media del haz es de 57 W. Así, se obtienen diferentes paletas, dos ejemplos de las cuales, correspondientes a 100 y 200 μm de separación entre trazas, se presentan en la (Fig. V.7). El rango de velocidades es de 20 a 185 mm/s y el tiempo de espera es 500 ms entre trazas consecutivas. Estas muestras presentan colores luminosos y, como se puede apreciar, al aumentar la fluencia acumulada en cada una de estas series se observa un cambio gradual del color similar al del caso continuo, desde el plateado al dorado, marrón, púrpura, azul y, finalmente, gris. Sin embargo, no se observan las tonalidades rosas y verdes. Las muestras realizadas con 200 μm de separación entre trazas (Fig. V.8) presentan un patrón de bandas de colores más extenso que aquellas realizadas con menor separación pues hay una mayor alternancia de color entre áreas solapadas y no solapadas y, además, en las zonas no solapadas se observan distintas bandas de colores que ya presentan las trazas individuales (*Sección III.3*). Al disminuir la distancia de separación entre las trazas, éstas llegan a solaparse casi completamente, por lo que prácticamente desaparecen las bandas de colores. Así, la serie efectuada con 200 μm de separación es la que presenta una mayor mezcla de colores a escala sub-milimétrica y, por tanto, una riqueza de tonos que no posee ninguna otra serie, es decir, una mayor paleta de colores. Por tanto, al aumentar el solapamiento entre trazas el color se hace más homogéneo pero también evoluciona más rápidamente con la fluencia acumulada, lo cual hace la paleta más limitada.

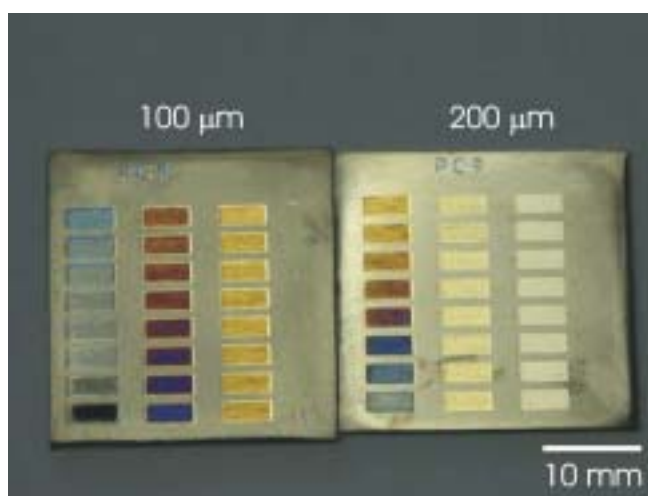


Fig. V.7. Paletas de colores realizadas en modo pulsado con 57 W de potencia, en el plano focal de la lente de 160 mm de distancia focal, a 30 kHz de frecuencia de repetición y con 100 y 200 μm de separación entre trazas. El rango de velocidades es 20 – 185 mm/s. En cada paleta, la velocidad de barrido aumenta de abajo arriba y de izquierda a derecha.

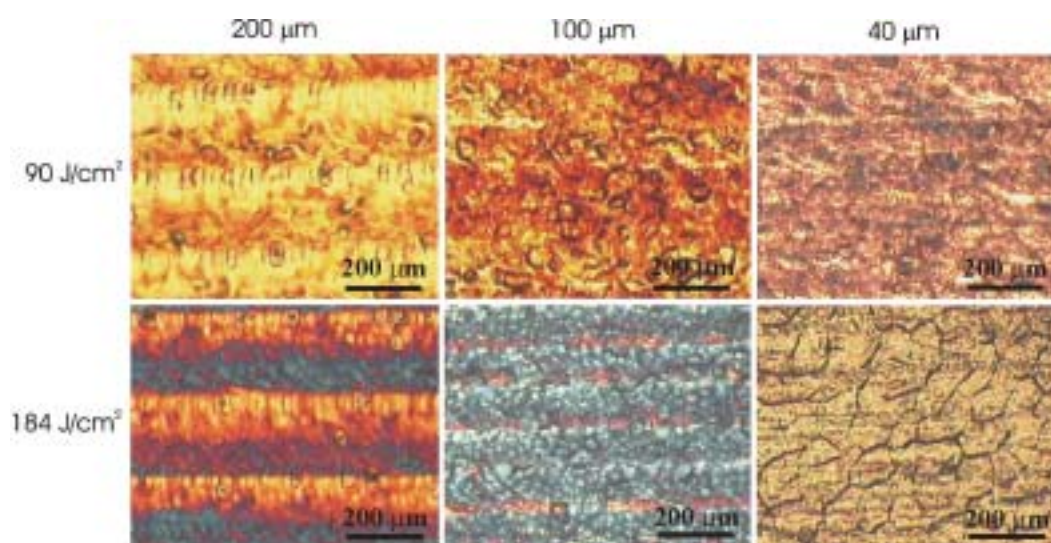


Fig. V.8. Imágenes de microscopía óptica de varias muestras tratadas con láser en modo pulsado con dos fluencias acumuladas distintas y con tres separaciones entre trazas.

La evolución del color y de las coordenadas de cromaticidad en función de la fluencia acumulada por traza de las series de muestras efectuadas con 200, 100 y 40 μm de separación entre trazas (presentadas en la Sección IV.2) se muestran en la Tabla V.2 y la

Fig. V.9. Como se puede comprobar, el aumento del solapamiento entre las trazas tiene el mismo efecto sobre el color que el aumento de la fluencia acumulada y, además, con este aumento disminuye la luminosidad de las muestras.

v [mm/s]		300	180	120	88	55	30	25
F _a [J/cm ²]		54	90	135	184	294	540	648
200 μm	Color	Plateado	Dorado	Marrón	Púrpura	Azul	Gris-azul	Gris
	x	0.36	0.40	0.39	0.29	0.30	0.35	0.35
	y	0.36	0.39	0.35	0.27	0.32	0.35	0.34
	Y	527	387	229	169	334	382	333
100 μm	Color	Dorado	Marrón	Marrón oscuro	Azul	Azul	Gris-azul	Gris
	x	0.40	0.45	0.41	0.25	0.30	0.32	0.33
	y	0.39	0.40	0.31	0.25	0.31	0.32	0.33
	Y	193	214	92	203	257	272	263
40 μm	Color	Marrón	Marrón oscuro	Azul oscuro	Gris-azul	Gris	Gris	Gris
	x	0.45	0.40	0.27	0.32	0.32	0.32	0.32
	y	0.40	0.34	0.28	0.32	0.32	0.32	0.32
	Y	90	97	201	261	232	245	243

Tabla V.2. Color, coordenadas de cromaticidad y valor triestímulo Y de las series de muestras realizadas en modo pulsado y a distintas distancias de separación entre trazas consecutivas en función de la velocidad de barrido y la fluencia acumulada.

La realización de tratamientos con tiempos de espera de más de 500 ms entre trazas consecutivas da lugar a muestras de colores mucho más homogéneos que aquellas efectuadas en modo continuo. Este tiempo de espera es inferior al del caso continuo (2 s), dado el carácter superficial del procesado en modo pulsado. Sin embargo, las muestras de color púrpura son la excepción, pues presentan pequeñas variaciones aleatorias en sus tonos en la escala milimétrica. Estas muestras están formadas en gran medida por micro-zonas rojas y azules, las diferencias entre las cuales son tan pequeñas (*Sección IV.2.2.c*) que

ligeras fluctuaciones de la potencia media del haz láser durante el tratamiento o variaciones locales de la absorción de la radiación incidente provocan cambios de tonalidad apreciables.

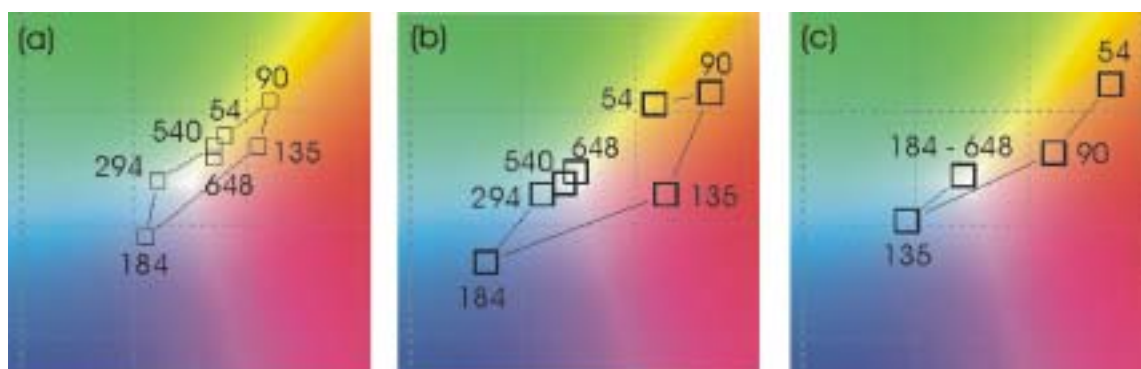


Fig. V.9. Representación de las coordenadas de cromaticidad de las muestras obtenidas en modo pulsado con una distancia entre trazas adyacentes de (a) 200, (b) 100 y (c) 40 μm . Los valores de la fluencia acumulada se muestran en la figura en J/cm^2 .

V.2.3 Realización de motivos.

En general, los sistemas de marcado de materiales con láser implementan en el software del equipo funciones para la realización de imágenes a base de trazas paralelas. Por tanto, si previamente se ha elaborado una paleta de colores con la que se pueden conocer los parámetros tecnológicos necesarios para obtener el color elegido ‘a la carta’, se pueden realizar fácilmente motivos con varios colores sobre titanio (Fig. V.10). Además, se pueden programar manualmente diseños vectoriales para conseguir gradaciones continuas de tonalidades azules o doradas, que ofrecen unos resultados muy atractivos (Fig. V.10d).

Un hecho muy importante a la hora de diseñar los motivos es el intentar minimizar las zonas de intersección entre áreas de distinto color, pues estas zonas presentan colores diferentes a los dos intersectados (*Sección V.1.1*) y pueden ser percibidos a simple vista si sobrepasan las 100 – 200 μm de extensión. Un ejemplo de este efecto se muestra en la

Fig. V.11a, donde las flechas muestran una zona extensa de intersección entre áreas de distinto color. Un buen diseño a base de máscaras digitales que realice una imagen independiente para cada color eliminará o, al menos, minimizará la extensión de estas zonas de intersección (Fig. V.11b). El tiempo empleado en la realización de los diseños es de alrededor de un minuto por centímetro cuadrado de material procesado. Este modo de coloración del titanio puede tener interés industrial pues se pueden confeccionar motivos muy atractivos a partir de distintas gradaciones de los colores básicos que se obtienen con láser (plateados, dorados, marrones, púrpuras y azules).

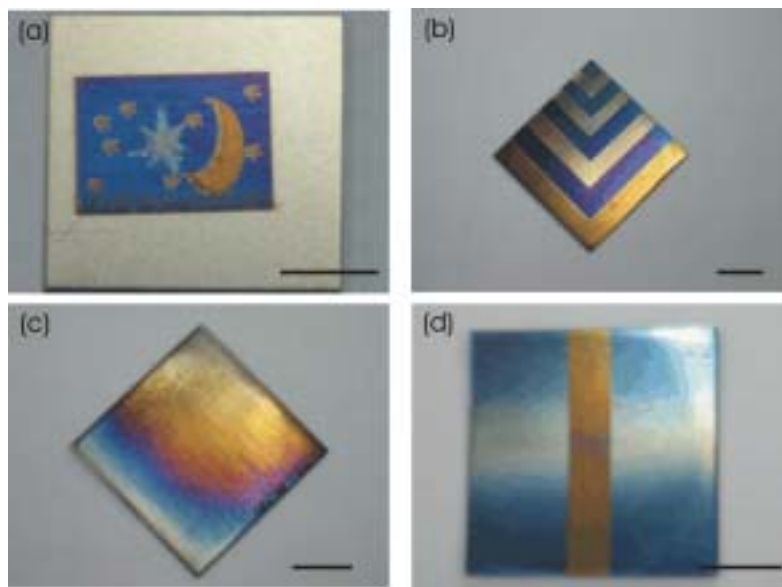


Fig. V.10. Imágenes de algunos de los motivos realizados mediante solapamiento de trazas láser. Las escalas corresponden a 10 mm en todos los casos.

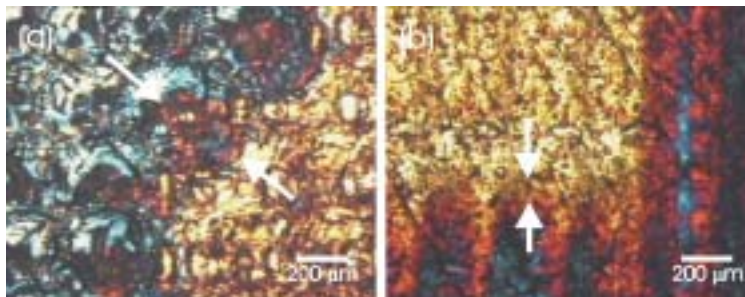


Fig. V. 11. Detalles de distintos motivos realizados mediante solapamiento de trazas en modo pulsado. Las flechas indican las zonas de intersección entre áreas de distintos colores.

V.3 Procesado del titanio mediante píxeles de colores.

Un modo de trabajo especialmente interesante para la obtención de motivos decorativos es la realización de mapas de bits. En la Sección III.2 se ha presentado un estudio sobre la irradiación del titanio mediante la acumulación de pulsos láser en una misma posición. El análisis de las zonas irradiadas revela que éstas muestran distintos colores, los cuales dependen en gran medida del número de pulsos acumulados. Por tanto, mediante la acumulación de pulsos láser en zonas determinadas se pueden conseguir píxeles de colores. El estudio realizado en esta sección tiene como objetivo verificar si es posible conseguir el procesado de áreas de titanio mediante píxeles con un control del color a escala macroscópica.

V.3.1 Influencia de los parámetros tecnológicos en el color.

El tratamiento de áreas extensas con píxeles de colores se consigue marcando matrices ordenadas de píxeles separados una distancia controlada entre sí. De este modo, se obtienen paletas de colores procesando distintas áreas en una misma muestra en condiciones experimentales diferentes. Las primeras paletas se realizan en el plano focal imagen de la lente de 160 mm de distancia focal. En cada paleta se mantiene fija la intensidad de la lámpara de excitación a 19 A (rango de energía de pulso entre 1.9 y 3.6 mJ) y se varía la frecuencia de repetición (ν) y el tiempo de apertura (t_{ap}), que es el tiempo durante el cual se abre el obturador del láser y, por tanto, se irradia la superficie. Así, el número de pulsos acumulados en cada píxel (N) será,

$$N = t_{ap} \nu \quad (V.1)$$

En una primera serie de paletas, se varía la distancia de separación entre píxeles consecutivos entre 500 y 300 μm (Fig. V.12). Como se observa en la figura, y de forma semejante a los tratamientos realizados con trazas, un aumento del tiempo de apertura desde 2 ms hasta aproximadamente 20 ms produce áreas cuya tonalidad cambia progresivamente desde el plateado al dorado, marrón, púrpura, azul y, finalmente, azul claro e, incluso, gris

Capítulo V. Realización de Motivos Decorativos con Láser

(Tabla V.3). Tiempos de apertura mayores no provocan más cambios del color, a no ser que sean tan grandes que se produzca la vaporización del material, apareciendo el color negro debido a la disminución de la reflexión originada por la gran rugosidad producida. La inspección al microscopio óptico de las áreas procesadas revela que, efectivamente, al igual que en las trazas realizadas con láser, los píxeles también presentan micro-zonas de colores que, en conjunto, les otorgan el color macroscópico observado (Fig. V.13). En estas

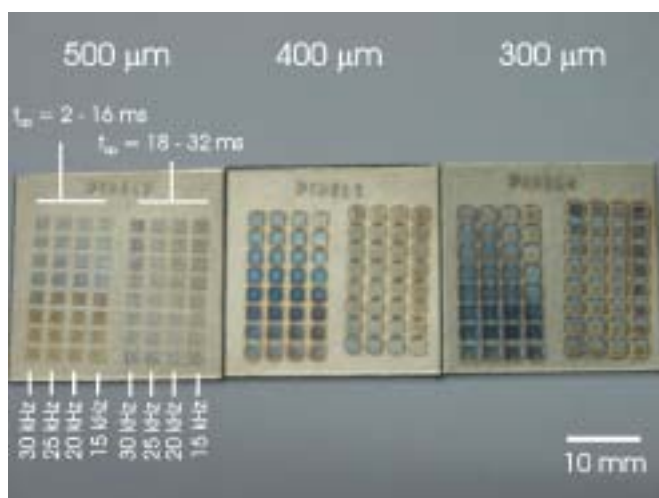


Fig. V.12. Paletas de colores realizadas en el plano focal de la lente de 160 mm de distancia focal, con una intensidad de lámpara de 19 A y con 500, 400 y 300 μm de separación entre píxeles. En cada paleta, el tiempo de apertura aumenta de abajo arriba.

t_{ap} [ms]		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
30 kHz	N	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
	F_a [J/cm ²]	118	236	355	473	591	709	827	946	1063	1182
	l										
20 kHz	N	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
	F_a [J/cm ²]	120	240	361	481	601	722	842	962	1082	1203
	l										
Color		Dorado	Marrón claro	Marrón	Púrpura	Azul oscuro	Azul claro	Azul claro	Azul claro	Azul claro	Gris - azul

Tabla V.3. Tiempo de apertura del haz láser (t_{ap}) y, número de pulsos (N), fluencia acumulada (F_a) y color de los píxeles realizados con 20 y 30 kHz de frecuencia de repetición y con 500 μm de separación entre ellos.

condiciones experimentales el diámetro de los píxeles es del orden de 350 - 400 μm como máximo. Con una distancia de separación de 500 μm entre píxeles adyacentes, éstos se encuentran separados, lo que permite estudiarlos individualmente. Además, en estas condiciones se obtienen áreas de colores uniformes y muy luminosos. Sin embargo, la gran separación entre los píxeles hace que éstos se aprecien individualmente a simple vista. Por otro lado, se observa que los píxeles realizados con distintas frecuencias de repetición no presentan diferencias significativas en el rango de 20 a 30 kHz, manteniendo el resto de los parámetros del láser constantes (Figs. V.12 y V.13).

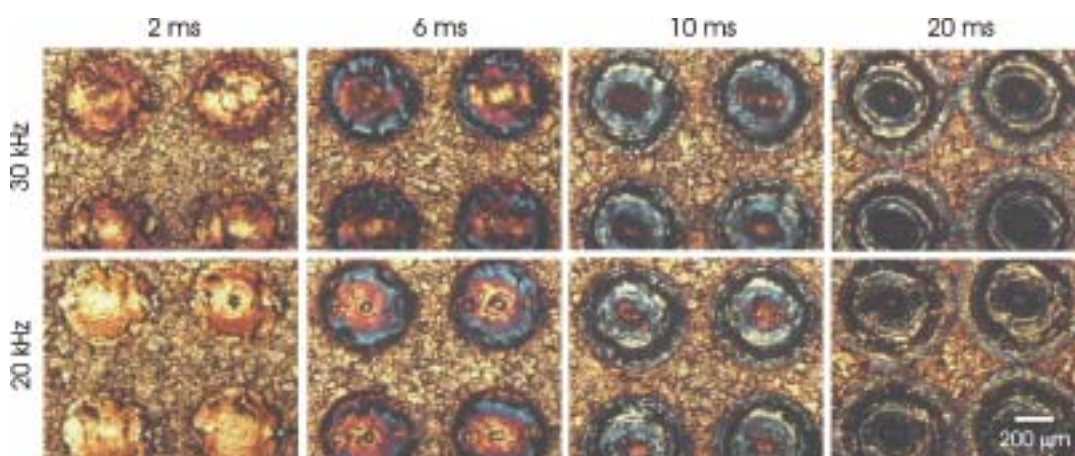


Fig. V.13. Imágenes de microscopía óptica de los píxeles realizados en el plano focal de la lente de 160 mm de distancia focal y separados 500 μm para distintas frecuencias de repetición y tiempos de apertura. La energía de pulso es de 1.9 mJ (30 kHz) y de 2.9 mJ (20 kHz).

Al disminuir la distancia entre los píxeles aumenta la resolución de la imagen, pero con distancias de 400 y 300 μm se obtienen colores muy poco uniformes debido a la deriva térmica que aparece durante el tratamiento (Fig. V.12). La falta de uniformidad en el color descartaría estas condiciones de trabajo para realizar el marcado del titanio con fines decorativos. Sin embargo, la deriva térmica puede ser controlada introduciendo un tiempo

Capítulo V. Realización de Motivos Decorativos con Láser

de espera al finalizar cada píxel, durante el cual, el sistema láser retrasa el inicio del siguiente píxel para que la temperatura de la zona adyacente se estabilice en un valor suficientemente bajo como para no influir en los píxeles siguientes.

Para obtener áreas de color homogéneo se ha estudiado el efecto de modificar el tiempo de espera en tratamientos realizados a base de píxeles separados $400\ \mu\text{m}$ entre sí. La evolución observada al microscopio óptico de un área al variar el tiempo de espera se presenta en la Fig. V.14. Como se puede observar, a medida que aumenta el tiempo de espera se obtiene un color en el área procesada similar al que se obtendría al disminuir el tiempo de apertura. Además, el color se hace más uniforme, como se aprecia al comparar dos paletas realizadas sin tiempo de espera y con $10\ \text{ms}$ entre píxeles (Fig. V.15). El origen de este comportamiento reside en que, cuanto mayor es el tiempo de espera, menor es la temperatura de la zona adyacente al píxel precedente en el momento de comenzar a irradiar el siguiente. Por tanto, menor es la temperatura máxima alcanzada durante el procesado de dicho píxel y también su estado de oxidación y, por tanto, su de color asociado. Se ha encontrado que, en el rango de condiciones experimentales explorado, la evolución del color se hace independiente del tiempo de espera para valores mayores o iguales que $10\ \text{ms}$.

Fijado el tiempo de espera en $10\ \text{ms}$, se lleva a cabo un estudio en el que se realizan paletas variando la distancia de separación entre píxeles. Algunas imágenes de áreas realizadas con

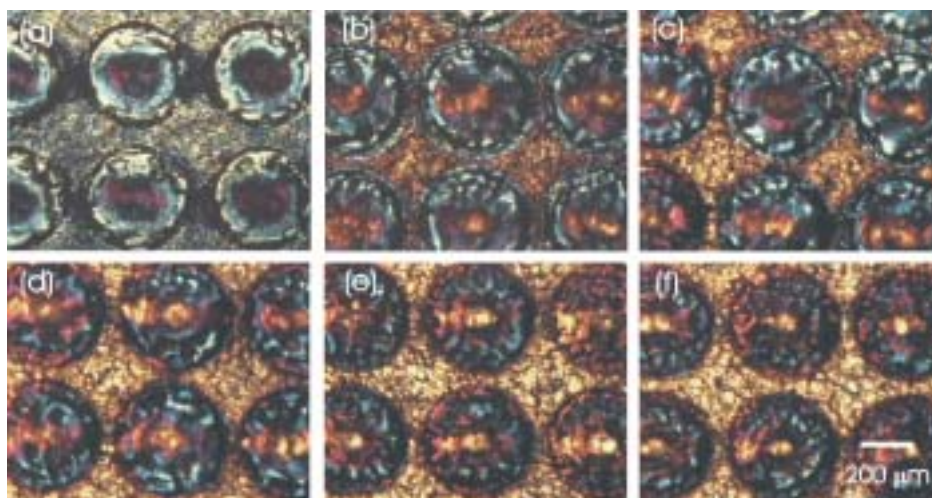


Fig. V.14. Imágenes de microscopía óptica de áreas tratadas con píxeles a 30 kHz de frecuencia de repetición, 1.9 mJ de energía de pulso, 400 μm de distancia entre píxeles, 10 ms de tiempo de apertura y un tiempo de espera de (a) 0, (b) 0.1, (c) 1, (d) 10, (e) 100 y (f) 1000 ms. Todas las imágenes están a la misma escala.

este tiempo de espera entre píxeles consecutivos se muestran en la Fig. V.16. Se ha observado que al introducir este tiempo de espera se obtienen áreas con colores muy luminosos y uniformes con una separación entre píxeles de 400 y 300 μm . En estas condiciones aún se aprecian a simple vista los píxeles. Al disminuir la distancia a 200 μm ya no se notan los píxeles pues se encuentran bastante solapados, pero el color deja de ser uniforme, por tanto, es necesario introducir un tiempo de espera mayor (50 ms). Las series realizadas con una distancia de separación entre píxeles determinada presentan una evolución del color con el tiempo de apertura similar a la descrita anteriormente (plateado a gris). Sin embargo, a igualdad de tiempos de apertura, cuanto menor es la distancia entre píxeles, mayor es su solapamiento y, por tanto, más se oxidan y más rápidamente evoluciona el color.

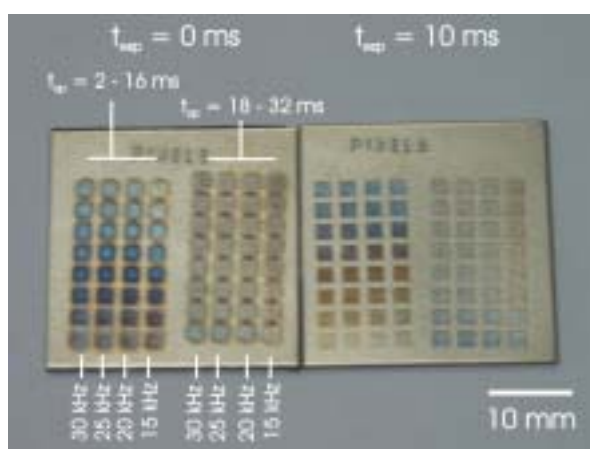


Fig. V.15. Paletas realizadas con la lente de 160 mm, 19 A de intensidad de lámpara, 400 μm de separación entre píxeles y con dos tiempos de espera diferentes de 0 y 10 ms.

Para poder realizar diseños con una mayor resolución espacial es necesario obtener píxeles de menor diámetro. Mediante el uso de la lente de 100 mm de distancia focal se han realizado estudios análogos a los anteriores que han permitido obtener paletas de colores homogéneas con píxeles de diámetro del orden de 100 – 200 μm . Las muestras obtenidas presentan colores uniformes pero muy pálidos y poco atractivos para ser utilizados en aplicaciones decorativas. La palidez que presentan las muestras proviene de la tonalidad

gris producida por la presencia de gran cantidad de TiO_2 rutilo y por efectos de ablación del sustrato, dada la elevada fluencia sobre la muestra en estas condiciones.

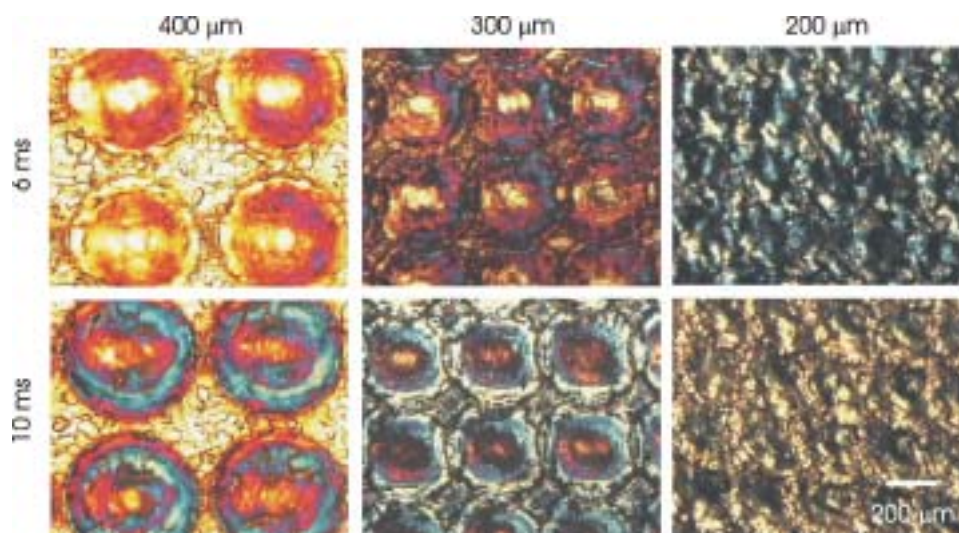
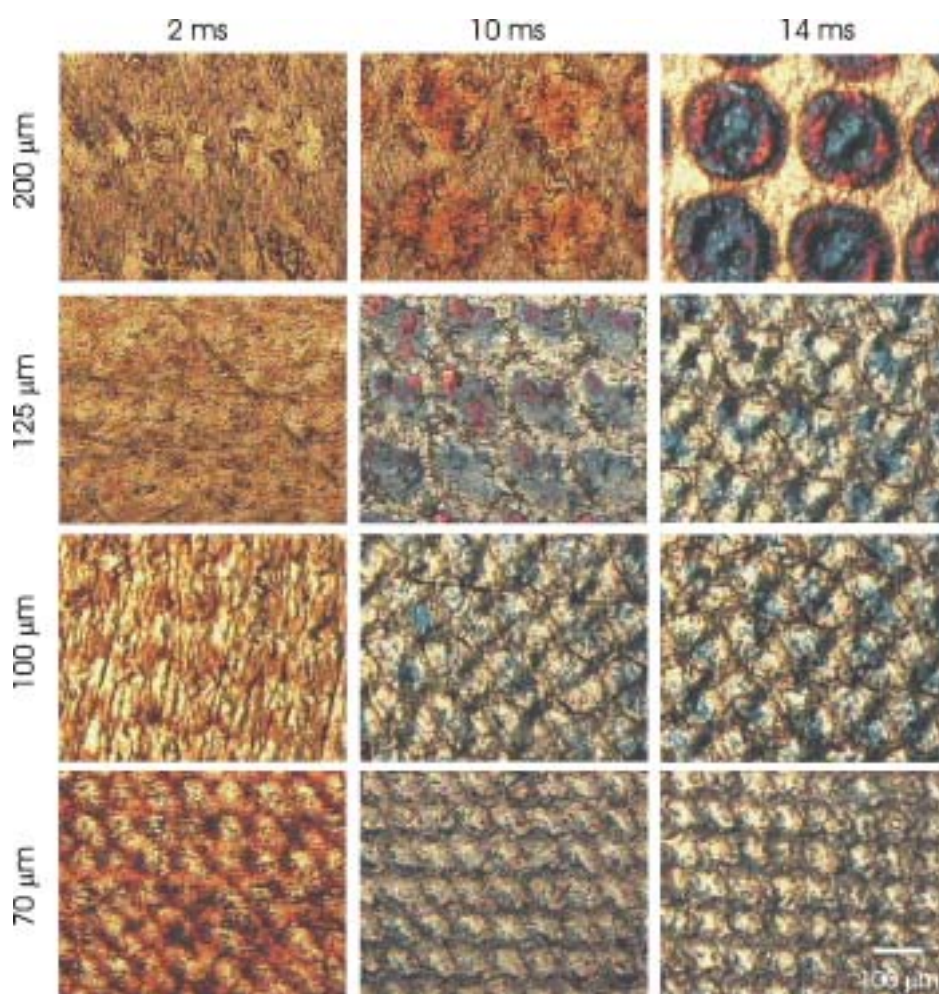


Fig. V.16. Imágenes de microscopía óptica de áreas realizadas con 30 kHz, 1.9 mJ por pulso, 10 ms de tiempo de espera y distintos tiempos de apertura y distancias de separación entre pulsos. Todas las imágenes están a la misma escala.

Para conseguir colores más luminosos se han realizado paletas de píxeles desenfocando ligeramente el haz láser sobre el sustrato. En estas condiciones, a pesar de perder algo de resolución respecto al caso anterior, se obtienen colores macroscópicos muy luminosos y uniformes cuya evolución con el tiempo de apertura es similar a los casos anteriores: plateado, dorado, marrón, púrpura, azul y gris – azul. Es necesario remarcar que esta pérdida de resolución no es, de ninguna forma, significativa. Una vez realizadas diversas paletas a partir de la variación sistemática de los diferentes parámetros tecnológicos, los mejores resultados se han obtenido con una distancia de 94 mm entre la lente de focalización y el sustrato, una intensidad de la lámpara de excitación de 19 A y un rango de tiempos de apertura y de espera de 2 – 32 ms y de 10 – 50 ms, respectivamente (Fig. V.17). En estas condiciones, el diámetro del haz es de unas 200 μm por lo que una distancia entre píxeles por debajo de este valor da lugar a su solapamiento (Fig. V.17). Como consecuencia, la disminución de la distancia de separación entre píxeles provoca un

mayor solapamiento, una evolución más rápida del color y, debido a la deriva térmica, se necesitan tiempos de espera mayores para obtener colores uniformes.

De todas las series realizadas, la mejor paleta de colores se presenta en la Fig. V.18. Algunas imágenes de microscopía óptica de las áreas obtenidas con una resolución espacial suficiente para que no se aprecien los píxeles a simple vista pueden ser observadas en la Fig. V.19. En estas paletas, las muestras presentan una gran variedad de tonalidades, desde el plateado al gris azulado, muy uniformes y luminosas. En este rango de frecuencias de repetición, el efecto de disminuir este parámetro para un tiempo de apertura fijado repercute en el color de forma análoga a la disminución del tiempo de apertura para una frecuencia dada, aunque los colores obtenidos por los dos procedimientos no son exactamente



Capítulo V. Realización de Motivos Decorativos con Láser

Fig. V.17. Imágenes de microscopía óptica de áreas procesadas con píxeles realizados con distintos tiempos de apertura y distancias entre píxeles adyacentes. Condiciones experimentales: lente de 100 mm de distancia focal, 30 kHz de frecuencia de repetición, 19 A de intensidad de la lámpara de excitación, 94 mm entre lente de focalización y substrato, y 10 ms de tiempo de espera.

idénticos, presentando una riqueza de matices considerable. Este hecho, que se observa de forma general en los tratamientos realizados con píxeles solapados, brinda al marcado del titanio con láser una gran variedad de tonalidades que amplía la libertad de combinar distintos colores en posibles diseños decorativos. Para finalizar, se ha de destacar que con el procesado del titanio mediante píxeles se obtienen motivos de colores con mucha más resolución y uniformidad del color que en aquellos realizados a base de trazas láser.



Fig. V.18. Paleta de píxeles realizada con la lente de 100 mm, 19 A de intensidad de la lámpara de excitación, 94 mm entre lente de focalización y substrato, 125 μm de distancia entre píxeles adyacentes y 50 ms de tiempo de espera. El tiempo de apertura aumenta de abajo arriba y de izquierda a derecha de 2 a 29 ms.

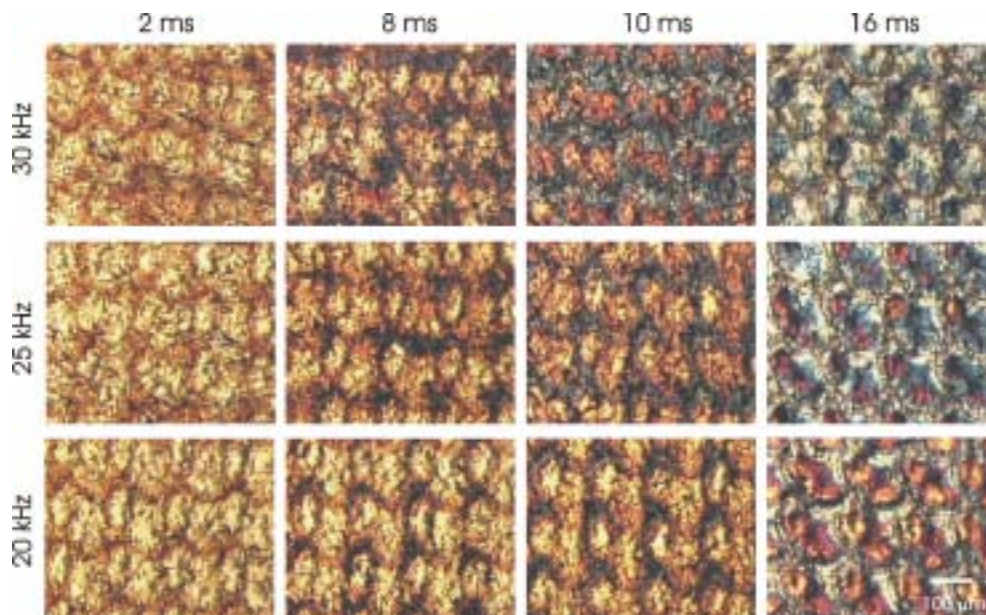


Fig. V.19. Imágenes de microscopía óptica de las muestras realizadas con distintos tiempos de apertura y frecuencias de repetición. Condiciones experimentales: lente de 100 mm, 19 A de intensidad de la lámpara de excitación, 94 mm entre lente de focalización y sustrato, 50 ms de tiempo de espera y 125 μm de distancia entre píxeles adyacentes. Todas las imágenes están a la misma escala.

V.3.2 Realización de motivos.

La elaboración de motivos en piezas de joyería y bisutería se realiza en muchas ocasiones mediante el grabado. Esta técnica consiste en procesar una imagen digital mediante la perforación de la superficie pulida de la pieza con un buril con punta de diamante. De este modo se realizan orificios de pocas decenas de micras de diámetro en las posiciones donde correspondan los píxeles de la imagen (Fig. V.20). Estos orificios son más oscuros que la superficie de la pieza, por lo que modifican la saturación del color y la luminosidad originales de la superficie, siendo sus efectos apreciables a simple vista. Para obtener distintas gradaciones de un mismo color basta con modificar la densidad superficial de orificios. De este modo, cuanto mayor es la densidad de orificios, menos luminoso y menos saturado se muestra el color de la superficie.

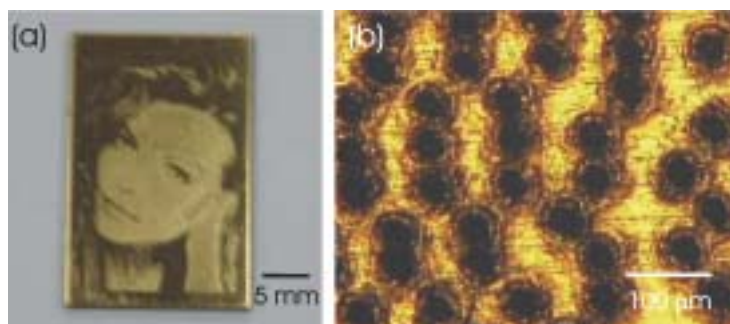


Fig. V.20. (a) Motivo grabado con buril en una medalla metálica. (b) Detalles de los orificios realizados.

En el caso del titanio, con el grabado sólo se conseguiría alterar el brillo y la saturación de su superficie, pero con el marcado con láser se logra modificar además la tonalidad en distintas gradaciones doradas, marrones, púrpuras y azules de forma muy sencilla. Dado que el marcado de píxeles no es un modo de trabajo implementado en el equipo láser, se ha desarrollado un protocolo que contiene las distintas pautas a seguir para transferir píxel a píxel una imagen digital en color sobre el titanio y el programa 'TiffPt' (Apéndice D.4),

que realiza la operación de transformación de imágenes TIFF a programas forma (FPT) que, al ser ejecutados en el equipo láser, llevan a cabo el marcado de dichas imágenes mediante la variación de los parámetros tecnológicos adecuados. El procedimiento a seguir es el siguiente (Fig. V.21):

- (a) a partir de la imagen en formato TIFF, se extrae una máscara digital para cada uno de los distintos colores que contiene el motivo. Esta tarea se puede efectuar fácilmente con cualquiera de los diversos programas de tratamiento de imágenes que existen en el mercado.
- (b) a continuación se carga cada una de las máscaras en el programa 'TiffFpt' y se eligen las condiciones experimentales asociadas al color con el que se desea que se marquen. La selección del color y, por consiguiente, los valores de los parámetros experimentales asociados a éste han de obtenerse a partir de una paleta de píxeles de colores realizada previamente.
- (c) se introducen los valores de los parámetros asociados al color deseado en el programa 'TiffFpt'. Al ejecutar la aplicación se obtienen una serie de programas FPT para cada una de las máscaras de color.
- (d) al ejecutar los programas FPT en el equipo láser se procesan automáticamente los diseños sobre titanio.

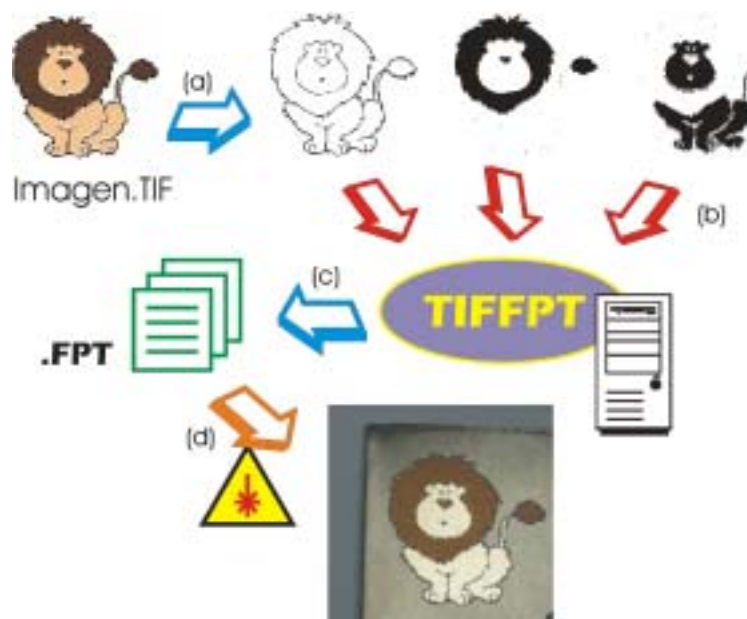


Fig. V.21. Proceso llevado a cabo en la realización del marcado píxel a píxel de imágenes en color sobre titanio: (a) realización de las máscaras de color, (b) introducción de los datos en el programa 'TiffPt', (c) obtención de los programas forma, (d) ejecución de los programas forma en el equipo láser y procesado del motivo sobre titanio.

Con este método de procesado con láser se pueden realizar todo tipo de motivos de colores. Por ejemplo, si no es necesaria una gran resolución, se pueden efectuar diseños a base de píxeles separados $300\ \mu\text{m}$ entre sí utilizando la lente de $160\ \text{mm}$ de distancia focal. Estas realizaciones, de $10\ \text{píxeles}/\text{mm}^2$ de resolución, muestran colores muy luminosos y atractivos. Al observarlos detenidamente se pueden apreciar a simple vista los píxeles del diseño, lo que podría presentar cierto interés artístico (Fig. V.22a). En estas condiciones los píxeles adyacentes entre sí apenas se solapan por lo que el color que presenta cada uno de ellos es prácticamente independiente del resto (Fig. V.22b).

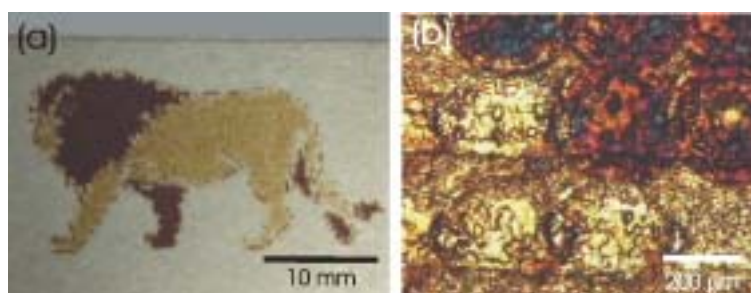


Fig. V.22. (a) Motivo realizado con una resolución de $10\ \text{píxeles}/\text{mm}^2$. (b) Detalle de una zona con píxeles de distintos colores.

Si se necesita una mayor resolución espacial, los diseños se han de confeccionar a base de píxeles separados entorno a $100\ \mu\text{m}$, esto es, utilizando la lente de $100\ \text{mm}$ de distancia focal. La Fig. V.23 muestra distintos diseños realizados con píxeles de colores separados $125\ \mu\text{m}$ entre sí. Con esta resolución ($64\ \text{píxeles}/\text{mm}^2$) se obtienen imágenes de gran calidad con colores muy uniformes y luminosos en las que no se aprecia el pixelado. En la Fig. V.24 se muestran algunos modelos de colgantes realizados mediante píxeles de colores. Como se puede observar en la Fig. V.25, a pesar de estar los píxeles solapados entre sí, éstos presentan una gran reproducibilidad de su patrón de colores y, además, no se aprecia el problema de cambio de color en las zonas de intersección entre píxeles de distintos colores.

Por otro lado, el tiempo de procesado, que depende del tipo de diseño que se desee realizar, se ha estimado entorno a 5 minutos por centímetro cuadrado de material tratado. Este tiempo de procesado es considerable pero puede ser optimizado para hacer esta técnica más

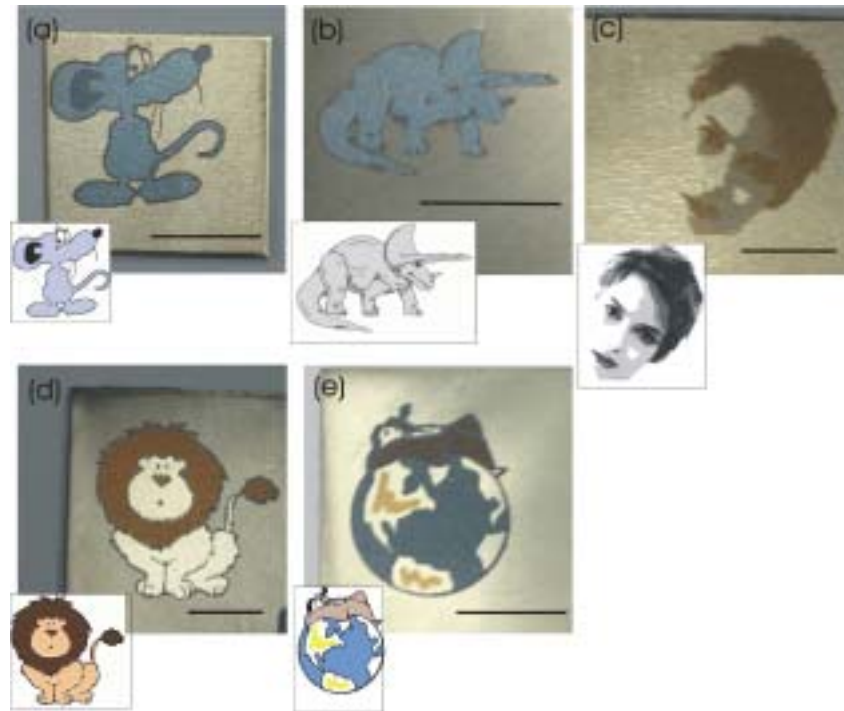


Fig. V.23. Motivos realizados con una resolución de 64 píxeles/mm² en (a) y (b) dos, (c) y (d) tres, y (e) cuatro colores distintos. En los recuadros se muestran las imágenes originales. Las escalas corresponden a 10 mm en todos los casos.



Fig. V.24. Colgantes realizados mediante píxeles de colores.

rentable desde el punto de vista industrial, por ejemplo, marcando los píxeles en un orden aleatorio para, así, poder eliminar el tiempo de espera. En cualquier caso, la inversión inicial para adquirir un equipo de tratamiento con láser puede ser más elevada que con otras técnicas alternativas, como por ejemplo, el grabado o la anodización. Sin embargo, el hecho

de poder obtener diseños en color sobre titanio con gran facilidad de preparación, sin necesidad de utilizar máscaras y con elevada velocidad de procesado, permite pensar que el tratamiento con láser es la técnica idónea para la realización de diseños personalizados. En este sentido, las técnicas convencionales posiblemente serían más rentables para la producción en serie de estos artículos.

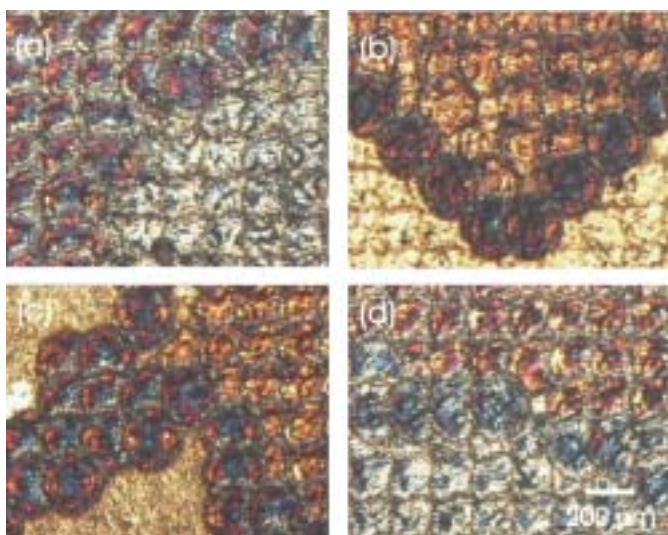


Fig. V.25. Detalles de zonas procesadas con distintos colores en los motivos realizados con una resolución de 64 píxeles/mm². Todas las imágenes están a la misma escala.

V.4 Conclusión.

El estudio llevado a cabo en este capítulo pone de manifiesto la posibilidad de realizar diseños en color sobre titanio mediante el procesado con láser.

- Mediante el marcado con trazas láser en modo continuo y en modo pulsado se pueden realizar diseños vectoriales con gran versatilidad, resolución espacial y control sobre el color. Con este modo de tratamiento la velocidad de procesado es elevada. Los motivos realizados en este modo de trabajo presentan un aspecto muy atractivo.
- El tratamiento mediante trazas solapadas permite realizar diseños en áreas extensas de colores sobre titanio. Las paletas de colores realizadas mediante la variación de distintos parámetros tecnológicos, tanto en modo continuo como en pulsado, demuestran la posibilidad de obtener colores muy vistosos, siendo las paletas

Capítulo V. Realización de Motivos Decorativos con Láser

realizadas en modo continuo más ricas en cuanto a la variedad de colores. Sin embargo, la poca uniformidad de ciertos colores y el tiempo de procesado pueden ser un inconveniente en el tratamiento en modo continuo.

- El tratamiento con píxeles de colores permite realizar mapas de bits sobre el titanio con gran resolución espacial. Los píxeles se efectúan en modo pulsado. Las paletas realizadas con este método muestran una gama de tonalidades muy atractivas. Este modo de procesado permite la elaboración de diseños de gran calidad, con un gran control del color y de su homogeneidad.