

TRABAJO ESPECIAL

DISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN CLAVO INTRAMEDULAR PARA FRACTURA DEL PERONÉ DISTAL

**PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES**

**CARVAJAL R., ANTONIO J.
CASTRO P., DANIEL J.**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

CARACAS, 2000

INTRODUCCIÓN

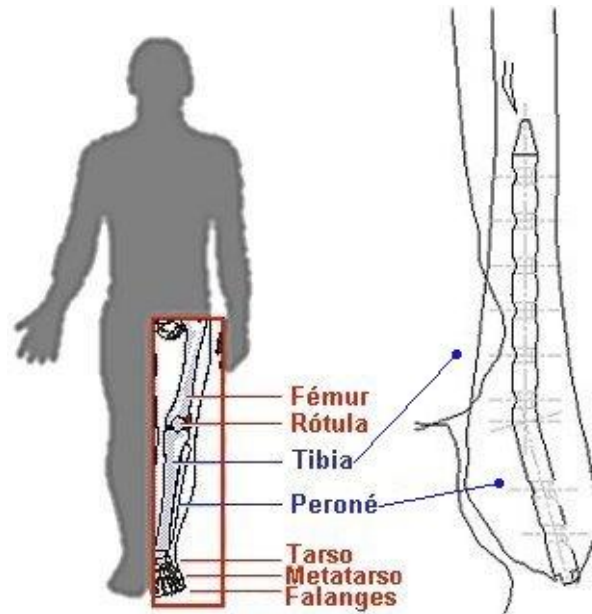
Los Huesos son un tipo especial de tejido conjuntivo que es rígido y actúa de soporte de los tejidos blandos del organismo. Constituye el componente principal de la estructura esquelética, protegen los órganos vitales, permiten la locomoción, entre otras funciones. La Fractura anatómica consiste en la rotura de un hueso o de un cartílago osificado. La mayor parte de las fracturas están causadas por agentes mecánicos (traumatismo), aunque también pueden ser producidas por una actividad cotidiana.

La Osteosíntesis es una especialidad de la traumatología, que agrupa toda una serie de procedimientos que tienen por objeto la recuperación de un hueso fracturado. Los procesos de Osteosíntesis estable consisten en la colocación de implantes que mantienen la solidez del hueso lesionado, evitando así las malformaciones y permitiendo la pronta recuperación del paciente.

Los implantes son elementos mecánicos diseñados para sustituir parcialmente la función de un miembro lesionado. Estos elementos deben reunir todas las características de resistencia y biocompatibilidad con el organismo humano. La mayoría de estos componentes tienen geometría relativamente compleja, dimensiones muy pequeñas, que requieren procesos de fabricación largos, de alta precisión y calidad. Los materiales de construcción consisten en aleaciones complejas que deben resistir, no sólo la acción de los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidos durante su operación, sino también la acción corrosiva del cuerpo humano.

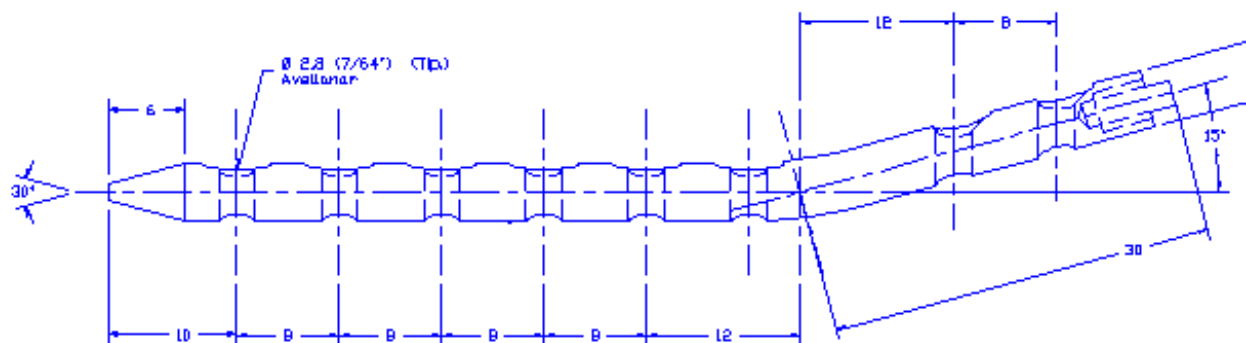
El estudio y fabricación de implantes para fracturas en las extremidades superiores e inferiores, es de gran interés para los especialistas en traumatología del CEBIO. El objetivo de este instituto es potenciar la investigación universitaria fabricando estos implantes en Venezuela con modelos novedosos, de excelente calidad y al menor costo. Nuestra motivación es formar parte de esta iniciativa de investigación e innovación. Por esto decidimos asumir el diseño de un procedimiento que facilite la construcción de un implante, diseñado por los especialistas en traumatología del Centro de Bioingeniería, para tratar las fracturas en la región distal del peroné, existiendo la necesidad de fabricarlo en serie para ser utilizado y comercializado en el campo de la traumatología.

El Peroné es un hueso delgado y flexible que junto con la Tibia conforma la estructura de las piernas tal como lo indica la figura. Este hueso es delgado y al fracturarse en la región distal (parte inferior del



Peroné) difícilmente se podría regenerar en su posición correcta sin ayuda de un implante.

El diseño del clavo es complejo; su diámetro es de 4.5mm y 84mm de longitud sobre el cual hay 8 agujeros de agarre pasantes y paralelos de 2.8mm de diámetro, distanciados 8mm entre sí. El clavo cuenta con un sujetador roscado de 2x2mm en el extremo doblado 15° y un cono truncado de entrada de 6mm de largo y 30° de conicidad. En este vástago doblado posee dos agujeros paralelos a los anteriores y con las mismas características. Tal como aparece en esta figura:



La utilización de un proceso de ensayo y error para construir los clavos prototipo, con fines demostrativos, es el problema principal. Por eso es indispensable el diseño de una metodología que permita la elaboración en serie de este dispositivo de la manera más eficiente. La solución que planteamos en este trabajo es la construcción de utillajes que faciliten la ejecución de los pasos más delicados tales como los agujeros, el sujetador y el doblado preciso.

Por otra parte las piezas de uso traumatológico expuestas a la vista, los utensilios empleados para su colocación y sus accesorios deben estar identificados con toda la información referente al modelo, norma, dimensiones y el nombre del instituto que los fabrica. Algunas marcas comerciales suministran esta información pintada sobre la superficie de acero inoxidable, con el inconveniente del desgaste que sufre la pintura en corto tiempo. Además los caracteres por lo general deben ser realizados en dimensiones inferiores a los 2mm.

Se requiere entonces de un procedimiento perdurable, alternativo al pintado. El fotograbado es la solución que planteamos a este problema ya que es el procedimiento más económico para este fin, fácil de realizar en serie y permite grabado de caracteres de dimensiones muy pequeñas sin alterar las dimensiones y las propiedades mecánicas de la pieza como si lo hacen los métodos mecánicos.

Los objetivos que se persiguen con este trabajo especial de grado son: en primer lugar, diseñar esta metodología y construir las herramientas necesarias para poder fabricar en serie este implante; en segundo lugar se busca determinar los parámetros de aplicación del grabado fotoquímico en las piezas acero inoxidable A316L.

La orientación de nuestro trabajo está dirigida hacia el diseño del mejor proceso de fabricación, aunque en nuestro caso, en la fabricación del clavo intramedular predomina el maquinado de precisión en su aspecto tradicional (torneado, fresado, taladrado y cepillado) y alternativo, en el que se aprovechan los fenómenos electroquímicos, fotoquímicos y térmicos para dar forma al metal.

INDICE DE CONTENIDO

1.	MAQUINADO EN ACERO INOXIDABLE A316L	2
1.1.	ACERO AISI A 316L	5
1.2.	TORNEADO	5
1.2.1.	Tipos de herramientas	5
1.2.2.	Velocidades de corte	11
1.3.	FRESADO	11
1.3.1.	Tipos de herramientas	11
1.3.2.	Velocidades de corte	13
1.4.	TALADRADO	14
1.4.1.	Tipos de herramientas	14
1.4.2.	Velocidades de corte	15
1.5.	ESCARIADO	16
1.5.1.	Tipos de herramientas	16
1.5.2.	Velocidades de corte	18
1.6.	CÁLCULO DE LOS TIEMPOS DE MAQUINADO	18
2.	DISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CLAVO INTRAMEDULAR	21
2.1.	CONTRAPUNTO INVERSO	22
2.2.	UTILLAJES PARA TALADRADO	23
2.2.1.	Cama para clavos rectos	28
2.2.2.	Cama para clavos doblados	29
2.3.	HERRAMIENTA DE DOBLADO	31
2.4.	PROCEDIMIENTO PARA FABRICACIÓN DEL CLAVO (Carta de proceso)	34
3.	GRABADO FOTOQUÍMICO	43
3.1.	MAQUINADO FOTOQUÍMICO Y GRABADO FOTOQUÍMICO	43
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	43
3.2.1.	Preparación y selección de la pieza de trabajo	44
3.2.2.	Aplicación de la emulsión fotosensitiva	48
3.2.3.	Secado	50
3.2.4.	Preparación de la fotoherramienta o diseño	51
3.2.5.	Exposición	54
3.2.6.	Revelado	58
3.2.7.	Grabado	60
3.2.8.	Despojado e inspección del trabajo	65
3.3.	DEFECTOS Y SUS CAUSAS	66
3.4.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	67
3.4.1.	Limitaciones dimensionales	67
3.4.2.	Tolerancias	68
3.4.3.	Calidad de los filos	69
3.5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	69
4.	METODOLOGÍA PARA EL GRABADO DEL ACERO A316L	72
4.1.	EQUIPOS Y COMPONENTES UTILIZADOS	72
4.1.1.	Horno de secado	72
4.1.2.	Cámara de exposición	73
4.1.3.	Probetas	76
4.1.4.	Fotoherramienta	76

4.2.	SOLUCIONES UTILIZADAS	77
4.2.1.	Solución desgrasante	77
4.2.2.	Solución para decapado	77
4.2.3.	Solución para pasivado	77
4.2.4.	Solución de ataque	78
4.3.	PARAMETROS DE TRABAJO	78
4.4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	79
4.4.1.	Preparación de las probetas	79
4.4.2.	Determinación del tiempo de exposición	81
4.4.3.	Determinación del tiempo de ataque	83
4.4.4.	Inspección visual	84
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	86
5.1.	TIEMPO ÓPTIMO DE EXPOSICIÓN	86
5.1.1.	Análisis cualitativo	86
5.2.	TIEMPO ÓPTIMO DE GRABADO	91
5.2.1.	Análisis cualitativo a simple vista	91
5.2.2.	Análisis cualitativo al microscopio	93

APÉNDICES

1. NORMA ISO 513 PARA DETERMINACIÓN DE LOS MATERIALES USADOS EN PLACAS PARA MÁQUINAS DE HERRAMIENTAS Y SU CLASIFICACIÓN

2. NORMA ISO 18232-991

3. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR LOS UTILLAJES Y LAS PIEZAS AUXILIARES PARA LA FABRICACIÓN DEL CLAVO INTRAMEDULAR

4. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS PARA CONSTRUIR EL HORNO Y LA CÁMARA DE EXPOSICIÓN

5. FOTOGRAFÍAS DE LOS CARACTERES DURANTE EL FOTOGRABADO

6. FOTOS DEL PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LOS UTILLAJES.

7. FOTOS DEL PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LOS CLAVOS

8. PROGRAMAS EN CÓDIGOS "G" PARA FRESADORA CNC

9. PLANOS (**Usted requiere Auto CAD-2000**)

Plano 1: Clavo intramedular para fractura del peroné distal

Plano 2: Contrapunto inverso

Plano 3: Utillaje para taladrado en el clavo recto

Plano 4: Herramienta Dobladora

Plano 5: Utillaje para taladrado del clavo doblado

Plano 6: Fotoherramienta

Plano 7: Horno de secado

Plano 8: Cámara de exposición

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Herramientas para desbaste en acero inoxidable y sus dimensiones	6
Figura 1-3: Herramienta circular para afinado	9
Figura 1-2: Herramientas para afinado	8
Figura 1-4: Geometría sugerida para una fresa para acero inoxidable.....	12
Figura 1-5: Geometría sugerida para las brocas usadas en acero inoxidable.....	14
Figura 1-6: Tipos de escariadores	17
Figura 2-1 : Aspecto del clavo intramedular para fractura del peroné distal.	21
Figura 2-2 : Contrapunto inverso	22
Figura 2-3 : Utilización del contrapunto invertido	23
Figura 2-4: Líneas de fuerza en una pieza agujerada, sometida a tracción.	25
Figura 2-5 : Configuración básica de la sección transversal de los urillajes	27
Figura 2-6: Utillaje para agujero piloto en clavos rectos.	28
Figura 2-7: Bocina de acero AISI O1	29
Figura 2-8: Utillaje para agujero en clavos doblados.....	30
Figura 2-9: Herramienta de doblado diseñada y sus partes	32
Figura 2-10 : Mordaza y ubicación.....	33
Figura 2-11: Palanca- rueda y trayectoria de la fuerza	33
Figura 3-1 : Placa fotosensitiva aplicada sobre la superficie.....	48
Figura 3-2: Centrifugador de placas de STS systems.	49
Figura 3-3: Hornos de secado.	50
Figura 3-4 : Aplicación tipo CAD creada para facilitar el diseño de circuitos impresos.	52
Figura 3-5: Disposición del conjunto pieza-fotoherramienta para la exposición	54
Figura 3-6 : Cámaras de exposición	56
Figura 3-7 : Proceso de exposición	57
Figura 3-8 : Partes del revelado.....	59
Figura 3- 9: Grabado en una o dos caras	60
Figura 3-10: Máquinas para grabado de C.I.B.S. Etching supplies	65
Figura 3-11: Limitaciones dimensionales de las piezas sometidas a maquinado fotoquímico	67
Figura 4-1: Horno de secado	73
Figura 4-2 : Cámara de Exposición	74
Figura 4-3: Diagrama de distribución.....	75
Figura 4-4 : Forma de las probetas.....	76
Figura 4-5: Fotoherramienta	76
Figura 4-6: Sand Blasting en probetas del Grupo 1.....	79
Figura 5-1 : Proceso de grabado en superficie muy rugosa.	98
Figura 5-2: Proceso de grabado en una probeta más lisa	98

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Herramientas diversas con pastilla dura soldada. Según norma ISO 243-1975 o DIN 4982-1980 ..	7
Tabla 1-3: Composición de algunas plaquitas de carburos metálicos	7
Tabla 1-4: Herramientas de forma de diversos tipos.	10
Tabla 1-5 : Parámetros nominales para torneado en acero inoxidable forjado serie A316x.....	11
Tabla 1-6: Parámetros para torneado en acero inoxidable forjado serie A316x	11
Tabla 1-7 : Parámetros nominales para fresado en acero inoxidable forjado serie A316x.....	13
Tabla 1-8: Parámetros nominales para taladrado en acero inoxidable forjado serie A316x.....	16
Tabla 1-9 :Dimensiones recomendadas para escariadores para acero inoxidables desde 135 al 425HB.	16
Tabla 1-10 : Parámetros de escariado para aceros inoxidables forjados serie A316x.	18
Tabla 1-11: Modificaciones que presentan los cálculos dependiendo de las operaciones.....	19
Tabla 1-12: Cantidad admisible de viruta a arrancar V' en $cm^3/(kWmin)$	20
Tabla 3- 1: Efectos de la pobre calidad del metal en el proceso de maquinado fotoquímico.	45
Tabla 3- 2: Rangos de grababilidad en algunos metales y aleaciones usando grabado fotoquímico.....	45
Tabla 3-3: Factores de variación del tiempo de exposición en función de la distancia a la fuente luminosa .	56
Tabla 3-4: Fórmulas químicas para grabado en diversos metales.	61
Tabla 3-5: Ancho o diámetro mínimo para diversos metales.	67
Tabla 3-6: Tolerancias en el grabado fotoquímico de varios metales en mm.....	68
Tabla 3-7: Tolerancias en el grabado fotoquímico de varios metales en mm.....	68
Tabla 3-8: Ventajas y desventajas del maquinado fotoquímico.....	70
Tabla 4- 1 : Intensidad luminosa en cada sector de la superficie de exposición.	75
Tabla 4-2: Composición química del acero A316L	76
Tabla 4-3: Ensayos del tiempo de exposición por grupo.	81
Tabla 4-4: Secuencia del ensayo de ataque.....	83
Tabla 5-1 : Símbolos de los caracteres de la probeta.....	86
Tabla 5-2 : Resultados de las pruebas de exposición Grupo 1	87
Tabla 5-3: Resultados de las pruebas de exposición Grupo 2	88
Tabla 5-4: Resultados de las pruebas de exposición Grupo 3	89
Tabla 5-5: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 1	91
Tabla 5-6: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 2	92
Tabla 5-7: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 3	93
Tabla 5-8 : Símbolos de los caracteres de la probeta.....	94
Tabla 5-9: Resultados de las medidas de las pruebas de exposición.	95

1. MAQUINADO EN ACERO INOXIDABLE A316L

Los aceros inoxidables corresponden a una familia que contienen un mínimo de 12% de Cr, lo que permite la formación de una delgada capa protectora de óxido de cromo cuando el acero se expone al oxígeno. El cromo es un elemento estabilizador de la ferrita. Los aceros inoxidables comprenden varias familias de aleaciones, cada una con sus propias características, aleando elementos en un determinado rango de propiedades. Los aceros inoxidables se seleccionan por su excelente resistencia a la corrosión.

Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. El acero inoxidable tiene un sinnúmero de aplicaciones de uso industrial y médico. En el caso de esta investigación, la aplicación que se destaca es la fabricación de implantes para fijar o sustituir huesos rotos, ya que tipos específicos de estos aceros resisten a la acción de los fluidos corporales.

En general los aceros inoxidables son considerados materiales difíciles de maquinar comparados con otros metales, tales como el aluminio o el acero de bajo carbono. El acero inoxidable se caracteriza por ser gomoso y duro de cortar, observándose una tendencia a producir largas y correosas virutas que se agarran del filo de la herramienta. Esto puede resultar en un acortamiento de la vida de la herramienta y una degradación del acabado superficial. Estas dificultades en el maquinado provienen intrínsecamente de las propiedades mecánicas y físicas de este acero, por ejemplo:

- Alta resistencia a la tracción.
- Amplia diferencia entre el esfuerzo de fluencia y la resistencia última de tracción (Zona plástica amplia).
- Alta ductilidad y dureza.
- Alta tasa de endurecimiento al trabajo en frío.

- Baja conductividad térmica.

Hay cuatro categorías de aceros inoxidable basadas en la estructura cristalina y el mecanismo de endurecimiento. La maquinabilidad de esta variedad de aceros puede variar según su clasificación:

- **Ferríticos:** Contienen más de 30% de Cr y menos de 0.12 % de C. Debido a su microestructura, estos aceros tienen buena resistencia mecánica y moderada [ductilidad](#) derivada del endurecimiento por solución sólida y por deformación. Si los contenidos de C o de Cr son ambos altos, la precipitación de partículas de carbono proporciona un endurecimiento por dispersión, pero que también fragiliza la aleación. Los aceros inoxidable ferríticos tienen excelente resistencia a la corrosión, una moderada conformabilidad y fácil maquinabilidad.
- **Martensíticos:** Son aleaciones con una composición de 17 % Cr-0.5 % C. Al ser calentadas a 1200°C producen 100% de austenita, la cual se transforma en martensita en el templeado. La martensita es luego revenida para producir combinaciones adecuadas de alta dureza y resistencia mecánica manteniendo una adecuada resistencia a la corrosión. Estos aceros tienen excelente templabilidad y resisten el ablandamiento a temperaturas elevadas, haciendo a las aleaciones útiles para aplicaciones como cuchillos de alta calidad, bolas para rodamientos y válvulas. Son usualmente maquinables, excepto cuando se han realizado tratamientos térmicos previos. Poseen una maquinabilidad intermedia, no tan buena como los ferríticos pero sin las complicaciones de los austeníticos.
- **Austeníticos:** El níquel es un elemento estabilizador de austenita, incrementa el tamaño del campo de austenita eliminando parcialmente la ferrita de las aleaciones Fe-Cr-C. Si el

contenido de carbono es inferior a 0.03%, los carburos no se forman y el acero es casi en su totalidad austenítico a temperatura ambiente.

Estos aceros tienen excelente [ductilidad](#), conformabilidad y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un endurecimiento extenso por solución sólida, pueden ser trabajados en frío para obtener resistencias mayores que las de los aceros inoxidables ferríticos. Estos aceros tienen excelentes propiedades al impacto a bajas temperaturas, puesto que no presentan temperatura de transición. Sin embargo son una variedad difícil de maquinar por su alto grado de gomosidad y dureza durante el maquinado. Además los aceros inoxidables austeníticos no son ferromagnéticos como los dos anteriores.

Las herramientas de trabajo para maquinar aceros inoxidables deben estar firmemente apoyadas. Durante el corte la lubricación es necesaria para evitar el deterioro de la herramienta y la superficie de la pieza. Los aceros austeníticos, por ejemplo, tienen tendencia al endurecimiento durante el maquinado, por lo tanto debe realizarse un corte continuo pues si la herramienta se detiene contra la superficie de trabajo, aparecerán puntos duros que serán difíciles de remover, creándose así irregularidades en la superficie de trabajo y el desgaste excesivo de la herramienta. Deben evitarse las vibraciones y los impactos en el material.

Las herramientas para maquinar acero inoxidable deben tener flancos amplios, un mango que ofrezca máximo soporte y un área de trabajo amplia para evitar aglomeración de viruta.

Debido a la baja conductividad térmica del acero inoxidable se usa una amplia gama de fluidos refrigerantes. Por ejemplo los Aceites a base de Azufre se usan generalmente para cortes pesados a bajas velocidades. Para cortes ligeros a grandes velocidades con herramientas de carburo se usan aceites solubles en agua.

1.1. ACERO AISI A 316L

El acero A316L es un acero inoxidable de tipo austenítico que contiene una baja concentración de carbono, concentraciones de Ni y Cr (Ver **Tabla 1-1**) que le otorga a la aleación una excelente resistencia a la [corrosión intergranular](#). La concentración de Mo proporciona una elevada dureza. Este acero es especialmente recomendado para partes que son fabricadas por soldadura. Es antimagnético cuando ha sido templado pero cuando son trabajadas en frío se vuelven ligeramente magnéticos. Esta variedad de acero inoxidable no escapa de las complicaciones propias de todos los aceros inoxidables.

Tabla 1-1: Composición química del acero A316L

Composición química

C	0.03%
Mn	2%
P	0.045%
S	0.03%
Si	1%
Cr	16-18%
Ni	10-14%
Mo	2-3%

Tomado del ASM Handbook.

1.2. TORNEADO

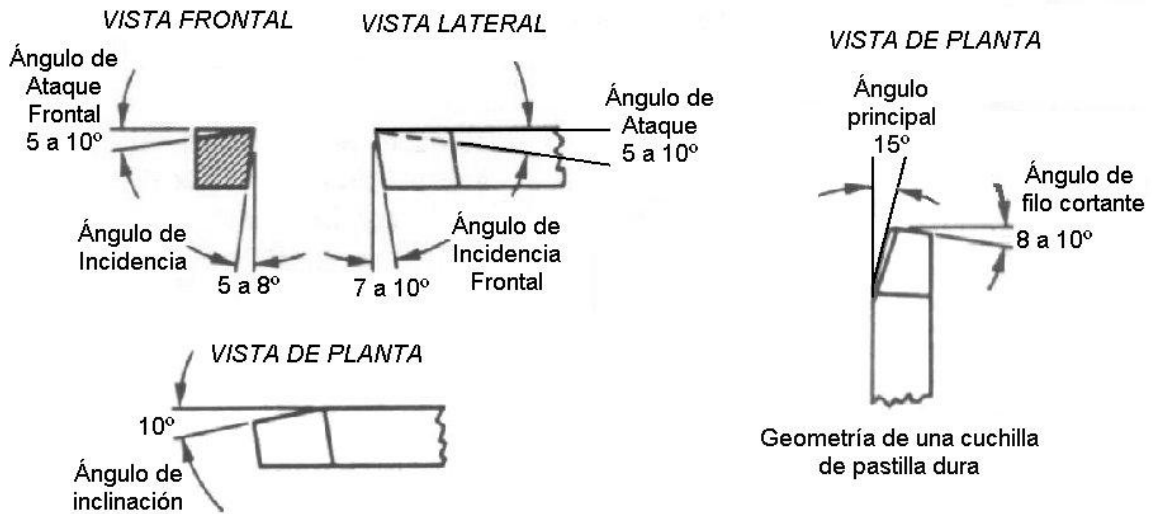
1.2.1. Tipos de herramientas

a. Herramientas para desbaste

Para [tornear](#) acero inoxidable es necesario utilizar herramientas que eviten la formación de virutas continuas. La **Figura 1-1** muestra las herramientas usadas y sus dimensiones recomendadas, tanto en [acero rápido](#) y como con pastilla dura ([WIDIA](#)). Las herramientas con 5 a 10° de ángulo de ataque positivo generarán menos calor y un corte más libre con superficies limpias. Para asegurar un apoyo adecuado para el filo cortante, el ángulo de incidencia debe estar entre 7 y 10°. Para los aceros austeníticos, debido a su dureza, requiere de herramientas con ángulos de ataque entre 5 y 10° para

controlar la viruta y puede requerirse aumentar el ángulo de incidencia para prevenir roces y golpes localizados sobre la pieza de trabajo.

Figura 1-1: Herramientas de [acero rápido](#) para desbaste en acero inoxidable y sus dimensiones



Los aceros A316 y A316L tienden a producir virutas correosas que son molestas. Esta dificultad es aliviada con el uso de pastillas duras que sumado a un control de la longitud de las virutas, disminuye la fricción del corte en el filo de la herramienta. La profundidad del corte y [la velocidad de avance](#) es gobernada por el ancho y la profundidad de la herramienta, para evitar el debilitamiento del filo cortante. Si la pastilla no está bien soportada es aconsejable tener un ángulo mayor de ataque en la configuración de la herramienta.

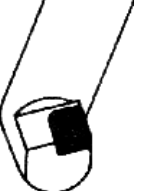
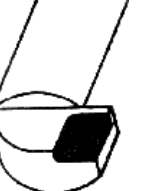
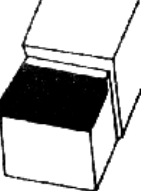
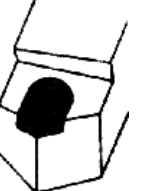
La composición del material de las placas duras se rige por la norma **ISO 513**. Esta norma divide los metales a tornearse en tres categorías: **P** para aceros al carbono y aceros inoxidables Martensíticos y ferríticos; **M** para aceros inoxidables del tipo austenítico y **K** para fundiciones muy maleables. Además la norma ISO 513 divide los materiales de las placas en nueve categorías (Ver [Apéndice 1](#)) de las cuales la HT y HC son las utilizadas en acero inoxidable.

La geometría de las pastillas duras para tornearse está determinada por la norma **ISO 1832-1991** (Ver [Apéndice 2](#)). Para hacer desbaste ligero las placas recomendadas son las **ISO1832-**

CNMG120412MR e **ISO1832-CNMG190616MR**. Para desbaste medio **ISO1832-CNMG120408MM** y para desbaste pesado las **ISO1832-CNMG190616HR** e **ISO1832-CNMG120412QR**, estas dos últimas de una cara (Ver geometría en [Apéndice 2](#)).

En la **Tabla 1-2** hay ejemplos de diversas configuraciones de herramientas con pastilla de carburo.

Tabla 1-2: Herramientas diversas con pastilla dura soldada. Según norma ISO 243-1975 o DIN 4982-1980

Cuchilla para desbastar ISO 1 DIN 4971  Kr=75°	Cuchilla para refrentar ISO 6 DIN 4980  Kr=90°	Cuchilla para tronzar ISO 7 DIN 4981  Kr=90°	Cuchilla para desbastar interiores ISO 8 DIN 4973  Kr=75°	Cuchilla para acabar interiores ISO 9 DIN 4974  Kr=92°
Cuchilla acodada para desbastar ISO 2 DIN 4972  Kr=45°	Cuchilla acodada para refrentar (Depende del fabricante)  Kr=90°	Cuchilla para acanalar ISO 4 DIN 4976  Kr=90°	Cuchilla para ángulos (Depende del fabricante)  Kr=90°	Cuchilla para alisar (Depende del fabricante)  Kr=90°

Datos derivados de: AL Casillas, Capítulo 7, Pag 340-341.

Tabla 1-3: Composición de algunas plaquitas de carburos metálicos

Recomendadas para aceros inoxidables.

Tipo	Comp.	Empleo	Tipo	Composición	Empleo
S1	78% W 16% TiC 6% Co	Trabajo para aceros a altas velocidades de corte (>200m/min) y pequeños avances. Operaciones de acabado. Buena resistencia al desgaste, poco a la flexión.	S2	76% W 16% TiC 8% Co	Trabajo con velocidad de corte mediana y con avances medios.

Otros tipos de pastillas

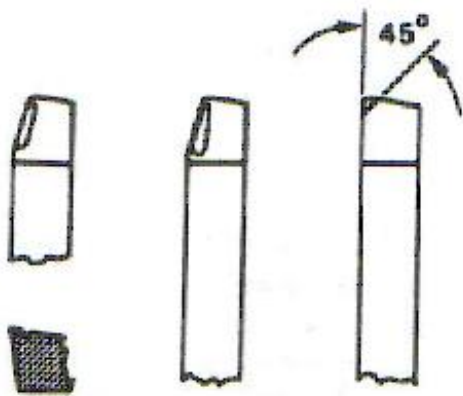
S3	89% W 5% TiC 6% Co	Trabajo con velocidades de corte < 120m/min. Buena resistencia a la flexión, menor al desgaste.	G1	94% W 6% Co	Para fundiciones con dureza Hd < 200, Bronce, Cobre, Latón y aleaciones ligeras.
H1	94% W 6% Co	Trabajo de las fundiciones duras Hd > 200, aceros templados, materiales sintéticos.			

Derivado de: Mario Rossi. Máquinas Herramientas modernas. 7^{ma} ed. Pg30.

Las herramientas de carburo pueden ser utilizadas para desbaste y permiten altas velocidades como las herramientas de [acero rápido](#). Sin embargo, estas herramientas requieren siempre una mayor atención en la rigidez de sujeción. Los cortes interrumpidos deben ser evitados.

b. Herramientas para afinado

Figura 1-2: Herramienta circular para afinado

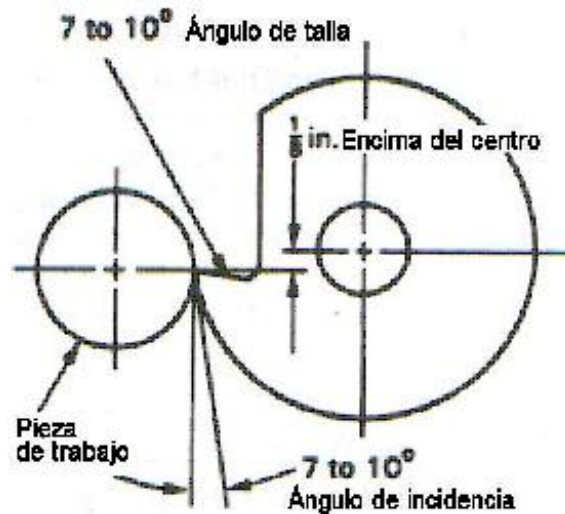


El tipo de cuchilla para esta aplicación usualmente tiene un ángulo oblicuo de relieve que es de 3°, pero puede ser mayor, para cortes profundos y esto se debe aplicar al ángulo de ataque y al ángulo de incidencia (**Figura 1-1**). El ángulo de incidencia 7 a 10°. En lugar de este ángulo puede ser establecido un radio similar o una concavidad poco profunda. El filo cortante necesita un ángulo entre 5 y 15°.

Los ángulos para herramientas circulares de acabado (**Figura 1-3**) son similares a los anteriormente mencionados. Cuchillas, con un ángulo de talla o incidencia entre 7 y 10°. Las herramientas circulares de acabado son más rígidas que las cuchillas y resisten más golpes. De hecho, existe mayor preferencia por estas herramientas para automatizar operaciones de roscado que es realizado dentro de agujeros, ya que debido a su tamaño se logra buena disipación de calor.

Las pastillas de carburo no son recomendables para el afinado de la superficie, ya que los impactos interrumpidos fragmentan la pieza. Si aún se desea usar este tipo de herramientas, la geometría de las pastillas pueden tener las siguientes configuraciones: **ISO1832-CNMG120408MF**, **ISO1832-CCMT09T304**, **ISO 1832-CCMT09T308**, (Ver [Apéndice 2](#)).

Figura 1-3: Herramientas para afinado



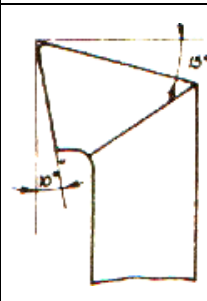
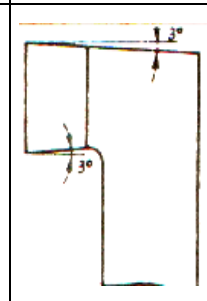
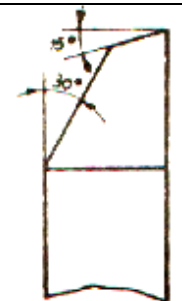
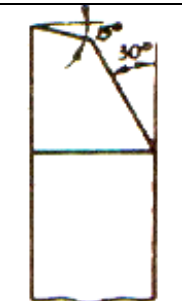
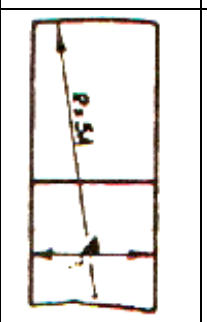
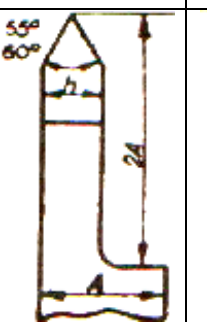
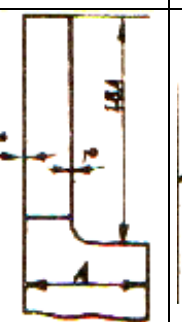
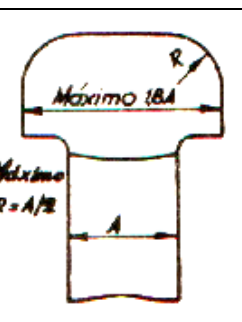
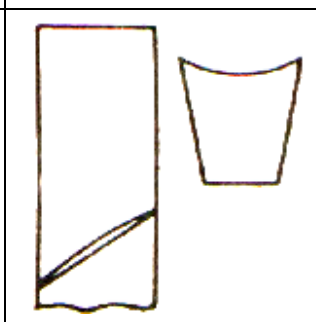
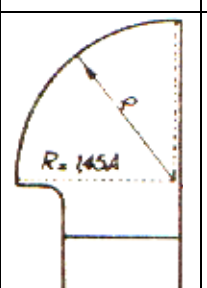
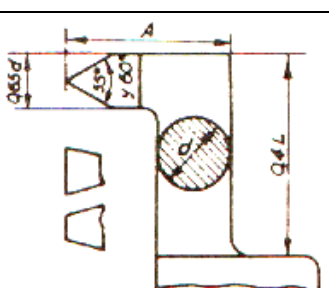
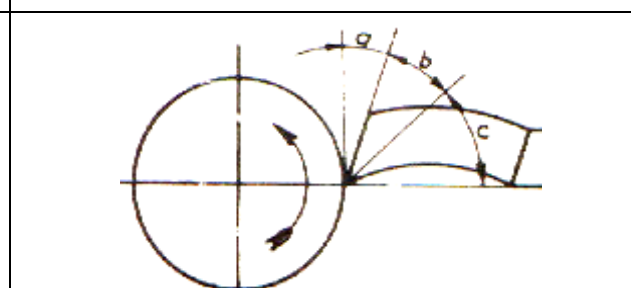
c. *Herramientas de forma.*

Las velocidades y los avances de estas herramientas son influenciados por la relación del diámetro de la barra y la profundidad de corte y la forma del contorno de la herramienta. Generalmente el ancho de las herramientas de forma no debe exceder $1\frac{1}{2}$ veces el diámetro de la pieza trabajada, de otra manera causa problemas.

Las herramientas de cola de milano son diseñadas con ángulos de tala de 7 a 10° y con un ángulo de ataque 5 a 10° . Los ángulos para las herramientas circulares de forma son similares a los mostrados en la **Figura 1-3**. Ángulos de ataque fuera del rango de 5 a 10° , pueden provocar rugosidades en la superficie de la pieza de trabajo. Al diseño de la herramienta se incorpora un ángulo de incidencia de 1 a 5° , dependiendo de la profundidad del corte. Para prevenir roturas y

calor puntualizado, durante el uso de estas herramientas se hace necesario la presencia de esquinas redondeadas.

Tabla 1-4: Herramientas de forma de diversos tipos.

Esquinado interior	Acanalado interior	Costado izq.	Costado der.	Acanalado profundo	Acanalado	
						
Afinado rígido	Roscar	Tronzar	Radio doble	Refrentado a dos manos		
						
Radio simple	Roscado interior		Tronzado especial			
						

Datos derivados de: AL Casillas. Capítulo 7. Paa 327-330.

Las herramientas de carburo son usadas para este fin en algunas operaciones, sin embargo estas herramientas de acabado no se utilizan si en el proceso hay impactos interrumpidos.

1.2.2. Velocidades de corte

En la **Tabla 1-5** se listan las [velocidades de corte](#) y los avances en la **Tabla 1-6** se muestran los parámetros para acabado y formas.

Tabla 1-5 : Parámetros nominales para [torneado](#) en acero inoxidable forjado serie A316x.

	Profundidad de corte (mm)	Acero rápido			Carburo				Material
		Velocidad (m/min.)	Avance (mm/rev)	Material	Velocidad (m/min.)	Vel. De Cilindrado (m/min.)	Vel. Refrentado (m/min.)	Avance (mm/rev)	
<i>A316F</i>	3.8	27	0.38	T15	107	122	160	0.38	C2, CC2
	0.75	32	0.18		122	137	183	0.18	
<i>A316, A316L</i>	3.8	26	0.38	M42	99	107	137	0.38	C3, CC3
	0.75	30	0.18		107	122	160	0.18	

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 4, Pag 692

Tabla 1-6: Parámetros nominales para [torneado](#) en acero inoxidable forjado serie A316x (Acabado y herramientas de forma)

	Velocidad (m/min.)	Avance para herramienta de ancho. (mm/rev)							Material
		1.6mm	3.2mm	6.4mm	13mm	25mm	38mm	50mm	
<i>A316F</i>	14	0.38	0.05	0.05	0.05	0.038	0.025	0.025	M2, M3, C2
	91	0.038	0.05	0.05	0.038	0.025	0.025	0.025	
<i>A316, A316L</i>	23	0.038	0.038	0.05	0.05	0.038	0.025	0.025	C2
	84	0.038	0.038	0.05	0.05	0.038	0.025	0.25	

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 5, Pag 693

1.3. FRESADO

1.3.1. Tipos de herramientas

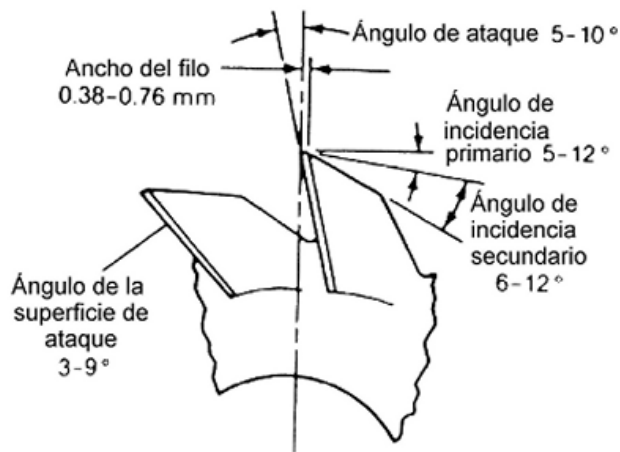


Figura 1-4: Geometría sugerida para una fresa para acero inoxidable

Para realizar el [fresado](#) se utilizan herramientas de [acero rápido](#) o herramientas con pastillas de carburo, particularmente para las aleaciones de difícil maquinado. Generalmente, los acabados más lisos se obtienen con herramientas de corte del tipo espiral o helicoidal a altas revoluciones, particularmente en cortes sobre 19 mm de

ancho. Las fresas helicoidales realizan un corte libre y sin vibraciones. Las fresas de

dientes gruesos (o de trabajo pesado) trabajan bajo menos esfuerzo y permiten velocidades más altas que las fresas de dientes finos. Además están geométricamente dispuestas con más espacio entre los filos para permitir el flujo del material removido.

Para [fresado](#) pesado plano, una fresa de corte grueso en espiral de 45° mano derecha corta con rapidez, el ángulo más alto permite que más dientes se pongan en contacto al mismo tiempo con la pieza de trabajo, aplicando presión en el árbol y el husillo se reduce la vibración.

Fresado hendiduras profundas en acero inoxidable algunas veces se presentan problemas de vibraciones, ligaduras y atascamiento de virutas anchas. Éstas dificultades son eliminadas por el uso de fresas de dientes escalonados. Estas consisten en herramientas de dientes alternados que cortan

solo una mitad de la hendidura, tomando así un pequeño mordisco y produciendo una pequeña viruta.

La geometría mostrada (**Figura 1-4**) provee suficiente fuerza y espacio. Las fresas de hasta 100mm de diámetro tienen ángulos de ataque máximos tales como los mostrados. Las fresas pequeñas requieren grandes ángulos de incidencia. Es necesario suficiente espacio detrás del filo cortante de todos los dientes para evitar el roce o efecto de bruñido. Una excesiva vibración indica que la fresa tiene insuficiente ángulo de incidencia y la flexión de la herramienta en el corte indica un ángulo de ataque muy grande o [velocidades de corte](#) muy altas.

1.3.2. Velocidades de corte

En la siguiente tabla se observan las velocidades de corte para [fresado](#) y sus avances para acabado en acero inoxidable usando herramientas de [acero rápido](#) o de pastilla de carburo. Puede ser necesario variar los avances nominales. Si el avance es muy lento la herramienta producirá un efecto indeseable de bruñido pero si es muy rápida la herramienta acortará su vida de manera muy violenta.

Tabla 1-7 : Parámetros nominales para [fresado](#) en acero inoxidable forjado serie A316x

	Velocidad de corte en m/min.	Avance en mm/ diente(*) con una fresa de diámetro				Material de la herramienta
		6mm	13mm	19mm	25-50mm	
<i>A316F</i>	30	0.025	0.05	0.1	0.13	M2, M7, C2
	91	0.025	0.05	0.1	0.13	
<i>A316, A316L</i>	24	0.05	0.075	0.13	0.15	
	82	0.025	0.05	0.075	0.13	

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 9, Pag 699

(*) Revise la ecuación Ec6 de la **Tabla 1-7**.

Las velocidades y avances también varían entre cortes bastos y cortes para acabado. Indiferentemente del tipo de corte, la pieza de trabajo y herramienta son sumergidas en aceite sulfurizado y diluido con aceite parafinado o preferiblemente una solución emulsificante. El [fresado](#)

genera mucho calor que es controlado por el fluido de corte, la pieza de trabajo se tuerce o la herramienta se desgasta rápidamente si no es controlado el calor.

Una vez que el [fresado](#) ha sido iniciado, no debe detenerse porque la herramienta se socava cuando reinicia el corte. Si es necesario volver para hacer una nueva pasada, la herramienta se separa de la pieza de trabajo, antes de comenzar de nuevo.

1.4. TALADRADO

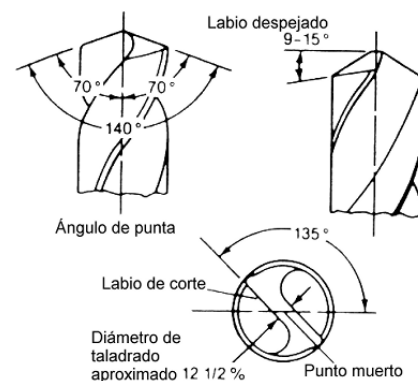
En cualquier operación de [taladrado](#) se recomienda tomar en cuenta cualquiera de estos factores.

- ◆ Mantener la pieza de trabajo limpia de virutas y removerla frecuentemente porque la suciedad y las virutas producen un efecto abrasivo que desgasta la broca.
- ◆ Afilar correctamente las brocas de trabajo.
- ◆ Alinear propiamente las brocas y la pieza de trabajo sostenerla firmemente.
- ◆ Dirigir propiamente al agujero el flujo de líquido refrigerante.
- ◆ Introducir las brocas de forma intermitente con pequeñas longitudes de [taladrado](#) para evitar latigazos o flexiones, que partan la broca o produzcan un trabajo impreciso.
- ◆ Avances violentos y bajas velocidades son necesarios para reducir o eliminar el endurecimiento del material.

1.4.1. Tipos de herramientas

Cuando se trabaja con acero austenítico, es aconsejable usar una punta muy afilada de 140° en lugar de punta simple para evitar la dureza al marcar. La **Figura 1-5** muestra la geometría recomendada de una broca para acero inoxidable. Utillajes de guías para ayudar a penetrar en las marcas. Para taladrar el acero inoxidable se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

Figura 1-5: Geometría sugerida para las brocas usadas en acero inoxidable.



- Evitar congestionar con virutas las ranuras de la broca ya que se produce un excesivo rozamiento que quiebra la broca. Para evitar eso se sugiere extraer la broca ocasionalmente durante el corte y taladrar los agujeros tres o cuatro veces desde un diámetro primario (más pequeño) y una o dos veces los diámetros secundarios hasta alcanzar el diámetro esperado. Esto también se hace para disminuir la presión del [avance](#).
- El [taladrado](#) no debe ser prolongado pues sucederá el endurecimiento de la superficie transversal al corte. La broca debe ser extraída rápidamente del agujero, descongestionada de viruta y reinsertada a gran velocidad para evitar el lustre prolongado y superficies vidriosas en el fondo del agujero.

a. Brocas de pequeño diámetro

Los procedimientos usando brocas de diámetro pequeño (1.8mm. e inferiores), arrojan mejores resultados que las brocas de tamaño más grande. Las brocas pequeñas están sujetas a deflexión del tipo torsional y longitudinal debido a su relación diámetro longitud. Las dimensiones de la sección transversal de las brocas pequeñas es proporcionalmente más gruesa que la de las brocas grandes. Esta sección más gruesa añade fuerza a la presión de trabajo, pero disminuye el despeje de la viruta. Por consiguiente la profundidad de cada pasada debe ser reducida.

b. Fresas de taladrar

En la **Figura 1-5** se muestran las dimensiones sugeridas para brocas de [acero rápido](#) usadas en acero inoxidable. El ángulo de punta debe ser de 140°, para facilitar la remoción de viruta cuando se taladran aleaciones duras. El labio debe ser entre 9 y 15°, y los dos filos de corte son simétricos. El área de la sección transversal debe ser sobre el 80% del área de la broca. Las secciones transversales delgadas reducen la presión del avance, generando calor y endurecen el fondo del agujero.

1.4.2. Velocidades de corte

El avance es un importante factor ya que una elección apropiada incrementa la vida de la herramienta.

Tabla 1-8 :Parámetros nominales para [taladrado](#) en acero inoxidable forjado serie A316x

	Velocidad de corte en m/min.	Avance en mm/ rev. Para un agujero nominal de diámetro							Material de la herramienta
		1.6 mm	3.2mm	6.4mm	13mm	25mm	38mm	50mm	
A316F	23	0.025	0.05	0.1	0.175	0.3	0.38	0.46	M1, M7,
A316, A316L	15-18	0.025	0.05	0.1	0.175	0.3	0.38	0.46	M10

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 6, Pag 694

1.5. ESCARIADO

Las dificultades involucradas en el [escariado](#) del acero inoxidable son a menudo causadas por operaciones previas, particularmente con las aleaciones austeníticas. Por ejemplo, si el avance en el [taladrado](#) es muy ligero, las paredes del agujero se endurecen y resisten el corte del escariador.

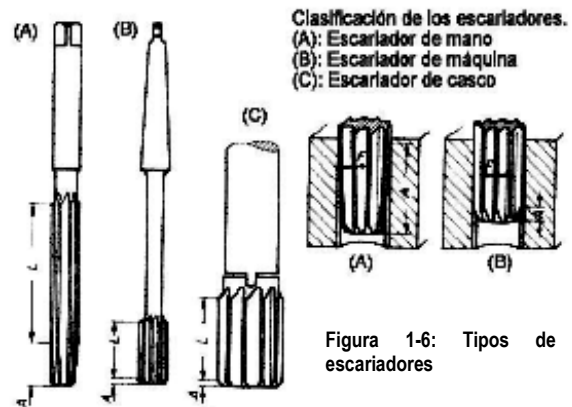
1.5.1. Tipos de herramientas

Los escariadores rectos o de flauta espiral son usados para agujeros rectos y ahusados. Los escariadores de flauta espiral son usualmente preferidos porque son poco susceptibles a las vibraciones, disponen mejor de las virutas en el fondo de los agujeros, y producen un mejor acabado.

Los fluidos refrigerantes expulsan el calor que quema los filos de corte del escariador y a la vez proveen lubricación. Estos fluidos deben estar limpios, pues el [escariado](#) produce rajadas y virutas muy finas que al flotar en él dañan la superficie, en especial si la máquina está equipada con sistema recirculante.

Tabla 1-9 :Dimensiones recomendadas para escariadores para todos los grados de acero inoxidable desde 135 al 425HB.

	De acero rápido	De pastillas de carburo
Margen o anchura (mm)	0.13-0.38	0.05-0.13
Ángulo del chaflán (°)	30-40	2
Longitud del chaflán (mm)	1.5	4.8
Ángulo de relieve (°)	4-5	
Ángulo radial de ataque (°)	3-8	7-10
Ángulo de hélice (°)	0-10	5-8
Ángulo primario de relieve	4-8	7-15



Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, "Reamer Design" Pag 705

1.5.2. Velocidades de corte

Los avances y las velocidades de corte para [escariado](#), con herramienta de [acero rápido](#) o pastilla de carburo, sobre acero inoxidable se muestran en esta **Tabla 1-10**. Cuando el acabado del agujero no es crítico, los parámetros para la primera pasada son utilizados. Para el acabado suave se requieren velocidades significativamente bajas.

Tabla 1-10 : Parámetros de escariado para aceros inoxidables forjados serie A316x.

		Velocidad de corte en m/min.	Avance en mm/ rev. Para un agujero nominal de diámetro				Material de la herramienta
			6mm	13mm	25mm	50mm	
A316F	Primera pasada	23	0.15	0.23	0.28	0.41	M7
		30	0.20	0.30	0.41	0.61	C2
	Acabado	12	0.10	0.15	0.2	0.25	M7
		17	0.15	0.20	0.25	0.30	C2
A316, A316L	Primera pasada	21	0.13	0.2	0.25	0.38	M7
		26	0.2	0.3	0.41	0.61	C2
	Acabado	11	0.075	0.10	0.15	0.20	M7
		15	0.10	0.15	0.20	0.25	C2

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 11, Pag 702

1.6. CÁLCULO DE LOS TIEMPOS DE MAQUINADO

Es importante determinar el tiempo requerido en el funcionamiento de las máquinas de herramientas para realizar cualquier operación de maquinado.

$$n = 10^3 \frac{v}{\pi d} \left\{ \begin{array}{l} v : \text{Velocidad de corte [m/min]} \\ d : \text{Diámetro actual [mm]} \\ n : \text{Revoluciones [RPM]} \end{array} \right. \quad [\text{Ec1}]$$

La velocidad de corte v es obtenida de las tablas respectivas a cada operación. Al calcular n se sabe a que velocidad angular habrá que activar la máquina para hacer el corte. En el caso del torno el diámetro d se trata del diámetro hasta el que se quiere cilindrar y se expresa en milímetros. Mientras que en el [fresado](#) d se refiere al diámetro efectivo de la fresa.

El tiempo de máquina (T_M) necesario para realizar un paso del proceso es función del avance, la carrera de corte y la velocidad de corte.

$$T_M = \frac{c}{a \cdot n} \left\{ \begin{array}{l} c : \text{Es la carrera de corte [mm]} \\ a : \text{Avance [mm/rev]} \\ n : [\text{RPM}] \text{ o } [\text{Rec/min}] \end{array} \right. \quad [\text{Ec2}]$$

La carrera de corte es la longitud en la que se practicará el corte. El avance se encuentra en cada una de las tablas que se sugieren. Las revoluciones por minuto son calculadas con la fórmula **Ec1**. Para determinar el tiempo total entonces se multiplicará T_M por el número de pasadas m .

$$T_{MT} = m \cdot T_M \quad [\text{Ec3}] \quad \text{donde} \quad m = \frac{p_T}{p} \left\{ \begin{array}{l} p_T : \text{Profundidad total} \\ p : \text{Profundidad parcial o de una pasada.} \end{array} \right. \quad [\text{Ec4}]$$

Tabla 1-11: Modificaciones que presentan los cálculos dependiendo de las operaciones.

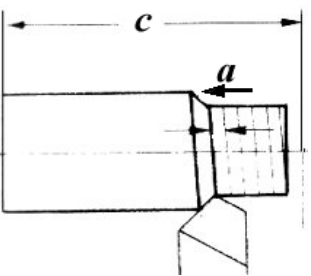
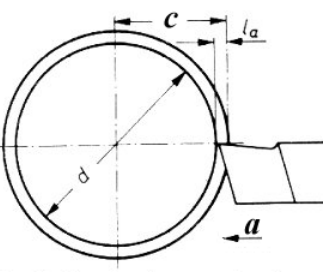
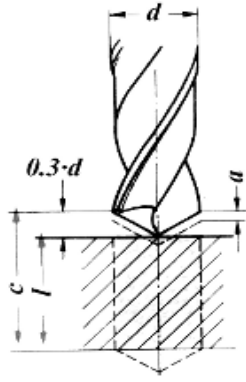
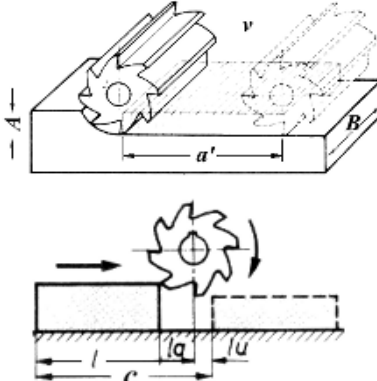
TORNO-Cilindrado  c: es la carrera de corte longitudinal	TORNO-Refrentado  c: es medido en forma radial	TALADRADO  $c = l + 0.3d$ donde l es la profundidad del agujero.
FRESADO 	$a = \frac{1000 \cdot V' \cdot N}{A \cdot B} \quad [\text{Ec5}]^1 \quad \text{ó} \quad a = M \cdot n \quad [\text{Ec6}]^2$ A: La profundidad de corte. B: Es el ancho de la fresa. V': Es la cantidad admisible de viruta en cm^3/kWmin. N: es la potencia de la máquina en kW (ver en la próxima sección). M es la cantidad de dientes de la fresa. El tiempo principal se calcula mediante la siguiente relación: $T_M = \frac{c}{a} \quad [\text{Ec7}]$	

Tabla 1-12: Cantidad admisible de viruta a arrancar V' en $\text{cm}^3/(\text{kWmin})$

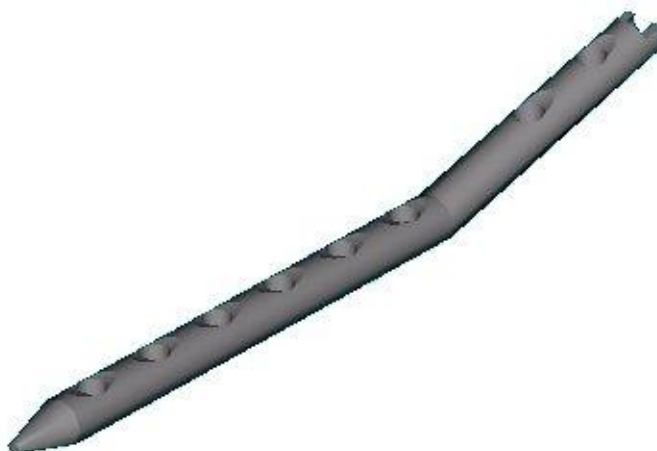
Tipo de fresado	Baja aleación 35-60 kgf/mm ² de resistencia	Aleado 60-80 kgf/mm ² de resistencia	Aleado de hasta 100 kgf/mm ² de resistencia
Fresado cilíndrico	12	10	8
Fresado frontal	15	12	10

¹ Ecuación para calcular el avance si no se conocen los parámetros de la **Tabla 1-3**.² Ecuación para calcular el avance con los parámetros de la **Tabla 1-3**.

2. DISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CLAVO INTRAMEDULAR

El objetivo principal de esta sección es diseñar el proceso de fabricación que permita obtener de la manera más eficiente, precisa y reproducible esta pieza:

Figura 2-1 : Aspecto del clavo intramedular para fractura del peroná distal.



El clavo se construirá a partir de una barra de acero inoxidable A316L de 4.763 mm (3/16") de diámetro. Los parámetros de mecanizado fueron indicados en el capítulo anterior. La precisión en la ubicación y orientación de los agujeros es fundamental para lograr una colocación exacta dentro del utensilio de instalación. La dificultad para realizar perforaciones en una superficie curva y lograr la exactitud al doblar la barra hasta 15° son los problemas más importantes que debemos solventar.

El proceso de fabricación se divide en dos etapas. Una primera etapa en la que se modifica la materia prima hasta la fase anterior al doblado. En esta etapa se realizan todos los pasos necesarios para obtener las dimensiones finales (cilindrado y refrentado), el trabajo en los extremos tales como el cono y el agujero con entalladura en la parte posterior. La segunda etapa, consiste en el doblado, abrir los agujeros y darle el acabado final.

Las máquinas de herramienta que se utilizarán para obtener la pieza serán en su mayoría de control numérico con el objetivo de lograr un procedimiento de fabricación en serie lo más preciso posible, sin embargo se utilizarán máquinas convencionales para realizar las operaciones que requieran mayor supervisión por parte de un operador debido al tamaño de la pieza y la magnitud de la operación, tales como el cilindrado del vástago y el conado de la punta.

En el **Apéndice 9** [Plano 1](#)¹, véase los planos del clavo y del conjunto de instalación.

Con el objetivo de optimizar el proceso de fabricación y evitar defectos de precisión y acabado se diseñaron y construyeron las siguientes herramientas y [utillajes](#):

2.1. CONTRAPUNTO INVERSO

Figura 2-2 : Contrapunto inverso



El cilindrado de piezas de diámetro pequeño respecto a su longitud debe realizarse con el uso de un contrapunto, ya que de lo contrario el esfuerzo producido por la herramienta de corte sobre la pieza ocasionará una deformación indeseable cuyos niveles pueden tener consecuencias desde un acabado irregular hasta la fractura de la pieza por fatiga.

Los contrapuntos universales consisten en un cono de 60° el cual se acopla en la pieza por medio de un orificio conocido como centro punto. Para garantizar la rigidez del acople el centro punto debe tener un tamaño mínimo de 5mm, pero la barra utilizada en este trabajo posee un diámetro menor (4.763mm). Una solución a este inconveniente es invertir la relación del acople con el fin de utilizar el cono del clavo como elemento de sujeción en el orificio que estará en el contrapunto.

Esta herramienta garantizará el soporte de la pieza en dos puntos durante el proceso de maquinado en el torno. La primera operación que debemos realizar durante el mecanizado del vástago del clavo es el cono, con la finalidad introducir este en la cavidad del contrapunto y obtener así soporte suficiente como para evitar flexión durante el cilindrado de la barra de acero desde 4.763mm (3/16") hasta 4.5mm (**Figura 2-3**).

Figura 2-3 : Utilización del contrapunto invertido



Coneado



Cilindrado

Para la construcción de este dispositivo, se sustituyó el contrapunto original por otro idéntico perforado en su extremo y fabricado en un acero AISI 1045 templado en aceite a 850°C. Esta pieza es colocada en un soporte universal para contrapunto provisto de rodamientos radiales y axiales. Véase el plano en el **Apéndice 9** [Plano 2](#)².

¹ Requiere de Auto CAD2000

² Requiere de Auto CAD2000

2.2. UTILLAJES PARA TALADRADO

Taladrar con precisión en una superficie curva es problemático, la broca no logra iniciar la perforación pues “patina” sobre la superficie, creándose una situación inestable donde la broca padece sobre la superficie curva, impidiendo la penetración y causando la rotura de la broca. Esta situación se hace más crítica mientras mayor es la relación diámetro longitud de la broca.

Para evitar los inconvenientes del taladrado en superficie curva y debido a las dimensiones de las piezas a trabajar se diseñará un [utillaje](#) que garantice en primer lugar la sujeción total de la pieza cilíndrica para evitar una rotación indeseable y en segundo lugar que guíe la broca hacia el punto deseado para abrir el agujero, impidiendo el pandeo y las vibraciones.

Para poder diseñar este [utillaje](#) hay que recordar que el proceso de fabricación se divide en dos partes, una en la que se trabaja el clavo antes de doblarlo y otra después de hacerlo. Entonces surgen las siguientes inquietudes:

- ¿Se podrán abrir todos los agujeros del vástago antes de doblarlo?
- ¿Se podrán realizar todos los agujeros con un solo [utillaje](#)?
- ¿De que manera debería estar el clavo sujeto en los [utillajes](#)?
- ¿Qué tamaño debería tener el [utillaje](#) y de que material se debe construir?

Para responder a la primera pregunta hay que considerar que el taladrado debilita estructuralmente al clavo ya que, al abrir orificios en el núcleo del clavo la sección remanente de material puede resultar insuficiente para soportar los esfuerzos que ocurrirán durante el doblado, pues la concentración de esfuerzos creada por la desviación que experimentan las líneas de fuerza para rodear el agujero facilitan alcanzar el esfuerzo de ruptura (**Figura 2-4**).

Por otro lado, se necesita al menos un agujero piloto que posicione el clavo y evite la rotación del mismo en el momento del doblado, pues el eje del doblado debe ser totalmente ortogonal al eje de

los agujeros. Esto obliga a efectuar un agujero piloto ubicado en un lugar que no se vea afectado con las líneas de fuerza producidas por el momento de doblado ni por la cercanía a los extremos del clavo que son también puntos críticos (Véase el **Apéndice 9 Plano 1**³).

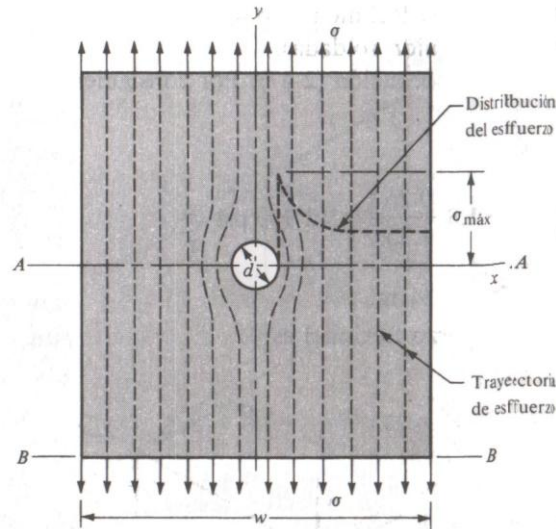


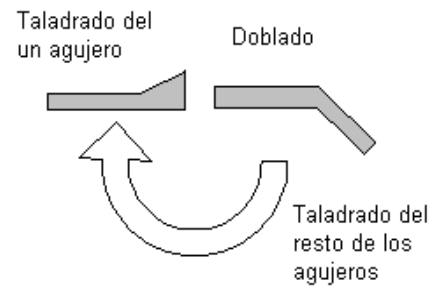
Figura 2-4: Líneas de fuerza en una pieza agujerada, sometida a tracción.

Ahora bien, si partimos de la necesidad de abrir este primer agujero posicionador para el doblado, hacerlo desde el mismo utillaje que servirá para abrir el resto de los agujeros traerá las siguientes consecuencias:

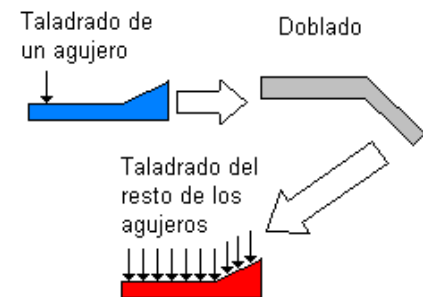
- En primer lugar el diseño implicará una geometría donde el clavo deberá ajustarse tanto antes como después del doblado, ocasionando así un manejo bastante complicado y engorroso de las piezas.
- La idea de un utillaje único no favorece la practicidad del proceso, el cual debe ser secuencial:

³ Requiere de Auto CAD2000

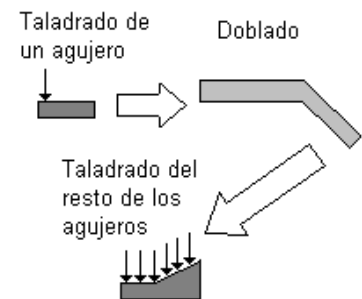
Un [utillaje](#) único implicará que el operador efectuará el agujero piloto, desmontará la pieza, efectuará el doblado, montará nuevamente la pieza en el dispositivo y efectuará las perforaciones remanentes, lo cual produce un manejo engorroso de la pieza.



En caso de usar dos [utillajes](#) similares, uno para el agujero piloto y otro para el resto de los agujeros el primer dispositivo estará sub-utilizado.

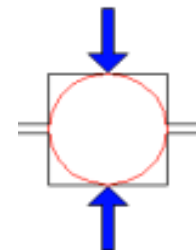


La mejor alternativa será fabricar dos [utillajes](#) totalmente independientes que permitan hacer simultáneamente estas operaciones en el proceso de producción: uno que sea soporte guía para abrir el agujero piloto y otro para abrir el resto de los agujeros.

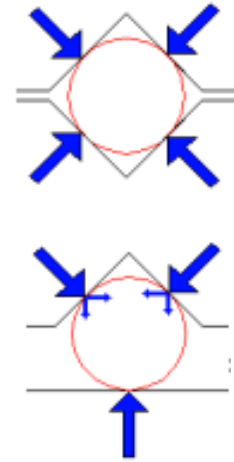


Ambos [utillajes](#) (tanto el usado en clavo recto como el usado en clavo doblado) deben constar de dos placas que se colocan una sobre la otra, sujetando el clavo entre ellas. Para garantizar el contacto con el clavo y lograr una condición estática que evite el desplazamiento se estudiaron varias alternativas.

- Los **canales rectangulares** en forma aparente pueden garantizar sujeción, pero el apoyo es en dos puntos colineales, esto no evita una posible rotación.



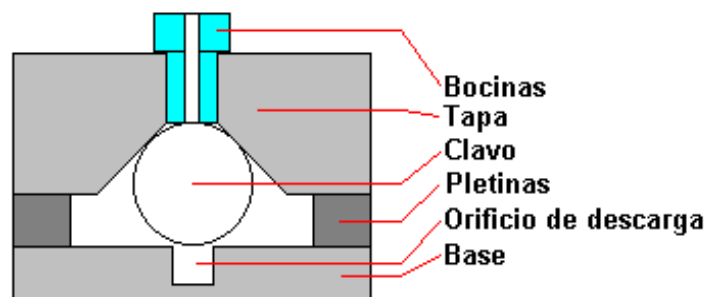
- Aunque los **canales en forma diagonal** mantienen la pieza fija. El problema se presenta en la fabricación del **utillaje**. Por la complejidad de la pieza puede suceder que los canales no queden alineados.
- La mayoría de los mandriles para sujetar piezas en taladros, tornos y otras herramientas poseen **tres puntos de sujeción**. La suma de las dos proyecciones verticales de las caras diagonales y la cara plana se anulan, así como las proyecciones horizontales de las caras diagonales. Esta es la forma de fijación deseada



El ajuste de la distancia entre las dos placas, la que tiene los canales y la de cara plana, se hará por medio de dos pletinas calibradas de un acero suave que al colocarse entre las placas produce un apriete equilibrado y ajustado a la dimensión del clavo y evitando así la rotación. La fuerza de sujeción entre las dos placas del **utillaje** se obtiene por medio de cuatro pernos Allen M6, espaciados uniformemente en la superficie.

Ambos **utillajes** deben ser de fácil montaje en una máquina así como en su manipulación manual. Una medida razonable para la base de ambos **utillajes** puede ser 90x90mm, lo que permite tomarlo con una mano y colocarlo en cualquier prensa universal. El material de los **utillajes** debe tener propiedades mecánicas capaces de resistir el desgaste producido por la interacción clavo-superficie y la deformación causada por el apriete del conjunto.

Figura 2-5 : Configuración básica de la sección transversal de los urillajes



Las bocinas, mencionadas anteriormente como elementos guías de la broca durante el taladrado se construirán de un acero para herramientas AISI O1 templado y revenido para resistir el contacto con el filo de corte de la broca. Las bocinas deben ser removibles para luego realizar el avellanado del agujero o poder remplazarlas cuando se vean afectadas por el desgaste.

Los [utillajes](#) desarrollados tienen cinco posiciones para aceptar cinco clavos a la vez. En ellos el proceso de taladrado se efectuará en cinco pasos:

- 1) Colocación y fijación de los clavos en la placa
- 2) Traslado y montaje en el taladro
- 3) Ejecución de los agujeros**
- 4) Desmontaje del taladro
- 5) Desmontaje de los clavos en la placa

Si diseñáramos un [utillaje](#) para construir un clavo, elaborarlo tendría un tiempo T. Pero si diseñáramos un utillaje para un número N de clavos tendríamos un tiempo de fabricación T menos (N-1) veces los tiempos para los pasos 1, 2, 3, 4, 6 y 7. Pensamos que cinco clavos serían suficientes para aprovechar este ahorro al máximo pero más de cinco serían demasiados clavos, ya que hay que pensar que quizá el operador no tenga a disposición un taladro de control numérico y tenga que hacerlo manualmente.

2.2.1. Cama para clavos rectos⁴

El [utillaje](#) para el taladrado del agujero piloto en el clavo recto fue diseñado según las pautas estudiadas en la sección anterior (**Figura 2-6**). Básicamente consiste en dos bloques de acero AISI P20 de 90x90x20mm. El primero, al que llamaremos **tapa (1)** tiene tallados en una de sus caras cinco canales en V a 90°, donde se colocarán los clavos.

Cada uno de estos canales está provisto de un **pin tope (5)** de acero rápido, que limita el movimiento longitudinal de los clavos una vez montados, y un agujero guía para realizar el taladrado y el avellanado del agujero piloto del clavo. La tapa además posee a los lados dos **pletinas (3)** que garantizan el ajuste y dos **pines guía (4)** que evitan el desplazamiento relativo entre las tapas. El segundo bloque al que llamaremos **base (2)** es el soporte que presiona los clavos, es totalmente plano y tiene los agujeros de descarga de la viruta, del roscado de la tapa y de las guías de los pines, este conjunto se une por medio de cuatro **tornillos**



Figura 2-7: Bocina de acero AISI O1



Figura 2-6: [Utillaje](#) para agujero piloto en clavos rectos. 1) Tapa, 2) Base, 3) Pletina, 4) Pin guía de ajuste de la base, 5) Pines tope, 6) Tornillos M6 tipo Allen y 7) Bocinas.

⁴ Véase en el **Apéndice 9** [Plano 3](#) (Requiere de auto CAD 2000)

Allen M6 (6).

Una vez que el conjunto está unido se procederá entonces a la apertura de los agujeros. Para ello se utilizarán las **bocinas (7)** hechas de acero AISI O1 templado a 750°C en aceite, que es un acero formulado para herramientas. Una vez templado es lo suficientemente duro para soportar el roce con las brocas 2.5 y 2.8mm que la atraviesan en forma longitudinal. La tolerancia entre la bocina y el [utillaje](#) es un ajuste suave que permite colocarla o removerla manualmente, aplicando una fuerza moderada.

2.2.2. Cama para clavos doblados⁵

El doblado del clavo se realiza a 15° de su eje, luego en este [utillaje](#) se abrirán los siete agujeros restantes del clavo. Existen dos agujeros que se encuentran en la parte inclinada de la **base (2)** que poseen su eje paralelo a todos los demás, por este motivo es muy importante que se garantice la sujeción de todo el vástago del clavo aún en la parte inclinada. La superficie de las placas debe seguir fielmente la geometría de la pieza, obteniéndose así dos planos que se interceptan en una línea que es paralela al eje del doblado del clavo. Al igual que en el [utillaje](#) anterior los canales están contruidos en la **tapa (1)** para tres puntos de contacto que eviten el desplazamiento y dos **pletinas (3)** que faciliten el ajuste. Las **bocinas (7)** para hacer los agujeros son similares a las usadas en el [utillaje](#) descrito en la sección anterior.

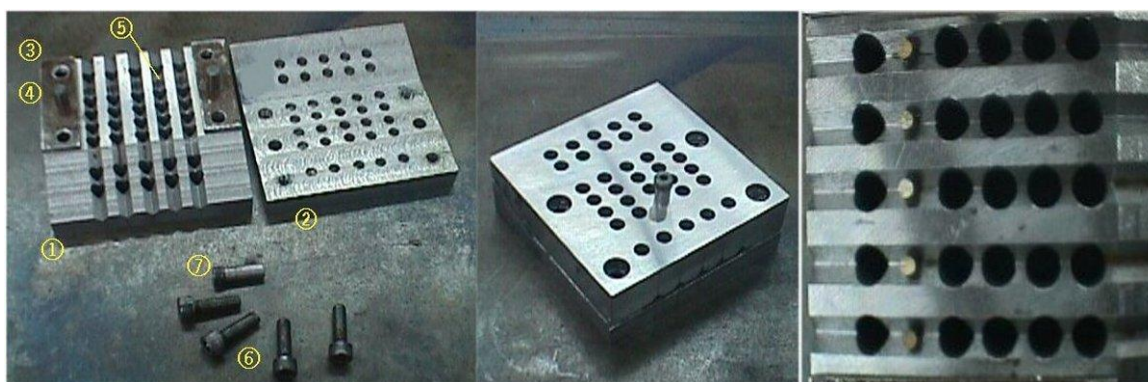


Figura 2-8: [Utilaje](#) para agujeros en clavos doblados. 1) Tapa, 2) Base, 3) Pletina, 4) Pin guía de ajuste de la base, 5) Pines tope, 6) Tornillos M6 tipo Allen y 7) Bocinas.

⁵ Véase en el **Apéndice 9** [Plano 5](#) (Requiere de auto CAD 2000)

Al igual que en el [utillaje](#) anterior existen **pinos (5)** que limitan el desplazamiento longitudinal de la pieza al estar montadas en el [utillaje](#). Aunque se puede pensar que la forma doblada del mismo y de los clavos puede impedir este movimiento, la existencia de estos pinos que se ajustan precisamente dentro del agujero piloto permiten asegurar la ausencia del movimiento y observar si el doblado se realizó de manera adecuada.

Las razones por las cuales se decidió construir los canales de los [utillajes](#) sólo en las tapas y no en las bases, eran que si se maquinaban en la base, se corría el riesgo de una imprecisión o desfase al juntar ambas caras. Por otra parte, la existencia de este plano inclinado hacia adentro en la base hacía realmente larga, complicada y arriesgada la operación. Ambos motivos implican la pérdida del trabajo y el material.

Ambos [utillajes](#) fueron acanalados con una fresa de disco bicónica a 45°, montada sobre un vástago que le permite acoplarse a la pinza en forma vertical⁶.

2.3. HERRAMIENTA DE DOBLADO

Para que el doblado del clavo sea aceptable y preciso se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El clavo debe ser doblado a 15° exactos en dirección hacia la cara avellanada de los agujeros.
- El eje de doblado debe ser perpendicular al plano formado por el eje del clavo y los ejes de los agujeros taladrados.
- La sección transversal en la zona del doblez debe conservarse completamente circular.
- La superficie del clavo no debe estar alterada por rayas ni muescas.
- Proveer suficiente fijación a las piezas a doblar para evitar su deformación o fractura.

⁶ Véase la herramienta en el [Apéndice 3](#) y fotos del proceso de fabricación en el [Apéndice 6](#).

Una de las alternativas más simples es colocar el clavo en una prensa y proceder a doblarlo con el uso de alguna otra herramienta. Esto presenta dos inconvenientes: La precisión del doblado es precaria y aparecen muescas en la superficie.

Se plantearon otras alternativas tales como construir un [utilaje](#) similar al que se usa para taladrar los clavos doblados, en la que una base móvil doble el clavo al ángulo. Esta alternativa se descarta ya que no se garantiza la permanencia de la sección en el área doblada, se requeriría de una construcción compleja y de materiales muy duros. Además hay que tomar en cuenta que la barra una vez doblada tenderá a recuperarse, entonces el ángulo de doblado debería ser ligeramente mayor de 15° , pero ¿cual sería ese ángulo?. Un procedimiento de ensayo y error en una pieza como esta es imposible.

El doblado se realizará en una base rígida acanalada en la cual se colocará el clavo. Los canales asegurarán que el eje de rotación estará perpendicular al plano entre el eje principal y el eje de los agujeros. El pin sujetador se inserta en el agujero piloto realizado en el clavo recto, evitando así el movimiento longitudinal y la rotación.

Figura 2-9: Herramienta de doblado diseñada y sus partes

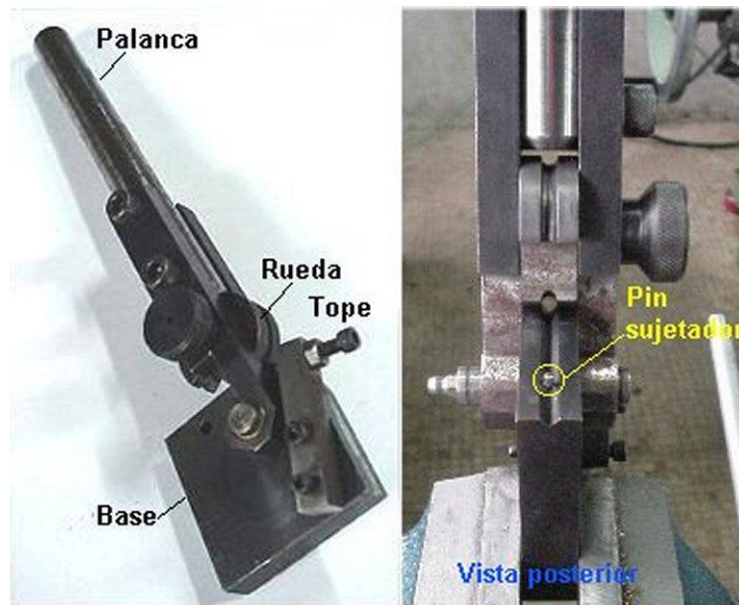


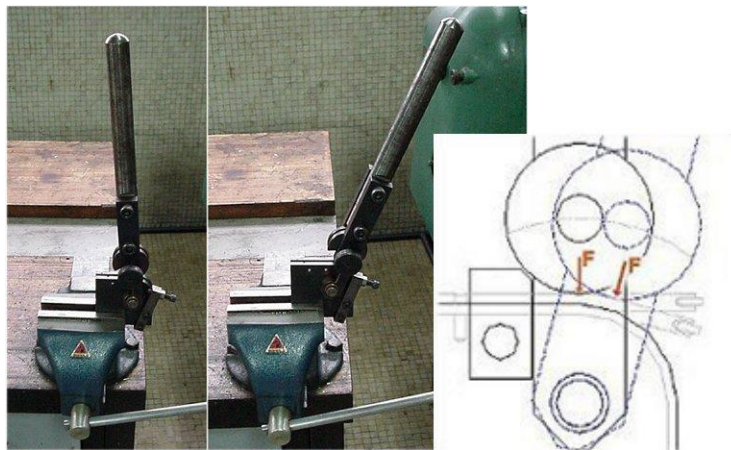
Figura 2-10 : Mordaza y ubicación



La fuerza de flexión que permite el doblado la transmitirá una rueda, haciendo que la sección permanezca uniforme. Esta fuerza permanece perpendicular al clavo en toda la trayectoria del doblado, la cual se puede graduar con el uso de un tope.

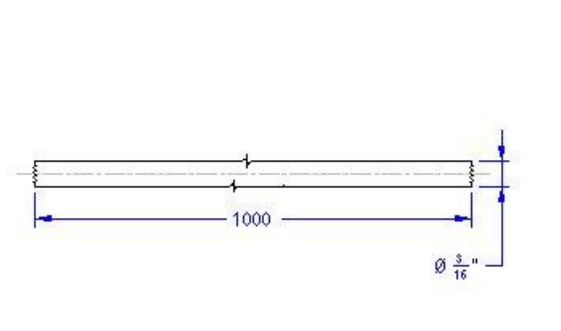
El esfuerzo requerido para doblar el clavo de manera permanente debe ser mayor al esfuerzo de fluencia del acero A316L pero no demasiado como para partirlo. Como decíamos anteriormente, si se hacían todos los agujeros de vástago estando el clavo recto y luego intentábamos doblarlos, las concentraciones de esfuerzos en los agujeros provocarían la rotura de los clavos. Si colocamos una mordaza que cree el efecto de sujeción en tres puntos con sus respectivas fuerzas de fricción paralelas al eje principal y tan solo sujetamos el clavo desde el segundo agujero (el cual es el único taladrado en el [utillaje](#) plano) con un pin guía, los esfuerzos de tracción provocados por el doblado se verían minimizados en la parte crítica (el agujero), evitando así la rotura o la deformación.

Figura 2-11: Palanca- rueda y trayectoria de la fuerza



2.4. PROCEDIMIENTO PARA FABRICACIÓN DEL CLAVO (CARTA DE PROCESO)

Partimos de una barra larga de acero AISI A316L (3/16"X1000mm)



LEYENDA

Obs: Observaciones

f: Avance

RPM: Revoluciones por minuto

L: longitud final

t: [tiempo de corte](#)

tot: Tiempo total de operación

M: Máquina

m: Número de pasadas

D: Diámetro final de la pieza

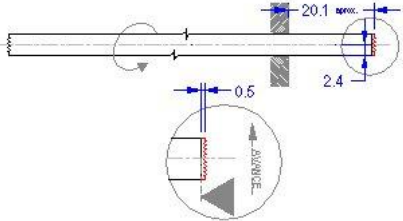
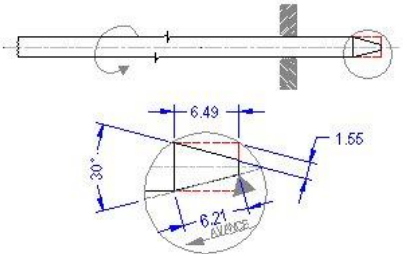
V: Velocidad lineal

p: Penetración de la herramienta

top: [tiempo de operario](#)

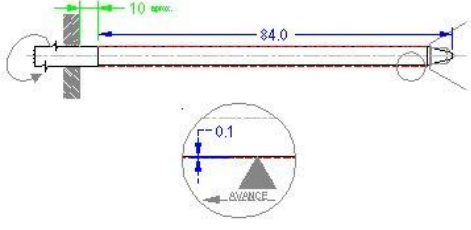
H: Herramienta

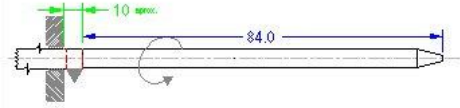
Cabe destacar que esta hoja de procesos está diseñada para trabajar con Fresadora de control numérico. Los programas para el fresado de la entalladura (pasos 8 y 9), el taladrado y avellanado de todos los agujeros, se muestran en el [Apéndice 8](#).

Operación	Obs	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
1: Refrentado 	Las operaciones 1 al 4 se realizan en el Torno 1	1	20.0	4.8	900	13.57	2.40	0.5	0.12	2.00	2.12	1	1
2: Coneado 		2	12.5	4.8	900	13.57	3.10	0.9	0.25	5.00	5.25	1	1
			12.5	4.8	900	13.57	6.20	0.8	0.50	1.00	1.50	2	1

⁶ Véase el [Apéndice 3](#), sección c de herramientas utilizadas.

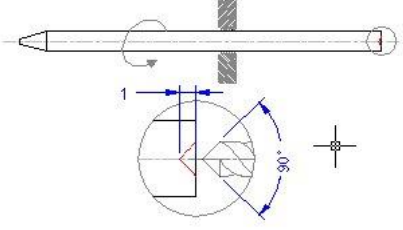
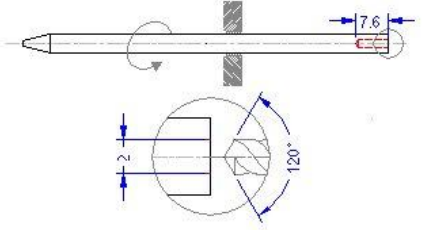
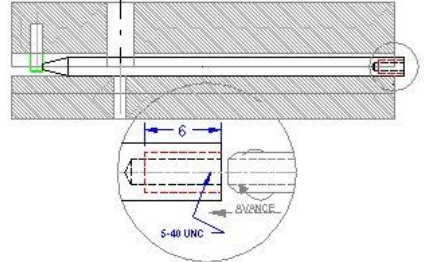
⁷ Véase el [Apéndice 3](#), sección d de equipos utilizados.

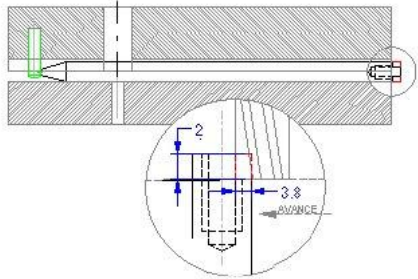
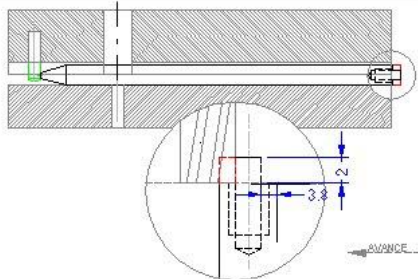
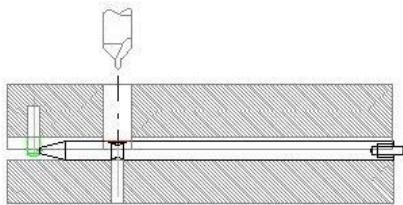
Operación	Obs	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
3: Cilindrado 	Contrapunto inverso	1	12.5	4.8	1200	18.10	77.51	0.3	6.20	5.00	11.20	1	1

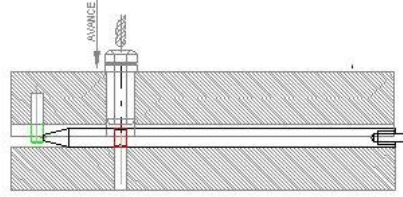
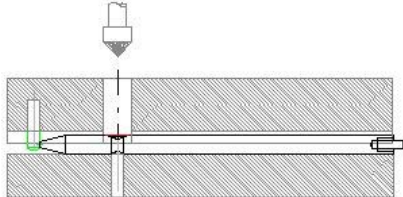
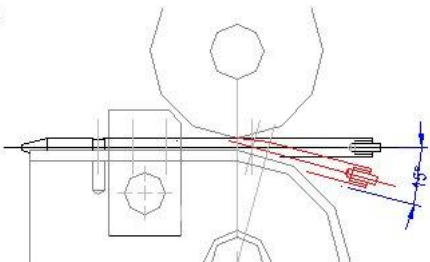
Operación	Obs.	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
4: Tronzado 		1	12.5	4.5	480	6.79	2.40	3.0	0.19	3	3.1	2	1

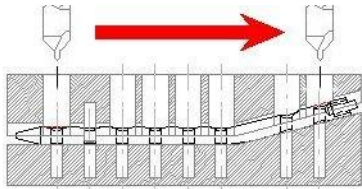
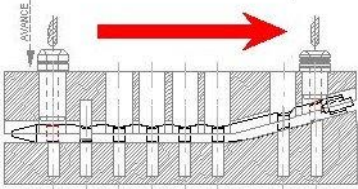
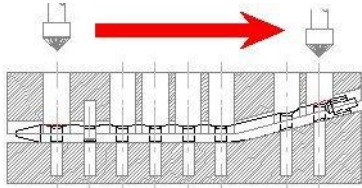
⁶ Véase el [Apéndice 3](#), sección c de herramientas utilizadas.

⁷ Véase el [Apéndice 3](#), sección d de equipos utilizados.

Operación	Obs.	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
5: Centro punto 	Estas operaciones se realizan en el Torno 2	1	15.0	2.8	750	6.60	2.00	2.8	0.13	3	3.13	3	1
6: Taladrado 	Desde el torno	1	15.0	2.5	750	5.89	6.00	2.5	0.40	3	3.40	4	1
7: Roscado 	Usando macho para roscar	1	manual	2.9	manual		2.40	0.4	15.00	5	20.00	7	-

Operación	Obs.	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
8: Fresado 	Fresado de la entalladura a ambos lados. Puede usar una Fresadora semi-automática o CNC	1	20.0	6.4	500	10.05	4.50	2.0	0.23	8	8.23	6	5
9: Fresado 		1	20.0	6.4	500	10.05	4.50	2.0	0.23	8	8.23	6	5
10: Centrado 	Utillaje para taladrar clavos rectos (Segundo agujero)	1	15.0	2.5	750	5.89	1.00	2.5	0.07	3	3.07	3	4

Operación	Obs.	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
11: Taladrado 	Utillaje para taladrar clavos rectos Bocina larga (Segundo agujero)	1	12.5	2.8	750	6.60	4.50	2.8	0.36	0.85	1.21	5	5
12: Avellanado 	Utillaje para taladrar clavos rectos	1	12.5	6.4	200	4.02	1.00	6.4	0.08	0.85	0.93	8	5
13: Doblado 	Máquina Dobladora	1	dobaldo		doblado		doblado		0.50	2	2.50	-	-

Operación	Obs.	m	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ^[6]	M ^[7]
14: Centrado 	Utilaje para taladrado en clavos doblados	7	13.0	2.5	750	5.89	1.00	2.5	0.08	5	5.08	3	4
15: Taladrado 	Utilaje para taladrado en clavos doblados (Bocinas respectivas)	7	13.0	2.8	750	6.60	4.50	2.8	0.35	3.25	3.6	5	4
16: Avellanado 	Utilaje para taladrado en clavos doblados	7	13.0	6.4	200	4.02	1.00	6.4	0.08	3.25	3.33	8	4
total									24.73	61.200	88.93		

Si se desea realizar el taladrado y avellanado usando taladro manual, entonces se deben considerar los siguientes tiempos de trabajo por cada agujero.

Operación	f [mm/rev]	D [mm]	RPM	V [m/min]	L [mm]	p [mm]	t [min]	top [min]	tot [min]	H ⁶	M ⁷
Centrado	13.0	2.5	750	5.89	1.00	2.5	0.08	1.00	7.54	3	8
Taladrado	13.0	2.8	750	6.60	4.50	2.8	0.35	1.00	9.42	5	8
Avellanado	13.0	6.4	200	4.02	1.00	6.4	0.08	1.00	7.54	8	8

Esto suma un tiempo total de operario de 77 minutos y un tiempo total de 106.73 minutos, lo que implica, un ahorro de 18 minutos al hacerlo con una máquina CNC. Si el taladrado se realiza por primera vez debe sumarse al tiempo de operario 2 minutos (Transporte y Preparación).

Después de culminar el proceso y desmontar el utillaje y los clavos terminados, viene un proceso relativamente breve de limpieza de la viruta.

Véase en el [Apéndice 7](#) los clavos resultado de este proceso.

⁶ Véase el [Apéndice 3](#), sección c de herramientas utilizadas.

⁷ Véase el [Apéndice 3](#), sección d de equipos utilizados.

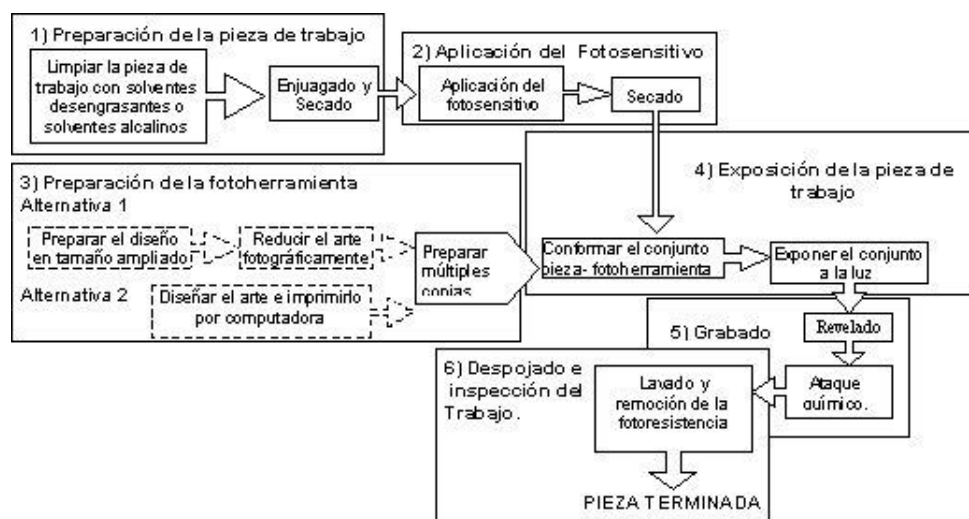
3. GRABADO FOTOQUÍMICO

3.1. MAQUINADO FOTOQUÍMICO Y GRABADO FOTOQUÍMICO

El maquinado fotoquímico consiste en la remoción selectiva de material a través del uso de una máscara o [película fotosensitiva](#) que define los lugares donde el metal será removido. El maquinado fotoquímico se hizo de uso comercial a mediados de los años 50 y es usado para producir diseños intrincados y tolerancias muy cerradas en variadas superficies de partes metálicas con espesores mínimos entre 0.01 a 1.6mm. El grabado fotoquímico es una práctica muy extendida en la producción de partes de precisión sobre todo en el campo de la electrónica: pistas para circuitos integrados, cabezales magnéticos, micromotores y aletas para transferencia de calor son algunos de los productos de esta aplicación.

El grabado fotoquímico (conocido también como borrado químico) es una aplicación derivada del maquinado fotoquímico que consiste en labrar caracteres o figuras sobre la superficie del metal. Para este trabajo, se tomó como referencia el grabado fotoquímico utilizado para joyería y para placas decorativas y etiquetas. Este procedimiento es comúnmente usado en metales y aleaciones disponibles en placas.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO



3.2.1. Preparación y selección de la pieza de trabajo.

a. Selección del metal

La mayoría de los metales comúnmente usados en la industria pueden ser grabados a través del grabado fotoquímico. Sin embargo algunas aleaciones y metales exóticos, que pueden también ser grabados, requieren un ataque químico muy sofisticado y un operador especializado. Excepto por instalaciones especiales para grabado fotoquímico, el proceso es usado en placas rectangulares de metal o paneles. Pero a la hora de practicar el procedimiento en cualquier superficie metálica, se formulan las siguientes preguntas:

- ◆ ¿Cuáles pueden ser las dimensiones?
- ◆ ¿Cuáles son las limitaciones fotográficas de los equipos?
- ◆ ¿Cómo afectará la estabilidad dimensional del diseño¹ a la calidad de la pieza acabada?

Las cualidades del metal para obtener buenos resultados con el proceso de grabado fotoquímico son:

- Un tamaño de [grano](#) lo más fino posible, ya que la suavidad de los bordes disminuye con el incremento del tamaño de [grano](#).
- Un metal que sea soluble en el químico que ataca.
- Un material que posea un espesor uniforme.
- Una superficie con un acabado uniforme y libre de rayas, [rugosidades](#) e inclusiones.
- El tamaño del panel o placa debe ser congruente con las capacidades del químico que lo atacará. Una elección razonable para un trabajo grande es 300X450mm, aunque existen excepciones.

¹ En este trabajo se denomina diseño a la fotoherramienta o al elemento transparente que contiene los caracteres a ser grabados en el metal.

La **Tabla 3-1** muestra los defectos que se obtienen de metales que no cumplen con estas normas.

Tabla 3- 1: Efectos de la pobre calidad del metal en el proceso de maquinado fotoquímico.

Defecto del metal	Efectos en el acabado con maquinado fotoquímico
<i>Superficie del metal mellada y/o curvada</i>	Dificultad para cubrir con la película fotosensitiva y el contacto con el diseño, resulta en la pérdida de algunos detalles y el registro de los caracteres en el metal.
<i>Espesor irregular²</i>	Dificultad para determinar un maquinado óptimo ya que este es función del espesor del material.
<i>Tamaño de grano muy grande</i>	Pérdida de la resolución de los caracteres grabados.
<i>Rayas en la superficie</i>	Dificultad para cubrir con la película fotosensitiva haciendo que el fluido de ataque penetre en las rayas produciendo defectos cosméticos en la pieza.
<i>Partículas empotradas o inclusiones tales como óxidos, sulfidos y silicatos.</i>	Errores en el grabado (por ejemplo charcos o agujeros, pigmentaciones y pérdida de resolución) porque ellos reaccionan de maneras distintas y hasta contrarias a la reacción de la base del material.

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 1, Pag 588

La [grababilidad](#) del metal depende de su composición química. La **Tabla 3-2** lista los grados de [grababilidad](#) de algunos metales y aleaciones usadas en el grabado fotoquímico.

Tabla 3- 2: Rangos de [grababilidad](#) en algunos metales y aleaciones usando el proceso de grabado fotoquímico.

<i>Excelente</i>	<i>Excelente a Bueno</i>	<i>Bueno a Pobre</i>	<i>Pobre</i>
<i>Cobre laminado</i>	<i>A215 acero inoxidable</i>	<i>Molibdeno</i>	<i>Tungsteno</i>
			<i>Níquel rápido C</i>
<i>Cobre electrolítico</i>	<i>A301 acero inoxidable</i>	<i>Níquel cromado</i> (Ni, 20% Fe, 15% Cr)	(Ni, 15% Mo, 14% Cr, 5% Fe, 3% W, 2.5% Co, 0.08% C)
<i>Cobre Berilio</i>	<i>A302 acero inoxidable</i>	<i>Níquel (Ni, 42% Fe, 12.5%</i>	<i>Titanio</i>

² Este es el caso de la elaboración de microcircuitos, en los que se maquinan las dos caras de la placa.

		Cr, 2.7% Ti)	
Bronce (Cu, Zn)	A304 acero inoxidable	Vanadio	René 41 (Ni, 19% Cr, 5%, 11% Co, 10% Mo, 3% Ti, 1.5% Al)
Cobre libre de oxígeno y alta conductividad	A305 acero inoxidable	Cromo	Niobio
Bronce fosforoso (Cu, 10%Sn, ≤0.5% presión)	A316 acero inoxidable	Oro	Tantalio
90-10 Cobre Níquel	A321 acero inoxidable	Plomo	
Zinc	A347 acero inoxidable	Manganeso	
Acero al carbón	PH 15-7 acero inoxidable	Renio	
Kovar (54%Fe, 29%Ni, 17%Co)	PH 17-7 acero inoxidable	Circonio	
Níquel	A410 acero inoxidable		
Monel (Ni, 31.5% Cu, 1.3%Fe)	A420 acero inoxidable		
Níquel plata (Cu, 25%Zn, 10% Ni)	A410 acero inoxidable		
Magnesio	Aleación Inconel (Ni, 15% Cr, 7% Fe) Níquel rápido B (Ni, 28% Mo, 1% Cr, 5% Fe, 3% W, 0.5% Co, 0.5% V y 0.05% C)		
Aluminio			

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 2, Pag 588

b. Preparación de la pieza de trabajo

Para garantizar la adhesión entre la emulsión fotosensitiva y la superficie del metal, ésta debe estar libre de contaminantes. La mayoría de las emulsiones fotosensitivas han sido desarrolladas para la industria de la fabricación de circuitos impresos y tienen buena adhesión al cobre y materiales a base de éste. Otros metales, especialmente el acero inoxidable, requieren superficies tratadas previamente para que la [película fotosensitiva](#) se adhiera completamente.

Independientemente de que se trate de cobre u otro metal las superficies deben estar limpias, libres de grasa y posibles capas de óxido, por eso se recomienda seguir una rutina de limpieza.

La limpieza se hace con detergente neutro o una solución débilmente ácida. Eventualmente para eliminar las suciedades se usa un estropajo o cepillo suave.

El desengrasado es la primera operación de preparación o limpieza. En el caso del cobre el desengrasado se realiza usando ácido acético (vinagre) y en el caso de otros metales se usan lejías tales como amoníaco o soda cáustica. En el caso del acero inoxidable se usa ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 10% v/v ⁽³⁾. Se sumerge la pieza en el ácido a una temperatura de 55°C por un tiempo breve de 5 a 10 min.

El decapado es un proceso en el cual la pieza se limpia de capas de óxido. Esta operación se realiza con ayuda de ácidos muy diluidos. Para el acero inoxidable se usará una solución compuesta por ácido nítrico (HNO_3) al 40% v/v y ácido clorhídrico (HCl) al 4% v/v . Una vez realizadas estas dos operaciones es recomendable eliminar cualquier rastro de sustancia química alguna, para lo cual se enjuaga con agua limpia, y se realiza una [pasivación](#) con el objeto de evitar que estos rastros produzcan una corrosión adicional, reaccionen con la emulsión fotosensitiva o impidan su adherencia. La [pasivación](#) se realiza sumergiendo la placa en una solución de ácido nítrico al 20% en volumen, por unos 10 minutos a temperatura ambiente.

Es posible que el material no tenga una textura uniforme. Sin importar que no esté muy pulida, si la superficie presenta [rugosidades](#) profundas e intrincadas y rayas, es posible que la emulsión no las penetre por su alta viscosidad y en el momento del grabado el ácido corrosivo penetre en estas, provocando distorsiones, puntos y rayas indeseables. Por lo tanto un pulido parcial con máquinas [abrasivas](#), horizontales o cíclicas es suficiente para preparar la [superficie](#). Obviamente este tratamiento se hace antes de los tres pasos de limpieza indicados antes. Debe evitarse el uso de

³ El símbolo v/v indica concentración en volumen. Por ejemplo 10% v/v de ácido sulfúrico significa 100ml de ácido en 900ml de agua.

líquidos [abrasivos](#), porque si no son removidos completamente durante la limpieza, habrá contaminación de la superficie.

Una buena manera de probar eficiencia de la preparación es rociar agua en la superficie del metal a trabajar (si son placas) y determinar si las gotas individuales se extienden uniformemente fuera de la superficie. La formación de una delgada [película](#) uniforme de agua implica un lavado eficiente, considerando que una inadecuada limpieza produce un baño desigual.

El ambiente también influye sobre el material tratado. Un ambiente por el que circulan vapores químicos daña de nuevo las superficies. Se recomienda proteger las placas a la hora de almacenarlas por un tiempo prolongado en un lugar distinto adonde se hacen otros tratamientos químicos.

3.2.2. Aplicación de la emulsión fotosensitiva.

La emulsión fotosensitiva es una sustancia que al secarse se convierte en una [película](#) que reacciona al exponerse a la luz. A esta [película](#) también se le llama fotoresistencia ya que es una capa hermética y adherente que resiste a la acción del líquido corrosivo luego de expuesta a la luz. Su nombre genérico es **KPR** (Kodak Photo Resist). A su vez, es la marca comercial más conocida y usada para el grabado fotoquímico, aunque en el mercado existen otras marcas.

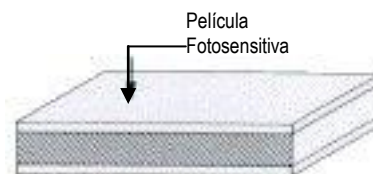


Figura 3-1 : Placa fotosensitiva aplicada sobre la superficie. En este caso la capa se ha aplicado en ambos lados.

Existen dos tipos de emulsión fotosensitiva: sistema positivo o sistema negativo. El sistema positivo consiste en hacer que el área de película que no es expuesta a la luz se suprima durante el revelado. El sistema negativo produce el efecto contrario y es utilizado en muchas aplicaciones en el que las áreas expuestas se hacen solubles a la solución reveladora. Ambos sistemas tienen una buena resolución fotográfica, sobre todo el sistema positivo. En cualquier caso, el resultado final es

un panel en el que las áreas a ser grabadas estarán desnudas y el resto de la pieza estará protegida con una capa hermética y resistente al ácido.

La aplicación de la emulsión fotosensitiva en la pieza de trabajo es el siguiente paso después de la preparación. Esto se hace en piezas preparadas recientemente o en piezas guardadas y empaquetadas en un ambiente controlado. La película fotosensitiva es como una capa líquida y delgada o como una capa seca, laminada y gruesa. Su aplicación se puede efectuar por: inmersión, pintado, spray y centrifugado. Cada uno de estos procedimientos tiene sus ventajas:

La **inmersión** es el procedimiento más sencillo y usado. La emulsión es lo suficientemente viscosa para simplemente verterla sobre la superficie o sumergir la pieza en ella y luego dejarla escurrir hasta que se forme la película necesaria.

El **pintado** provee una capa uniforme. Es necesario usar una brocha de buena calidad con cerdas duras que no caigan en la superficie. Otra forma de pintar es usando un rascador o trozo de plástico.

El **spray** es un método muy versátil para superficies de gran tamaño. Además la viscosidad de la emulsión debe ser bastante baja. El **centrifugador** (Figura 3-2) de placas por caldeo consiste en una mesa en el que se coloca la placa, se hace girar y se vierte la emulsión ligeramente caliente sobre la superficie. La fuerza centrífuga garantiza un esparcimiento uniforme evitando el desperdicio de la sustancia. Ambos procesos son costosos y se recomiendan para procedimientos automatizados. De hecho, estos procedimientos los utilizan actualmente muchos fabricantes que venden las placas ya sensibilizadas.



Figura 3-2: Centrifugador de placas de STS systems.

3.2.3. Secado

La capa o película una vez aplicada es secada en una cámara, según las especificaciones del fabricante, para remover los solventes residuales y endurecerla. Para el secado se utilizan dos tipos de hornos: Hornos de aire (o de circulación de calor). La temperatura afecta de manera inversa el tiempo de secado, sin embargo, es importante mantener sus valores al mínimo posible pues si el secado es muy agresivo, la película se levanta o cuartea.

En el horno de aire mostrado en la **Figura 3-3, (A)** el aire dentro del horno es calentado por elementos eléctricos de caldeo, no usar vapor. En este horno la transferencia de calor es precaria, por lo que alcanzar la temperatura deseada en la superficie (entre 60 y 100°C) requiere mucho tiempo. Se debe ajustar el horno a temperaturas entre 30 y 50° por encima de la temperatura necesaria. Este horno no ofrece un mantenimiento de la temperatura del material y no es recomendable.

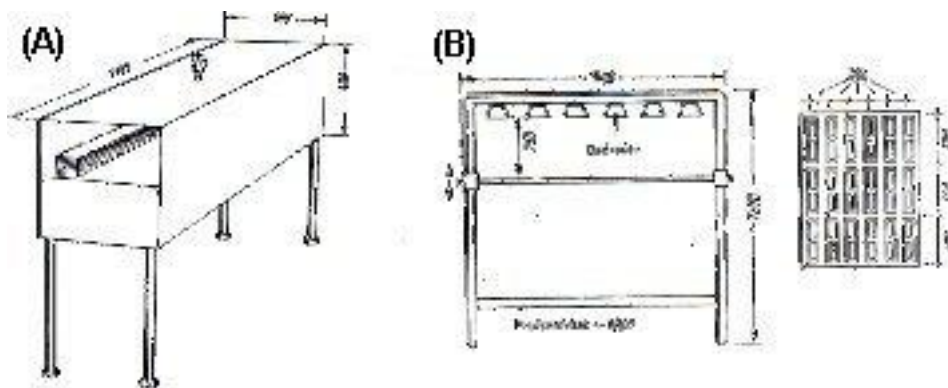


Figura 3-3: A) Horno de aire y B) Horno de rayos infrarrojos.

La **Figura 3-3 (B)** muestra un horno de rayos infrarrojos. Existen dos tipos de hornos infrarrojos: de rayos claros (longitud de onda de $1\mu\text{m}$ hasta $3\mu\text{m}$) y de rayos oscuros (longitud de onda mayor de $3\mu\text{m}$). Los rayos oscuros irradian calor a temperaturas entre 220 y 1030°C. Estos hornos por lo general están recubiertos de materiales cerámicos y reflectores de aluminio. Ambos tipos de rayos funcionan para el secado de las placas, pero el de rayos oscuros en especial permite un

calentamiento uniforme con pequeñas potencias. En estos hornos es importante colocar las placas a una distancia mínima de 25cm de los radiadores para evitar la sobre-exposición de algunas áreas de la pieza y evitar las temperaturas de sobrecalentamiento o mayores de 150°C.

Se recomienda almacenar la placa sensibilizada empaquetada en un sitio oscuro o armario no expuesto a la luz solar y evitar que la película fotosensitiva se estropee durante el ataque por golpes o rayas.

3.2.4. *Preparación de la fotoherramienta o diseño.*

La preparación del diseño o patrón que se desea imprimir y que sirve como herramienta para el grabado fotoquímico admite diversas técnicas de ejecución cuya selección depende de la aplicación que tenga la pieza grabada. Si se desean hacer las pistas de un circuito impreso o maquinar micropartes, se sugieren procedimientos de alta precisión. Si se desea tan sólo grabar caracteres informativos o artísticos, lo más importante es la visibilidad y el buen acabado.

a. Elaboración del original

En orden creciente de precisión obtenida se dispone de las siguientes técnicas:

- 1) Hacerlo a mano (alzada o con instrumentos) sobre papeles para dibujo en tinta china.
- 2) Mediante el uso de etiquetas autoadhesivas sobre una lámina de papel poliéster o acetato. En este caso hay que asegurarse que las etiquetas queden muy bien pegadas. A veces se usa este procedimiento para ahorrarse la impresión de la fotoherramienta y usándose la etiqueta como plantilla directamente para la exposición.

En estos dos casos el diseño es usualmente dibujado con algún factor de magnificación para reducir el error de minimización dimensional. El rango de ampliación estará entre 2 y 200 veces del tamaño actual, dependiendo de la precisión del equipo que se use para la impresión.

- 3) Si el diseño es por computadora, para aplicaciones de alta precisión se utiliza software tipo CAD⁴ tales como el AutoCAD y algunos paquetes como el DynaSys⁵ (de Accufab Inc.) que está orientado únicamente para el diseño de pistas para grabar en circuitos impresos.
- 4) Para fines artísticos se usa software para edición de imágenes tales como: PhotoShop, PhotoPaint, Paint Shop Pro, Publisher, Power Point o Corel Draw.

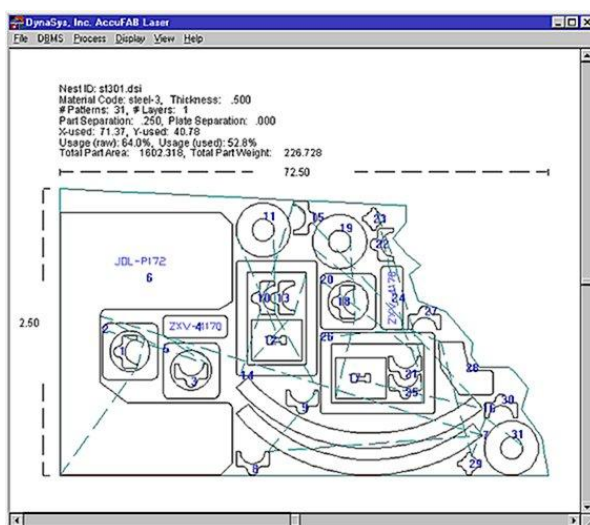


Figura 3-4 : DynaSys de AccuFAB es una aplicación tipo CAD creada para facilitar el diseño de circuitos impresos.

b. Impresión de la ftoherramienta

La ftoherramienta por lo general se imprime desde un original en tamaño muy ampliado en papel blanco, acetato duro o etiquetas autoadhesivas sobre base de papel de poliéster estable. Luego el

⁴ CAD: (Computer Aided Design) Diseño Asistido por Computadora.

⁵ www.ncell.com/accufab/accufab_trueshape299.html

diseño es reducido mediante métodos fotográficos que varían dependiendo también del grado de precisión:



- 1) La impresión del original por métodos **fotográficos** o **fotolitografía**.
 - De este procedimiento se obtiene una impresión perfecta de la fotoherramienta al minimizar el original.
 - Dependiendo del tipo de fotosensibilizador se obtiene una fotoherramienta positiva o negativa.



- 2) **Fotocopiar** el original, dado que las fotocopadoras de hoy en día gozan de una resolución aceptable. Aunque es una opción económica e inmediata para trabajos artísticos, para trabajos de precisión es una alternativa prohibida por las distorsiones que se presentan. Además las sombras que puede presentar una mala copia puede dañar el trabajo.



- 3) Para un original diseñado por computadora lo importante es la resolución del equipo de impresión. Las **impresoras** o **plotters** de **inyección de tinta** garantizan una buena resolución aunque se requiere de acetato especial para tinta. Para trabajos de alta precisión tales como circuitos integrados no son recomendables ya que las líneas no se trazan en forma continua sino en forma de cuadros o pixeles que a pesar de ser diminutos incrementan el efecto dentado en los bordes del trabajo final. Esta alternativa no deja de ser económica e inmediata para trabajos que no requieran mayor cuidado.



- 4) Las **impresoras láser** funcionan bajo el mismo principio de las fotocopadoras pero gozan de mayor precisión y resolución. Además minimizan el problema de los pixeles en forma significativa. La desventaja es económica.

Dependiendo del volumen de la producción se generan varias fotoherramientas.

3.2.5. Exposición.

La exposición de la placa con la fotoherramienta es un procedimiento muy sencillo y también su flexibilidad depende del producto que se desea. . Consiste en una placa de vidrio y luz solar directa. La sensibilidad luminosa de la mayoría de las emulsiones fotosensitivas está predominantemente en la zona de radiación ultravioleta. La colocación del conjunto de exposición se muestra en la siguiente figura.

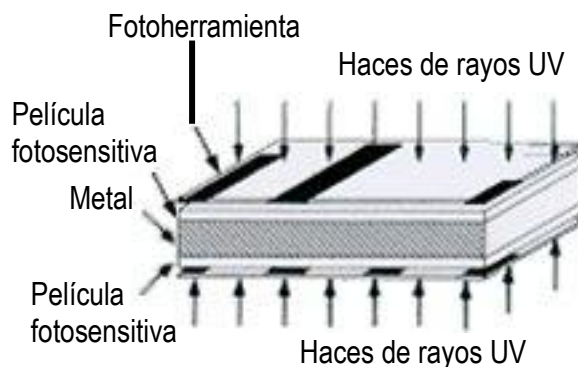


Figura 3-5: Disposición del conjunto pieza-fotoherramienta para la exposición (En este caso se realiza en las dos caras).

La emulsión fotosensitiva al exponerse a la luz ultravioleta (UV), polimeriza las áreas expuestas con resina fotosensible, modificando su estructura química de forma de incrementar la resistencia de esas áreas a los químicos usados en el revelado.

Los equipos de exposición tienen en común que el conjunto placa-fotoherramienta está colocado entre una lámina de vidrio transparente de espesor mediano (donde se apoya el área a exponer) y una segunda placa, de vidrio u opaca que varía según el sistema. Es importante al elegir la construcción y utilización de un dispositivo de exposición considerar que el vidrio absorbe fuertemente la radiación ultravioleta y ello repercute en la necesidad de prolongar la exposición. El peor de los casos lo constituye el vidrio plomado donde los resultados son malos.

El tiempo de exposición está influenciado por los siguientes factores:

- El tipo de emulsión fotosensitiva.
- El espesor de la película fotosensitiva o fotoresistencia.
- La composición espectral de la fuente luminosa.
- La intensidad (potencia) de la fuente luminosa.
- Distancia entre la fuente luminosa y el conjunto.
- El tipo y espesor del vidrio y su absorción del espectro: Vidrio, vidrio de cuarzo, vidrio de acrílico o plástico.

a. La composición espectral de la fuente luminosa

Si se ilumina al conjunto pieza-fotoherramienta con **luz solar** por lo general se eligen las horas del mediodía, escogiendo una orientación que garantice una incidencia perpendicular sobre el conjunto. Esto se hace para evitar las distorsiones. A pesar que con la luz solar se obtiene un tiempo de exposición muy corto y la uniformidad de la iluminación, la desventaja de esta fuente es que depende de factores climáticos. Inclusive la contaminación ambiental repercute en el espectro luminoso, prolongando así el tiempo de exposición y aumentando la dificultad para obtener resultados repetitivos en el proceso. Otra ventaja de la luz solar es que permite la elaboración de placas grandes.

Ante las dificultades de la luz solar se usan otros tipos de luz más estables pero menos intensas en cuanto a rayos UV se refiere, como las lámparas incandescentes, fluorescentes y halógenas.

b. La intensidad (potencia) de la fuente luminosa

La exposición se puede lograr con varias lámparas incandescentes dispuestas uniformemente en una superficie del tamaño de la placa a exponer, o con tubos fluorescentes colocados de forma similar. Las lámparas halógenas son de bajo costo y son las mismas utilizadas para usos fotográficos, con la excepción de las fuentes de exposición instantáneas (flash). Estas lámparas tienen un tamaño manejable y se colocan sobre un trípode y por su alta intensidad luminosa dan lugar a tiempos de exposición breves.

En la búsqueda de reducir el tiempo de exposición se cae en el error de utilizar fuentes de exposición instantánea similares a las que se usan con las películas fotográficas.

c. Distancia entre la fuente luminosa y el conjunto

Es importante anotar dos factores: Primero que el tiempo de exposición aumenta con el cuadrado de la distancia entre la fuente luminosa y la pieza a exponer. La otra es cuanto mayor sea la distancia más uniforme es la iluminación sobre la placa. Por lo anterior es necesario hallar una relación conveniente entre la iluminación uniforme que implica mayor distancia y el tiempo de exposición.

Tabla 3-3: Factores de variación del tiempo de exposición en función de la distancia a la fuente luminosa (para fuentes sin reflector).

	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Valores base	10	1	30	1	50	1	75	1	100	1
Aumento de distancia	15	2.2	40	1.8	65	1.7	90	1.4	120	1.4
	20	4	50	2.8	80	2.5	110	2.1	150	2.3
	30	9	80	7	100	4	150	4	180	3.2
	50	25	100	11	150	9	180	5.8	200	4
Disminución de distancia	8	0.65	25	0.7	40	0.64	60	0.64	80	0.64
	5	0.25	20	0.45	30	0.36	50	0.45	75	0.56
	4	0.16	15	0.25	20	0.16	40	0.29	60	0.36
	3	0.09	10	0.11	15	0.09	30	0.16	50	0.25

a es la distancia entre la fuente luminosa y la capa fotosensible en cm y b es el Factor de corrección.



El conjunto a exponer entre dos placas de vidrio.



Pequeña cámara de exposición con tubos halógenos.



Máquina de exposición con cámara de vacío.

Figura 3-6 : Cámaras de exposición

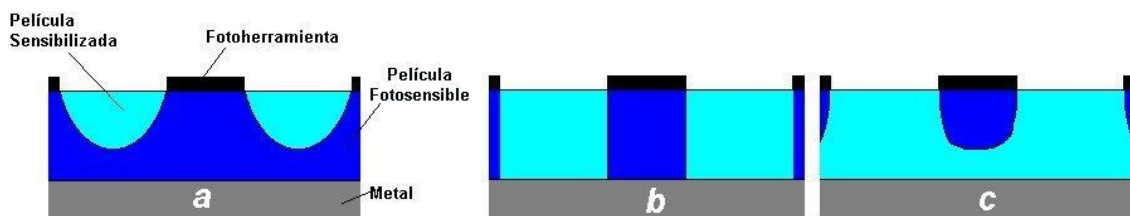
Otro factor a verificar durante la exposición es la total adherencia de la fotoherramienta a la pieza. Si la fotoherramienta no está bien pegada el resultado durante el revelado será una imagen borrosa y con distorsiones. Si la fotoherramienta se mueve durante la exposición aparecerá una imagen doble o "fantasma". Para evitar este problema, las cámaras luminosas tienen entre sus placas medios para aplicar un vacío del orden de 500mmHg (66.6kPa) entre la pieza impresa y la fuente de luz para asegurar un buen contacto. La estructura que soporta el vidrio debe ser diseñada apropiadamente para evitar que la diferencia de presión lo rompa.

d. *Tiempo de exposición*

El proceso de exposición ocurre en tres etapas, ver figura 3-7:

- Una primera etapa en la cual la luz sensibiliza las capas superficiales de la película en las zonas expuestas. La sensibilización no llega hasta el metal base.
- En una segunda etapa, cuando el tiempo de exposición es el óptimo la luz sensibiliza la película hasta llegar en forma casi ortogonal a la superficie del metal base, conservando las dimensiones del área protegida.
- Si el tiempo de exposición es excesivo la luz comenzará a sensibilizar las capas de película cercanas al metal base que se encuentran debajo de la zona protegida, y lo seguirá haciendo de forma sistemática hasta velar toda la película.

Figura 3-7 : Proceso de exposición



Para determinar el tiempo de exposición se hace una serie de ensayos con la fuente luminosa, usando para ello varias placas sensibilizadas con sus fotoherramientas. Se ejecutan exposiciones empleando series de tiempos muy próximos y a intervalos de 30 segundos con el fin de definir el rango en el cual la película se sensibiliza completamente. Un indicio de un buen tiempo de exposición es un revelado sin sombras y poco borroso. Luego se comparan todas las placas en su orden de extracción y la primera placa que, con el menor tiempo de exposición, presenta la mejor resolución en sus caracteres es aquella cuya película fotosensitiva ha sido penetrada totalmente en su espesor por la luz.

Para retirar la pieza a grabar de la exposición se debe proceder cuidadosamente, reduciendo en lo posible los tiempos de transporte y de manejo de las placas al colocarlas y recogerlas, ya que aún cuando una exposición posterior moderada de las placas no repercute inmediatamente sobre las piezas, una exposición muy prolongada a la luz puede producir un desdibujamiento de la placa.

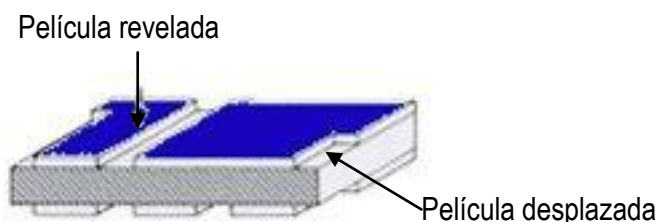
3.2.6. *Revelado*

Después de la exposición, las placas se revelarán lo antes posible. El revelado se hace vertiendo una solución reveladora acuosa sobre la placa expuesta. Estas sustancias son soluciones formuladas para cada tipo específico de emulsión fotosensitiva y son suministradas o recomendadas por el fabricante. La duración del revelado depende de la naturaleza y el espesor de la película fotosensitiva.

Dependiendo del sistema (positivo o negativo) el líquido revelador reacciona con la parte de la película fotosensitiva que polimeriza mientras la parte que no lo hace se afloja y cae durante el lavado (**Figura 3-8**). Si el sistema es positivo la película fotosensitiva polimeriza en el área expuesta a la luz, en el sistema negativo sucede lo contrario.

En los procesos automatizados, una máquina rocía el revelador sobre la superficie, haciendo que reaccione con la película polimerizada que cubre el área a grabar. La temperatura del revelador, la presión del spray, la configuración de la oscilación del spray y la temperatura de enjuague del agua son los parámetros más importantes en el revelado.

Figura 3-8 : Partes del revelado.



Luego que la pieza es extraída del revelador es enjuagada en agua corriente o en spray para remover el revelador sobrante y remover el polímero de las áreas sin imagen. Si las partes sin imagen todavía no se aclaran, debe repetirse el proceso.

En algunos casos es deseable secar los paneles después de revelarlos, para ello se usan hornos infrarrojos. El secado ayuda a evaporar los remanentes del solvente en la película fotosensitiva revelada y asegura un endurecimiento molecular ligado al sustrato. Esto provee mucha resistencia al líquido atacante y es particularmente importante cuando se usa película fotosensitiva con solvente base, las cuales tienden a hincharse cuando se revela. Se debe cuidar no excederse con los tiempos y temperaturas de secado ya que la película fotosensitiva se vuelve quebradiza y difícil de remover después del grabado.

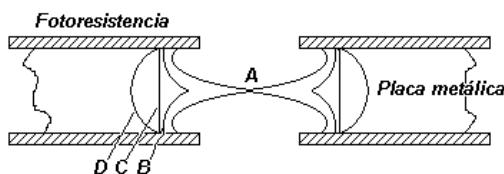
Las placas una vez reveladas son guardadas en un lugar limpio y empaquetadas o dispuestas de tal manera que no se produzcan golpes o marcas. Las placas una vez reveladas pueden ser expuestas a la luz, pues ya no son fotosensibles.

3.2.7. Grabado

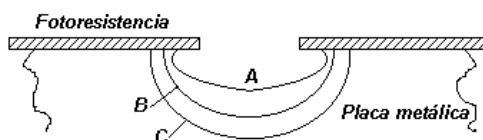
El metal revelado y seco es expuesto luego en una solución de grabado (ácido, base o sal soluble). Esta puede estar caliente y/o agitada continuamente durante el proceso de grabado. La reacción química toma lugar cuando el ácido reacciona con el metal expuesto, oxidándolo y corroyéndolo. El grabado fotoquímico puede ser realizado por simple inmersión, inmersión con agitación mecánica, inmersión con agitación por aire o spray. Las placas reveladas sumergidas, o la solución de grabado se mantiene en movimiento para que actúe sobre las placas líquido fresco y activo de forma uniforme.

Figura 3-9: Grabado en una o dos caras

Grabado en ambas caras



Grabado en una cara



En el caso de las dos caras: A, Punto de penetración y/o ruptura; B, Corte biconvexo; C, Maquinado correcto o recto; D, Corte cóncavo debido a que se ha pasado el tiempo de grabado

En el caso de una pieza a ser grabada en las dos caras, el ataque procede hasta un punto en el que la penetración de cada superficie pasa parcialmente por medio de la lámina (**Figura 3-10⁶**). Después que la solución de grabado pasa a través de la apertura, hace que los bordes se suavicen y se produzca una pared vertical.

Cuando se trata del grabado de una cara, el ácido produce un socavamiento interno que avanza en todas direcciones tal como lo indica la **Figura 3-9**. Nótese que en cualquiera de los dos casos mientras el ácido penetra el metal, el grabado resultante se incrementa internamente por debajo de la película fotosensitiva, por eso se debe tener mucho cuidado con el tiempo de grabado.

En la mayoría de las operaciones de producción, la composición y concentración de la solución de grabado y otras condiciones del proceso son reguladas por una rata de remoción sobre 0.01 a 0.05 mm/min. Ratas más rápidas de remoción son obtenidas cuando se usa la aplicación del ácido

⁶ En esta figura se define a la película fotosensitiva como "Fotoreistencia"

en spray (equipos de corrosión acelerada), este proceso no garantiza la precisión cuando se desea obtener el grabado de caracteres con aristas.

Una vez terminado el proceso de grabado se lava la pieza con abundante agua corriente a fin de eliminar todo el líquido de grabado y así evitar una corrosión adicional. Debido al uso de sustancias muy corrosivas, usar pinzas y otros utensilios plásticos.

a. *Líquidos para grabar*

Estos líquidos están listados en la **Tabla 3-4** junto con las operaciones características de cada uno.

Tabla 3-4: Fórmulas químicas para grabado en diversos metales.

Metal	Formulaciones de los líquidos de grabado	Temp. °C
Alfenol (Fe, 16% Al)	▪ 42°Bé ⁷ FeCl ₃	49
	▪ HNO ₃ conc; HCl conc; H ₂ O (1:1:2)	38-49
Aluminio	▪ HCl conc; H ₂ O (1:4)	22-65
	▪ Solución 20% NaOH	60-90
	▪ 12-20°Bé FeCl ₃	49
	▪ Ferrocianuro potasio alcalino: 329g/L K ₃ Fe(CN) ₆ ; 16 g/L NaOH; 30 g/L Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	55
	▪ 40°Bé FeCl ₃ ; HCl conc (100:9)	43
	▪ Solución 20% NaOH	60-90
Aluminio anodizado	▪ 12-20°Bé FeCl ₃	49
Berilio	▪ Bifluoruro de amonio (90-180g/L NH ₄ HF ₂)	27-32
Aleaciones de cobre (incluye Cobre-Berilio)	▪ 12-20°Bé FeCl ₃	43-49
	▪ 33°Bé CuCl ₂	54
	▪ Ácido crómico modificado (Grabador para multicircuitos)	27-38
	▪ 220 g/L Persulfato de amonio	32-49
	▪ 2M Cloruro de amonio cúprico (Cu(NH ₃) ₄)Cl ₂ ; Peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico (Shipley Hydro-etch 536)	45-50

⁷ Bé es una unidad de concentración en grados Baumé.

Germanio	▪ HF+HNO ₃	...
Oro	▪ Agua fuerte que consiste en HCl conc y HNO ₃ conc (3:1)	20-32
	▪ Potasio ionizado (saturado)+ (20 g/L) Yodo	50
HyMu 80. 800 (80% Ni, 4%Mo, rem Fe)	▪ 42°Bé FeCl ₃ ; HCl conc (9:1)	43-49
Inconels (Ni, Cr, Fe)	▪ 42°Bé FeCl ₃	54
Kovar		
(Fe, 29%Ni, 17%Co)	▪ 42°Bé FeCl ₃	49
Plomo	▪ 33°Bé CuCl ₂	54
Magnesio	▪ 10-20% HNO ₃ conc (+ aditivos tales como Hunt X-flex para mejorar el factor de grababilidad)	35
	▪ Ferrocianuro potasio alcalino: 200g/L K ₃ Fe(CN) ₆ ; 20 g/L NaOH; 5 g/L Oxalato de sodio	55
Molibdeno	▪ 40°Bé FeCl ₃	40-55
	▪ HNO ₃ ; HF; H ₂ O	50-54
	▪ HNO ₃ conc; H ₂ SO ₄ ; H ₂ O (1:1:3)	50-54
	▪ HNO ₃ conc; HCl; H ₂ O (1:1:3)	50-54
Ni, 13%Fe, 5%Cu, 4%Mo	▪ 42°Bé FeCl ₃ ; HCl conc (9:1)	54
Monel (67%Ni, 33%Cu)	▪ 42°Bé FeCl ₃	49-54
Mumetal		
(Ni, 16%Fe, 5%Cu, 1.5%Cr)	▪ 42°Bé FeCl ₃	49-54
Níquel	▪ 38-42°Bé FeCl ₃ ; HNO ₃ conc; HCl; H ₂ O (1:1:3)	49
Aleaciones de níquel hierro	▪ 42°Bé FeCl ₃ con adiciones de HNO ₃ si es necesario	49
(Invar o Aleac. 42)		
Nimonic	▪ FeCl ₃ ; HNO ₃ ; HCl	
(80% Ni, 20% Cr)		
Niobio	▪ HNO ₃ conc; HF; H ₂ O (7:1:2)	

Bronce fosforoso (Cu, 5%Sn, 0.5%P)	▪ 42°Bé FeCl ₃	25-49
Platino	▪ Agua fuerte que consiste en HCl conc y HNO ₃ conc (3:1)	20-25
Plata	▪ 36°Bé Fe(NO ₃) ₃	43-54
	▪ 50-90%H NO ₃	38-49
Aceros inoxidables	▪ 35-48°Bé FeCl ₃	35-55
Aceros inoxidables con Mo (a316l)	▪ 35-48°Bé FeCl ₃ con adiciones de H NO ₃	35-55
Acero (suave, resorte, silicón y herramienta)	▪ 36-42°Bé FeCl ₃	52
Estaño	▪ 42°Bé FeCl ₃	54
Titanio	▪ 10-50%HF opcionalmente con adiciones de H NO ₃	30-49
	▪ NH ₄ HF ₂ : HCl conc: H ₂ O	
Tungsteno	▪ Ferrocianuro potasio alcalino: 200g/L K ₃ Fe(CN) ₆ ; 20 g/L NaOH; 5 g/L Oxalato de sodio.	55
Vanadio	▪ HNO ₃ conc; H ₂ O (1:1)	25
Circonio	▪ HNO ₃ conc; HF; H ₂ O	36
	▪ H ₂ SO ₄ ; HF; H ₂ O	

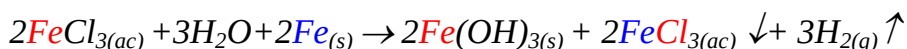
Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 3, Pag 590

La reacción química predominante durante el grabado de cada uno de estos metales y aleaciones es la oxidación. Los elementos que intervienen dependen del tipo de metal a grabar y la solución de ataque, ya sea en medio ácido o medio básico.

En nuestro caso el material a grabar será una aleación de acero inoxidable A316L, en la cual predomina la siguiente reacción de oxidación, por ser el hierro el elemento que se encuentra en mayor proporción y en forma más inestable.

Semi-reacciones

$2\text{FeCl}_{3(ac)} \rightarrow 2\text{Fe}_{(ac)}^{3+} + 6\text{Cl}_{(ac)}^-$	Disociación de la sal
$3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6(\text{OH})^-$	Disociación del agua
$2\text{Fe}_{(ac)}^{3+} + 6(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)} \downarrow$	Precipitado de hidróxido de hierro (con el hierro de la solución)
$6\text{Cl}_{(ac)}^- + 6\text{H}^+ \rightarrow 6\text{HCl}_{(ac)}$	Formación del ácido clorhídrico
$6\text{HCl}_{(ac)} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6\text{Cl}_{(ac)}^-$	Disociación del ácido clorhídrico
$2\text{Fe}_{(s)} + 6\text{Cl}_{(ac)}^- \rightarrow 2\text{FeCl}_{3(ac)} + 6e^-$	Ataque de los iones cloro al hierro metal en la placa
$6\text{H}^+ + 6e^- \rightarrow 3\text{H}_{2(g)} \uparrow$	Formación del hidrógeno molecular que se desprende



Donde el **Fe** (Hierro) proveniente de la solución se escribe en rojo y el **Fe** (Hierro) de la aleación se escribe en azul. La reacción se realiza hasta que la solución se debilita por la pérdida de acidez ocasionada por la expulsión del hidrógeno.

El factor de grababilidad en el grabado fotoquímico está expresado de esta manera:

$$FG = \frac{p}{s} \quad \left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right]$$

Donde p equivale a la profundidad de corte en mm (por un lado) y s es el socavamiento en mm, por lo tanto FG es un parámetro adimensional.

El grabado es realizado usualmente utilizando una solución acuosa de cloruro férrico (FeCl_3 a menudo con aditivos), cloruro de cobre, ácidos diluidos y químicos de base alcalina basados en hidróxido de sodio o de amonio. El hidróxido de sodio es usado extensivamente en aluminio y sus aleaciones. Las soluciones de percloruro férrico (FeCl_3) son utilizadas para las aplicaciones relacionadas con el maquinado fotoquímico en una amplia variedad de metales, como lo indica la **Tabla 3-4**.

La actividad química de una solución de grabado se reduce a medida que se utiliza en varias placas. Cuando la solución está saturada de metal removido, la actividad química se recupera con la adición de ácidos frescos. Sin embargo cuando una solución ya no disuelve eficientemente el metal, se desecha.

Por ejemplo, los químicos a base de NaOH son mantenidos con adiciones y regenerado cuando el contenido de aluminio es excesivo. El FeCl_3 se regenera parcialmente si se le agrega HCl diluido.

b. Máquinas para grabado

Estas máquinas están construidas de materiales que resisten la corrosión (tales como PVC y titanio) del percloruro férrico y otros químicos atacantes. La temperatura de los químicos por lo general está por debajo de los 55°C para evitar la distorsión del plástico utilizado en la construcción de estas máquinas. La mayoría de las máquinas para practicar el grabado fotoquímico tienen una construcción similar.

En la base de la máquina hay un sumidero que contiene el químico para grabar. Un elemento intercambiador de calor construido de titanio mantiene la temperatura del químico constante. El químico grabador se bombea a través de un sistema de spray que rocía directamente sobre las dos caras de la superficie⁸. El diseño de estas máquinas es muy variado, en muchas ocasiones el spray es oscilante y en otras es fijo.



Figura 3-10: Máquinas para grabado de C.I.B.S. Etching supplies

3.2.8. Despojado e inspección del trabajo.

Después del grabado los paneles están todavía cubiertos con la película fotosensitiva que debe ser removida. Algunas fórmulas producen el ablandamiento y alzamiento de la película, que entonces se retira cepillando suavemente. El Cloruro de metileno es el solvente base que disolverá la película fotosensitiva por completo, pero requiere de mucha ventilación y cuidado durante su uso.

⁸ Este es el caso de las máquinas utilizadas en la fabricación de circuitos integrados

Una vez removida la película fotosensitiva hay que verificar el espesor de los caracteres y la superficie de la pieza. Si se trata de trabajos de alta precisión se requiere la utilización de artefactos sofisticados de comparación óptica.

3.3. DEFECTOS Y SUS CAUSAS

En todo el proceso los defectos más importantes son:

- 1) En el momento del revelado se origina un desdibujamiento del trazado del diseño.

Causas posibles:

- Fotoherramienta defectuosa, los lugares oscuros son parcialmente transparentes.
- Exposición previa a la luz por descuido.
- Recalentamiento de las placas durante las etapas de secado.
- Recalentamiento de las placas durante la exposición.
- Revelador muy concentrado.
- Demasiado tiempo de revelado.
- Un "revelado diferido" de las placas debido a que el enjuague y lavado de las placas después del revelado no se hizo al instante.

- 2) Si la capa fotosensible permanece en algunos puntos, luego del revelado.

Causas posibles:

- Revelador muy diluido
- Tiempo de revelado muy breve
- Capa fotosensible no uniforme (grosor excesivo en algunas partes)
- Contraste de la fotoherramienta muy pobre. Las partes oscuras no son tan oscuras y las claras no son lo suficientemente transparentes.
- Fotoherramienta deteriorada
- Tiempo de exposición demasiado breve.
- Ensombrecimiento de la placa durante la exposición, debido a las partículas de suciedad.

3.4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Las propiedades mecánicas del metal de trabajo tienen pequeños efectos sobre la rata de remoción durante el grabado. Por ejemplo, en bronce y en acero los tiempos de ataque son diferentes para desprender una misma cantidad de material.

3.4.1. Limitaciones dimensionales

En la **Figura 3-11** se muestran las relaciones entre el espesor y varias limitaciones dimensionales cuando el proceso se usa para efectuar perforaciones en una lámina. Como regla general el diámetro más pequeño de agujero pasante o el ancho de una hendidura producida por el procedimiento de maquinado fotoquímico no es mayor a 1.2 veces el espesor. El mínimo agujero o ancho de hendidura que se realiza es de 0.1 mm. La distancia mínima entre agujeros es de 0.9 veces el espesor. En la **Tabla 3-5** se muestran algunas medidas aproximadas para el ancho mínimo.

Tabla 3-5: Ancho o diámetro mínimo para diversos metales.

Metal	Ancho o diámetro mínimo
Acero al carbono	T
Acero inoxidable	$1.4T$
Aluminio y sus aleaciones	$1.4T$
Aleaciones de cobre	$0.7T$

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, "Dimensional Limitations", Pag 591

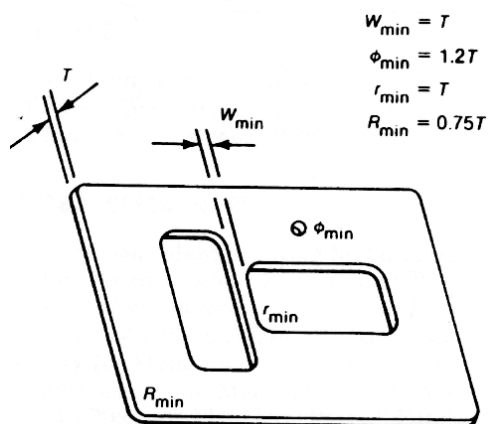


Figura 3-11: Limitaciones dimensionales de las piezas sometidas a maquinado fotoquímico

Tabla 3-6: Tolerancias en el grabado fotoquímico de varios metales en mm(9).

<i>Espesor</i>	<i>Aluminio y sus aleaciones</i>	<i>Cobre y sus aleaciones</i>	<i>Níquel</i>	<i>Acero inoxidable</i>	<i>Acero de bajo carbono</i>
Para producción rutinaria					
0.05	0.05	0.025	0.025	0.025	0.025
0.13	0.08	0.02	0.08	0.05	0.05
0.25	0.1	0.08	0.13	0.08	0.1
0.5	0.15	0.13	0.25	0.13	0.15
1	0.02	0.15		0.25	0.25
1.5	0.3	0.18		0.36	0.3
Para producción con control rígido					
0.05	0.008	0.005	0.005	0.013	0.005
0.13	0.018	0.013	0.013	0.025	0.013
0.25	0.04	0.025	0.025	0.05	0.025
0.5	0.08	0.05	0.05	0.1	0.05
1	0.13	0.1	0.13	0.2	0.13
1.5	0.18	0.15	0.2	0.3	0.18

3.4.2. Tolerancias

En ese sentido es difícil establecer reglas debido a diversos factores involucrados, tales como la naturaleza del metal, el tamaño de la lámina, el tipo de exposición y la habilidad del operador.

Ver **Tabla 3-7**.

⁹ Estas tolerancias son aplicables a dimensiones menores de 50mm.

Tabla 3-7: Tolerancias en el grabado fotoquímico de varios metales en mm.¹⁰

<i>Espesor</i>	<i>Aluminio y sus aleaciones</i>	<i>Cobre y sus aleaciones</i>	<i>Niquel</i>	<i>Acero inoxidable</i>	<i>Acero de bajo carbono</i>
Para producción rutinaria					
0.05	0.05	0.025	0.025	0.025	0.025
0.13	0.08	0.02	0.08	0.05	0.05
0.25	0.1	0.08	0.13	0.08	0.1
0.5	0.15	0.13	0.25	0.13	0.15
1	0.02	0.15		0.25	0.25
1.5	0.3	0.18		0.36	0.3
Para producción con control rígido					
0.05	0.008	0.005	0.005	0.013	0.005
0.13	0.018	0.013	0.013	0.025	0.013
0.25	0.04	0.025	0.025	0.05	0.025
0.5	0.08	0.05	0.05	0.1	0.05
1	0.13	0.1	0.13	0.2	0.13
1.5	0.18	0.15	0.2	0.3	0.18

Datos derivados de: ASM Handbook Tomo 7, Tabla 5, Pag 591

3.4.3. Calidad de los fillos

En este proceso no se forman irregularidades en los contornos de los caracteres, pero los bordes obtenidos en el instante de la completa penetración son irregulares y rugosos. La uniformidad de los fillos depende del tamaño de [grano](#), los esfuerzos locales la orientación, la adherencia de la película fotosensitiva, concentraciones locales del atacante, velocidad de impresión y la dirección de flujo.

3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

¹⁰ Estas tolerancias son aplicables a dimensiones menores de 50mm.

El proceso de maquinado fotoquímico es una alternativa al estampado convencional cuando se involucran diseños intrincados o bajos volúmenes de producción. La ventaja se observa, ya que los cambios en las herramientas sólo se limitan al diseño, mientras que en el estampado se requiere la fabricación de troqueles de precisión de materiales duros tratados térmicamente. El proceso de maquinado fotoquímico y en consecuencia el grabado, tiene la ventaja de ser altamente reproducible. Esta ventaja es difícil lograr en otro tipo de grabado. En la **Tabla 3-8** vemos algunas ventajas y desventajas:

Tabla 3-8: Ventajas y desventajas del maquinado fotoquímico.

Ventajas	Desventajas
▪ Procedimiento muy exacto. ▪ Alta reproducibilidad. ▪ Los costos de equipos y herramientas son extremadamente bajos. El cambio del diseño del grabado tiene un costo bajo, basta cambiar la fotoherramienta. ▪ El proceso no produce virutas. ▪ Un metal extremadamente delgado, quebradizo y sin distorsiones puede ser grabado fácilmente. ▪ La temperatura de fusión, los esfuerzos máximos y otras propiedades físicas del metal no son alteradas. ▪ El proceso permite diseños grandes.	▪ Una relativa calificación de los operarios. ▪ Precauciones de seguridad especiales en el manejo de los químicos. Los vapores de las soluciones de grabado son muy corrosivos y en ocasiones venenosos. Por esta razón el equipo de grabado está aislado del resto de los equipos de la planta. ▪ Las facilidades fotográficas no siempre están disponibles. ▪ El espesor máximo de metal para ser <u>traspasado</u> es limitado directamente por el tipo de protección a utilizar. ▪ No se producen radios afilados.

4. METODOLOGÍA PARA EL GRABADO DEL ACERO A316L

4.1. EQUIPOS Y COMPONENTES UTILIZADOS

En esta sección se describen los equipos que fueron diseñados y construidos exclusivamente para las rutinas experimentales, incluyendo las probetas y la fotoherramienta. Los materiales que se utilizaron en cada uno de los ensayos y preparaciones se enumeran en el [Apéndice 4](#).

4.1.1. Horno de secado¹

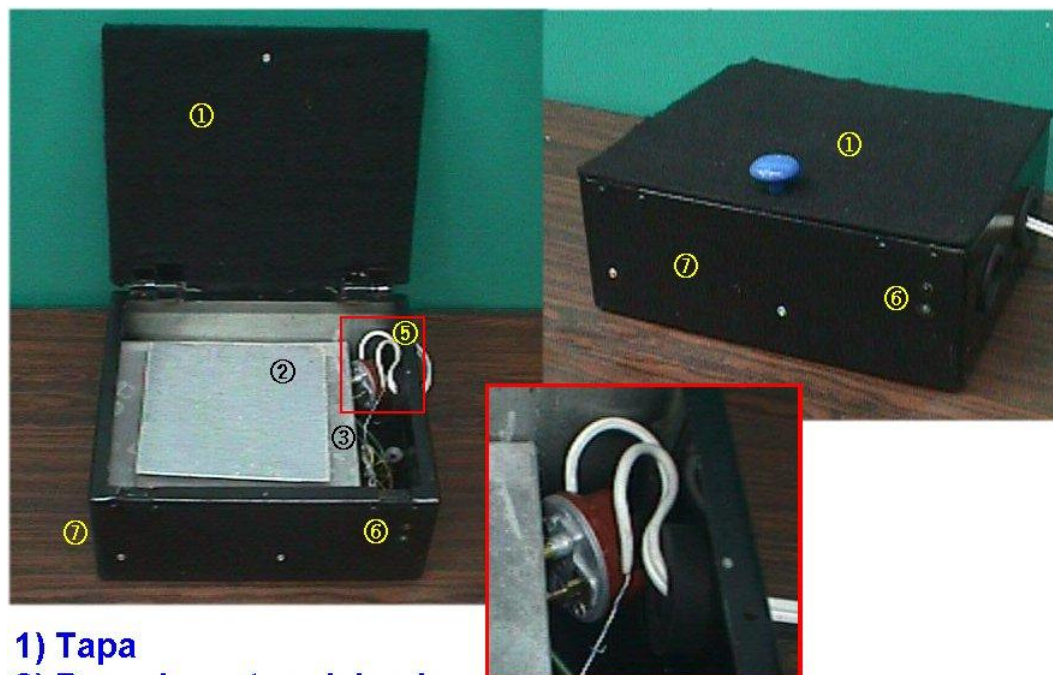
El secado de la emulsión fotosensitiva luego de su aplicación garantiza la formación de una película fotosensitiva sólida y la adherencia a la superficie sobre la que está aplicada. Esta operación debe ser realizada de manera tal que no se sobrepasen los límites de temperatura establecidos por el fabricante, ya que de lo contrario la película se deteriorará, perdiendo la adherencia y la fotosensibilidad.

El horno a utilizar en el proceso será similar a un horno de aire² como el explicado en el capítulo anterior. Consiste en una caja de acero de 320X200X130mm, con una tapa hermética a la luz exterior. Una resistencia de 280 Ω y 2100W, normalmente usada para hornilla de cocina eléctrica, funciona como elemento principal de calentamiento. Esta resistencia está montada en la parte inferior de una lámina de aluminio de 2mm de espesor que asegura una temperatura uniforme en el interior de la cámara. La resistencia está conectada en serie con un termostato bimetálico de gatillo normalmente cerrado, ajustable entre 30°C y 80°C (con un error $\pm 5^\circ\text{C}$).

Las probetas sensibilizadas estarán montadas sobre una base de cartón delgado colocada a 20mm de la base de aluminio para reducir la transferencia de calor por conducción la cual puede provocar el endurecimiento rápido de la película en zonas localizadas, ocasionando así un resquebrajamiento.

¹ Véase plano normalizado del horno de secado en el [Plano 7](#)

Figura 4-1: Horno de secado



- 1) Tapa
- 2) Base de carton delgado
- 3) Tapa de aluminio
- 4) Resistencia de calentamiento
- 5) Termostato
- 6) Leds indicadores
- 7) Caja

4.1.2. Cámara de exposición³

La cámara de exposición consiste de una caja de madera de 320X320X180 mm. La base o caja de 130mm de alto, está dividida en su interior por dos compartimientos. En la base del compartimiento superior se encuentran cuatro tubos fluorescentes de 6W, espaciados 60mm entre sí y está tapado por un cristal de 4mm de espesor. En el compartimiento inferior se encuentran los dispositivos necesarios para el encendido de las lámparas, tales como arrancadores (starters) y

² Capítulo 3, Sección 3.1.3. Secado.

³ Véase plano normalizado de la cámara de exposición en el [Plano 8](#).

balastos, además de un temporizador ajustable que permite controlar el tiempo de exposición de las probetas sensibilizadas. Un bombillo tipo led bicolor indica el estado del funcionamiento de la cámara; verde (encendida), rojo (apagada).

La tapa de 50mm de alto es hueca y esta forrada en su parte inferior por una lámina de goma blanda colocada al ras del borde, de la misma manera que el cristal está colocado en la caja. Cuando la cámara se encuentra cerrada la goma y el cristal entran en contacto presionando de manera rígida al conjunto probeta-fotoherramienta cuando se coloca entre éstos. Esto se hace para evitar desplazamientos indeseables durante la exposición.

Figura 4-2 : Cámara de Exposición

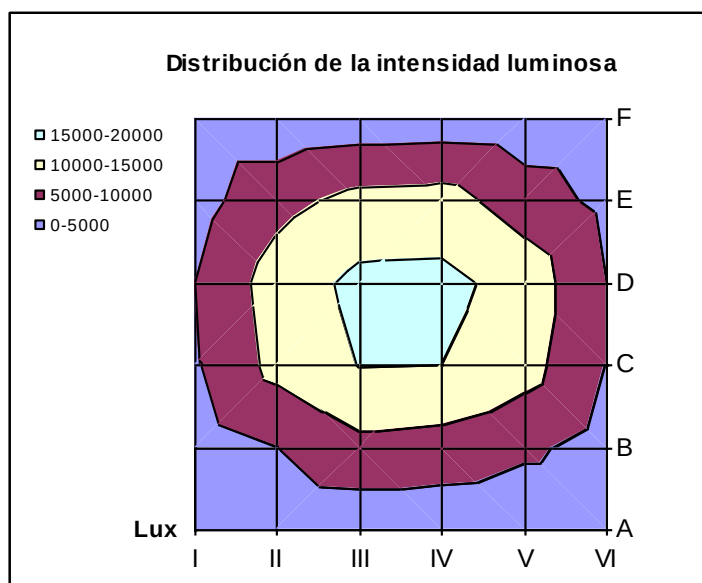


Una de las limitaciones de este equipo es la distribución de la intensidad luminosa. La intensidad luminosa en la superficie de exposición no es uniforme, varía en función de la cercanía a la fuente de luz. Para determinar la el rango de intensidad luminosa se divide el área en cuadrículas de 50mm y con el uso de un lupsometro se midió la intensidad luminosa en cada cuadro y se registró en la Tabla 4-2.

Tabla 4-1 : Intensidad luminosa en cada sector de la superficie de exposición.

Cuadro	A	B	C	D	E	F
I	800	2400	4500	5000	3000	1150
II	1000	4900	11600	12300	8500	1350
III	1300	8800	15200	16200	11500	2000
IV	1300	8000	15000	16400	12000	2300
V	900	6000	12000	13000	7500	1700
VI	950	3000	4900	5000	3700	1350

Figura 4-3: Diagrama de distribución.



La intensidad luminosa de la cámara varía entre 800-16400lux. La intensidad promedio es de 6300lux. Las pruebas se realizaron en el área central de la superficie de exposición en la que la intensidad luminosa varía entre 10000-16400lux y el promedio es 12000lux.

Tabla 4-2: Composición química del acero A316L

Composición química

C	0.03%
Mn	2%
P	0.045%
S	0.03%
Si	1%
Cr	16-18%
Ni	10-14%
Mo	2-3%

Tomado del ASM Handbook.

Figura 4-4 : Forma de las probetas

**4.1.3. Probetas**

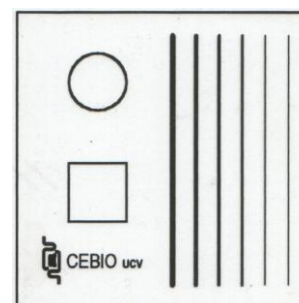
Las probetas que se usaron en este trabajo son pletinas cuadradas de acero AISI A316L, cuyas dimensiones son 50mm de lado y 3mm de espesor. La composición de este acero se observa en la **Tabla 4-2** y la forma de las probetas en la **Figura 4-4**.

4.1.4. Fotoherramienta⁴

Consiste en una lámina de acetato (HP Inkjet Transparency Paper) sobre la cual están impresos los caracteres que deben ser fotografiados sobre las probetas. Los caracteres fueron impresos a través de una Impresora de inyección de tinta.

El diseño sobre la fotoherramienta consiste en dos zonas: zona de resolución y zona de distorsión. La zona de resolución servirá para estudiar la nitidez, consiste de cuadrado y un círculo dibujados con líneas de 0.3mm de espesor. La zona de distorsión consiste en seis líneas de 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mm de espesor. Se incluyeron

Figura 4-5 : Fotoherramienta

⁴ Véase plano normalizado de las probetas [Plano 6](#).

además el logotipo del Centro de BioIngeniería y letras para estudiar la capacidad de copiar caracteres complejos.

4.2. SOLUCIONES UTILIZADAS.

Los reactivos utilizados en cada una de las soluciones se mezclaron de manera independiente siguiendo el orden señalado en la solución respectiva. Cada procedimiento se realizó bajo una campana de extracción de gases, con agitación constante y empleando los dispositivos de protección personal adecuados, tales como guantes de plástico para químicos, protección visual y máscaras antigases.

4.2.1. *Solución desgrasante*

En un vaso Vicker de 1000 cm³ se preparó una solución acuosa de H₂SO₄ al 10% v/v (Por cada 900 cm³ de agua se agregan 100 cm³ de H₂SO₄).

El ácido sulfúrico fue agregado lentamente en un recipiente que contenía agua destilada. Debido a que la reacción es exotérmica, se agita constantemente hasta estabilizar la temperatura de la mezcla con la del medio ambiente.

4.2.2. *Solución para decapado*

En un vaso Vicker de 1000cm³ se preparó una solución acuosa de ácido nítrico (HNO₃) 40% v/v y ácido clorhídrico (HCl) 4% v/v (en un Vicker de 1000cm³ se vertieron 560 cm³ de agua, luego 40cm³ de HNO₃ y 400cm³ de HCl).

4.2.3. *Solución para pasivado*

En un vaso Vicker de 1000cm³ se preparó una solución acuosa de solución ácido nítrico (HN O₃) 20% v/v (800 cm³ de agua, luego 200cm³ de HN O₃).

4.2.4. Solución de ataque

Según la Bibliografía⁵ para el grabado del acero inoxidable con molibdeno se necesita una solución acuosa de FeCl_3 cuya concentración oscile entre 35-55°Bé (1.38g/cm^3 - 1.6g/cm^3 aprox), con adiciones de HNO_3 (ácido nítrico).

En un vaso Vicker de 1000cm^3 se preparó una solución acuosa de FeCl_3 . En 1000cm^3 de agua y se vertieron 500g de Cloruro Férrico Hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Debido a la condición de saturación de la solución durante la mezcla no se pudo alcanzar la concentración sugerida. Finalmente obtenemos 1200cm^3 solución de Cloruro Férrico 23°Bé (1.25 g/cm^3), al cual se adicionaron 10cm^3 de ácido nítrico al 20% v/v (El mismo utilizado en la pasivación).

4.3. PARAMETROS DE TRABAJO

Emulsión fotosensitiva

- KPR Dye Blue. Alphametals
- Sistema de activación: Positivo.

Revelador

- KPR Dye Blue Developer. Alphametals

Esta es la sustancia que se consigue comúnmente para este tipo de aplicaciones en Venezuela.

Secado de la película fotosensitiva

- Temperatura de secado: 45°C .⁽⁶⁾
- Tiempo mínimo de secado: 25 min ⁽³⁾

Exposición

- Intensidad de la exposición: 12000 lux promedio.

⁵ ASM Handbook Tomo 7, Tabla 3, Pag. 590

- Distancia de exposición: 3cm.

Distancia que garantiza una iluminación uniforme del conjunto pieza-fotoherramienta.

Ataque (Grabado)

- Sustancia: Solución acuosa de $\text{FeCl}_3^{(7)}$ 23°Be (1.25g/cm^3). más 10ml de HNO_3 20% v/v
- Agitación: 180 R.P.M.
- Temperatura: $55^\circ\text{C}^{(4)}$

4.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.4.1. Preparación de las probetas

a. Obtención de las rugosidades en las superficies

Para estudiar los parámetros de fotograbado en función de la rugosidad de las superficies, se modificaron las condiciones iniciales de las superficies de las probetas por métodos abrasivos. Se tomaron tres grupos de catorce (14) probetas y se realizaron los siguientes procedimientos:

- **Grupo 1:** Se tomaron 14 probetas y se aplicó sobre toda la superficie de las probetas en forma uniforme, arena a alta velocidad proyectada por aire comprimido (Sand Blasting), obteniéndose una rugosidad promedio $R_a=1.64\mu\text{m}$.

Figura 4-6: Sand Blasting en las probetas del Grupo 1 (Véase también [Apéndice 4](#) Figura A4-2)



⁶ Recomendado por el fabricante (Alphametals).

⁷ Recomendado por ASM Handbook Tomo 7, Tabla 3, Pág. 590

- **Grupo 2:** Se tomaron otras 14 probetas, y se pasaron por papeles abrasivos en serie de grano 80, 100 y 120, hasta obtener una rugosidad promedio $Ra = 0.05\mu m$.
- **Grupo 3:** Se utilizaron papeles abrasivos en serie de grano 80, 100, 120, 180, 240 y 320 con las otras 14 probetas, hasta obtener una rugosidad promedio $Ra = 0.02\mu m$.

b. Desengrasado

Por medio de este procedimiento se remueven los aceites y/o grasas presentes en la superficie de las probetas. Las probetas fueron tratadas de la siguiente manera:

- 1) Se vertieron $700cm^3$ de la solución desengrasante en un Vicker de $1000cm^3$.
- 2) Utilizando una plancha de calentamiento con agitación magnética se calentó la sustancia hasta una temperatura de $55^{\circ}C$.
- 3) El desengrasado se realizó sumergiendo las probetas en la solución desengrasante por un tiempo de 5 min.
- 4) Posteriormente se procedió a enjuagarlas en agua tibia ($40^{\circ}C$).
- 5) El proceso se llevó a cabo en una campana de extracción de gases, contando con los dispositivos de seguridad necesarios tales como guantes, lentes protectores y máscara antigases.

c. Decapado

El decapado remueve la cascarilla de óxido presente en la superficie del material. Las probetas fueron tratadas de la siguiente manera:

- 1) El decapado se realizó sumergiendo la pieza en la solución para decapado a una temperatura de $55^{\circ}C$ por un tiempo de 5 min.
- 2) Luego del proceso de decapado las piezas fueron enjuagadas en agua tibia ($40^{\circ}C$).

d. Pasivación

Se elimina el color gris de la superficie una vez decapada de las probetas, adquiriendo un color blanco mate. Las probetas fueron tratadas de la siguiente manera:

- 1) El pasivado se realizó sumergiendo la pieza en el ácido a temperatura ambiente por un tiempo de 10 min.
- 2) Luego del proceso de pasivado las piezas fueron enjuagadas en agua tibia (40°C).

4.4.2. Determinación del tiempo de exposición

a. Objetivo

La finalidad de este ensayo es la determinación del tiempo óptimo de exposición. Para lograrlo se hicieron una serie de ensayos con la fuente luminosa, usando para ello varias placas sensibilizadas en una serie de tiempos muy próximos y a intervalos iguales. Se tomaron cinco placas de cada Grupo, recubiertas con emulsión fotosensitiva y secadas en el horno, y se realizaron los ensayos en el orden mostrado en la **Tabla 4-3**.

Tabla 4-3: Ensayos del tiempo de exposición por grupo.

Grupos	4 seg Exposición instantánea	30 seg	60 seg	90seg	120 seg
Grupo 1 Ra=1.64 μ m	PE#1.4	PE#1.30	PE#1.60	PE#1.90	PE#1.120
Grupo 2 Ra=0.05 μ m	PE#2.4	PE#2.30	PE#2.60	PE#2.90	PE#2.120
Grupo 3 Ra=0.02 μ m	PE#3.4	PE#3.30	PE#3.60	PE#3.90	PE#3.120

Donde PE: Prueba de exposición. La primera cifra es el numero del Grupo y el resto el tiempo en segundos.

Los siguientes pasos se realizaron dentro de un recinto aislado a la luz externa (Véase [Apéndice 4 Figura A4-1](#)) con el fin de evitar el velado de la emulsión fotosensitiva con fuentes de luz externas durante el ensayo. Este recinto estuvo parcialmente iluminado con luz roja de baja intensidad la cual es inerte para la emulsión fotosensitiva.

b. Descripción del procedimiento

- 1) Mediante el uso de un pincel N° 5 de cerda suave se aplicó una capa uniforme de emulsión fotosensitiva KPR a cinco (5) probetas de cada Grupo. Se emplearon los dispositivos de protección personal adecuados, tales como máscara antigases y guantes.
- 2) Se introdujeron las quince probetas en el horno secador ajustando la temperatura del termostato a 45°C.
- 3) Luego de veinte minutos las probetas estaban secas y listas para el proceso de exposición.
- 4) Se tomaron sistemáticamente una probeta de cada Grupo y se expusieron durante el tiempo establecido en la **Tabla 4-3**.
- 5) En un Vicker de 500cm³ se vertieron 300cm³ de sustancia reveladora KPR Dye Blue Developer.
- 6) Se retiraron las tres probetas y se sumergieron en la solución reveladora durante 10 seg.
- 7) Una vez extraída la probeta de la sustancia reveladora se sumergió en un Vicker de 1000 cm³ con agua, agitando la probeta hasta remover todo el KPR no polimerizado de las zonas no expuestas a la luz.
- 8) Para evitar contaminación en la superficie revelada se retiraron las gotas de agua con aire comprimido.
- 9) Mediante el análisis de las muestras se obtuvo el tiempo óptimo de exposición. Una vez expuestas las probetas le fueron tomadas fotografías de registro.

4.4.3. Determinación del tiempo de ataque

a. *Objetivo*

Una vez determinado el tiempo óptimo de exposición para cada grupo el siguiente paso fue determinar el tiempo de ataque o de grabado, así se habrán completado los parámetros necesarios para lograr un grabado fotoquímico en acero inoxidable A316L. Para ello se tomaron las nueve (9) muestras restantes de cada Grupo y una vez expuestas al tiempo respectivo determinado en la sección anterior se procedió al ataque en la solución acuosa de Cloruro Férrico (FeCl_3 -23°Bé) según la rutina indicada en la siguiente tabla:

Tabla 4-4: Secuencia del ensayo de ataque.

Grupos	10min	15min	20min
Grupo 1 $R_a=1.64\mu\text{m}$	PA#1.10	PA#1.15	PA#1.20
Grupo 2 $R_a=0.05\mu\text{m}$	PA#2.10	PA#2.15	PA#2.20
Grupo 3 $R_a=0.02\mu\text{m}$	PA#3.10	PA#3.15	PA#3.20

Donde PA: Prueba de ataque. La primera cifra el número del Grupo y el resto el tiempo en minutos.

b. *Descripción del procedimiento*

- 1) Se repitieron los pasos del 1 al 8 del ensayo anterior, utilizando los tiempos óptimos de exposición respectivos⁸ en las nueve (9) probetas de cada Grupo.
- 2) Las probetas se protegieron con cinta de papel adhesivo (tirro), en las caras laterales y posteriores al área donde estaba aplicada la película protectora, para evitar que la solución de ataque (Cloruro Férrico) afectara estas zonas.
- 3) Se tomaron 700 cm³ de solución de ataque (FeCl_3 -23°Bé) y se colocaron en un Vicker de 1000 cm³.

⁸ Véase la sección 4.3.1. *Tiempo óptimo de exposición* página 82.

- 4) Utilizando la plancha de calentamiento con agitación magnética se llevo la solución FeCl_3 hasta una temperatura de 55°C agitando constantemente a 180RPM con el uso de un Spin Bar.
- 5) Se sumergieron tres probetas de cada grupo en la solución durante el tiempo indicado en la **Tabla 4-4**.
- 6) Cumplido el tiempo del ensayo respectivo, se retiraron las probetas del Cloruro Férrico y se enjuagaron con agua tibia (40°C). Luego se removió la capa protectora con solvente (Thinner Laca), y por último se lavaron con detergente.

4.4.4. Inspección visual

Posterior a cada ensayo de fotograbado, se le realizaron inspecciones visuales a todos los caracteres de cada una de las probetas mediante un microscopio óptico con aumento a 50X. A cada una de las inspecciones efectuadas se les tomó una fotografía y se procedió a hacer la medición del espesor de los caracteres grabados.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. TIEMPO ÓPTIMO DE EXPOSICIÓN

5.1.1. Análisis cualitativo

Para facilitar el análisis de los resultados de esta prueba clasificaremos los caracteres de la probeta de la siguiente manera:

Tabla 5-1 : Símbolos de los caracteres de la probeta

□	Cuadrado de 10mm de lado, 0.3mm de espesor	L3	Línea de 0.4mm de espesor
○	Círculo de 10mm de diámetro, 0.3mm de espesor	L4	Línea de 0.6mm de espesor
L1	Línea de 0.1mm de espesor	L5	Línea de 0.8mm de espesor
L2	Línea de 0.2mm de espesor	L6	Línea de 1mm de espesor

El tiempo óptimo de exposición es aquel en el cual el espesor de la película fotosensitiva de la zona expuesta ha sido afectado totalmente por la luz, lográndose una buena definición de los caracteres y observándose en el interior de los mismos la superficie del metal base. Con el fin de obtener una clasificación cualitativa de esta condición, dividiremos la apreciación visual en tres categorías:

- **Totalmente Visible (T):** Se observa completamente el espesor y la longitud del carácter comparado con su homólogo en la fotoherramienta. Además debe distinguirse la superficie del metal base dentro del carácter.
- **Parcialmente Visible (P):** Se observa el carácter con irregularidades tales como indefinición o intermitencia en buena parte de su longitud o espesor. El metal base es poco apreciable y los caracteres se observan como variaciones de contraste del mismo color de la protección.
- **No Visible (N):** El carácter no aparece, producto de la falta de exposición o ha desaparecido por el velado.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5-2 : Resultados de las pruebas de exposición Grupo 1

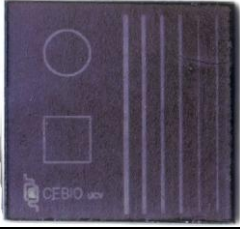
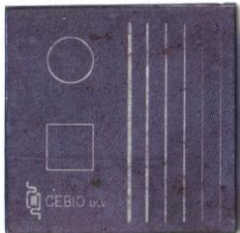
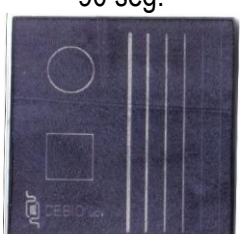
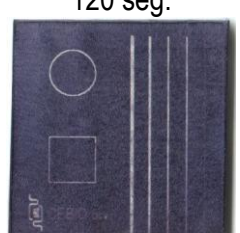
Probetas del Grupo 1 Ra = 1.64µm	Observación								
Exposición Instantánea 	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	No se observa ningún carácter, solo hay manchas producto del proceso de revelado. El tiempo de exposición no es suficiente como para fijar la emulsión y formar la película protectora.								
30 seg. 	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	P	T	N	N	P	P	T	T	P
	Se comienzan a observar los caracteres y no se distingue el metal base en los más delgados. No se ha alcanzado el tiempo de exposición óptimo.								
60 seg. 	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	P	T	P	P	T	T	T	T	P
	Los caracteres de menor espesor comienzan a verse. Las diferencias entre caracteres del mismo espesor, tales como el círculo y el cuadrado se debe a una falta de uniformidad en la incidencia de la luz sobre la superficie. No se ha alcanzado el tiempo óptimo de exposición.								
90 seg. 	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	T	T	P	P	T	T	T	T	T
	Se observan claramente todos los caracteres y se distingue el metal base, excepto en las líneas 1 y 2. En esta condición no se ha alcanzado el tiempo óptimo de exposición.								
120 seg. 	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	P	P	P	P	P	P	P	P	P
	El tiempo de exposición óptimo se ha sobrepasado. Comienzan a desaparecer los caracteres por el fenómeno de velado.								

Tabla 5-3: Resultados de las pruebas de exposición Grupo 2

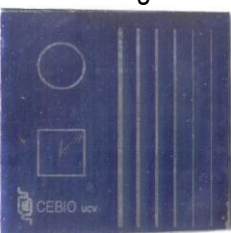
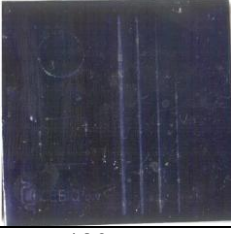
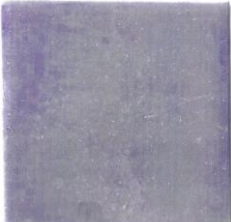
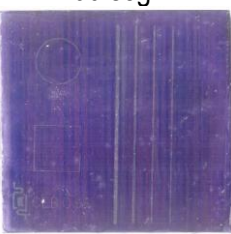
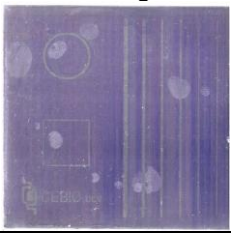
Probetas del Grupo 2 Ra = 0.05μm	Observación								
Exposición instantánea 	☐	☐	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	No se observa ningún carácter, solo hay manchas producto del proceso de revelado. El tiempo de exposición no es suficiente como para fijar la emulsión y formar la película protectora.								
30 seg. 	☐	☐	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	Los caracteres están totalmente definidos y se aprecia en su interior el metal base, podemos decir que estamos en la condición óptima de exposición.								
60 seg. 	☐	☐	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	T	T	P	P	P	T	T	T	P
	Se comienzan a desaparecer las líneas más delgadas por el efecto de velado.								
90 seg. 	☐	☐	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	N	N	N	N	N	P	P	P	N
	El efecto de velado ha hecho desaparecer la mayoría de los caracteres								
120 seg. 	☐	☐	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
	N	N	N	N	N	N	N	P	N
	Se ha velado totalmente la película.								

Tabla 5-4: Resultados de las pruebas de exposición Grupo 3

Probetas del Grupo 3 Ra = 0.02μm	Observación								
	□	○	L1	L2	L3	L4	L5	L6	CEBIO ucv
Exposición instantánea 	N	N	N	N	N	N	N	N	N
No se observa ningún carácter, solo hay manchas producto del proceso de revelado. El tiempo de exposición no es suficiente como para fijar la emulsión y formar la película protectora.									
30 seg. 	N	N	N	N	N	N	N	N	N
La película comienza a obtener sus propiedades de adherencia, pero aun no resiste el proceso del revelado.									
60 seg. 	P	P	N	N	P	P	P	P	P
La película se adhiere totalmente a la superficie y comienzan a aparecer los caracteres de mayor espesor									
90 seg. 	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Los caracteres están totalmente definidos y se aprecia en su interior el metal base, podemos decir que estamos en la condición óptima de exposición.									
120 seg. 	T	T	P	P	T	T	T	T	T
Comienzan a desaparecerse las líneas más delgadas por el efecto de velado, se ha pasado el tiempo óptimo de exposición.									

La baja rugosidad de las superficies produce un efecto brillante en las imágenes obtenidas para este grupo, que no permite apreciar los caracteres claramente.

Finalmente los tiempos óptimos de exposición para cada grupo quedaron establecidos de la siguiente manera:

- **Grupo 1 ($R_a = 1.64\mu\text{m}$) 105 seg.** Este tiempo entre 90 y 120 seg fue determinado mediante una sexta prueba de exposición, en la que aparecieron todos los caracteres en forma nítida incluyendo las líneas L1 y L2 (0.1 y 0.2mm respectivamente).
- **Grupo 2 ($R_a = 0.05\mu\text{m}$) 30 seg.** se observaron todos los caracteres a simple vista.
- **Grupo 3 ($R_a = 0.02\mu\text{m}$) 90 seg.** se observaron claramente todos los caracteres.

La rugosidad de la superficie de las probetas del grupo 1 permite la adherencia de la película fotosensitiva rápidamente, aún cuando no este suficientemente sensibilizada como para definirse los caracteres. Sin embargo la irregularidad de la superficie impide la presencia de una capa de espesor uniforme, haciendo que las partes delgadas de la película se sensibilicen más rápido que las gruesas, siendo estas últimas las que determinan el tiempo de exposición de toda la superficie.

El grupo 2 posee una rugosidad que facilita la formación de una película uniforme, facilitando entonces una sensibilización uniforme, requiriéndose así un tiempo menor para lograr la exposición óptima.

El tiempo de exposición necesario para alcanzar la adherencia de la película en el grupo 3 es mayor que el del grupo 2, ya que la superficie posee una menor rugosidad, lo que dificulta la sujeción de la capa, aún cuando esta es la más uniforme de los tres grupos, por esta razón el tiempo óptimo de exposición de este grupo es casi igual al del grupo 1.

La rugosidad influye en el tiempo de exposición de dos formas diferentes:

- El tiempo de exposición aumenta a medida que se incrementa la rugosidad de la superficie debido a que los picos y valles más altos y profundos de la superficie atrapan un espesor mayor de película fotosensible, requiriéndose por lo tanto mayores tiempos de revelado.
- El tiempo de exposición se incrementa con la disminución de la rugosidad por la dificultad en la **adherencia de la película** a la superficie.

En nuestro caso se observa que el efecto predominante en las rugosidades menores a $Ra = 0.05\mu m$ es el de la adherencia y que disminuciones pequeñas de rugosidad aumentan significativamente el tiempo de exposición.

5.2. TIEMPO ÓPTIMO DE GRABADO

5.2.1. Análisis cualitativo a simple vista.

Una vez realizadas las tres rondas de ataque para cada uno de los grupos, se seleccionaron las muestras más representativas de cada condición:

Tabla 5-5: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 1

Probetas del Grupo 1 $Ra = 1.64\mu m$	Observación
10min 	Se observan de manera difusa algunos caracteres. La alta rugosidad de la superficie impide que se pueda apreciar la penetración del ataque químico el cual al parecer es muy poco profundo. Por eso se distingue una superficie manchada en vez de grabada. Aún quedan restos de la película protectora en los valles de la superficie, por eso se ven sombras azules en algunos sectores.
15min 	Se observan de manera difusa todos los caracteres. No se aprecia la penetración del ataque químico en las zonas deseadas. Puede distinguirse ataque en zonas protegidas. Aún quedan restos de la película protectora en los valles de la superficie, por eso se ven sombras azules en algunos sectores.

20min 	No se observa nada, el ataque ha producido la remoción de toda la capa superficial de la probeta.
--	--

Tabla 5-6: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 2

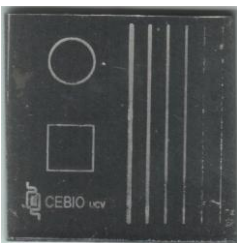
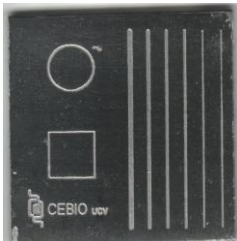
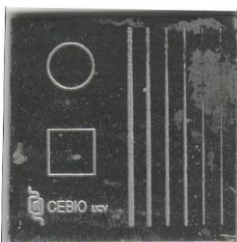
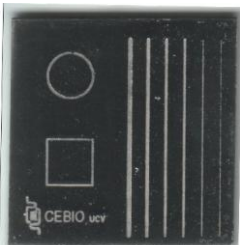
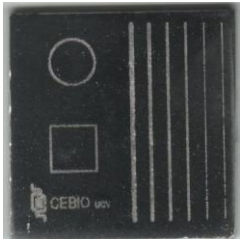
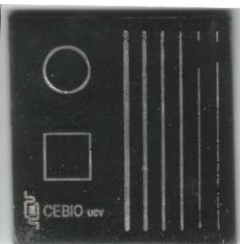
Probetas del Grupo 2 Ra = 0.05μm	Observación
10min 	Los caracteres se aprecian en su mayoría, con excepción de las líneas más delgadas, que se definen como secuencias de puntos alineados, por motivo de falta de ataque en estas zonas.
15min 	El grabado de los caracteres es completo y se observa una buena definición. Se consiguen algunos pequeños defectos aleatorios (puntos de ataque en zonas no deseadas), ocasionados por fallas de la adherencia de la protección debidas al efecto térmico del ataque.
20min 	Los caracteres se presentan totalmente y aparentan mayor espesor del deseado. Se observan deterioradas zonas antes protegidas. Existen mas defectos aleatorios y son de mayor tamaño. Esta condición se obtuvo por un tiempo excesivo de ataque.

Tabla 7: Resultados de las pruebas de ataque Grupo 3

Probetas del Grupo 3 Ra = 0.02 μ m	Observación
10min 	La definición de los caracteres es nítida, y se aprecian sin distorsión aparente. No se observan ataques aleatorios a simple vista, el grabado se efectuó satisfactoriamente.
15min 	Los caracteres se observan distorsionados, existen defectos aleatorios causados por un excesivo tiempo de ataque.
20min 	Se observan los caracteres con distorsión, apreciándose una condición similar a la prueba anterior, con mayor número de defectos aleatorios causados por un tiempo de ataque muy largo.

5.2.2. Análisis cualitativo al microscopio

Antes de hacer este análisis hay que destacar que al ver al microscopio las superficies atacadas del Grupo 1 no fue posible apreciar diferencias significativas entre las zonas que debían ser atacadas y el resto de la placa, evidentemente las superficies atacadas por Sand Blasting no son las adecuadas para el fotograbado.

En el [Apéndice 5](#) se muestran las fotografías tomadas al ver al microscopio (a 50X de aumento) los nueve caracteres básicos de las muestras grabadas y la fotoherramienta.

Los caracteres sobre la fotoherramienta son los primeros en ser estudiados ya que es necesario determinar si alguna irregularidad en la misma puede haber influido sobre los resultados del grabado sobre las placas. En efecto hubo una observación que influyó significativamente sobre los resultados. Cuando observamos las líneas 1 y 2, las que creíamos medían 0.1 y 0.2mm, notamos que ambas líneas eran exactamente iguales (Ver fotos en [Apéndice 5](#)). Al realizar las mediciones de ambas líneas a través del microscopio encontramos que ambas medían 0.25mm. Al realizar las medidas sobre las demás líneas entonces encontramos que la línea de 0,4mm mide 0.5mm, la línea de 0.8 mide 0.75, pero las líneas de 0.6mm y 1mm conservan su tamaño. Pensamos que el tamaño del pixel de impresión es de una centésima de pulgada (1/100"). Finalmente hacemos el siguiente cambio:

Tabla 5-8 : Símbolos de los caracteres de la probeta

☐	Cuadrado de 10mm de lado, 0.5mm de espesor	L3	Línea de 0.5mm de espesor
☐	Círculo de 10mm de diámetro, 0.5mm de espesor	L4	Línea de 0.6mm de espesor
L1	Línea de 0.25mm de espesor	L5	Línea de 0.75mm de espesor
L2	Línea de 0.25mm de espesor	L6	Línea de 1mm de espesor

Aclarado esto entonces definiremos como distorsión la diferencia porcentual entre la medida del grosor promedio de la línea grabada y la medida real de la línea en la fotoherramienta:

$$Distorsión = 100 \frac{\text{Medida obtenida} - \text{Medida fotoherramienta}}{\text{Medida fotoherramienta}}$$

Esta medida nos indicará cuál debería ser el tiempo de ataque óptimo.

La diferencia porcentual se define como variación del grosor promedio de la línea grabada entre dos tiempos consecutivos de ataque:

$$Diferencia = 100 \frac{\text{Medida } T_1 - \text{Medida } T_0}{\text{Medida } T_0}$$

Esta media nos describe cual es el comportamiento del ataque.

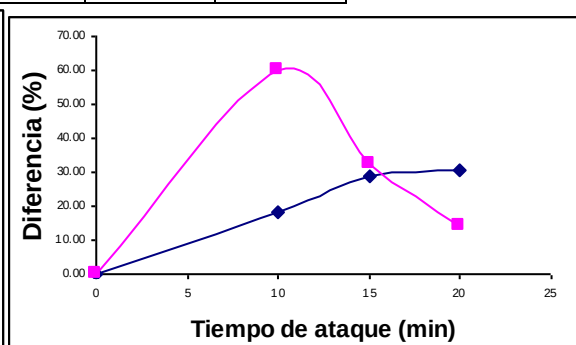
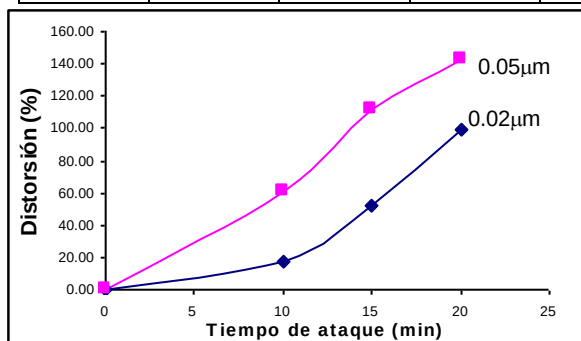
En las tablas siguientes observaremos las medidas del ancho, distorsión y la variación porcentual del ancho de las líneas en función del tiempo de exposición:

Tabla 5-9: Resultados de las medidas de las pruebas de exposición.

Línea 1

0.25 mm

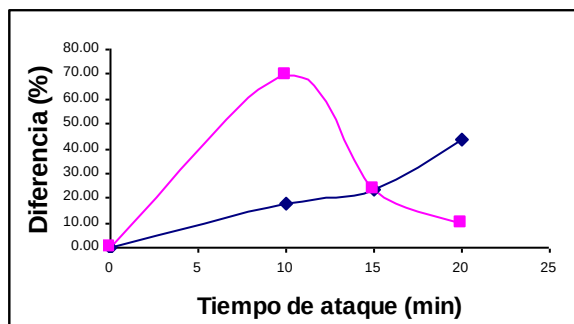
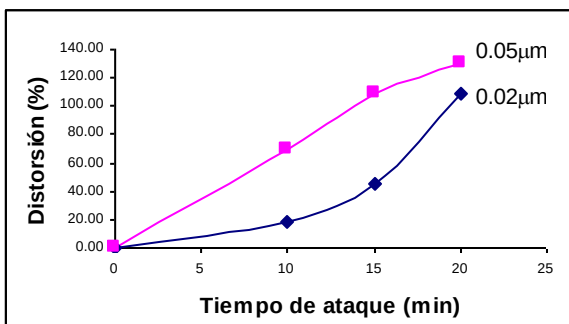
Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión ($\Delta\%$)	Diferencia ($\Delta\%$)	Ancho en mm	Distorsión ($\Delta\%$)	Diferencia ($\Delta\%$)
0	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
10	0.29	17.97	17.97	0.40	60.26	60.26
15	0.38	52.11	28.95	0.53	111.92	32.23
20	0.50	98.68	30.61	0.61	142.14	14.26



Línea 2

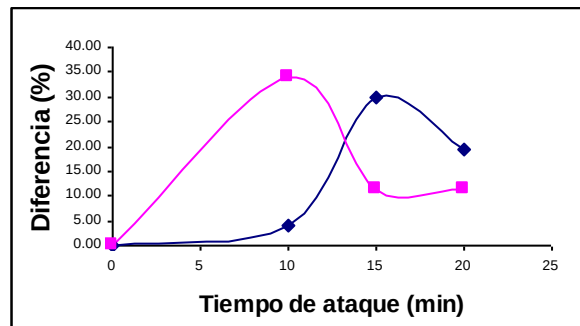
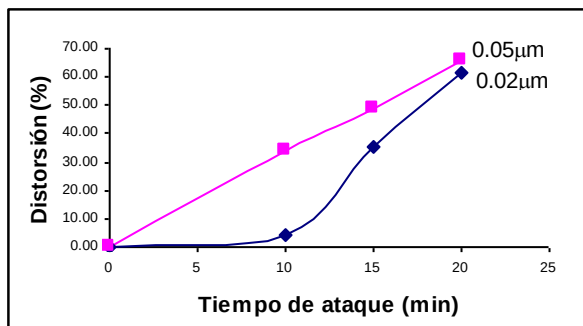
0.25 mm

Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión ($\Delta\%$)	Diferencia ($\Delta\%$)	Ancho en mm	Distorsión ($\Delta\%$)	Diferencia ($\Delta\%$)
0	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
10	0.29	17.97	17.97	0.42	69.54	69.54
15	0.36	45.91	23.68	0.52	109.27	23.44
20	0.52	109.55	43.62	0.57	129.72	9.77

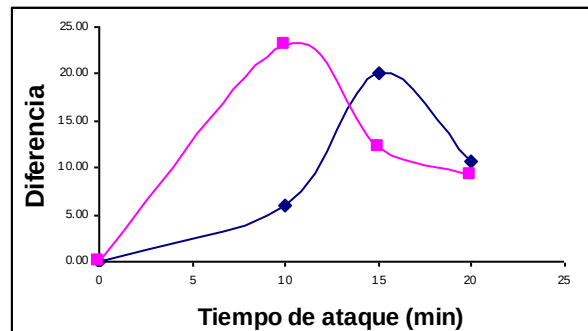
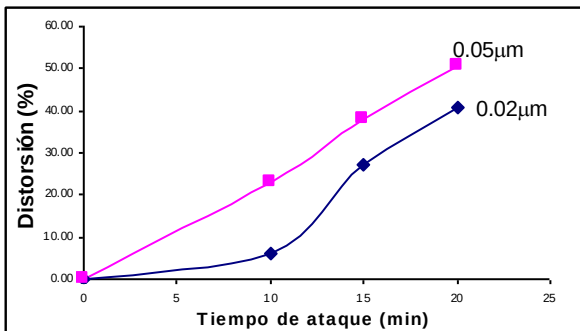


Línea 3 0.5 mm

Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)
0	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00
10	0.52	4.00	4.00	0.67	33.77	33.77
15	0.68	35.04	29.85	0.75	49.01	11.39
20	0.81	61.43	19.54	0.83	66.08	11.46

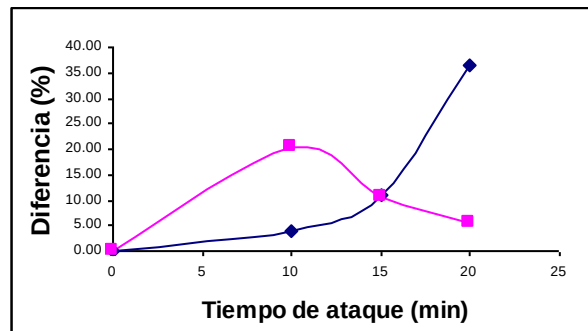
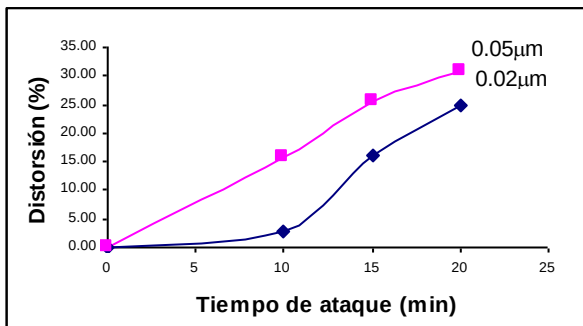
**Línea 4 0.6 mm**

Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)
0	0.60	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00
10	0.64	6.07	6.07	0.74	23.07	23.07
15	0.76	27.41	20.12	0.83	37.97	12.11
20	0.85	40.99	10.66	0.90	50.69	9.22

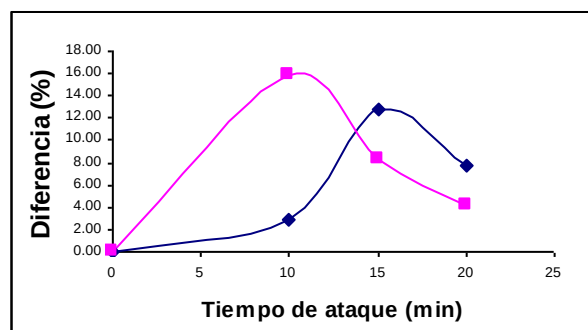
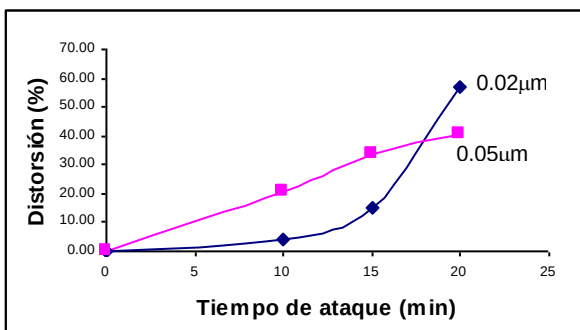


Línea 5 0.75 mm

Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)
0	0.75	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00
10	0.78	4.00	4.00	0.90	20.53	20.53
15	0.87	15.38	10.95	1.00	33.33	10.62
20	1.18	57.29	36.32	1.06	40.73	5.55

**Línea 6 1 mm**

Tiempo en min	Rugosidad 0.02			Rugosidad 0.05		
	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)	Ancho en mm	Distorsión (Δ%)	Diferencia (Δ%)
0	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
10	1.03	2.83	2.83	1.16	15.89	15.89
15	1.16	16.03	12.83	1.25	25.50	8.29
20	1.25	24.95	7.69	1.31	30.77	4.20



Para ver las fotos del carácter respectivo véase el **Anexo 5**.

En una visión general de las tablas de resultados es evidente que mientras mayor es el tiempo de ataque el espesor de los caracteres se alejará cada vez más de la medida real o la medida de la fotoherramienta. Al mirar con detenimiento las gráficas destacan las siguientes observaciones:

- Las probetas del Grupo 2 cuya rugosidad es mayor ($0.05\mu\text{m}$) presentan un ataque más agresivo que en las probetas del Grupo 3 de rugosidad menor ($0.02\mu\text{m}$).
- A medida que se incrementa el tiempo de ataque la anchura de los caracteres crece pero no a la misma velocidad, tal como lo comprueban las gráficas de diferencia.

Figura 5-1 : Proceso de grabado en superficie muy rugosa.

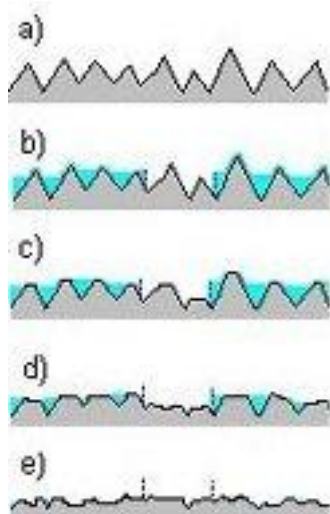
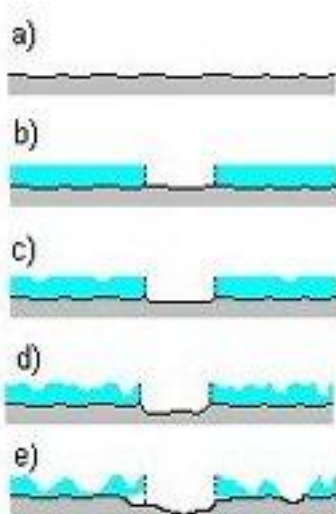


Figura 5-2: Proceso de grabado en una probeta más lisa



La explicación de este comportamiento puede obtenerse a partir de las siguientes consideraciones.

Mientras mayor es la rugosidad de la superficie, la cantidad y altura de los valles y los picos hace que la película protectora no sea uniforme y entonces el ataque comenzará de manera más rápida en unas zonas que en otras (**Figura 5-1, c**). A medida que el tiempo transcurre la solución de ataque tenderá a meterse por debajo de la película protectora incrementando de manera irregular el grosor de las líneas. En consecuencia el ataque será más violento mientras mayor es la rugosidad.

Por eso no es extraño que en las probetas del grupo 1 al cabo de diez minutos los caracteres no eran visibles y a los quince minutos la probeta estaba borrada.

En las probetas de los Grupos 2 y 3 se comprueba esta teoría ya que en las probetas más rugosas de éstas dos, el ataque fue mucho más violento. Si observamos con detenimiento las curvas de diferencia, existe un punto en el que el ataque decrece su intensidad. La explicación a este comportamiento podría explicarse porque la remoción de material no solo sucede hacia los lados, también sucede hacia abajo. Al haber mayor área expuesta es lógico que el ataque sea aparentemente más lento, pues sólo lo estamos viendo en el ancho de la hendidura y no en la profundidad.

Finalmente para rugosidades menores a $0.05\mu\text{m}$ el tiempo de ataque debería ser menor a 10 minutos ya que la distorsión de los caracteres es menor. No podemos establecer un tiempo exacto para estas rugosidades menores ya que no debemos olvidar que la visibilidad de los caracteres depende también de la forma y extensión de los mismos.

Las superficies mate o muy rugosas no son recomendables para este proceso, debiendo recurrirse a otros procedimientos mecánicos como troquelado o rayado cuando se requiera grabar este tipo de superficies.

CONCLUSIONES

Se diseñó un proceso para fabricar de manera reproducible y eficiente un clavo intramedular para fractura del peroné distal. Este es fácilmente realizable tanto en máquinas de herramientas convencionales como en máquinas automáticas asistidas por ordenadores de control numérico.

Se diseñaron y construyeron dispositivos (utillajes) que permiten realizar perforaciones diametrales sobre superficies cilíndricas de pequeño diámetro, manteniendo constante la posición relativa de la pieza respecto a la herramienta y guiando por medio de una bocina la broca en el proceso de taladrado.

Se diseñó y construyó un dispositivo de apoyo llamado contrapunto inverso, con la finalidad de reducir el tiempo de maquinado en el torno y aumentar la precisión en el cilindrado. De esta manera realizando primero el cono del clavo y luego el cilindrado se obtiene un proceso reproducible que favorece una fabricación en serie, a partir de una barra larga de material.

Para asegurar un doblado cuyo eje sea ortogonal al plano generado por el eje del clavo y los ejes de los agujeros se construyó una herramienta dobladora donde se tomaron en cuenta las características de diseño del clavo recto.

Se diseñó e instaló un sistema para realizar fotograbado en metal, con el objetivo de obtener los parámetros óptimos para grabar caracteres en acero inoxidable A316L.

El fotograbado es un proceso efectivo para marcar caracteres en la superficie de un metal, aprovechando la corrosión química, evitando la utilización de procedimientos mecánicos que produzcan deformación o alteración significativa en las propiedades del material. Este procedimiento es rápido y sencillo de aplicar una vez determinados los parámetros óptimos de exposición y ataque.

Para grabar piezas hechas con aleación de acero inoxidable A316L, las superficies deben tener una rugosidad promedio Ra menor a $0.05\mu\text{m}$, para esta rugosidad el tiempo de exposición es 30seg utilizando una intensidad luminosa promedio de 12000Lux. El tiempo de grabado o ataque para esta rugosidad es menor a 10 minutos, para minimizar los efectos de la distorsión. La concentración del líquido de ataque debe ser de 23°Bé de FeCl_3 , con adiciones de HNO_3 no mayores al 1% v/v y la temperatura de líquido debe ser 55°C con agitación por aire o mecánica

RECOMENDACIONES

1. La Escuela de Ingeniería Mecánica debería abrir una materia electiva que introduzca al estudiante en el manejo de las máquinas de herramientas controladas por ordenador (CNC).
2. Se deben diseñar procesos de fabricación que involucren todas las técnicas mecánicas existentes y al alcance de nuestra Escuela que permitan optimizar los requerimientos de construcción de los productos.
3. Debe continuarse la investigación acerca del grabado fotoquímico aplicado a otros metales o aleaciones tales como aluminio, cobre o bronce, con el objetivo de obtener los parámetros necesarios para elaborar caracteres. Al mismo tiempo puede orientarse el estudio de esta técnica hacia el maquinado fotoquímico, para obtener piezas de alta precisión.
4. Se recomienda realizar la fotoherramienta para el grabado mediante métodos fotográficos, pues la utilización de impresoras de inyección de tinta tiene la desventaja de solo poder realizar líneas o caracteres con secciones que sean múltiplos de una centésima de pulgada, si se desean líneas de menor espesor la mejor opción es un fotolito.
5. La cámara de exposición debe ser rediseñada de manera tal que la distribución de la intensidad luminosa sea uniforme en toda la superficie de exposición.

GLOSARIO

Acero rápido: Aleación de acero que posee la siguiente composición: 0.7-0.9% C, 13-19% W, 3.5-4.5% Cr y 0.8-3.2 V. Las herramientas construidas de este material permiten arrancar viruta a altas velocidades y hasta temperaturas de 600°C sin perder su dureza (62-64 RC).

Corrosión intergranular: Corrosión en los límites de grano producida por la segregación o la precipitación de éstos produce celdas galvánicas.

Corrosión Química: Remoción de átomos de un material por efecto de la solubilidad o reacción química entre el material y el líquido circundante.

Ductilidad: Capacidad de un material a ser deformado en forma permanente sin sufrir fractura cuando se le aplica la fuerza.

Emulsión fotosensitiva: Este es el nombre que recibe el KPR al aplicarlo sobre la superficie.

Escariado: Operación muy parecida al taladrado en la que es posible agrandar un agujero realizado previamente y con el objeto de obtener una medida de precisión en el diámetro. El movimiento principal lo asume la herramienta, mientras que el movimiento de avance lo tiene la pieza. El escariado tiene por objetivo alisar y calibrar el agujero.

Fresado: Consiste en arrancar la viruta mediante herramientas circulares de cortes múltiples denominadas fresas. El movimiento fundamental es asumido por la herramienta, que gira alrededor de su propio eje; el movimiento secundario de alimentación lo tiene la pieza, la cual, estando fija en la mesa de la máquina, pasa tangencialmente o frontalmente delante de la fresa que gira, la cual le arranca abundantemente el material de la superficie. Las máquinas que efectúan la operación de fresado reciben el nombre de fresadoras. Dichas máquinas pueden ser: horizontales, verticales y universales.

Grababilidad: Capacidad del material para obtener resultados tales como: uniformidad, resolución y limpieza, después del proceso de grabado.

Grano: Porción del material sólido dentro del cual la red es idéntica y orientada en una sola dirección, o sea, un cristal sólido. El tamaño de éstos, determina la resolución de los caracteres grabados en el metal.

Número de carreras o recorridos: Se representa como también como n pero en [recorridos/min]. Se emplea de esta manera cuando se habla de máquinas de movimiento alternativo.

Pasivación: Producción de una fuerte polarización anódica mediante la formación de un recubrimiento protector en la superficie del ánodo. El proceso también se define como

protección anódica. Este proceso se puede realizar exponiendo el metal a soluciones oxidantes altamente concentradas.

Película fotosensitiva: Este es el nombre que recibe el KPR luego de secarlo en el horno.

Película protectora: Este es el nombre que recibe el KPR luego de ser expuesto y revelado.

Rectificado: Tiene por objeto corregir definitivamente una superficie, sea ésta plana, cilíndrica, cónica exterior o interior, de forma exterior moldurada, acanalada o roscada. La herramienta empleada se llama muela y la máquina rectificadora. El movimiento principal es asumido por lo general por la muela que se desplaza gradualmente sobre la pieza, fija o en rotación, mientras ésta, junto con la mesa, es movida de modo que se puedan rectificar todas las superficies interesadas.

Rugosidad promedio R_a : Se define como el promedio aritmético de las medidas del perfil que describe la superficie real de un material.

Superficie real: Borde que separa a un objeto sólido de su contorno.

Taladrado o agujereado: Consiste en practicar un hueco cilíndrico en un cuerpo metálico; se emplean los taladros, que por medio de las brocas, efectúan la operación. El movimiento principal de rotación y el secundario de avance es asumido por la herramienta, que gira alrededor del propio eje y avanza, practicando el hueco en la pieza, que permanece fija.

Tiempo a prorratar: Tiempos que intervienen de forma irregular e involuntaria, por ejemplo el empleado en engrasar la máquina, el afilado no previsto de la herramienta, tiempo perdido por perturbaciones del accionamiento.

Tiempo accesorio: Tiempo que entra en juego regularmente pero que no participa directamente en el adelanto del trabajo a realizar, por ejemplo, el tiempo empleado en sujetar y soltar, en aplicar el filo, en medir y en afilar el útil.

Tiempo de preparación: Es el tiempo invertido en preparar el utillaje y los medios auxiliares así como en volverlo a su primitivo lugar, por ejemplo, la lectura del plano, preparar la máquina, traer y volver a llevar las herramientas.

Tiempo principal o total: Tiempo durante el cual se imprime un avance encaminado a terminar el trabajo encargado, por ejemplo, tiempo empleado en mecanizar la pieza, tiempo de funcionamiento de la máquina, tiempo de corte.

Torneado: Consiste en perfilar, alrededor de un eje, un sólido de revolución; se emplean los tornos, que por medio de herramientas monocortantes, efectúan la operación. El movimiento principal lo tiene la pieza en rotación; el movimiento de alimentación o avance, la herramienta.

El torneado comprende también operaciones complementarias tales como el roscado o fileteado interior o exterior.

Utilaje: Herramienta auxiliar que se utiliza para facilitar una operación de maquinado.

Velocidad de avance: En las fórmulas se indica como a [mm/min]. Es la velocidad según la cual la herramienta y la pieza se desplazan una respecto a la otra, de modo que se arranque una nueva porción de metal con la herramienta; el avance a se computa como [mm/vuelta] pieza o por carrera activa. Frecuentemente y de modo particular, en las fresadoras el avance se computa en [mm/min].

Velocidad de corte: En las fórmulas se indica como v [m/min]. Representa la velocidad según la cual es cortado un metal.

Widia: *Wie Diamant* en alemán o químicamente conocido como Carburo de Wolframio (WC), es un compuesto metálico inventado en 1926 por Acerías Krupp. Éste posee la propiedad de tener una dureza similar a la del diamante. Éste también es mezclado con Carburo de Titanio (TiC) y cobalto (Co).

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFRED, Bauer. Circuitos Impresos, Diseño y Realización, CEAC, Barcelona (España), 1982, 85págs.
2. AMERICAN SOCIETY OF METALS. ASM Handbook. New York (Estados Unidos), 1995, Vol 16, 944págs.
3. AMERICAN SOCIETY OF METALS. Steel properties. Cleveland (Estados Unidos), 1985, 527págs.
4. AMEZQUITA, Uxmal / VILLEGAS, Enrique. Diseño de una Cámara de Sandblásting con sus sistemas auxiliares. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 1993, 229págs.
5. ASKELAND, Donald, La ciencia e ingeniería de los materiales, Grupo editorial iberoamericana, México DF(México), 1985, 556 págs.
6. BACHMANN A. / FORBERG R., Dibujo técnico. 2ª Edición, Editorial Labor, España, 1982. 331págs.
7. CASILLAS, A. L., Máquinas, Cálculos de taller. 32va Edición, Editorial Máquinas, Madrid (España), 1982, 600págs.
8. CURIEL N. Daniela / REYES Marialejandra, Diseño del proceso de fabricación y rediseño del extremo cortante de los clavos de Schanz, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 1999, 67págs.
9. GERLING, Heinrich, Alrededor de las máquinas de herramientas, Editorial Reverté Barcelona (España), 1975, 269 págs.
10. GOUVEIA, Ricardo/ RAMÍREZ, José., Determinación de los parámetros de los procesos de electropulido y pulido abrasivo en piezas de acero A316L para uso traumatológico, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 1999, 118págs.
11. HANS, Sutaner, Electrónica práctica, Editorial Marcombo, Barcelona (España), 1980, 60págs.
12. INCHAURZA, Adrián, Acero inoxidable y aceros resistentes al calor. Madrid (España). Editorial Limusa. 1981. 410págs.

13. OYON, Elio / VERGARA, Eleazar. Determinación de los parámetros operativos del anodizado duro en piezas de aluminio y construcción de una planta piloto, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 1999, 91págs.
14. ROJAS T., Juan C., Diseño y construcción de un dispositivo para la fabricación de roscas internas empleando un taladro, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, 1999, 77 págs.
15. ROSSI, Mario, Máquinas-Herramientas Modernas, Editorial Hoepli, Barcelona (España). 1971. 934 págs.
16. SANDVIC. Herramientas rotativas, Catálogo, SANDVIC. Sandviken (Suecia). 1998. 400págs.
17. WIDIA CO. GMBH. Tools and indexable inserts for turning, Catálogo, WIDIA, Berlin (Alemania). 1999, 60 págs.