

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería de la Energía

Procedimiento para el Cálculo del Coste del Fresado Químico en la Fabricación de Piezas de Aleaciones de Aluminio para la Industria Aeronáutica

Autor: Jorge Castaño Luis

Tutor: José Morillo Aguado

**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Procedimiento para el Cálculo del Coste del Fresado Químico en la Fabricación de Piezas de Aleaciones de Aluminio para la Industria Aeronáutica

Autor:

Jorge Castaño Luis

Tutor:

José Morillo Aguado

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Procedimiento para el Cálculo del Coste del Fresado Químico en la Fabricación de Piezas de Aleaciones de Aluminio para la Industria Aeronáutica

Autor: Jorge Castaño Luis

Tutor: José Morillo Aguado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

“A mi familia por haberme apoyado siempre y estar a mi lado

A mis tutores, José Morillo y Jose Manuel Carmona por haberme guiarme cada vez que lo necesité y las horas dedicadas

A mis compañeros por los momentos vividos durante estos años de carrera y apoyo mútuo”

Jorge Castaño Luis

Sevilla, 2018

Resumen

En este trabajo de fin de grado se aplican los conocimientos adquiridos durante las prácticas externas de empresa sobre el tratamiento de fresado químico de piezas de aleaciones de aluminio en la industria aeronáutica.

Se basa en el desarrollo de un procedimiento técnico para calcular el coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica, teniendo en cuenta cada uno de los procesos que deberán ser aplicados a la pieza según las normas de los principales fabricantes del sector.

Se empleará, además, el procedimiento desarrollado sobre piezas reales.

Abstract

In this end-of-degree project, the knowledge acquired during the company's external practices on the treatment of chemical milling of aluminum alloy parts in the aeronautical industry is applied.

It is based on the development of a technical procedure to calculate the cost associated with the chemical milling of an aeronautical part, taking into account each of the processes that is applied to the piece according to the standards of the main manufacturers of the sector.

The procedure developed on real parts will also be used.

Índice

Agradecimientos.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract.....	xiii
Índice.....	1
Índice de Tablas.....	3
Índice de Figuras.....	5
1 Introducción y Objetivos.....	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Objeto.....	8
1.3 Contenido del proyecto.....	9
2 Industria Aeronáutica.....	15
2.1 Historia de la Industria Aeronáutica.....	15
2.1.1 Hitos en España.....	18
2.2 La importancia del peso en el sector aeronáutico.....	19
2.3 Aleaciones ligeras.....	21
2.3.1 Aleaciones de magnesio.....	21
2.3.2 Aleaciones de titanio.....	21
2.3.3 Aleaciones de aluminio.....	22
2.4 El aluminio en el sector aeronáutico.....	24
2.5 Mercado Aeronáutico.....	25
3 Tratamientos Químicos en la Industria Aeronáutica.....	27
4 Fresado químico.....	36
4.1 Introducción.....	36
4.2 Descripción del proceso.....	36
4.3 Control y especificaciones.....	49
4.3.1 Definición de las especificaciones del fresado químico.....	50
4.3.2 Tolerancias y profundidad de fresado.....	51
4.3.3 Defectos del proceso.....	52
4.3.4 Acabado de la superficie.....	53
4.3.5 Ataque intergranular y selectivo.....	54
4.4 Propiedades mecánicas de piezas fresadas químicamente.....	55
4.4.1 Absorción de hidrógeno.....	55
4.5 Aplicaciones.....	56
4.6 Ventajas e inconvenientes del proceso.....	56
5 Variables a Tener en Cuenta en el Cálculo del Coste.....	58
6 Desarrollo del Método de Cálculo del Coste del Tratamiento de Piezas Aluminio Fresadas Químicamente.....	62

6.1	<i>Desglose de los costes asociados al fresado químico.....</i>	<i>62</i>
6.2	<i>Costes asociados a la limpieza previa.....</i>	<i>63</i>
6.3	<i>Costes asociado al enmascaramiento de la pieza.....</i>	<i>69</i>
6.4	<i>Coste asociado al trazado de la máscara.....</i>	<i>74</i>
6.5	<i>Coste asociado al pelado de la máscara.....</i>	<i>76</i>
6.6	<i>Coste asociado al repaso de la máscara.....</i>	<i>78</i>
6.7	<i>Coste asociado al fresado químico.....</i>	<i>81</i>
6.8	<i>Costes asociados al desoxidado posterior.....</i>	<i>86</i>
6.9	<i>Coste asociado al pelado completo de la pieza.....</i>	<i>88</i>
6.10	<i>Coste asociado a los ensayos.....</i>	<i>88</i>
6.11	<i>Coste asociado a la documentación a formalizar en el proceso.....</i>	<i>89</i>
6.12	<i>Coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica de aluminio.....</i>	<i>90</i>
7	Aplicación del Método.....	91
7.1	<i>Revestimiento de refuerzo de fuselaje central.....</i>	<i>95</i>
7.2	<i>Revestimiento puerta fuselaje posterior.....</i>	<i>98</i>
7.3	<i>Borde de ataque.....</i>	<i>100</i>
7.4	<i>Visera puerta A400M.....</i>	<i>103</i>
7.5	<i>Resumen de resultados.....</i>	<i>106</i>
8	Conclusiones.....	107
	Bibliografía.....	109
	Glosario.....	111
	ANEXO.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Designación de aleaciones y principales aleantes de cada aleación de aluminio.....	22
Tabla 2. Disolución de ataque para el fresado químico Tipo I.....	45
Tabla 3. Disolución de ataque para fresado químico Tipo II.....	46
Tabla 4. Baños de desoxidado.....	46
Tabla 5. Desoxidado con fresado químico Tipo II.....	47
Tabla 6. Etapas que componen la limpieza previa de una pieza.....	63
Tabla 7. Productos empleados para la limpieza previa de la pieza y costes de formación y recarga de los baños.....	67
Tabla 8. Reparto de la carga de los baños de limpieza.....	67
Tabla 9. Datos obtenidos durante el enmascaramiento de las piezas con 4 bidones distintos.....	70
Tabla 10. Tiempos de trazado y perímetros totales trazados.....	74
Tabla 11. Tiempos de pelado y perímetros totales de superficies a pelar.....	77
Tabla 12. Tiempos de repaso y áreas de revisión de la pieza para analizar si es necesario o no repasar.....	79
Tabla 13. Precio unitario de los productos del baño de fresado.....	82
Tabla 14. Cantidades de los productos que componen el baño de fresado y coste de los productos..	83
Tabla 15. Coste del gasoil, la retirada de los productos del baño antiguo y la depuradora.....	83
Tabla 16. Producto empleado en el desoxidado posterior y costes de formación y recargas del baño.....	86
Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos tras la aplicación del método en las distintas piezas.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Douglas DC-3.....	16
Figura 2. DC-8 (izquierda) y Boeing 707 (derecha).....	17
Figura 3. Hitos de la industria aeronáutica.....	18
Figura 4. Influencia del peso del avión en el ángulo de ataque.....	20
Figura 5. Esquema de procesos químicos en la industria aeronáutica.....	27
Figura 6. Cadena de baños de proceso químico.....	28
Figura 7. Resultado final tras el proceso de anodizado.....	31
Figura 8. Diagrama del proceso de anodizado tartárico-sulfúrico.....	33
Figura 9. Diagrama de los procesos de anodizado crómico y anodizado sulfúrico.....	34
Figura 10. Diagrama del proceso de fresado químico.....	37
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de limpieza previa de una pieza de aluminio.....	38
Figura 12. Pistola erográfica de la empresa colaboradora empleada para la imprimación del enmascarante.....	39
Figura 13. Piezas enmascaradas.....	40
Figura 14. Útil de trazado de la empresa colaboradora.....	41
Figura 15. Plantillas empleadas para el trazado de las áreas a fresar.....	42
Figura 16. Piezas tras trazado, pelado y repaso de las mismas.....	43
Figura 17. Pasos en escalones de un fresado químico.....	44
Figura 18. Resultado final de dos piezas tras un tratamiento de fresado químico.....	49
Figura 19. Pieza con dos escalones de fresado químico.....	50
Figura 20. Características del proceso de fresado químico.....	51
Figura 21. Condición para aceptar una pieza con defectos.....	52
Figura 22. Posibles defectos superficiales tras el fresado químico.....	53
Figura 23. Efecto microscópico de la acción del fresado químico sobre la superficie de la pieza.....	54
Figura 24. Desglose de los costes asociados al tratamiento de fresado químico.....	62
Figura 25 . Bastidor de carga de la empresa colaboradora.....	64
Figura 26. Área útil total del bastidor de carga.....	65
Figura 27. Área ocupada por la pieza en el bastidor de carga.....	65
Figura 28. Bidón de producto enmascarante Masking D.....	69

Figura 29. Piezas colgadas por el operario para la imprimación del enmascarante.....	73
Figura 30. Velocidad de trazado de las piezas.....	75
Figura 31. Velocidad de pelado de las piezas.....	77
Figura 32. Velocidad de repaso de las piezas.....	80
Figura 33. Concentración máxima de aluminio que pueden aportar las piezas al baño de fresado químico.....	81
Figura 34. Regla de tres empleada para calcular el coste de la aportación de aluminio de la pieza estudiada al baño.....	81
Figura 35. Interfaz del programa creado en excel para el cálculo del coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica.....	93
Figura 36. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre refuerzo de fuselaje central.....	97
Figura 37. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre revestimiento puerta fuselaje posterior.....	99
Figura 38. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre borde de ataque.....	102
Figura 39. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre visera puerta A400M.....	105

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

El fresado químico es un proceso de mecanizado que existe desde la antigüedad. Su utilización histórica va desde el grabado de metales y piedras, el decapado y el desbarbado, hasta la producción de tarjetas electrónicas, circuitos impresos y chips de microprocesadores o mecanizado de grandes piezas de la industria aeroespacial para aligerar su peso.

El fresado químico puede considerarse uno de los métodos de grabado no convencional más antiguos de la historia, puesto que los egipcios, en el año 2300 a.C. ya lo empleaban para conformar cobre mediante el uso de ácido cítrico. Desde entonces, es un proceso que ha evolucionado constantemente, llegando hasta el siglo XIX para su uso en grabados decorativos. Posteriormente, una de las mayores aportaciones constructivas del proceso se produjo gracias a la fotografía, disciplina en la que se empezaron a utilizar materiales fotosensibles para grabar sobre aleaciones de estaño-plomo.

Sin embargo, el mayor desarrollo de esta tecnología a nivel industrial se consiguió a partir de la Segunda Guerra Mundial, siendo empleada para la grabación de inscripciones en el armamento y para aligerar piezas de las aeronaves de guerra. Hasta 1953 no se utilizó el proceso de “grabado” en algunos componentes de aluminio de cohetes, propiedad de la North American Aviation Inc., California, compañía que le otorgó al proceso el nombre de fresado químico (chemical milling) y lo patentó en 1956.

En la actualidad es un proceso ampliamente utilizado en el sector aeronáutico. Se emplea tanto para el fuselaje de aviones militares como comerciales, para turbinas y motores de cohetes, helicópteros y misiles.

Otro sector en el que tiene una gran aplicación es en la industria electrónica y microelectromecánica.

1.2 Objeto

El presente proyecto tiene como objeto el desarrollo de un método para calcular el coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica. Este surge de la necesidad real de la empresa donde se llevaron a cabo las Prácticas Externas de Empresa, la cual precisaba de un método para la cotización de las piezas a las cuales les realiza un tratamiento de fresado químico.

Para la elaboración del método se hará uso de las especificaciones y las descripciones de las distintas operaciones a realizar que aparecen en las normas proporcionadas por la empresa colaboradora, las cuales pertenecen a uno de los principales fabricantes del sector aeronáutico.

Por último, para facilitar el empleo del método elaborado por parte de la empresa colaboradora este fue implementado en Excel.

1.3 Contenido del proyecto

El proyecto se compone de 7 capítulos, los cuales se presentarán a continuación.

El presente capítulo es un capítulo introductorio compuesto por tres apartados en los cuales se habla de los antecedentes históricos del fresado químico, el objetivo del proyecto y su contenido.

El segundo capítulo versa sobre la industria aeronáutica. Este se compone de cinco apartados, en los cuales se recogerán los principales hitos de la industria aeronáutica, el problema que supone el peso en el sector aeronáutico, así como una de sus posibles soluciones, las aleaciones ligeras y el uso de esas aleaciones en los aviones.

El tercer capítulo recoge los principales tratamientos químicos que se llevan a cabo en la industria aeronáutica, tanto sobre piezas de aleaciones de aluminio como sobre otros tipos de metales.

El cuarto capítulo está dedicado al proceso en el cual se basa el método a desarrollar en el presente proyecto, el tratamiento de fresado químico. En el se explicará en qué consiste dicho tratamiento, así como las diferentes operaciones que deben llevarse a cabo en el y sus especificaciones, basándose en la norma de uno de los principales fabricantes del sector. Por último se darán a conocer las principales aplicaciones del tratamiento de fresado químico y sus ventajas y desventajas.

En el quinto capítulo se enumerarán as distintas variables que se han tenido en cuenta para el desarrollo del método y se explicará como influyen dichas variables en el cálculo del coste de la pieza de estudio. También se explica la estructura de costes asociados al tratamiento de fresado químico.

El sexto capítulo está reservado para el análisis de los costes anteriormente mencionados y el desarrollo del método para calcular el coste asociado al fresado químico de una pieza de aluminio. En el se llevará a cabo un desglose de los costes asociados a cada etapa del proceso y se analizará cada uno por separado, llegando a una expresión a partir de la cual, en función de las características de la pieza y los requisitos del cliente, es posible calcular el coste de dicha pieza.

En el séptimo capítulo se recoge la expresión final obtenida en el capítulo anterior, la cual agrupa todos los costes del tratamiento de fresado químico, y se implementará en un programa Excel. Se explicará como funciona el programa obtenido y se aplicará sobre cuatro piezas distintas.

2 INDUSTRIA AERONÁUTICA

2.1. Historia de la Industria Aeronáutica

Sus inicios se remontan a la Grecia Antigua. Se tienen noticias de que alrededor del año 400 a. C., Arquitas de Tarento construyó un artefacto de madera que bautizó con el nombre de "Paloma", que tenía forma de ave y era capaz de volar. Al parecer utilizaba un chorro de aire para alzar el vuelo, pero no se tiene constancia de qué era lo que producía ese chorro. El objeto volador se amarraba mediante unas cuerdas que permitían realizar un vuelo controlado hasta que el chorro de aire terminaba. Este artefacto de madera probablemente fue la primera máquina voladora capaz de moverse por medios propios.

Sobre el año 300 a. C. los chinos inventaron la cometa y desarrollaron técnicas para hacerla volar ágilmente. Siglos después, en el año 559 hay documentados vuelos de seres humanos usando cometas. Al parecer el emperador Gao Yang experimentó con prisioneros. Yang ordenó a varios prisioneros lanzarse desde lo alto de una torre, logrando algunos planear hasta sobrepasar las murallas de la ciudad.

En el año 852, el andalusí Abbás Ibn Firnás, se lanzó desde el minarete de la Mezquita de Córdoba con una enorme lona para amortizar la caída, sufriendo heridas leves, pero pasando a la historia como el precursor de los modernos paracaídas. En el 875, ya con 65 años de edad, Ibn Firnás confeccionó unas alas de madera recubiertas de tela de seda que adornó con plumas de rapaces. Con ellas se lanzó desde lo alto de una colina logrando permanecer en el aire durante un breve periodo de tiempo.

Leonardo da Vinci (1452-1519), pintor, escultor, arquitecto, ingeniero e inventor italiano, se dedicó seriamente a proyectar una máquina capaz de volar. Da Vinci diseñó planeadores y ornitópteros, que usaban mecanismos parecidos a los usados por los pájaros para volar, a través de un movimiento constante de las alas para arriba y para abajo. Sin embargo, nunca llegó a construir tales máquinas, pero sus diseños se han conservado hasta nuestros días.

Durante el siglo XVIII se sabe de variados intentos de volar, culminando en 1783 con el vuelo en globo aerostático de los Hermanos Montgolfier, aunque su defecto es el no poder ser totalmente controlados.

El problema del control se resolvió en el siglo siguiente, cuando Henry Giffat inventa el dirigible en 1852, una máquina capaz de mantenerse en vuelo controlado durante algún tiempo. También se comienzan a construir los primeros aeroplanos equipados con motor, pero que, incluso impulsados por ayudas externas, apenas lograban despegar y recorrer unos metros.

Sin embargo, el 17 de diciembre de 1903, en Kitty Hawk los hermanos Orville y Wilbur Wright logran, mediante una máquina controlable, volar. La Era de la Aviación había comenzado. Desde ese momento, la Aeronáutica se convierte en uno de los avances de la civilización más importantes de la Era Moderna, con un rapidísimo desarrollo, solo igualado ya en la segunda mitad del siglo XX por la Electrónica.

Esta nueva disciplina técnica no sólo avanza con rapidez, sino que se convierte en vanguardia tecnológica, y sus desarrollos sirven de motor y aplicación en muchas otras industrias y aspectos cotidianos. Casi desde el comienzo, el aeroplano y su industria aparecen como un revolucionario método de salvar grandes distancias, complicadas geografías y mares, todo ello a unas velocidades hasta la fecha impensable: desde el principio se intuye el concepto de transporte aéreo. Y también los gobiernos son rápidamente conscientes del potencial bélico de la nueva máquina, apareciendo la industria aeronáutica militar.

Desde comienzos del siglo XX hasta la Primera Guerra Mundial, el aeroplano es una máquina experimental que necesita ser perfeccionada para tener éxito comercial, aunque en 1910 aparecen los primeros usos del avión para el transporte de mercancías. En 1914 se establece en Florida (Estados Unidos) una línea regular para trasladar personas.

Con el comienzo de la Primera Guerra Mundial empieza el desarrollo técnico y productivo del avión. En estos momentos, Alemania y el Reino Unido tienen del orden de 250 aeroplanos militares. La importancia del avión como arma y su rápido desarrollo se comprueba si se observa que al terminar esta contienda, en 1918, Alemania y el Reino Unido tienen operativos unos 16.000 y 22.000 aviones respectivamente.

En los años 20 el desarrollo militar se recicla en civil, apareciendo las primeras compañías aéreas.

En 1919, Junkers desarrolla en Alemania el avión metálico, con estructura de barras y chapa ondulada. La fiabilidad de los aviones comienza a tomar cuerpo.

En 1927, el americano Lindbergh cruza el Atlántico en un avión llamado “Spirit of St. Louis”.

En los años 30 se desarrollan los hidroaviones que utilizan muchas líneas aéreas. En 1930, Whittle desarrolla en Inglaterra los principios del reactor. También ese año Boeing idea el concepto de ala baja. En 1935, con ese concepto, nace el versátil Douglas DC-3. En 1938, Boeing crea el B307, con cabina presurizada. Y en 1939, la Segunda Guerra Mundial vuelve a revolucionar la Aeronáutica, aumentando espectacularmente los índices de producción, fiabilidad y desarrollo tecnológico, velocidades, pesos al despegue, alcances y altitudes.



Figura 1. Douglas DC-3

En 1941 se establecen los conceptos básicos de la radionavegación y la electrónica de abordaje o Aviónica. En 1943, en plena Guerra Mundial, Messerschmitt fabrica el caza Me-262, el primer avión a reacción del mundo. A finales de la guerra aparecen las grandes fortalezas volantes como el Boeing B-29. Terminada la lucha, estos diseños dan pie al concepto de avión de aerolínea moderno. Aparecen el Douglas DC-4 y el Lockheed

Constellation.

El 14 de octubre de 1947, el avión experimental Bell X-1 atraviesa la “Barrera del Sonido”.

En 1949, De Havilland vuela el Comet, el primer avión de pasajeros con motor a reacción. También este avión descubre el efecto de la “fatiga de los materiales”, sufriendo diferentes accidentes.

En 1950, durante la Guerra de Corea, Sirkosky elabora el concepto del helicóptero moderno, con su modelo VS-300 y lo desarrollará en esta década. En 1954, Boeing pone en servicio el B-52, superfortaleza militar de ocho reactores. Bell crea y prueba el concepto de ala de geometría variable con el X-5. Douglas comienza a utilizar experimentalmente el titanio en las estructuras de aviones. En 1956 el Dassault Mirage III es el primer caza supersónico de la historia.

A finales de los 50, el Boeing 707 y el Douglas DC-8 sientan las bases del avión comercial transoceánico a reacción moderno. El francés Caravelle hace lo propio para vuelos continentales.

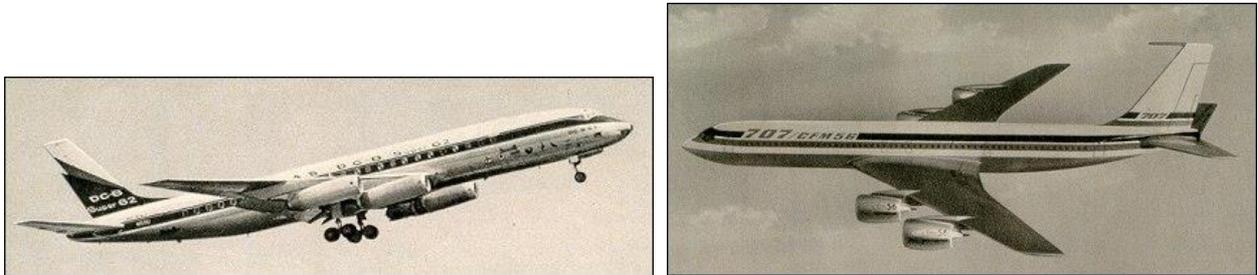


Figura 2. DC-8 (izquierda) y Boeing 707 (derecha)

Durante los 60, el Boeing 727 y 737 y el Douglas DC-9 popularizan los vuelos en avión, y comienza el desarrollo de la Aviación General. En 1961, la cosmonave Vostok pone en órbita a un ser humano, Yuri Gagarin. A finales de esta década, el Concorde introduce el vuelo supersónico en la aviación civil y Boeing el de avión gigante de fuselaje ancho, el B-747. Inglaterra sienta las bases del despegue vertical con el Hawker.

En el último tercio del siglo XX, la concentración empresarial es el hito sobresaliente. En los 70, y con el hombre en la Luna gracias al programa Apollo, maduran las tecnologías, así como los sistemas de navegación y mandos de vuelo y de producción. También se comienza a experimentar con los materiales compuestos. En los 80, las cabinas eliminan al mecánico de vuelo, aparece el helicóptero de combate y se construye la lanzadera espacial Columbia. En 1987, el Airbús A320 sienta las bases del diseño asistido por ordenador, y elimina el poste de los pilotos.

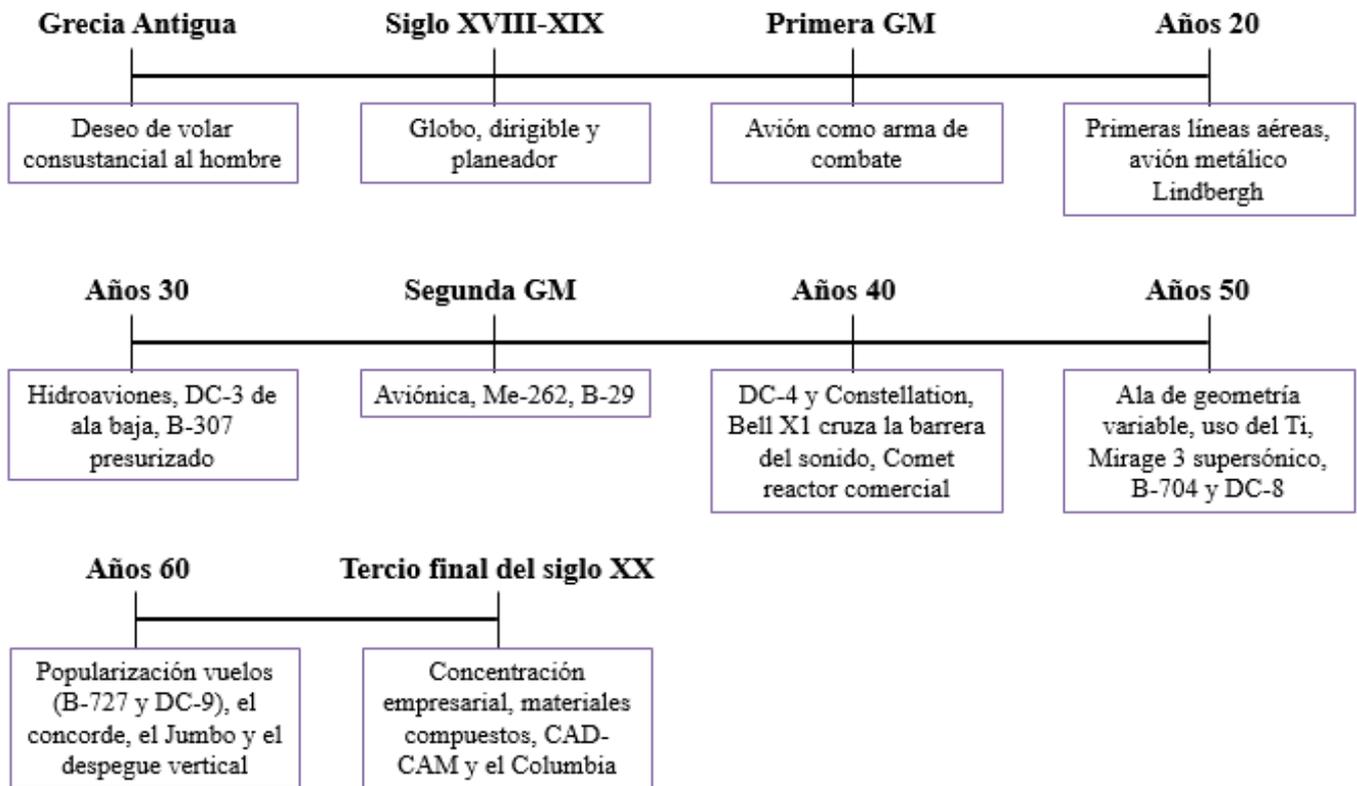


Figura 3. Hitos de la industria aeronáutica

2.1.1 Hitos en España

España jugó un papel importante en el desarrollo de la Aeronáutica. Ya en 1913 se organiza la Aeronáutica Militar Española, que en los años siguientes en las guerras del Norte de África adquiere un protagonismo militar que las demás potencias no tendrían hasta la Primera Guerra Mundial.

En 1923, el ingeniero Juan de la Cierva inventa el Autogiro, aeronave que utilizar un rotor asistido por alas. Los años 20 es la época de los grandes raids, donde Sevilla es frecuentemente protagonista. Ya en 1921 se inaugura el servicio postal aéreo entre Sevilla y Larache (Marruecos) por la CETA.

En los años 30 se desarrollan las primeras líneas aéreas de pasajeros: LAPE. En 1936, la Guerra Civil convierte a España en campo de pruebas para los aviones que más tarde se utilizarían en la Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, los restos de dicha contienda modernizan nuestra industria en los años 40.

Durante los años 50 y 60, la empresa estatal CASA desarrolla los aviones C-201, C-202 y C-207, de los que volaron pocos ejemplares. Mientras, La Hispano Aviación S.A. hace lo propio con aviones militares tácticos,

los HA-100 y HA-200.

En los 70 aparece el transporte militar CASA C-212, y el entrenador CASA C-101. La Hispano Aviación vende a Marruecos el diseño de un reactor táctico militar el HA-300, rebautizado Haluan, del que se construyeron varios aviones prototipos. En 1972 Construcciones Aeronáuticas absorbe a la Hispano Aviación, y poco después a la empresa estatal ENMASA dedicada a los motores de aviación.

En los años 80 se consolida la tradición del transporte militar en CASA con el diseño del CN-235 en colaboración con la empresa indonesia Nurtanio, para posteriormente desarrollar, en solitario el avión C-295. Estos aviones continúan hoy día en producción.

2.2 La importancia del peso en el sector aeronáutico

En la actualidad, el concepto clave en diseño y fabricación de aviones es la reducción de peso.

El peso es uno de los factores más importantes, por detrás de la aerodinámica y el rendimiento del motor, que afectan a la eficiencia del avión. Un menor peso de la aeronave supondrá un menor consumo de combustible y por lo tanto una menor cantidad de emisiones de CO₂ y un ahorro en el coste operativo para las aerolíneas. Se trata, por tanto, de un factor tanto económico como medio ambiental.

“Quitar 454 kg de peso a un motor equivale a un 1% de combustible. Supone un importante ahorro económico, pero también es bueno para el clima. Todo lo que se pueda hacer para reducir peso es bueno.” Ric Parker, ex director de investigación y tecnología de Roll-Royce y presidente en la actualidad de la iniciativa Clean Sky de la UE.

Sin embargo, el peso de una aeronave no se ve influenciado sólo por el propio peso de esta, sino que, obviamente, cualquier objeto o persona que esté a bordo del avión tendrá efectos negativos sobre las posibilidades de vuelo de la aeronave. A estos objetos y personas son llamados “carga de pago”, y no pueden ser eliminados, ya que el vuelo comercial dejaría de ser rentable. El combustible es también el ejemplo de algo pesado pero imprescindible para la realización del vuelo, ya que si se rebaja el peso reduciendo la cantidad de combustible el alcance se ve gravemente penalizado.

El excesivo peso de la aeronave reduce su capacidad para volar en, prácticamente, todos sus aspectos. La penalización de sus performances¹ son las siguientes:

- Mayores velocidades de despegue, aterrizaje y pérdida
- Distancias de aterrizaje y despegue mayores
- Mayores ángulos y regímenes de ascensos
- Menores velocidades de crucero y techo de operación reducidos

¹ Conjunto de parámetros que definen la forma en la que hay que volar un avión. Son útiles para preveer el rendimiento de la aeronave al ver aumentado su peso.

- Menor alcance y autonomía de vuelo

En la *Figura 4* puede observarse como el aumento del peso del avión supone un aumento del ángulo de ataque, suponiendo el resto de condiciones constantes, resultando en una mayor resistencia de avance y por consiguiente un mayor consumo de combustible, que radica en una menor autonomía de vuelo.

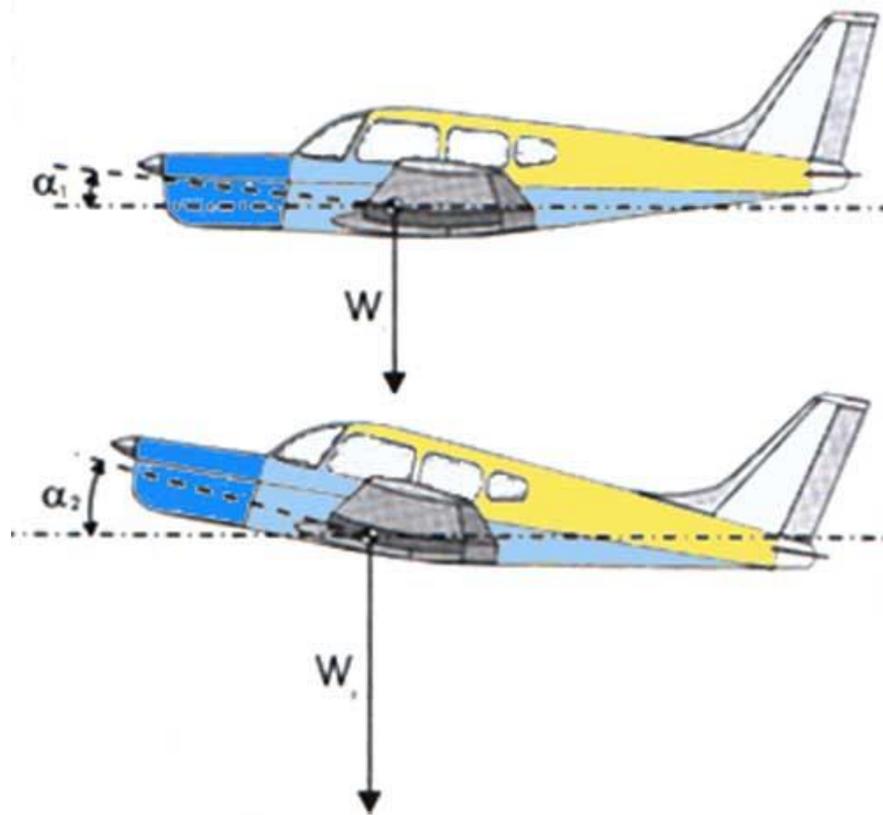


Figura 4. Influencia del peso del avión en el ángulo de ataque.

Cabe destacar que el consumo de combustible es lo único que hace cambiar el peso de la aeronave durante el vuelo. Según se va quemando el combustible, el avión se va aligerando y mejorando progresivamente sus performances.

Por lo tanto, la reducción del peso de los aviones y la necesidad de reducción del consumo de combustible durante los vuelos son aspectos de suma importancia a la hora de diseñar y construir nuevas aeronaves. Para ello se realizan tratamientos de eliminación de material de forma selectiva y por zonas de las piezas, como el fresado químico, tratamiento del cual trata el presente proyecto, y se emplean materiales alternativos al acero en la construcción de la aeronave, como los materiales compuestos de matriz orgánica (fibra de carbono, fibra de vidrio y aramidas) y las aleaciones ligeras.

2.3 Aleaciones ligeras

El estudio de los materiales tradicionales, avanzados, biomateriales y nanomateriales, su procesamiento y caracterización, así como la modificación de propiedades para generar nuevos materiales compuestos son de gran importancia en la industria aeronáutica, ya que en este se buscan siempre las mejores relaciones peso/costo para las estructuras de las aeronaves. Las aleaciones ligeras suponen una posible solución a este problema, ya que mejoran las prestaciones de muchos materiales, como el acero.

En función del material base pueden distinguirse tres tipos de aleaciones ligeras:

- Aleaciones de magnesio
- Aleaciones de titanio
- Aleaciones de aluminio

2.3.1 Aleaciones de magnesio

El magnesio es un metal ligero, con una densidad de 1.740 kg/m^3 , que compite con el aluminio para aplicaciones que requieren metales de baja densidad, a pesar de que su precio sea el doble que el del aluminio. Sin embargo, el magnesio y sus aleaciones muestran una serie de desventajas que limitan su utilización. Por una parte la reactividad del magnesio es elevada y la estabilidad de sus óxidos es pobre, por lo que su resistencia a corrosión es pequeña. Sus características mecánicas son del orden de las correspondientes a las aleaciones de aluminio incluso de forma específica, y muestran pobres resistencia a la termofluencia, la fatiga y el desgaste. Además, resultan aleaciones que en estado fundido arde en contacto con el aire, y su transformación en frío resulta igualmente difícil al cristalizar el Mg en una estructura hexagonal densa que no favorece precisamente su deformación. No obstante tiene amplias aplicaciones en la ingeniería aeronáutica y aeroespacial.

Las aleaciones de magnesio se dividen fundamentalmente en aleaciones de forja y aleaciones de fundición. Ambos tipos pueden mejorarse mecánicamente mediante tratamientos de deformación o por tratamientos térmicos de envejecimiento.

2.3.2 Aleaciones de titanio

El titanio es un metal relativamente ligero con una densidad de 4.540 kg/m^3 , mayor que la del aluminio. Por su elevada dificultad de extracción y transformación y su alta reactividad se trata de un metal caro, llegando a costar hasta 5,7 veces más que el aluminio. No obstante, se trata de un metal con una resistencia muy elevada (684 MPa), por lo que tanto el titanio como sus aleaciones son capaces de competir con el aluminio en algunas aplicaciones aeroespaciales.

Las principales desventajas que poseen las aleaciones de titanio son su elevada reactividad, su facilidad para combinarse con oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, carbono y hierro a altas temperaturas, lo que implica la utilización de técnicas especiales para su conformado. Sin embargo, es un material muy resistente a medios agresivos debido a su resistencia a la corrosión, ya que, una vez pasivado, la capa de óxido que se forma en la

superficie del material es muy estable, similar a la del aluminio.

Pueden distinguirse cuatro grupos de aleaciones de titanio: titanio comercialmente puro, aleaciones de titanio α , aleaciones de titanio β y aleaciones de titanio $\alpha+\beta$, siendo estas últimas las más utilizadas en la industria aeroespacial.

2.3.3 Aleaciones de aluminio

La combinación de propiedades que presenta el aluminio y sus aleaciones hacen de este material uno de los más económicos y versátiles para una amplia gama de aplicaciones. Presenta una baja densidad, 2.780 kg/m^3 , una alta resistencia a la corrosión y una excelente conductividad eléctrica y térmica, aunque se han desarrollado algunas aleaciones con un alto grado de resistencia eléctrica. Debido a su baja densidad, presenta una relación resistencia-peso excelente. Es por ello que es un material ampliamente utilizado cuando el peso es un factor importante, como en el caso del sector aeronáutico. Sin embargo, pese a poseer una alta ductilidad incluso a temperatura ambiente, tiene un punto de fusión bajo, 660°C , por lo que no se comporta bien a temperaturas elevadas. Además, no posee un límite de resistencia a la fatiga bien definido y su dureza es escasa, originando en ocasiones poca resistencia al desgaste abrasivo.

Para identificar las aleaciones de aluminio se emplea una designación numérica de cuatro dígitos seguidos de dos siglas AA. El primero indica el grupo de aleación, el segundo indica los límites de impurezas y los dos últimos identifican la aleación o indican la pureza del metal. Las siglas indican el grado de envejecimiento o el tratamiento realizado.

En la *Tabla 1* se muestra la designación de aleaciones mencionada y los principales aleantes de cada aleación de aluminio.

Tabla 1. Designación de aleaciones y principales aleantes de cada aleación de aluminio.

Serie	Principal aleante
1xxx	Aluminio puro (99%)
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Zinc
8xxx	Otros elementos
9xxx	Sin usar

El grado de endurecimiento o tratamiento viene expresado por letras colocadas después del número de designación. Las letras empleadas para los tratamientos térmicos son:

- F: Material tal y como se ha fabricado. Sin control en el endurecimiento por deformación.
- O: Recocida y recristalada. Endurecimiento con mínima resistencia y máxima ductilidad.
- H: Endurecida por deformación.
- W: Tratada por solución.
- T: Tratada térmicamente.

Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grandes grupos, aleaciones de aluminio de forja y aleaciones de fundición, las cuales pueden dividirse a su vez en aleaciones tratables térmicamente o no tratables térmicamente.

- **Aleaciones de aluminio de forja.**

Las no tratables térmicamente no pueden ser endurecidas por precipitación y sólo pueden trabajarse en frío para aumentar su resistencia. Los tres grupos más importantes de estas aleaciones corresponden a las familias de aluminio puro (series 1xxx), Al-Mn (series 3xxx) y Al-Mg (series 5xxx).

- Las aleaciones de la serie 1xxx tienen una composición del 99% de aluminio, siendo sus principales impurezas el Fe y Si. Se emplean principalmente para conductores eléctricos y la obtención de láminas muy finas.
- Las aleaciones de la serie 3xxx tienen como elemento de la aleación principal Mn y son empleadas cuando se requiere una buena trabajabilidad.
- Las aleaciones de la serie 5000 tienen como principal componente Mg. Son empleadas en la industria del transporte para fabricar chapas.

El grupo más importante es, sin embargo, el compuesto por aquellas aleaciones que son tratables térmicamente, teniendo lugar el endurecimiento por precipitación. En estas aleaciones se combinan elementos como Cu, Zn, Si y Mg, formando aleaciones de Al-Cu y Al-Cu-Mg (series 2xxx), Al-Mg-Si (series 6xxx) y Al-Zn-Mg (series 7xxx).

- Las aleaciones de la serie 2xxx tienen como principal elemento de aleación el Cu, aunque también contienen pequeñas cantidades de Mg y algún otro elemento. La aleación 2024 es una de las más importantes y más utilizada de la serie. Contiene un 4,4% de Cu, un 1,5% de Mg y un 0,6% de Mn. Sus propiedades varían en función del tratamiento térmico al que ha sido sometida, llegando a resistencias de 442 MPa en las condiciones de T6.
- Las aleaciones de la serie 6xxx tienen como principales elementos de aleación el Mg y Si, que al combinarse entre sí forman el compuesto intermetálico Mg_2Si , que junto a otros compuestos complejos del tipo FeCrAlSi endurecen en gran medida el material. La aleación más utilizada

de esta serie es la 6061, que en condiciones de T6 alcanza resistencias de 290 MPa, empleándose para fines estructurales de carácter general.

- Las aleaciones de la serie 7xxx añaden al aluminio contenidos variables de Zn, Mg y Cu que al combinarse entre sí forman compuestos intermetálicos del tipo $MgZn_2$, que es el principal elemento endurecedor de estas aleaciones, y debido a la alta solubilidad del zinc y magnesio en el aluminio, permite una alta densidad de precipitados y por lo tanto un elevado índice de endurecimiento. La aleación más importante de esta serie es la 7075, con una composición aproximada de 5,6% de Zn, 2,5% de Mg, 1,6% de Cu y 0,25% de Cr, que con un tratamiento T6 alcanza resistencias de tracción de 504 MPa. La importancia de estas aleaciones radica en las elevadas prestaciones mecánicas que alcanzan tras un envejecimiento natural, por lo que son empleadas en estructuras de vehículos de transporte, principalmente en la industria aeronáutica.

- **Aleaciones de aluminio de fundición.**

Estas aleaciones se basan en los mismos sistemas de aleación como los de aluminio de forja, se refuerzan por los mismos mecanismos y se clasifican de manera similar en tratables y no tratables térmicamente. La principal diferencia entre ambas radica en que las aleaciones de fundición contienen mayores cantidades de agregados de silicio que las aleaciones de forja.

Las aleaciones de aluminio de fundición presentan buenas cualidades de colabilidad, fluidez y capacidad de alimentación de los moldes, así como una mejora en las propiedades de resistencia y tenacidad o resistencia a la corrosión. Presentan también una mayor tolerancia a las impurezas que las aleaciones de forja y un límite elástico de hasta 435 MPa. El principal problema que presentan estas aleaciones es su elevado nivel de contracción, aunque esto puede ser solucionado realizando un buen diseño del proceso de modelo.

Los principales aleantes de las aleaciones de fundición son:

- Silicio (5-12%): aumenta la fluidez
- Magnesio (0,3-1%): endurece por precipitación y mejora la resistencia
- Cobre (1-4%): aumenta la resistencia, especialmente a altas temperaturas.

2.4 El aluminio en el sector aeronáutico

Las piezas de aleaciones de aluminio son generalmente el fuselaje y las alas, piezas de gran tamaño y con morfologías complejas que dificultan el acceso con herramientas y la sujeción de las mismas a la hora de mecanizarlas. Es por ello que suponen un porcentaje alto del total de los materiales empleados en la fabricación de un avión.

Cabe mencionar que el 82% de la estructura de la aeronave Boeing 747 y el 70% de un 777 está constituido por aleaciones de aluminio. Las partes principales del avión construidas con aleaciones de aluminio son las siguientes:

- Bordes de ataque
- Fuselaje
- Cono de cola
- Mamparo trasero
- Portones
- Largueros y costillas
- Capots del motor
- Carena ventral
- Paneles de los trenes de aterrizaje

Una desventaja importante de las aleaciones ligeras con respecto a los materiales compuestos es su vulnerabilidad frente a la corrosión, algo que estos últimos no tienen. Es por ello que el diseño de los nuevos aviones se basa en la fibra de carbono, material que combina dureza, muy buena relación resistencia/peso y es resistente a la corrosión. Sin embargo, la flota de aviones existentes está conformada mayoritariamente por piezas de aleaciones de aluminio y aún debe llevarse a cabo su mantenimiento.

2.5 Mercado Aeronáutico

El Mercado Aeronáutico presenta características propias que le hacen un mercado difícil en el más amplio sentido de la palabra.

En forma resumida podemos decir que se caracteriza por:

- **Producto muy complejo.** Un avión consta de miles de piezas formando “sistemas”, que deben trabajar acompasadamente y que se encuentra gobernado en muy alta medida por ordenadores.
- **Producto con altísimo coste de desarrollo y lento retorno de la inversión.** Hoy día los costes de desarrollo típico de un nuevo avión de tamaño medio-grande puede sobrepasar los 10.000 millones de euros y el retorno de inversión está en el entorno de los 10 años.
- **Alta Tecnología.** Con lo anteriormente dicho, es claro que el avión es un producto muy complejo y sofisticado, que requiere por ello la utilización de una alta tecnología para su diseño, desarrollo, fabricación e incluso para su mantenimiento.
- **Gran Gasto en I+D+i.** Para mantenerse en esa línea de alta tecnología y para poder mantener un nivel

de innovación acorde con el producto y las demandas del mercado, se requiere por parte de las empresas un gran gasto en “Investigación, Desarrollo e Innovación”.

- **Muy concentrado.** Al revisar la evolución de la Aeronáutica se observa que el número de empresas actuales capaces de diseñar, poner en fabricación y volar un producto nuevo es muy pequeño. Pero el número sigue siendo pequeño incluso en empresas menores que colaboran con las anteriores y están dedicadas solo a algunas de esas actividades.
- **Difícil penetración.** Acorde con lo anteriormente expuesto: alta tecnología, gran gasto en I+D+i y concentración empresarial, resulta un mercado de difícil penetración para nuevas empresas.
- **Beneficios ajustados.** A una gran complejidad y un alto coste de desarrollo, le siguen unos ajustados beneficios, en parte porque el precio de venta tiene que estar limitado por la propia dinámica del mercado.

3 TRATAMIENTOS QUÍMICOS EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

En el presente capítulo se expondrán los principales tratamientos químicos realizados sobre piezas en la industria aeronáutica, los cuales serán englobados en tres grandes grupos en función de su finalidad, ver *Figura 5*. El primero engloba a los procesos de limpieza previa a los que deben ser sometidas las piezas a las que se les va a realizar algún tratamiento posterior, el segundo incorpora los procesos para prevenir la corrosión de las piezas por sí mismos y además favorecer el anclaje posterior del esquema de pintura, estos son los llamados tratamientos químicos superficiales, y el último grupo consiste en el mecanizado por medios químicos, entre ellos fundamentalmente el tratamiento de fresado químico sobre el que se centrará el presente trabajo.

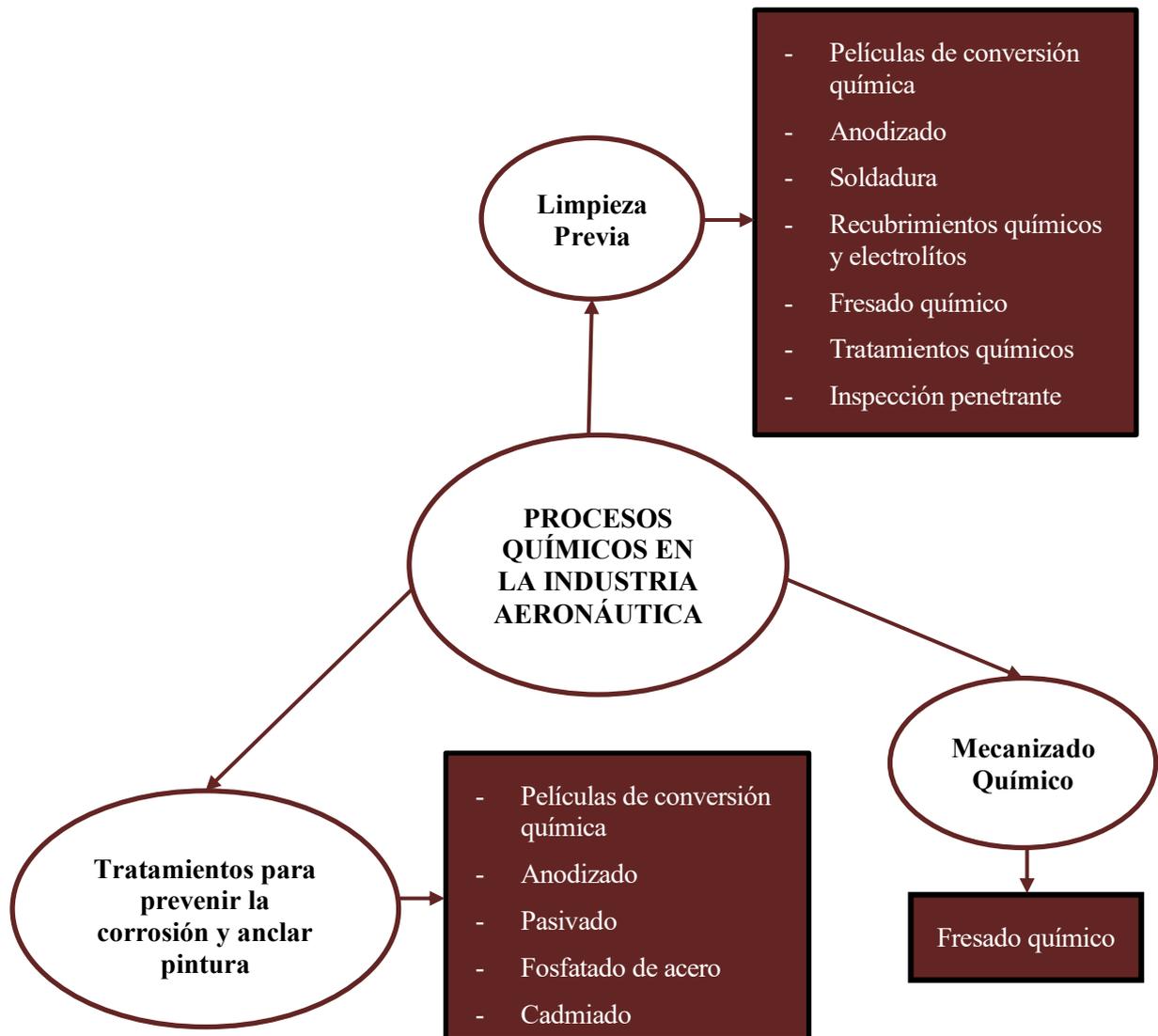


Figura 5. Esquema de procesos químicos en la industria aeronáutica

Estos procesos químicos se realizan en cadenas de baños de procesos químicos, ver ejemplo de cadena de baños en *Figura 6*.



Figura 6. Cadena de baños de proceso químico

En todos los procesos de tratamientos químicos se deberán tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Las piezas se montarán en los soportes o bastidores que las transportarán a lo largo del proceso, de forma que:
 - Se evite la retención de las soluciones de tratamiento
 - Se evite la retención de aire
 - Se permita la salida libre de los gases producidos durante el tratamiento
 - Se impida el rozamiento de las piezas entre sí
- A la salida de cada baño se dejarán escurrir las piezas unos instantes, antes de pasarlas al baño siguiente.
- En los tratamientos electrolíticos:
 - Se deberán utilizar bastidores o soportes contruidos en acero, cobre o titanio, que además de ser capaces de soportar, sin deformarse, los esfuerzos mecánicos a los que se van a

someter, permitan el paso de la corriente de tratamiento.

- Los contactos eléctricos entre el bastidor y las barras que llevan la corriente hasta el baño y entre el bastidor y las piezas, deberán estar diseñados de forma que permitan una unión rígida y una superficie de contacto suficiente.
- Los bastidores se protegerán con productos aislantes y resistentes a las soluciones de tratamiento, excepto en las superficies de contacto.

A continuación se llevará a cabo una breve descripción de los grupos mencionados anteriormente y se enumerarán los distintos procesos empleados en cada uno de ellos para conseguir los objetivos deseados:

- 1) **Limpieza química:** este es un proceso fundamental, ya que si se lleva a cabo de forma defectuosa incide de forma directa en la calidad de los procesos posteriores.

Antes de llevar a cabo la limpieza se realiza un examen visual de las piezas para conocer su estado superficial y grado de contaminación.

También deben de conocerse los procesos posteriores a la limpieza a los que serán sometidos las piezas con el objetivo de conocer el tipo de limpieza a realizar. Las principales empresas del sector aeronáutico tienen sus propias normas y procedimientos con el esquema de limpieza a seguir (secuencia de productos químicos, concentraciones, temperaturas y tiempos) según el tratamiento posterior. Estos tratamientos posteriores pueden ser:

- Películas de conversión química
- Anodizado
- Soldadura
- Recubrimientos químicos y electrolitos
- Fresado químico
- Tratamientos térmicos
- Inspección penetrante

Cualquier esquema de limpieza química comienza con una operación de desengrase. Con estas operaciones se eliminan todo tipo de aceites, grasas, pastas de pulido y contaminaciones superficiales producidas en la manipulación de las piezas. Los procesos de desengrases más utilizados son los siguientes:

- *Desengrase en fase vapor con disolventes colorados.* Muy recomendable para una primera eliminación de las materias grasas y aceites que impregnan la superficie de las piezas procedentes del mecanizado u operaciones de estirado. Sin embargo, no disuelve completamente las grasas de tipo sólido fuertemente incrustadas, ni los residuos sólidos de las pastas de pulir.

- *Desengrase por emulsión.* Se lleva a cabo mediante inmersión de las piezas en disolventes emulsionantes. Con la adecuada combinación de estos productos se consiguen soluciones que a la acción disolvente de las grasas, unen una acción emulsionable y de arrastre de los productos adheridos a la superficie de la pieza, no eliminados en el desengrase con disolventes en fase vapor. El desengrase por emulsión deja sobre la superficie de la pieza una capa protectora que deberá ser eliminada a continuación mediante un desengrase alcalino.
- *Desengrase alcalino.* Es un tratamiento de limpieza química que se consigue por inmersión de las piezas en una solución alcalina formada por sales inorgánicas, jabones o productos tensoactivos e inhibidores del ataque químico. En esta limpieza, la grasa es saponificada en parte, convirtiéndose en un compuesto soluble, fácilmente arrastrable y en parte emulsionada por agentes tensoactivos. Las partículas sólidas procedentes de las pastas de pulir, junto con el polvo y restos metálicos, son arrastrados por absorción mediante agentes coloidales también presentes en la solución alcalina.

Esta limpieza se aplica después de un primer tratamiento, cualquiera de los mencionados anteriormente.

- *Desengrase anódico.* Tratamiento electrolítico exclusivo para acero en el cual las piezas se introducen en el baño suspendidas de un soporte que se conecta a la barra anódica del baño. El cátodo lo forman placas de acero sumergidas en el electrolito conectados a la barra catódica del baño. Tanto la barra anódica como la catódica están conectadas a un rectificador de corriente.

2) **Tratamientos para prevenir corrosión y mejorar el anclaje de pintura:** la corrosión provoca sobre las piezas un cambio en el área de la sección transversal de la parte estructural afectada, aumentando la probabilidad de rotura. Para prevenir dicho fenómeno se llevan a cabo una serie de tratamientos químicos, los cuales se mencionan a continuación:

- *Películas de conversión química.* A este procedimiento, aplicado sobre aluminio y sus aleaciones, se le llama cromatado. Se distinguen dos tipos de películas de conversión química:
 - Tipo I – Coloreadas: distinguidas por su mayor resistencia a la corrosión.
 - Tipo II – Incoloras: caracterizadas por su baja resistencia eléctrica.

Este tratamiento puede aplicarse de dos formas, mediante inmersión en baños o por un método manual, ya sea empleando brochas o rotuladores específicamente diseñados para este proceso.

- *Anodizado.* Se denomina anodizado al proceso electrolítico mediante el cual el aluminio se recubre de una película de alúmina cuyo espesor y propiedades dependen más del proceso usado que del tipo de aleación. La alúmina formada en el anodizado es anhídrica y porosa, con un gran poder absorbente, propiedad que puede aprovecharse para teñirla,

introduciendo en sus poros pigmentos coloreados. La alúmina anhidra en presencia de humedad se hidrata transformándose en alúmina monohidratada, con el consiguiente aumento de volumen que cierra los poros. Esta operación de hidratación de la película anódica recibe el nombre de sellado o de fijado en el caso particular de películas teñidas.

Las piezas anodizadas sufren un aumento dimensional por cada superficie de aproximadamente el 50% del espesor de la película, el cual se forma en un 50% a costa del metal base. Vease ejemplo en la *Figura 7*.

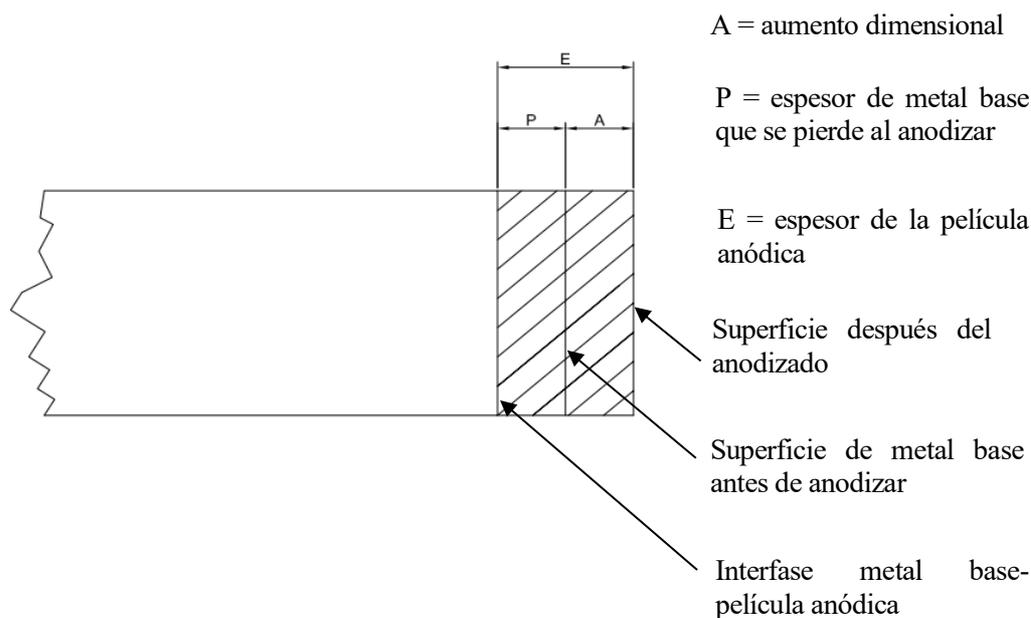


Figura 7. Resultado final tras el proceso de anodizado

Dentro de los procesos de anodizado, según la norma de uno de los principales fabricantes del sector, pueden distinguirse tres tipos principales:

- *Anodizado sulfúrico*. Las películas obtenidas son normalmente transparentes, de más espesor y porosidad, por lo que son más aptas para aplicar que las obtenidas con ácido crómico.
- *Anodizado crómico*. Las películas obtenidas por este proceso son opacas, más blandas, de menor espesor y mayor resistencia al desgaste que las capas obtenidas con ácido sulfúrico. Sin embargo, presentan una mayor ductilidad y, para espesores iguales, mayor resistencia a la corrosión.
- *Anodizado tartárico-sulfúrico*. Permite obtener capas anódicas con propiedades equivalentes a las obtenidas mediante anodizado crómico sin la utilización de cromo. De esta manera se reduce el impacto medioambiental y los riesgos de salud laboral.
- *Anodizado sulfo-bórico, anodizado fosfórico, etc.*

En la *Figura 8* y *Figura 9* se expone el proceso a seguir antes y después de los tratamientos de anodizado explicados anteriormente.

- *Pasivado*. El pasivado, realizado únicamente sobre piezas de acero y sus aleaciones, es un tratamiento que, sin alterar las dimensiones de las piezas, aumenta su resistencia a la corrosión. Se realiza después de las operaciones de mecanizado, conformado, soldadura (excepto soldadura por puntos), tratamiento térmico y chorreado. La limpieza total de las piezas y su decapado, si procede, son requisitos previos al pasivado. Las piezas deben ser completamente sumergidas en los baños para prevenir ataques locales.

Se distinguen dos tipos de pasivado en función del tipo de reactante utilizado:

- Tipo I. Pasivado en baño de ácido nítrico.
 - Tipo II. Pasivado en baño de ácido nítrico con dicromato y tratamiento suplementario de dicromato sódico.
- *Fosfatado de acero*. Aplicado en piezas de acero de baja aleación. El fosfatado consiste en provocar sobre la superficie de los aceros la formación de una película fina de fosfatos estables, no solubles en agua. En general las películas de fosfatos proporcionan una suave protección contra la corrosión, pero son una excelente base para la fijación de los recubrimientos orgánicos (pinturas) y mejoran considerablemente las características de rozamiento de las superficies sobre las que se aplica.
 - *Cadmio*. Tratamiento electrolítico catódico que emplea un electrolito alcalino cianurado. En este, las piezas montadas en sus soportes, se fijan en la barra catódica de la cuba electrolítica y los ánodos están formados por bolas de cadmio, sumergidos en el electrolito.

Los recubrimientos de cadmio se aplican para proteger al metal base contra la corrosión ambiental, así como, para disminuir los pares galvánicos entre metales. Debido a la baja resistencia de contacto del cadmio, también se emplea extensamente en aplicaciones eléctricas.

La electrodeposición del cadmio sobre aceros al carbono de baja aleación y sobre las aleaciones de cobre, se efectúa directamente sobre el metal base, sin ningún recubrimiento intermedio. Sobre aceros inoxidables y refractarios y sobre aleaciones de base níquel y cobalto, aplicando previamente un flash de níquel. Sobre las aleaciones de aluminio y de magnesio hay que depositar previamente una película de cinc químico.

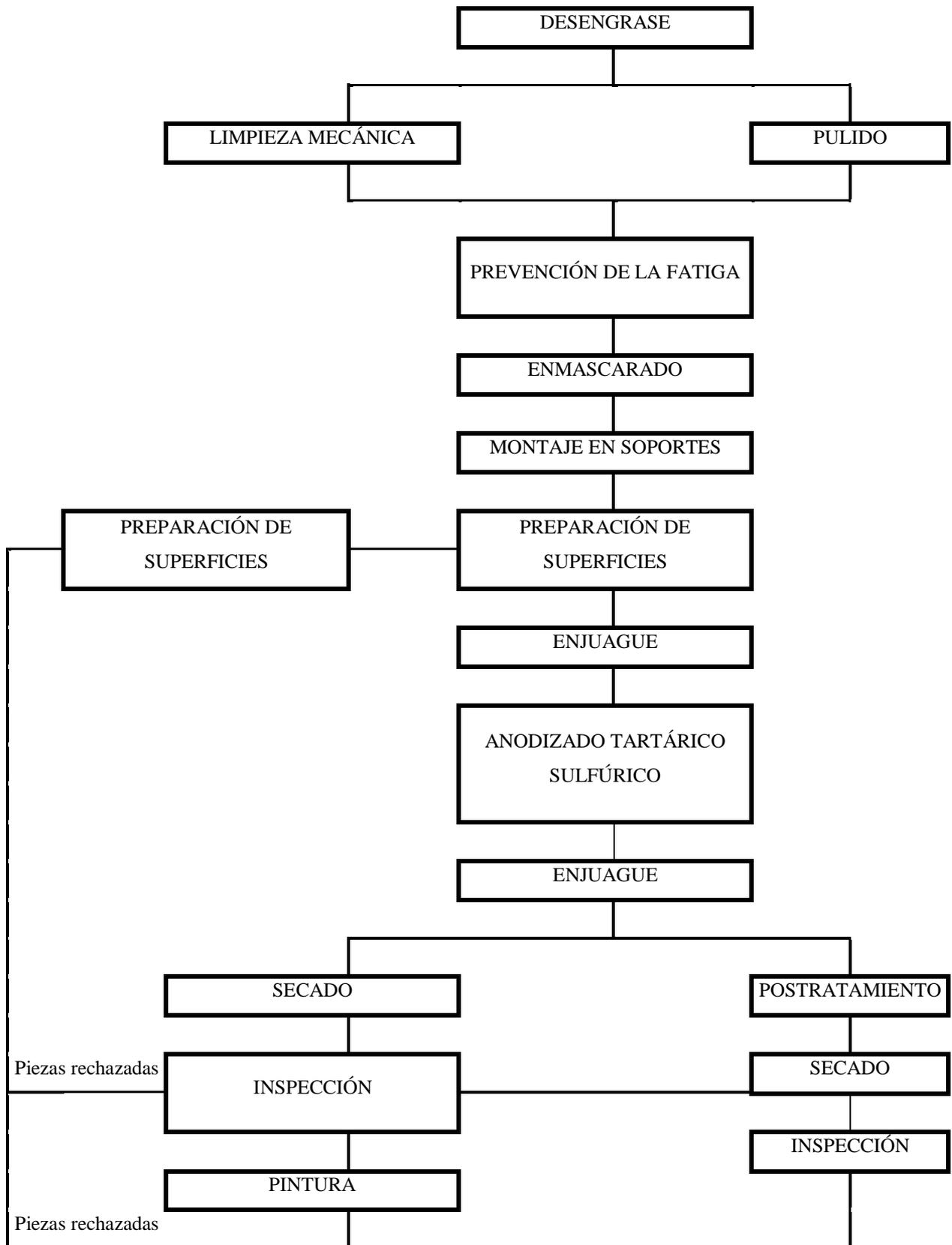


Figura 8. Diagrama del proceso de anodizado tartárico-sulfúrico

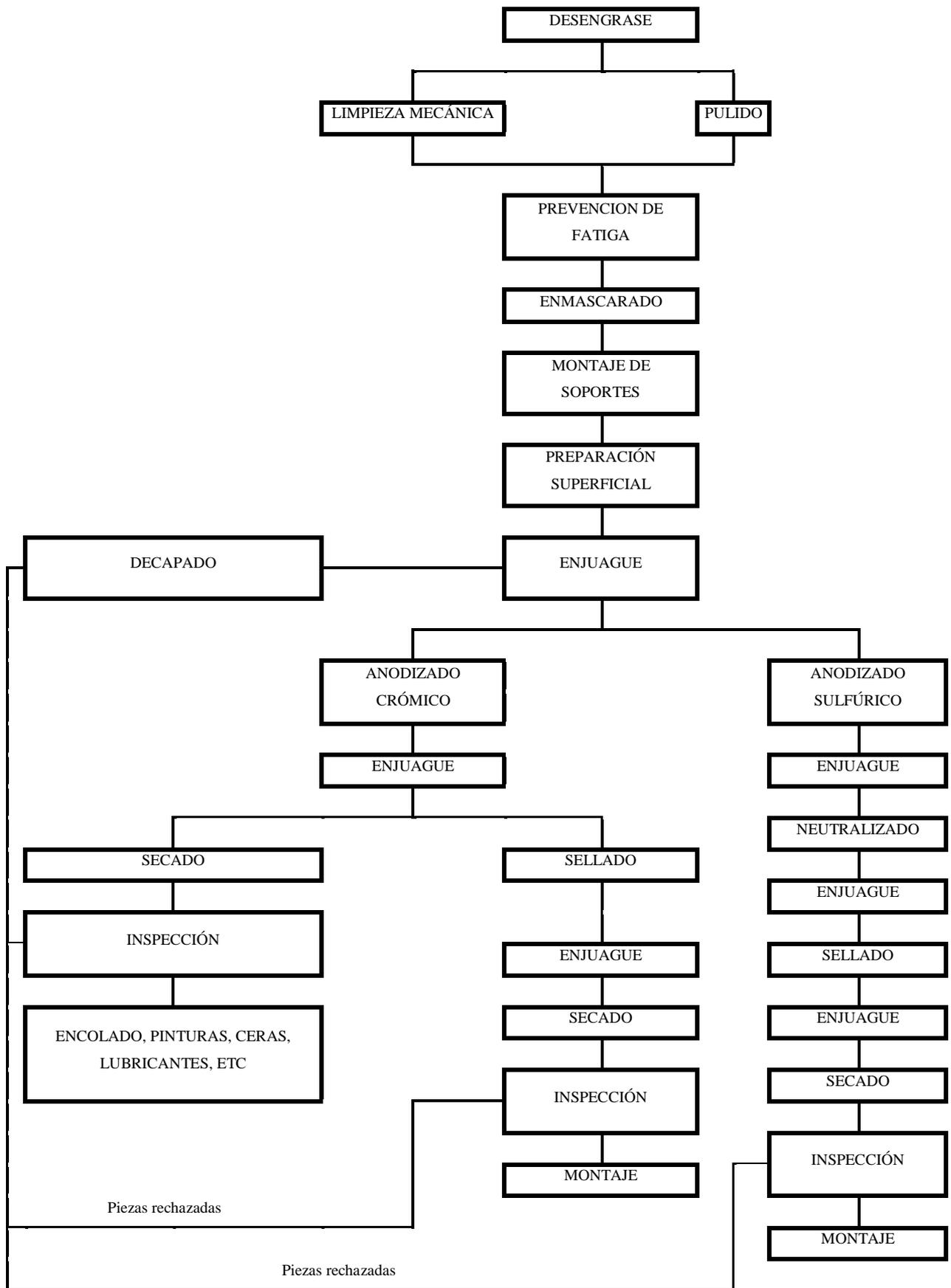


Figura 9. Diagrama de los procesos de anodizado crómico y anodizado sulfúrico

Todos los procesos explicados hasta el momento, a parte de prevenir la corrosión en las piezas, mejorán la adhesión de la pintura sobre ellas. La pintura ejerce dos funciones, protección y decoración, existiendo una gran cantidad de productos proporcionados por los fabricantes capaces de cumplir esos objetivos sin perjuicio a que se realicen ambos a la vez. Por esta razón, en función del resultado esperado, la elección del tipo de pintura es de gran importancia. Esta elección se lleva a cabo de acuerdo con los requerimientos del producto a pintar y debe realizarse teniendo conocimiento de las características favorables y desfavorable, las formas de suministro, costo relativo y forma de aplicación, secado, condiciones de servicio y regulaciones ambientales.

- 3) **Fresado químico:** es una técnica de remoción de material, la cual se fundamenta en la eliminación de material no deseado por ataque de una sustancia química activa, como puede ser una solución acuosa ácida o alcalina. Las partes que no se desee que sean atacadas son protegidas con recubrimientos aislantes ó máscaras. Modificando dichos aislamientos entre ataques se pueden conseguir diferentes geometrías, así como mayores profundidades si se hace en varios pasos.

En el siguiente capítulo se explicará más exhaustivamente este tratamiento, describiendo cada uno de los procesos y aspectos más importantes del tratamiento.

4 FRESADO QUÍMICO

4.1 Introducción

El fresado químico es un proceso que permite reducir el espesor inicial de forma selectiva y por zonas de las piezas, por eliminación de material mediante ataque químico. Las áreas donde el material no deba ser eliminado se protegerán con productos enmascarantes impermeables a la solución de ataque. El procedimiento raramente está asistido eléctricamente. La mayoría de las aplicaciones de este proceso son para producir piezas con altas relaciones resistencia/peso.

Los servicios de fresado químico se ofrecen de forma subcontratada por un pequeño número de empresas especializadas. La mayoría de grandes fabricantes aeroespaciales poseen instalaciones para llevar a cabo el proceso, aunque muchos de ellos realizan fresado químico únicamente sobre piezas de aleaciones de aluminio. Los procesos y tecnologías de fresado y trazado más complejos no tienen una alta disponibilidad.

En la actualidad, el fresado químico es un proceso aceptado y ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, con aplicaciones importantes en fuselajes militares y comerciales, vehículos de lanzamiento, motores de turbina y cohetes, helicópteros y misiles. Hay muy pocas aplicaciones comerciales no aeroespaciales, destacando entre ellas el sector automovilístico.

Para el desarrollo del capítulo se ha usado como fuente para las distintas especificaciones mencionadas la norma de uno de los principales fabricantes del sector proporcionada por la empresa colaboradora.

4.2 Descripción del proceso

Los dos elementos clave empleados en el fresado químico son la solución abrasiva y el enmascarante. Los decapantes ácidos o soluciones alcalinas se mantienen dentro de los rangos controlados de composición química y temperatura. Los enmascarantes están especialmente diseñados con productos elastoméricos fácilmente retirables a mano y químicamente resistentes a los ácidos fuertes.

Prácticamente todos los metales empleados en la industria aeroespacial y en industrias metalúrgicas comerciales pueden ser tratados mediante fresado químico. El aluminio permite simplificar este proceso, tanto en términos de requerimientos para las instalaciones como control del proceso. Las aleaciones de magnesio y titanio son las más complejas, seguidas por las de acero inoxidable, siendo las superaleaciones las más complicadas de procesar.

Los distintos escalones por los que debe pasar una pieza a la que se le realiza un proceso de fresado químico sobre un área determinada son los siguientes:

1. Limpieza de la pieza y recubrimiento con el enmascarante.

2. Secado y curado del enmascarante.
3. Trazado de las áreas a fresar mediante plantillas.
4. Pelado del material enmascarante en las áreas trazadas previamente.
5. La reducción de espesor deseada se lleva a cabo por inmersión de la pieza en el baño donde se encuentra la solución abrasiva durante un periodo controlado.
6. Los dos pasos anteriores se repetirán si es necesaria la eliminación de un área con espesores mayores.
7. Se retira el enmascarado restante.
8. La pieza es mecánicamente cubierta según los requerimientos.

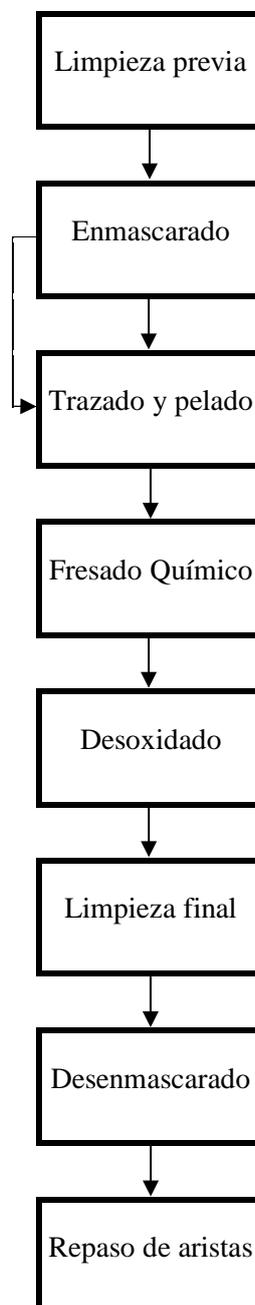


Figura 10. Diagrama del proceso de fresado químico

El enjuague, secado y otros procesos no están recogidos en el diagrama de flujo, ya que deben llevarse a cabo tras cada paso.

A continuación se explicará brevemente que se lleva a cabo en cada una de las etapas mencionadas anteriormente:

1) Limpieza previa.



Si la superficie de la pieza una vez realizado el tratamiento térmico correspondiente no está limpia antes de aplicarle el enmascarante, las propiedades adhesivas de este pueden verse seriamente perjudicadas. Los principales problemas podrían ser demasiada adhesión, dificultad para pelar el enmascarante o baja adhesión, resultando en una baja definición de línea entre áreas fresadas y no fresadas. Si el único contaminante presente en la superficie de la pieza es aceite, un tratamiento de desengrase por vapor o limpieza con disolvente son suficientes para eliminarlo. Sin embargo, si hay contaminación superficial y química en la pieza por la manipulación previa y el tratamiento térmico debe eliminarse mediante un tratamiento químico más exhaustivo. Existen una gran variedad de productos de limpieza para los distintos metales. A continuación, en la *Figura 11* se muestra el diagrama de flujo del proceso de limpieza para una pieza de aluminio.

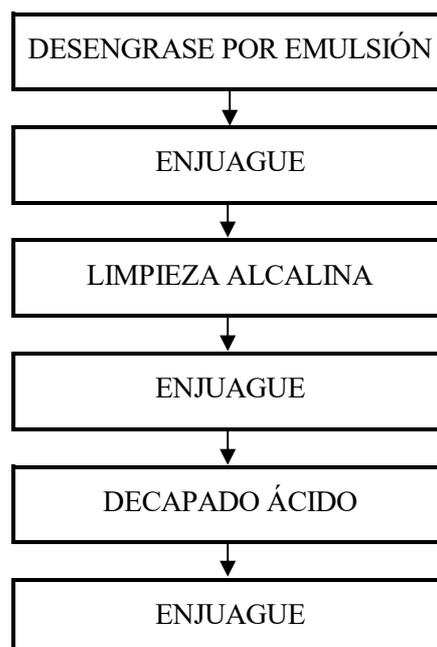


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de limpieza previa de una pieza de aluminio.

La función que desempeña cada etapa y sus objetivos fueron explicados en el capítulo 3.

Tras ser enjuagada la pieza en el último baño, esta es almacenada para su secado. Una vez seca la pieza está lista para ser enmascarada.

2) Enmascarado.



El enmascarante o máscara se aplica comúnmente mediante inmersión de la pieza en un tanque lleno de producto o con pistolas aerográficas, siendo este último el método empleado por la empresa colaboradora. En la *Figura 12* se muestra la pistola aerográfica empleada por la empresa colaboradora. El enmascarante debe ser impermeable, químicamente resistente a la solución abrasiva y fácilmente pelable a mano, tanto antes como después del fresado químico. Los recubrimientos especiales se aplican normalmente mediante pistola aerográfica y proporcionan una resistencia química a la abrasión mejorada.



Figura 12. Pistola aerográfica de la empresa colaboradora empleada para la imprimación del enmascarante.

El curado del enmascarante dependerá del producto y de la aplicación. La evaporación dura normalmente entre 4 y 12 horas a temperatura ambiente (20°C). La cura en horno a una temperatura de unos 50 °C puede hacer que la eliminación del disolvente sea más rápida y si se realiza a 90°C se consiguen, además, mejores propiedades adhesivas y resistencia química.

El espesor del enmascarante oscila normalmente entre los 0,2 y 0,4 mm, pero se llegan a usar para aplicaciones más complejas espesores de hasta 0.025 y 0.075 mm. Aplicado correctamente sobre la superficie limpia de la pieza, el enmascaramiento curado proporciona valores de adhesión al pelado que oscilan desde 7 a 36 g/mm de ancho y una fuerza de tensión de al menos 4000 KPa. Si fuera necesario una mayor adherencia del enmascarante se debe aumentar el espesor, lo que dificulta el pelado. A su vez, unos valores de adhesión más bajos aumentan la probabilidad de fallo en el borde del trazado, ya sea durante su manipulación o durante el fresado químico.

Los productos de enmascarados están en continuo desarrollo, lo que permite disponer en la actualidad de productos de gran calidad. Las instrucciones proporcionadas por los fabricantes ofrecen información sobre las funciones del enmascarante, sus aplicaciones y sus propiedades. Dichos fabricantes proporcionan a sus clientes también el apoyo necesario sobre su producto e información actualizada sobre la industria del fresado químico.

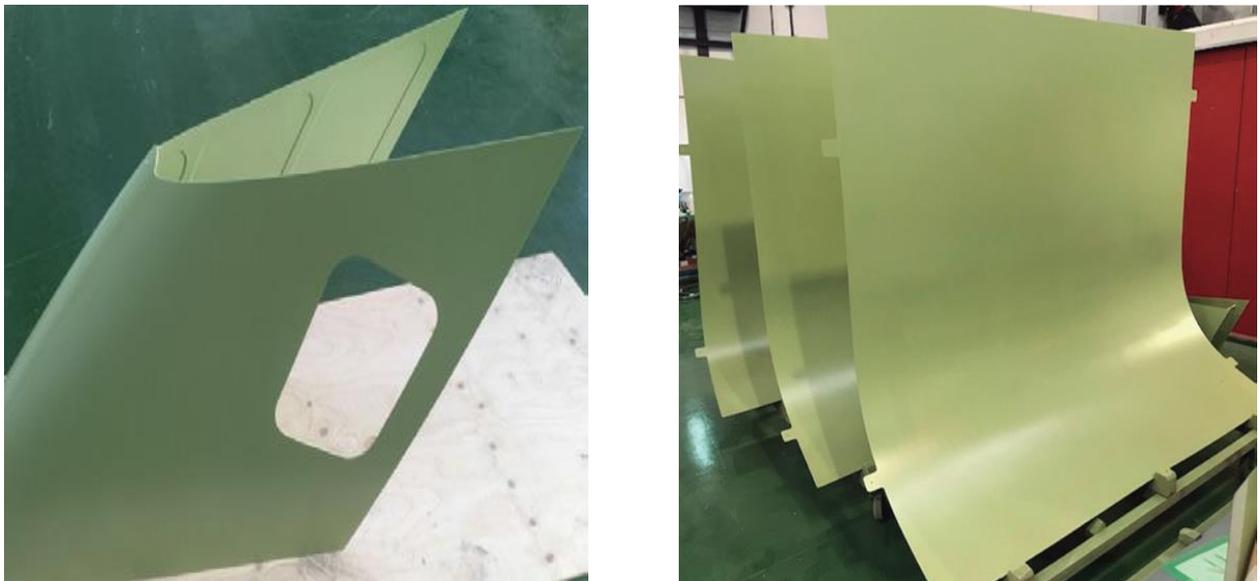


Figura 13. Piezas enmascaradas

3) Trazado y pelado.



Normalmente se emplean plantillas diseñadas expresamente para este fin, PLFQ, las cuales se fijan a la pieza por medio de taladros, útiles o pinzas de presión, de manera que se garantice siempre la correcta colocación de la plantilla sobre la pieza.

El corte debe realizarse cuidadosamente utilizando cuchillas, láser o cualquier otra herramienta capaz de producir un corte limpio, continuo y perpendicular a la superficie de la pieza sin dañar el metal base. Si el fresado químico debe realizarse a distintas profundidades de corte, en una misma operación pueden trazarse todos los escalones, marcándose sobre cada escalón el número de orden en que deberá realizarse su pelado. El primer escalón será, evidentemente, el que requiera una mayor profundidad de fresado. Para que no se produzcan daños en los trazados posteriores al que se está realizando, estos se cubren con un revestimiento, el cual no dificulta el pelado manual.

Tras llevar a cabo el trazado de todas las áreas a fresar se procede a la eliminación del enmascarante en las zonas donde se pretende atacar a la pieza. Se elimina el masking del escalón que se vaya a fresar, teniendo cuidado de no dañar el resto del enmascarante. Obviamente, la primera zona que se retira es la de mayor profundidad. Tras el pelado de las zonas de ataque, se eliminan los residuos de enmascarante por medios mecánicos o químicos, asegurándose de que los medios químicos que se empleen no afecten al fresado químico de la pieza.



Figura 14. Útil de trazado de la empresa colaboradora.

Si se observan daños en el masking, este puede repasarse mediante brochas o rotuladores especiales con el producto enmascarante.

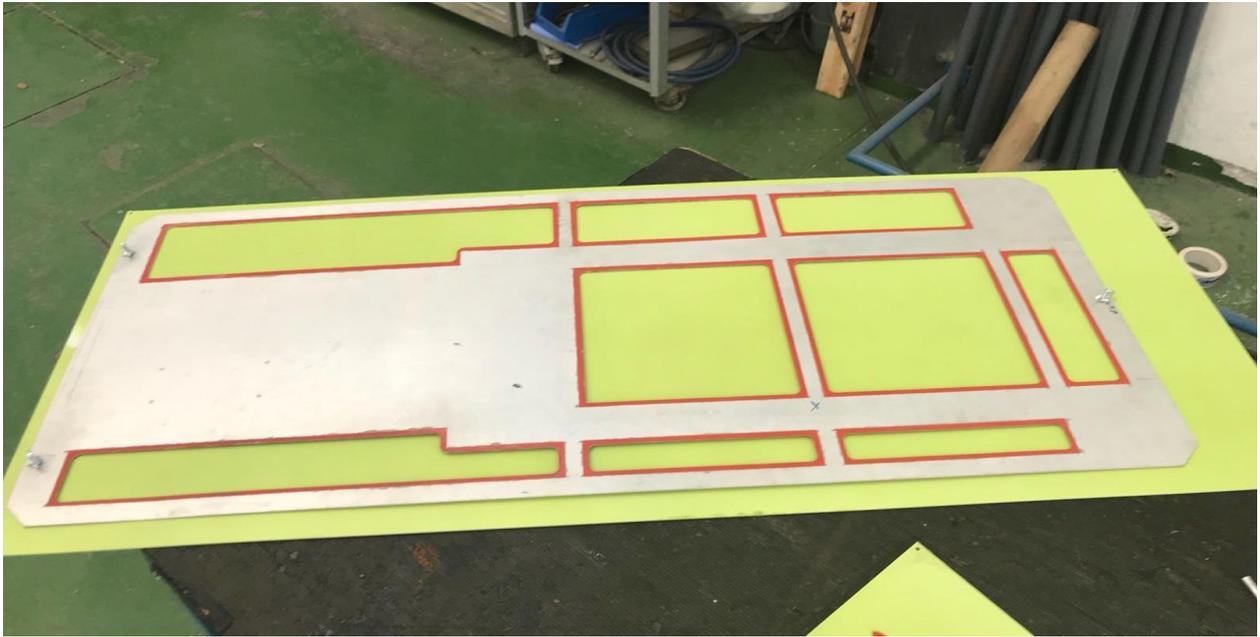


Figura 15. Plantillas empleadas para el trazado de las áreas a fresar



Figura 16. Piezas tras trazado, pelado y repaso de las mismas

4) Fresado químico.



El proceso de grabado se realiza típicamente por inmersión de la pieza en el tanque de fresado en función de lo establecido en el plano o en la documentación aplicable, manteniendo las concentraciones y las condiciones que se especifiquen en la norma aplicable. Estas piezas están sujetas mediante alambres, muelles o abrazaderas a un bastidor de carga con el cual se las saca e introduce en el tanque.

El espesor de la pieza debe ser comprobado cuando haya transcurrido el 80% de del tiempo estimado para el fresado total de la pieza o el primer escalón y continuar atacando hasta conseguir el espesor deseado. Si el espesor obtenido en la comprobación que debe llevarse a cabo tras transcurrir el 80% del tiempo esperado del fresado no es el esperado hay que recalcular el factor de ataque del baño.

Una vez obtenida la profundidad de fresado deseada se enjuaga la pieza, preferiblemente con duchas, hasta conseguir eliminar todo resto de disolución de ataque. Tras esto se reparan los defectos que aparezcan en la zona fresada o en la máscara y se puede proceder al fresado del siguiente escalón.

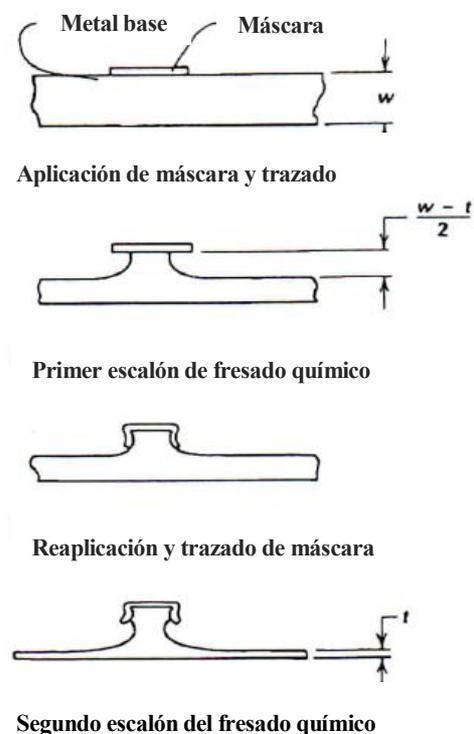


Figura 17. Pasos en escalones de un fresado químico

La reacción que provoca el fresado químico en la superficie de las piezas genera gases, por lo que si este se lleva a cabo mediante inmersión, las piezas deben colocarse de forma que se evite el atrapamiento de dichos gases. El rápido flujo de líquidos provocado por el movimiento de los gases puede provocar patrones de fresado desiguales en los bordes de las áreas atacadas. Las características de este proceso pueden ser minimizadas con el control de las piezas durante el fresado cambiando su posición de forma intermitente. La rotación es una práctica común en el fresado químico de piezas de aluminio cilíndricas y cónicas.

Los disolventes empleados en este tratamiento son mezclas químicas industriales estándar y aditivos especiales, como agentes humectantes. Aunque cada disolvente puede variar en función de la

aleación y del tratamiento térmico llevado a cabo sobre la pieza, los principios de selección y control son los mismos para cada uno. Los principales objetivos técnicos en el desarrollo de disolventes, seguidos por sus consideraciones prácticas son:

- Buen acabado de la superficie
- Buena uniformidad en la eliminación del metal
- Control de la selectividad y el ataque intergranular
- Para aleaciones de titanio, control de la absorción de hidrógeno
- Seguridad del personal
- Coste y fiabilidad de los materiales de los baños del proceso
- Problemas de calidad de aire
- Bajo coste químico del disolvente por unidad de peso
- Capacidad de regenerar la solución de ataque y/o neutralizar y eliminar los productos de deshecho

Según la norma de fresado químico de uno de los principales fabricantes del sector se lleva a cabo una distinción de las disoluciones en dos Tipos, Tipo I y Tipo II, en función del factor de ataque y el rango de temperaturas de funcionamiento, que cumplen con los objetivos técnicos y consideraciones prácticas mencionados con anterioridad. Estas dos configuraciones se recogen en la *Tabla 2* y *Tabla 3*.

Tabla 2. Disolución de ataque para el fresado químico Tipo I.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN		TEMPERATURA (°C)	FACTOR DE ATAQUE (mm/hora/cara)	MATERIAL DE ATAQUE
	DE PREPARACIÓN (g/l)	DE TRABAJO (g/l)			
Hidróxido sódico	100	90 - 140	88 - 100	0.6 - 3	Acero inoxidable
Sulfuro sódico	8	6 - 10			
Al (disuelto)	20	20 - 80			
Agua	Resto				

Tabla 3. Disolución de ataque para fresado químico Tipo II.

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN		TEMPERATURA (°C)	FACTOR DE ATAQUE (mm/hora/cara)	MATERIAL DE ATAQUE
	DE PREPARACIÓN (g/l)	DE TRABAJO (g/l)			
Hidróxido sódico	150	120 - 195	91 - 107	1.8 - 3	Acero inoxidable
Sulfuro sódico	14	11 - 26			
TEA	45	30 - 60			
Al (disuelto)	22	19 - 75			
Agua	Resto				

5) **Desoxidado.**

Una vez finalizado el fresado o cuando las piezas estén fuera de la disolución de ataque durante más de 15 minutos, deberá eliminarse el óxido producido como consecuencia del ataque, utilizando para ello uno de los baños de desoxidado indicados en la *Tabla 4*. La función de esta etapa consiste en homogeneizar el espesor de oxidación de la pieza.

Tabla 4. Baños de desoxidado

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN		TIEMPO (minutos)	MATERIAL DEL TANQUE
	DE PREPARACIÓN (g/l)	DE TRABAJO (g/l)		
Turco Smut GO-NC- B (Z-23321)	225 – 275 g/l	10 – 50	1 – 10	Acero inoxidable o material resistente a ácidos. No usar vidrio ni fibra de vidrio
Cobre	< 0.5 g/l			
Agua Clase A	Resto			
Ácido nítrico 40-42° Be	50% Volumen	ambiente	1 - 3	Hierro forrado de PVC, polietileno o polipropileno

Si las piezas se tratan con fresado químico Tipo II, deben desoxidarse con la siguiente frecuencia:

Tabla 5. Desoxidado con fresado químico Tipo II.

Profundidad de corte (mm):	Nº de veces desoxidado:
Hasta 1,27	Ninguna
1,28-2,54	1 vez a la mitad del proceso
2,55-6,35	2 veces, a 1/3 y 2/3 de la mitad del proceso

6) Limpieza final.



Cuando se haya eliminado el óxido de la superficie, hay que enjuagar las piezas, preferiblemente con duchas, hasta conseguir eliminar todo resto de disolución de ataque.

Posteriormente podrá realizarse un segundo enjuague en agua caliente desionizada para facilitar el secado de las piezas. Tras este último enjuague deber realizarse una prueba de rotura de película de agua para comprobar que la limpieza es adecuada.

El secado de la pieza tras el enjuague final se puede llevar a cabo de forma natural o artificial, dependiendo del tiempo que vaya a transcurrir entre esta etapa y la siguiente. Si se lleva a cabo un secado artificial, este es realizado con aire comprimido seco a 70°C y sin residuos de aceites para evitar marcas de agua en la superficie de la pieza. La duración de este secado se encuentra entre 1-3 minutos en función del espesor de la pieza.

7) Desenmascarado.



Tras pasar las piezas por las distintas etapas en baños, el enmascarante protector debe ser eliminado. Si el material de las piezas es acero inoxidable, estas deben ser pasivadas antes de eliminar

el enmascarante. Se realizan otros tratamientos en función del metal del que está compuesto la pieza y de los requerimientos del cliente. Al finalizarse todo estos pasos se retira el enmascarante a mano, aunque en algunas ocasiones se elimina por desengrase por vapor u otro tratamiento con solvente. Tras retirar la máscara se comprueba el espesor de la pieza, debiendo repetir el proceso completo si no se ha llegado a la profundidad de fresado deseada.

8) Repaso de aristas.



Las aristas vivas producidas por el fresado químico deben ser redondeadas manualmente, empleando las herramientas adecuadas de forma que se obtenga un radio de aproximadamente 0,1 mm. Se busca en este último paso ajustar aún más las tolerancias dimensionales.

De este tratamiento de fresado químico quedan excluidas las piezas plaqueadas, a menos que esté aprobado previamente por el ingeniero de revisión de materiales. Como se comentó al inicio del apartado, el enjuague y el secado son procesos que se llevan a cabo tras cada una de las etapas del tratamiento de fresado químico. Dicho enjuague se lleva a cabo en un baño contigüo al de la etapa anterior o mediante nebulización en un baño vacío, y tiene como objetivo eliminar la mayor parte de los productos de la etapa anterior que pueda contener la pieza y que pueden dañar el baño de la siguiente etapa. Tras el fresado químico de la pieza, por ejemplo, algunas empresas llevan a cabo un enjuague de la pieza por ambos métodos: primero se lleva a cabo una nebulización en un baño vacío y a continuación se enjuaga en un baño contigüo al de fresado químico. Esto se realiza debido a que la cantidad de productos corrosivos que contiene aún la pieza recién salida del baño de fresado es tan elevada que puede reducir sustancialmente la vida útil del baño de enjuague. Esta es la misma razón por la que se lleva a cabo un enjuague previo a cada etapa del tratamiento de fresado químico.

Tras la realización de todas las etapas del tratamiento de fresado químico, el resultado final obtenido se puede observar en la *Figura 18*.

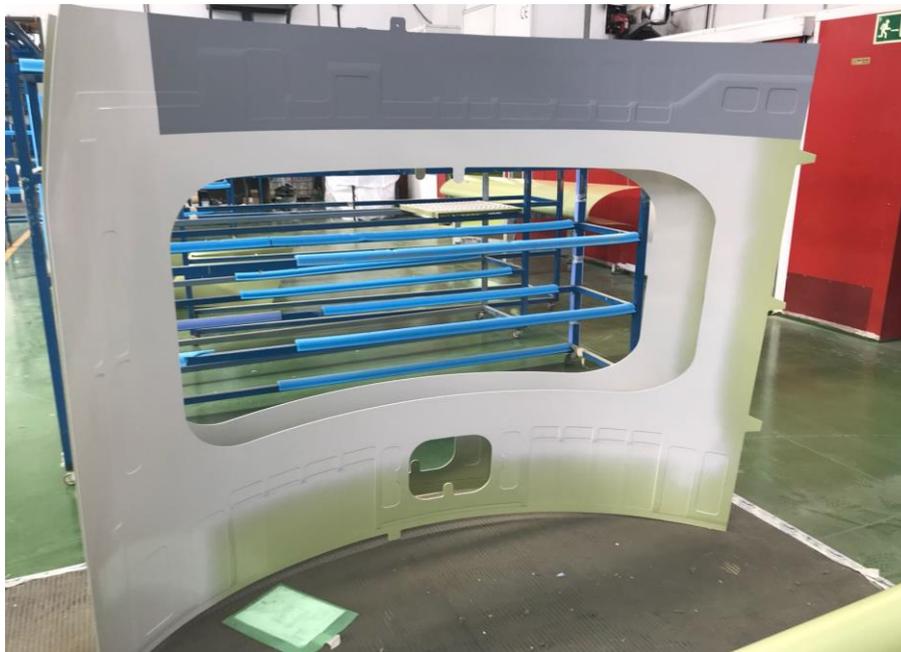


Figura 18. Resultado final de dos piezas tras un tratamiento de fresado químico

4.3 Control y especificaciones

Características importantes del tratamiento de fresado químico sobre una pieza, como la rugosidad de la superficie o la cantidad de hidrógeno absorbido en el proceso, dependen tanto del metal base de la pieza como de la disolución de ataque. El reactivo de ataque óptimo para diferentes piezas hechas de la misma aleación puede variar, por lo tanto, debido a los factores que influyen en la estructura de grano: condiciones del

tratamiento térmico; grado de endurecimiento por deformación; la forma original de la aleación, es decir, hoja, placa, forjado, extrusión o fundición. Los rangos de control exactos empleados para aplicaciones más complejas son a menudo secretos comerciales.

La mayoría de grandes fabricantes aeroespaciales poseen especificaciones de fresado químico para controlar el procesamiento interno y de proveedores. Un ejemplo es la especificación proporcionada por la empresa colaboradora. En ella se recogen las especificaciones que deben cumplir todos los metales empleados por las compañías aeroespaciales.

4.3.1 Definición de las especificaciones del fresado químico

Algunas de las características del tratamiento de fresado químico están representadas en la *Figura 19*. El fresado, bajo la máscara, se lleva a cabo a la misma velocidad prácticamente en todas las direcciones, dando como resultado una curva de radio aproximadamente igual a la profundidad de corte, d . El *radio de contorno* también debe ser aproximadamente igual a la profundidad de corte. El factor de ataque es definido como el *radio de contorno*/ d . A diferencia del mecanizado convencional, la curva del radio raramente es perfecta, por lo que no debe ser medido y definido como tal.

Se define también en las especificaciones de fresado químico la zona de transición, representada en la *Figura 20*. Esta se define como la distancia entre el final del radio de contorno y el punto donde la profundidad de corte comienza a ser constante. Las partes de menor espesor pueden exceder las tolerancias del plano en esta zona. Según la norma se permite que la longitud de esa zona sea 4 veces la profundidad de corte para piezas de aleaciones de aluminio, y hasta 10 veces la profundidad de corte para otros metales. Para aplicaciones en las que la zona de transición pueda causar interferencias en piezas de acoplamiento se lleva a cabo un control por procedimientos especiales.

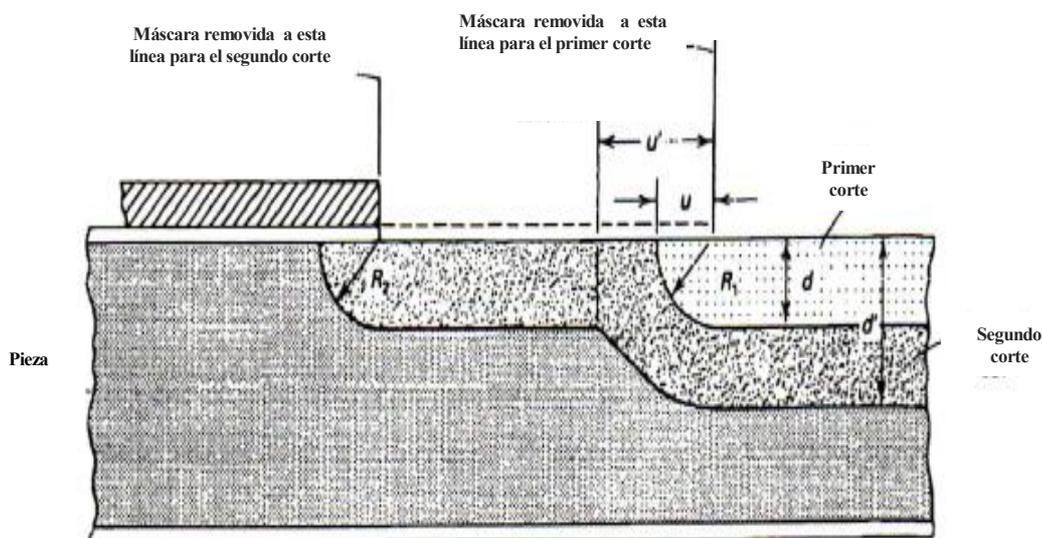


Figura 19. Pieza con dos escalones de fresado químico

La arista que se produce normalmente en la esquina de la curva del radio, protegida por la máscara, se redondea o achaflana mecánicamente en una operación posterior. En piezas con diferentes escalones de corte, la acción de fresado interviene también sobre los escalones anteriores como se observa en la *Figura 19*.

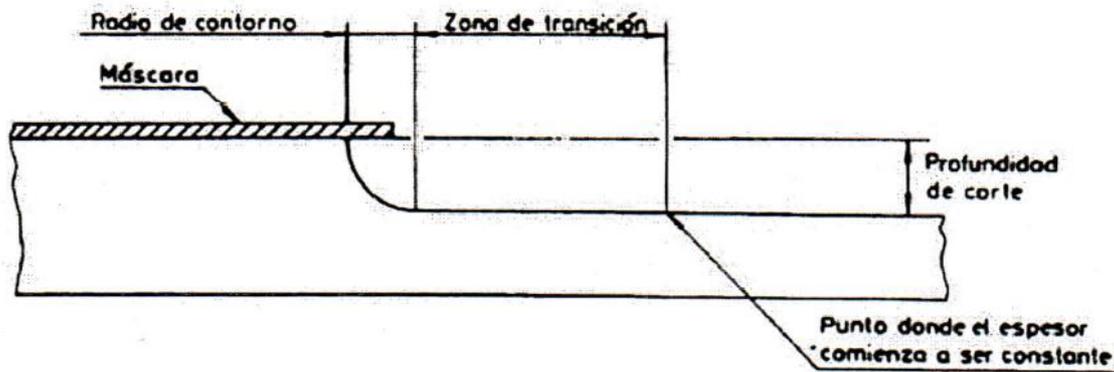


Figura 20. Características del proceso de fresado químico

4.3.2 Tolerancias y profundidad de fresado

La posición final del escalón depende de la precisión del trazado y del control del radio de contorno. Las variables que afectan a dicho radio son:

- Control de la limpieza y el enmascarado de los escalones
- Cantidad de metal disuelto en la disolución de ataque
- El factor de ataque
- La profundidad de corte
- La dirección de grano
- Posición y movimiento de la pieza durante cada escalón del fresado químico

Las tolerancias normales de los planos para ubicaciones de pasos van desde $\pm 0,4$ a $\pm 0,8$ mm para escalones por debajo de 3,2 mm, y desde $\pm 0,8$ a $\pm 1,5$ mm para cortes mayores de 3,2 mm. Existen métodos especiales que se emplean cuando se requieren tolerancias menores. Las especificaciones permiten normalmente ondulaciones en la línea de fresado químico, siempre que no se produzcan aristas agudas. Las tolerancias para las herramientas y propósitos del diseño pueden, en general, estimarse con suficiente precisión a partir de los datos acumulados de pruebas anteriores o piezas similares. La tolerancia del radio de contorno, representada en la *Figura 19* como u' , es más difícil de estimar, por lo que normalmente se emplean probetas² para calcularla.

² Espécimen diseñado con unas dimensiones y configuración tales que permiten obtener cierta información relevante acerca de las propiedades de una muestra de un determinado material, o conjunto de materiales, mediante su posterior ensayo.

No existen limitaciones en cuanto a la profundidad del fresado. Cualquier límite se basa en el coste de las compensaciones con métodos alternativos de fabricación y el valor de metal eliminado que exige el cliente. Los costes del disolvente pueden ser muy significativos cuando se realizan fresados profundos sobre piezas largas. La profundidad de corte, la mayor variación de espesor producida en el fresado y el trabajo de dimensionamiento químico se requieren para calcular las tolerancias de espesor final.

En el caso del fresado químico de piezas de aleaciones de aluminio, las tolerancias finales del plano deben permitir entre $\pm 0,05$ y $\pm 0,08$ mm más sobre el espesor final esperado tras el tratamiento. Para profundidades de corte superiores a 5 mm deben calcularse variaciones de tolerancias para el fresado químico que se realice, las cuales dependerán de la aplicación a la que este destinada la pieza tratada. Generalmente, la eliminación del metal es mucho más uniforme en piezas de aluminio que en piezas de otras aleaciones. Aunque las piezas compuestas de aleaciones más densas deberían permitir tolerancias más amplias desde el punto de vista de la productividad, las consideraciones de peso a menudo determinan tolerancias de espesor aún más estrechas que las del aluminio. La calibración química de la disolución de ataque es, por lo tanto, un requisito frecuente para las piezas de acero y superaleaciones.

4.3.3 Defectos del proceso

Sobre la superficie fresada no deben existir evidencias de arañazos o picaduras. Se consideran admisibles aquellos arañazos que, como consecuencia del fresado químico, se haya reducido el carácter anguloso de los mismos hasta una suave depresión redondeada, cuya profundidad se encuentre dentro de las tolerancias dimensionales del plano, tal y como se muestra en la *Figura 21*.

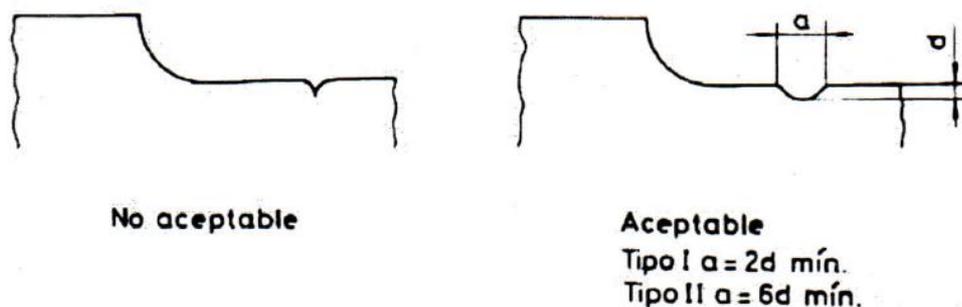


Figura 21. Condición para aceptar una pieza con defectos

Las superficies deberán ser, por lo tanto, uniformes y esencialmente libres de defectos, tales como los que se mencionan a continuación y aparecen representados en la *Figura 22*:

- **Canal:** formación de un canal o una ranura en la base del radio de curvatura. Puede aceptarse si se corrige mecánicamente con todas las dimensiones dentro del plano.
- **Ondulación por gas:** ranuras verticales o canales en la superficie atacada, resultado de las burbujas de gas que salen de la superficie de la pieza. Aceptable si se corrige mecánicamente con todas las dimensiones dentro del plano.

- **Laguna:** patrón gradual de adelgazamiento en toda la superficie fresada. Aceptable si todas las dimensiones están dentro del plano (se cumplen todas las tolerancias especificadas).
- **Picaduras:** depresiones localizadas en la superficie atacada. Es un defecto no aceptable a menos que los hoyos se mezclen mecánicamente, con todos los espesores restantes dentro de las tolerancias del plano.
- **Voladizos:** presencia de metal sobresaliente en el borde superior de la curvatura del radio. Generalmente, se requiere un radio de 0,05 mm en el borde superior para aviones de combate.
- **Islas:** áreas locales elevadas que resultan del enmascaramiento u otro material que queda en la superficie, lo que evita que se produzca el ataque químico. Debe mezclarse mecánicamente a ras del área circundante, manteniendo las tolerancias del plano.
- **Filas:** formación de una cresta en la base de la curvatura, que puede ser eliminada mecánicamente, manteniendo todas las dimensiones del plano.
- **Muecas:** muescas en la base de la curvatura, producto de un trazado demasiado profundo. Aceptable si el fresado suaviza la depresión, con un ancho mayor que el doble de la profundidad, y el espesor está dentro de las tolerancias del plano.

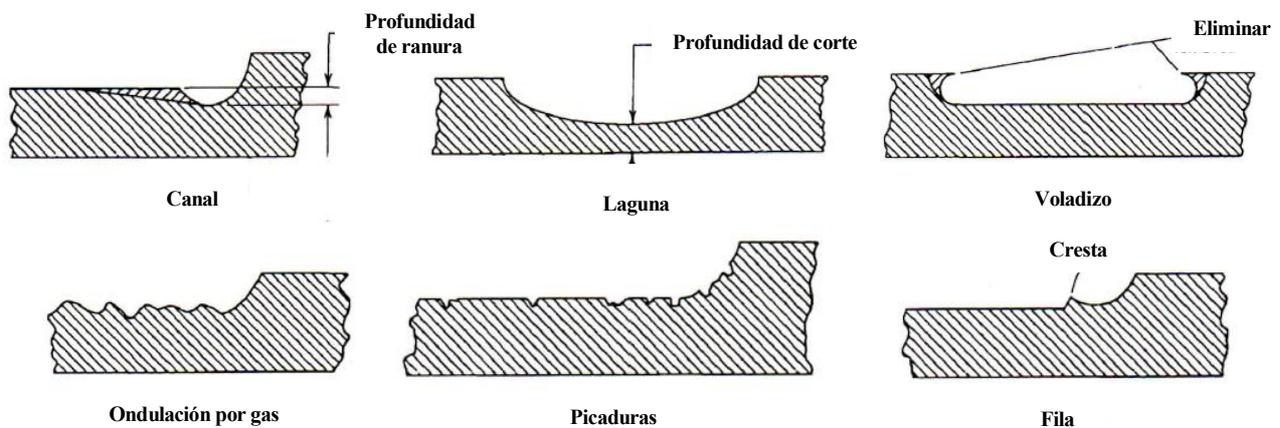


Figura 22. Posibles defectos superficiales tras el fresaado químico

4.3.4 Acabado de la superficie

En el fresaado químico, el material expuesto es disuelto en una disolución alcalina o ácida. A nivel microscópico, el ataque químico tiene lugar tanto en superficies individuales del grano como en los límites del grano, generalmente con diferentes velocidades de reacción. El mecanismo de fresaado puede observarse en la *Figura 23*.

El tamaño de grano fino y estructura homogénea son necesarios si se quiere conseguir un acabado superficial fino y un aspecto uniforme en la pieza. El titanio y el magnesio, fresaados químicamente con una disolución de ataque estándar, produce una eliminación de metal uniforme, dando lugar a superficies muy lisas

y suaves. La mayoría de piezas fundidas y extrusiones de la serie 2000 de aluminio son ejemplos de metales con una estructura de grano anormalmente grande y desigual, por lo que es difícil conseguir piezas con una buena superficie final.

En función de la aplicación final, se pueden emplear disoluciones de ataque que producen una superficie final tras el fresado químico extremadamente suave. Sin embargo, esa gran uniformidad de la superficie se obtiene a expensas de una reducción en la eliminación de metal.

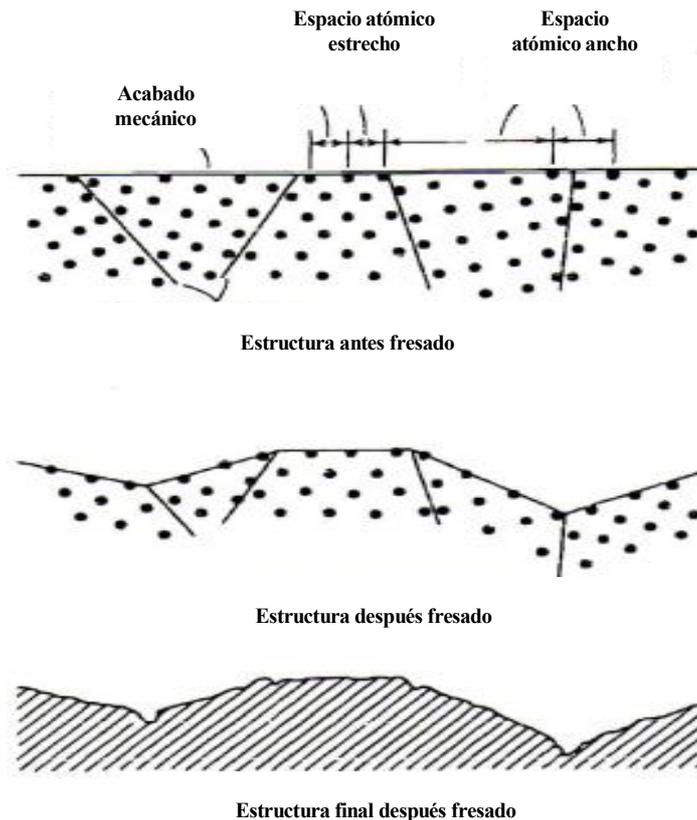


Figura 23. Efecto microscópico de la acción del fresado químico sobre la superficie de la pieza

4.3.5 Ataque intergranular y selectivo

Tanto el ataque intergranular como el ataque selectivo son problemas inherentes en el fresado de metales, pero se minimizan a través de un buen control de ataque. La mayoría de las especificaciones de fresado químico permiten que existan condiciones menores. En la norma se permiten, por ejemplo, 0,008 mm de límite de grano para titanio y aleaciones de hierro, y 0,013 mm en los extremos del grano. En aleaciones de níquel y cobalto, el límite aceptable es 0,013 mm en los límites de grano y 0,025 mm en los extremos del grano. Los límites aceptables para el aluminio son significativamente grandes. La supervisión se lleva a cabo mediante el examen microscópico de probetas.

4.4 Propiedades mecánicas de piezas fresadas químicamente

Con la excepción de posibles cambios en la resistencia a la fatiga debido a cambios en la textura de la superficie y el efecto de absorción de hidrógeno en algunas aleaciones, normalmente las propiedades mecánicas de las piezas fresadas químicamente no se ven afectadas. No se inducen tensiones en el proceso, ya que no hay deformación mecánica ni exposición a altas temperaturas.

Cuando las capas superficiales tienen diferentes propiedades mecánicas a las del metal base, su eliminación si produce una variación en el promedio de las propiedades mecánicas de la pieza terminada. El fresado químico es muy usado en estas situaciones, por lo que con frecuencia cambia las propiedades mecánicas del metal base al eliminar el material de la superficie. Condiciones perjudiciales, como descarbonización de la capa superficial y la estructura refundida pueden ser eliminadas fácilmente con el tratamiento de fresado químico, resultando en una mejora de las propiedades finales de la pieza.

Desde 1975, la compañía Boeing ha realizado un gran número de estudios de fatiga sobre piezas de aleaciones de aluminio a las que se realiza un tratamiento de fresado químico con un disolvente que contenga TEA, pero estos no están disponibles públicamente. Sin embargo, estudios anteriores sobre lo mismo indican generalmente una pérdida de propiedades de fatiga.

El deterioro de la resistencia a la fatiga puede mejorarse impartiendo una tensión de compresión uniforme a la superficie fresada químicamente mediante granallado, chorreo húmedo u otras técnicas adecuadas. Además, algunas condiciones adversas de la superficie pueden ser eliminadas en la operación final de pulido mecánico.

4.4.1 Absorción de hidrógeno

El ácido fluorhídrico es uno de los activos químicos empleados para disolver titanio en el fresado químico, y su reacción provoca la generación de hidrógeno en la superficie de la pieza. Este es empleado como disolvente para aleaciones alfa y algunos tipos de aleaciones alfa-beta. Sin embargo, como el hidrógeno tiende a ser absorbido en la estructura del metal si la fase alfa está presente, se añade normalmente ácido nítrico a la disolución de ataque para contener esta tendencia.

En general, se observa que piezas de titanio a las que se les realiza el mismo tratamiento térmico y poseen el mismo espesor absorben la misma cantidad de hidrógeno. Las variables del tren de laminación y los ciclos térmicos utilizados en la conformación en caliente, la formación superplástica y la estabilización beta pueden afectar a la fase beta y, por lo tanto, pueden afectar en gran medida la absorción de hidrógeno. La temperatura del disolvente y el factor de ataque afectan también el ratio de absorción de hidrógeno.

Las especificaciones del proceso de fresado químico definen normalmente un máximo contenido permisible de hidrógeno en la pieza o un máximo de hidrógeno consumido. El último control requiere una medida del hidrógeno antes y después del proceso, y supone que los contenidos inicial y final están uniformemente dispersos según el grosor de la pieza. Sin embargo, el mecanismo de absorción se considera un proceso superficial con una profundidad de 0,25 a 0,5 mm. Como resultado, el control del disolvente es mucho

más crítico en piezas de poco espesor, sobre todo en piezas delgadas que deben ser fresadas por ambas caras.

4.5 Aplicaciones

Existen diferentes aplicaciones para el fresado químico, aunque es utilizado principalmente en la industria aeronáutica para la reducción de peso, ya sea de grandes piezas, paneles o piezas de extrusión o forja. Su elección como proceso se centra en la capacidad de producir cavidades superficiales de espesores variables manteniendo a su vez costillas interiores. Principalmente sustituye al fresado mecánico en aquellos casos en los que sería más costoso mecanizar la pieza ya sea por su tamaño o por la difícil accesibilidad a determinados puntos de las piezas. Es una operación realizada normalmente por empresas subcontratadas especializadas en el proceso. Pese a que se puede emplear en múltiples materiales metálicos, las aleaciones de aluminio son las más propensas a ser tratadas de esta forma.

Además de la reducción de peso, puede utilizarse para impresión de circuitos electrónicos, impresión de placas, realización de paneles decorativos, conformado de piezas complejas como estructuras de panel de abeja, cavidades escalonadas o contornos irregulares. Así como para eliminar la capa de fase alfa del titanio, generada en las operaciones de forja y conformado superplástico, eliminar la capa descarburizada de las aleaciones de acero en forja, eliminar de una superficie fina de forja o moldeo antes de realizar una inspección por penetración debajo de la superficie. También sirve para eliminar la capa de “recast” de las piezas mecanizadas por EDM³ y para eliminar la rebaba de las operaciones de mecanizado convencional en formas complejas.

4.6 Ventajas e inconvenientes del proceso

El proceso explicado hasta ahora presenta una serie de ventajas e inconvenientes que promueven o limitan su empleo a nivel industrial, en función de las necesidades de producción.

Las principales ventajas que presenta el fresado químico son las siguientes:

- La eliminación de metal está completamente libre de tensiones residuales.
- Formas complejas y áreas profundas pueden ser fresadas químicamente de manera uniforme.
- El empleo del fresado químico después de la formación de la pieza a menudo permite un método de formación más simple.
- Secciones extremadamente delgadas pueden ser fresadas químicamente.
- La dureza y la fragilidad del metal no son factores.
- Las dimensiones de la pieza están limitadas únicamente por el tamaño de los baños de fresado.

³ Mecanizado por Descarga Eléctrica, en inglés Electrical Discharge Machining

- Secciones cónicas pueden fresarse químicamente.
- La mayoría de aleaciones y formas pueden ser fresadas mediante este proceso.
- Acabados superficiales finos son producidos en una gran cantidad de aleaciones.
- Pueden alcanzarse tolerancias extremadamente pequeñas, independientemente de la variación inicial de espesor, a través de métodos de dimensionamiento químico.
- El coste de las herramientas y el mantenimiento correspondiente de las mismas es bajo.
- Cambios de diseño pueden ser aplicados rápidamente realizando modificaciones en los patrones utilizados en el trazado.
- Los recortes y la periferia de las partes difíciles de mecanizar se pueden recortar en bruto grabándolos en el meal a un costo adicional mínimo.

Los principales inconvenientes del proceso son los siguientes:

- La curvatura del radio es aproximadamente igual a la profundidad de corte.
- Profundidades de corte extremadamente grandes no son económicas.
- Se requiere una estructura metálica homogénea obtener buenos resultados.
- La textura de la superficie de una pieza fresada químicamente depende en gran medida de la estructura de grano del metal.
- Soldaduras y fundiciones producen a menudo superficies picadas al ser fresadas químicamente.
- Los costes del proceso dependen de la calidad de la pieza trabajada (variación de espesor, presencia de arañazos superficiales y corrosión).
- La superficie puede resultar algo dañada por el proceso, por lo que es requerido un pulido mecánico.
- Tolerancias laterales más cercanas de $\pm 0,8$ mm son a menudo difíciles de alcanzar.
- No es práctico hacer surcos de ancho inferior al doble de la profundidad.
- Aleaciones alfa-beta de titanio a menudo requieren disolventes especiales para limitar el hidrógeno absorbido. Aleaciones con fase beta son extremadamente difíciles de controlar.
- Necesidad de verificar el correcto control del proceso aumenta el coste.
- Los productos químicos peligrosos empleados en el proceso presentan problemas de seguridad, eliminación de residuos y contaminación atmosférica.

5 VARIABLES A TENER EN CUENTA EN EL CÁLCULO DEL COSTE

En el presente capítulo se llevará a cabo una recopilación de las distintas variables a tener en cuenta a la hora del cálculo del coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica, así como un desglose de los diferentes factores que afectarán directa o indirectamente al precio de la pieza tratada.

Lo primero que ha de tenerse en cuenta es que, a diferencia de otros procedimientos industriales como el tratamiento térmico o el anodizado, los cuales dependen únicamente del área de la pieza, el proceso de fresado químico presenta una gran dependencia de la tipología de la pieza, siendo afectado por un gran número de variables. Todas esas variables han sido tenidas en cuenta en el desarrollo de la fórmula para conseguir un coste del fresado químico de la pieza lo más ajustado posible. Dichas variables son:

- **Superficie de la pieza.** Cuanto mayor sea la superficie de la pieza mayor será el producto enmascarante a aplicar, más difícil de manejar y más espacio ocupará en los bastidores de carga de los baños.
- **Área a fresar.** Un área grande a fresar implica una cantidad de aluminio aportado al baño grande y un mayor tiempo de trazado y pelado de la máscara.
- **Espesor de fresado.** Un espesor elevado provocará una mayor aportación de aluminio al baño de fresado.
- **Número de áreas a fresar.** Una pieza que posea un elevado número de piscinas a fresar implicará un mayor tiempo de trazado y pelado.
- **Morfología del área a fresar.** Al igual que el caso anterior, la complejidad de la forma del área a fresar puede aumentar el tiempo que emplea el operario encargado de la operación en trazar y pelar las piscinas.
- **Coste horario.** Esta variable está ligada exclusivamente a la política de costes de la empresa, ya que estará definida en función de sus costes internos.

La presencia de tantas variables dificulta en gran medida el cálculo del coste asociado al tratamiento de fresado químico, ya que hay que tener en cuenta la gran casuística existente. Por ejemplo, pueden tenerse dos piezas con el mismo número de piscinas a fresar, pero con espesores de ataque muy diferentes, o con el mismo número de áreas a fresar pero con un tamaño de piscinas distinto, haciendo que el área a fresar de una sea inferior a la otra, etc. Todo esto da lugar a que un pequeño cambio en una variable proporciona costes bien distintos. Por esta razón se hace necesario el desarrollo de un procedimiento de cálculo que tenga en cuenta el mayor número de casos posibles.

A continuación se explica someramente la sistemática conceptual utilizada atendiendo a la estructura de costes elegida. De primeras, conviene recordar que un coste es la suma de los gastos necesarios para obtener un trabajo/servicio (consumo). Es decir, si se proyecta aquella parte del gasto consumido para la obtención de un servicio o un producto ese es el coste del servicio o producto. Por otra parte, atendiendo a la estructura de costes elegida, aquella que tiene en cuenta el objeto de su imputación, pueden distinguirse entre costes directos y costes no directos.

A. **Costes directos.** Estos costes se asocian con el producto de una forma muy clara, sin necesidad de ningún tipo de reparto. Se producen cuando las empresas establecen mecanismos de control para conocer con exactitud la cantidad de coste que va al producto, servicio o sección. Dentro de estos, los más habituales son:

- a.1. *Coste de Materias Primas:* son los costes de los materiales que se han consumido para fabricar el producto. Pueden extraerse directamente de la naturaleza o haber sido elaborados previamente por otra empresa.
- a.2. *Coste de Mano de Obra Directa (MOD):* es el coste del tiempo incurrido por las personas relacionadas directamente con el producto debido a que se encargan de su elaboración. Las horas empleadas en el producto podemos medirlas a través de partes de trabajo o tarjetas de tiempos.

B. **Costes no directos.** Aunque la mayoría de los autores emplean de forma generalizada el concepto de "indirecto", los costes no directos se pueden dividir en:

- *Semidirectos:* son aquellos que no pueden ser aplicados directamente a un producto, pero sí pueden llevarse directamente a un centro de coste.
- *Indirectos:* no son directos al producto ni tampoco al centro. Son comunes a dos o más productos o centros, por lo que deberemos elegir algún criterio de reparto.

En este trabajo se analizan con detenimiento los costes directos del proceso de fresado químico, estudiando el consumo de materiales, consumibles, mano de obra, etc. Los costes no directos se encuentran implícitos en el coste horario proporcionado por la empresa, por lo que no era parte del problema planteado, y no ha sido por tanto necesario abordar su estudio detallado. Basta decir aquí que a los costes salariales, incluyendo los correspondientes impuestos de seguros sociales, la empresa sumo la totalidad de costes indirectos en los que se incurre en un año promedio (vestuario, seguros, alquileres, PRL, EPIs, parte del consumo energético, costes de representación, servicios de limpieza, servicios informáticos, mano de obra indirecta, etc), y los dividió entre el número total de horas.

Por tanto, el coste horario fue un dato dado por la empresa y el presente trabajo consistió entonces en el análisis paso a paso de los costes directos relacionados con el fresado químico de aleaciones de aluminio.

Para el presente trabajo se han considerado, entre otros, los siguientes costes directos:

- *Mano de obra.* El coste de la mano de obra, como ya se ha comentado, es un dato proporcionado por la empresa, por lo que en este sentido el trabajo se ha limitado a analizar y cuantificar los tiempos de mano de obra directa necesarios para realizar las operaciones.
- *Productos químicos para la formación y recargas de baños.* Es un aspecto fundamental ya que representa en este caso un porcentaje importante del coste de este proceso.
- *Consumo energético.* Se centra el trabajo en el consumo del gasoil al ser, con bastante diferencia, el mayor consumo energético a tener en cuenta en este proceso.
- *Productos químicos para el enmascaramiento de las piezas.* Se hace mención aparte de los productos químicos anteriores debido a su elevado coste en el proceso de fresado químico.
- *Materia prima.* Sería lo normal en cualquier apartado de costes directos. Sin embargo, no se imputa en este caso porque en la sección de fresado químico la materia prima no es un coste, sino que fue un coste ya contabilizado en una sección anterior del proceso de fabricación. Para incluir este coste en la expresión de la fórmula que se derivará para el fresado químico, habría que partir del coste del producto semielaborado, como la materia prima de la sección de fresado químico, hasta la fase de entrada en la sección de fresado químico, y sumar a este coste los distintos costes directos incurridos en esta sección. De esto modo a la salida de la sección de fresado químico tendríamos el coste del producto semielaborado y por diferencia con el coste del producto semielaborado de entrada, tendríamos el coste de la operación de fresado químico. Haber operado así no supondría ninguna dificultad conceptual, pero no ha sido el problema planteado y por tanto se optó por partir de una materia prima de valor cero en esta sección.

Atendiendo a la estructura de costes elegida se distinguirán entre costes directos, costes indirectos y costes semidirectos. A continuación se desglosarán los costes tenidos en cuenta para el desarrollo del procedimiento de cálculo en función de la estructura mencionada anteriormente.

- **Costes indirectos**

- Ensayos y análisis químicos en laboratorios externos
- Mantenimiento periódico preventivo de la zona de los baños
- Una larga lista de costes indirectos de la empresa que se han imputado a este proceso, entre ellos: alquileres, seguros, Prevención de Riesgos Laborales, asesorías, Equipos de Protección Individual, servicios informáticos, servicios de limpieza, etc.

- **Semidirectos**

- Luz
- Agua
- Etc

- **Directos**

- Mano de obra. El coste de la mano de obra se calculará en base del coste horario proporcionado por la empresa.
- Productos químicos para la formación y recargas de baños
- Productos químicos para el enmascaramiento de las piezas
- Materia prima (Sin embargo, no se imputa en esta sección porque se tiene en cuenta en procesos anteriores al fresado químico)

6 DESARROLLO DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DEL TRATAMIENTO DE PIEZAS ALUMINIO FRESADAS QUÍMICAMENTE

6.1 Desglose de los costes asociados al fresado químico

A continuación se llevará a cabo una representación de las distintas etapas del tratamiento de fresado químico de piezas de aleaciones aluminio y los costes asociados a dichas etapas:

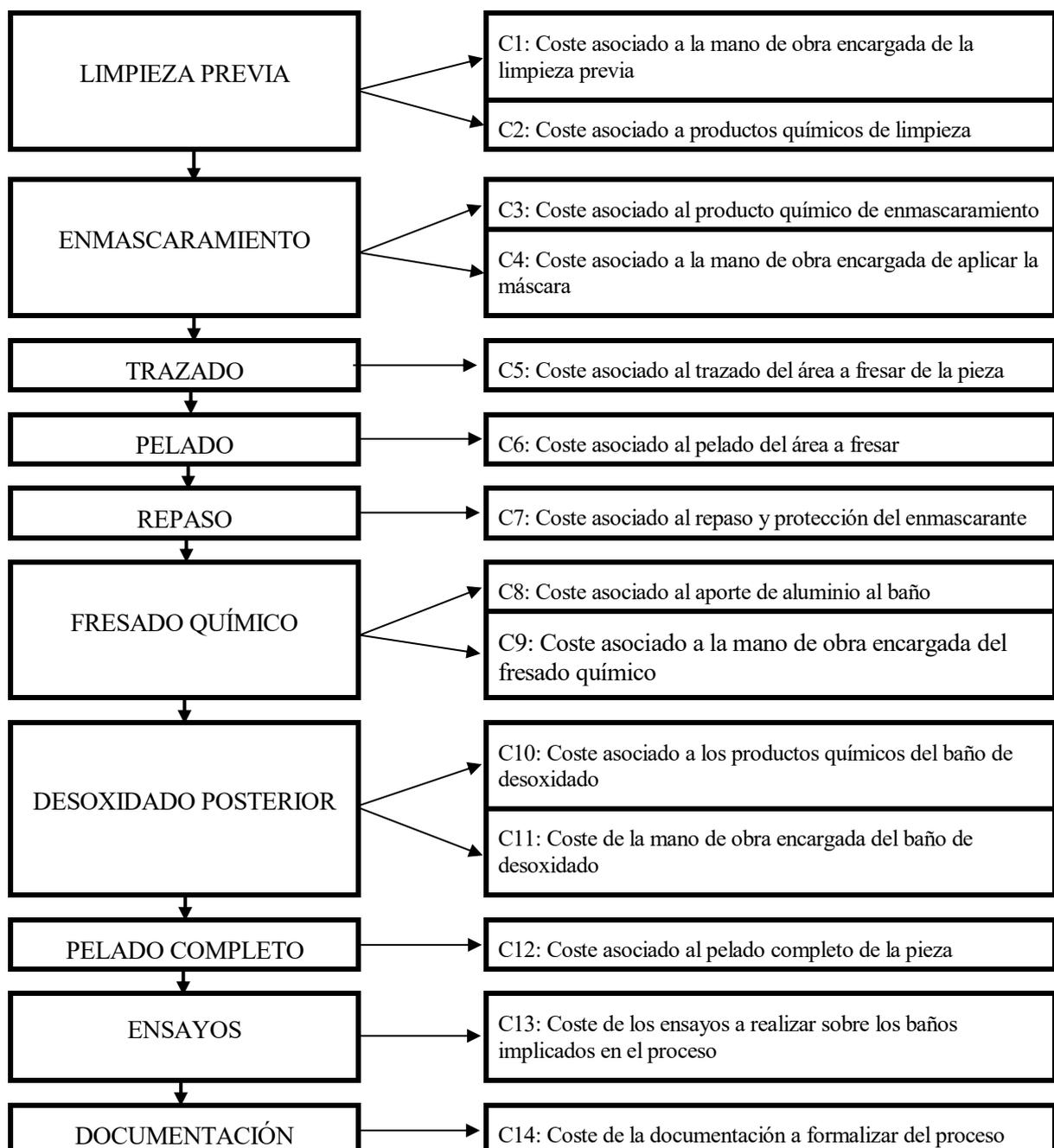


Figura 24. Desglose de los costes asociados al tratamiento de fresado químico

En la *Figura 24*, representada en la página anterior, se observa el desglose de costes que se ha realizado a partir de los distintos procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento de fresado químico de piezas de aleaciones de aluminio. A partir de dichos costes se llevará a cabo el objeto del presente proyecto, el desarrollo de un método de cálculo del coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica. En el presente capítulo se analizará cada uno de los costes representados en la *Figura 24* por separado, para a continuación conseguir una fórmula que los englobe todos. Dicha fórmula tendrá la siguiente estructura:

$$\text{Coste Total} = \text{Coste Total (Área de la pieza, Área fresada, Longitud de trazado, Espesor de fresado químico, Coste horario)} = \sum_i^{14} C_i \quad (1)$$

Cabe destacar que la fórmula anterior es una fórmula general, puesto que en el presente proyecto el “*Coste horario*” no es una variable, ha sido proporcionado por la empresa colaboradora donde se llevaron a cabo las prácticas.

Aunque la fórmula final obtenida esté referida específicamente a piezas de aleaciones de aluminio fresadas químicamente, el método seguido para la evaluación de los costes asociados al tratamiento será el mismo independientemente del material base de las piezas que vayan a ser tratadas.

A continuación se procederá a analizar cada uno de los costes obtenidos a partir de los procesos realizados durante el tratamiento de fresado químico.

6.2 Costes asociados a la limpieza previa

Como ya se comentó en el Capítulo 4, la limpieza previa al enmascarado engloba un conjunto de tratamientos que deben realizarse sobre la pieza antes de que sobre esta sea aplicada la máscara, con el fin de evitar que durante el fresado químico esta se despegue o se mueva, provocando daños irreversibles en la pieza. Para analizar los costes asociados al primer paso del tratamiento de fresado químico, la empresa colaboradora proporcionó la norma de uno de los principales fabricantes del sector, a partir de la cual se han obtenido la duración de cada una de las etapas de limpieza previa a realizar y los productos que pueden emplearse.

De dicha norma se obtiene la *Tabla 6*, la cual contiene cada una de las etapas que componen la limpieza previa de una pieza que va a ser sometida a un tratamiento de fresado químico. Contiene también los tiempos más desfavorables de cada uno de las etapas mencionadas, lo que ayudará más adelante a obtener el coste del caso más desfavorable.

Tabla 6. Etapas que componen la limpieza previa de una pieza.

Procedimientos	Tiempo (min)
Desengrase alcalino	10
Enjuague	3
Limpieza alcalina	15

Procedimientos	Tiempo (min)
Enjuague	3
Prueba rotura película de agua	2
Decapado ácido	10
Enjuague	3
Prueba rotura película de agua	2
TOTAL	48

Para obtener el *CI: Coste asociado a la mano de obra encargada de la limpieza previa* mencionado en la *Figura 24* se ha empleado la *Tabla 6*, de la que se ha calculado el tiempo total empleado en la limpieza previa de la pieza. Teniendo en cuenta de que se trata de una secuencia de etapas ininterrumpida, y tomando los valores temporales más desfavorables en cada una de dichas etapas, se obtuvo una duración máxima de 48 minutos. Una vez conocido el tiempo total empleado en los procedimientos de limpieza, se procedió a buscar la forma para imputar eficazmente dicho tiempo en el coste de la pieza de estudio únicamente, dado que en esos 48 minutos se lleva a cabo de forma simultánea la limpieza de todas las piezas que componen la carga. Esto se llevó a cabo a partir del porcentaje de superficie que la pieza tratada ocupa en el bastidor de carga empleado para sumergir la pieza en los baños de limpieza. Teniendo en cuenta que la limpieza es llevada a cabo en ambas caras, se consideraron también las dos caras del bastidor de carga.



Figura 25 . Bastidor de carga de la empresa colaboradora.

La definición del área del bastidor de carga llevada a cabo se representa en la *Figura 26*. Se definió como área útil del bastidor aquella conformada por sus dos caras.

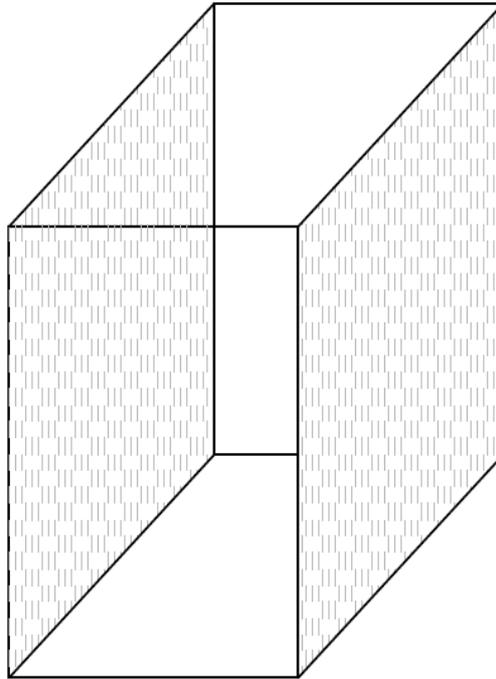
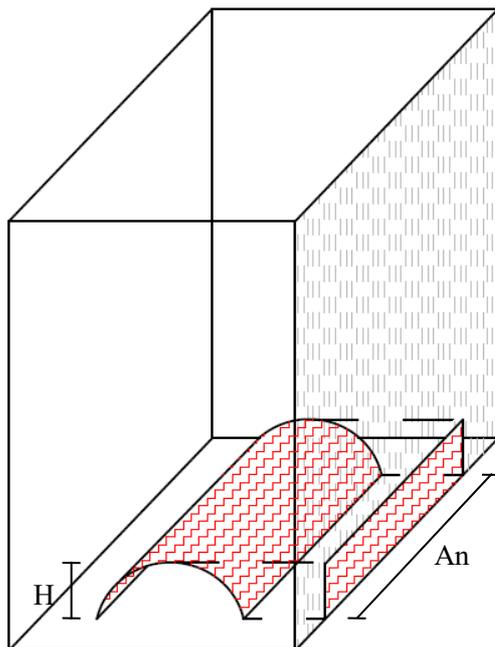


Figura 26. Área útil total del bastidor de carga

Al ser definida de esta manera se hizo necesario tener en cuenta otra magnitud, la cual es proporcionada en los planos de las piezas: la altura de la pieza proyectada sobre el bastidor de carga. Por lo tanto, el área que una pieza ocupa en el bastidor de carga será función del ancho de la pieza y de su altura proyectada sobre el mismo bastidor. En la *Figura 27* se muestra un ejemplo de área de bastidor de carga ocupada por una pieza curvada.



Donde:

- **H** es la altura de la pieza proyectada sobre el bastidor de carga.
- **An** es el ancho de la pieza.

Figura 27. Área ocupada por la pieza en el bastidor de carga

Para definir completamente C1 es necesario tener en cuenta también el manejo de la pieza que tiene que llevar a cabo el operario durante el proceso de limpieza: manipulación de la pieza durante la colocación y la descarga de la pieza en los bastidores de carga. Este parámetro fue obtenido a partir de la toma de datos en el taller. Se observó el tiempo que dedicaban los operarios en colgar y descolgar varias piezas de los bastidores y se calculó una media aproximada de dichos tiempos en función de los m² de pieza. Se obtuvo para el caso de la empresa colaboradora un tiempo de 7 min/m². Para conocer el coste del manejo de una pieza cualquiera deberá multiplicarse el parámetro anterior por la superficie de la pieza tratada y el coste horario del proceso.

El C1 puede calcularse entonces a partir de la siguiente expresión:

$$C1[€] = CH \left[\frac{€}{h} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{h}{min} \right] \times \left(A \left[m^2 \right] \times 7 \left[\frac{min}{m^2} \right] + \frac{2 \times A_{protectada} \left[m^2 \right] \times 48 \left[min \right]}{20 \left[m^2 \right]} \right) \quad (2)$$

Donde:

- **CH** es el coste horario de la empresa.
- **A** es la superficie de una cara de la pieza en m².
- **20 m²** es la superficie útil del bastidor de carga de la empresa colaboradora teniendo en cuenta ambas caras.

El cálculo de C2: *Coste asociado a productos químicos de limpieza* presentó una mayor complejidad. Para el desarrollo del método ideado, era necesario conocer la vida útil media de los baños de limpieza, los productos empleados en dichos baños, los costes de formación y el coste de las recargas realizadas a lo largo de la vida del baño, el reparto de la carga de trabajo en los baños de limpieza y el número de bañadas de fresado químico que se llevan a cabo mensualmente.

Se solicitó a la empresa colaboradora información sobre los productos empleados en cada uno de los baños de limpieza, así como los costes de formación y recarga. Hay que tener en cuenta que la formación de los baños de limpieza no se llevan a cabo con la misma frecuencia que los baños de fresado. Los baños de limpieza presentan una vida útil media de 5 años (este es el tiempo que se ha tenido en cuenta para el presente proyecto, descartando la posibilidad de que, por una posible contaminación, el baño dure menos de lo estimado, ya que no se cree conveniente imputar en el precio de la pieza un fallo debido al mantenimiento preventivo de los baños), mientras que los de fresado químico apenas llegan a los 2 meses de duración. Las recargas son realizadas en función de las capacidades de limpieza del baño, estando dichas capacidades normalizadas.

En la *Tabla 7* se representan los datos proporcionados por la empresa colaboradora:

Tabla 7. Productos empleados para la limpieza previa de la pieza y costes de formación y recarga de los baños.

Etapa	Producto	Coste de formación (Cada 5 años) [€]	Coste de las recargas (Anual) [€]
Desengrase alcalino	TURCO 6849	14.626,5	2.900,0
Limpieza alcalina	TURCO 4215	4.800,0	448,0
Decapado ácido	SMUTGO NC	15.925,0	1.565,0
TOTAL [€]		35.351,5	4.913,0

Ahora bien, hay que tener en cuenta que los baños de limpieza no se emplean exclusivamente para el fresado químico, sino que hay otros procesos industriales que requieren de los mismos baños, por lo que no se puede imputar el coste de los productos químicos mencionados anteriormente únicamente al tratamiento de fresado químico. En este dicho tratamiento, la limpieza se lleva a cabo sólo antes del enmascaramiento de la pieza. Por ello, se solicitó a la empresa colaboradora un estudio de la carga de los baños de limpieza, el cual se realizó a partir de los registros históricos del último año. De ese estudio se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 8. Reparto de la carga de los baños de limpieza.

Procedimiento	Porcentaje (%)
Anodizado	20
Alodine	5
Enmascarado	25
Inspección penetrante	50

De los datos arrojados por el estudio realizado por la empresa colaboradora, se deduce que sólo puede imputarse el 25% del coste de los productos químicos de limpieza al tratamiento de fresado químico.

Con los datos recopilados hasta el momento se procede a realizar una fórmula para el cálculo del C2. Para ello se ideó un método basado en el coste de limpiar el m² de pieza.

$$\frac{\text{Coste limpieza fresado químico al mes } \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right]}{m^2 \text{ de superficie limpiada antes de fresado al mes } \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right]} \quad (3)$$

Para calcular el coste de limpieza del fresado químico al mes se suman los costes de formación y los de recarga imputados únicamente a la carga de enmascarado.

$$\text{Costes formación mes} = \frac{35.351,5 [\text{€ cada 5 años}]}{5 [\text{años}]} \times \frac{1}{12} \left[\frac{\text{año}}{\text{meses}} \right] \times 0,25 = \mathbf{147,3 \frac{\text{€}}{\text{mes}}} \quad (4)$$

$$\text{Costes recargas mes} = \frac{4.913}{12} \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] \times 0,25 = \mathbf{102,4 \frac{\text{€}}{\text{mes}}} \quad (5)$$

Por lo tanto se tiene:

$$\text{Coste limpieza fresado químico mes} = 147,3 + 102,4 = \mathbf{249,7 \frac{\text{€}}{\text{mes}}} \quad (6)$$

Para el cálculo de los m² de superficie limpiada antes del fresado químico al mes fue necesario acudir a los registros históricos de la empresa colaboradora para determinar una media de las bañadas de fresado químico mensuales que se llevan a cabo, arrojando un resultado de 20 bañadas/mes. Con este dato y la superficie útil del bastidor de carga, teniendo en cuenta ambas caras del mismo, se llega al siguiente resultado:

$$\begin{aligned} m^2 \text{ de superficie limpiada antes de fresado al mes} &= 20 \left[\frac{m^2}{\text{bañada}} \right] \times 20 \left[\frac{\text{bañadas}}{\text{mes}} \right] \\ &= \mathbf{400 \frac{m^2}{\text{mes}} \text{ se limpian para fresado químico}} \end{aligned}$$

Con ambos resultados se dispone de un coste por m² de área fresada, por lo que ahora es necesario referenciarlo a una pieza cualquiera. Para eso únicamente hay que multiplicar ese coste por m² por la superficie total de la pieza a tratar, obteniendo así C2:

$$C2[\text{€}] = \frac{249,7 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right]}{400 \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right]} \times 2 \times A [m^2] = \mathbf{1,25 \times A} \quad (7)$$

Hay que destacar que el cálculo de C2 se ha llevado a cabo en función de la carga actual de trabajo de la empresa colaboradora. Si la carga de trabajo varía, aumenta por ejemplo, evidentemente el coste de la limpieza de fresado químico al mes aumentaría, al igual que los m² de superficie limpiada antes del fresado químico también lo harán, manteniéndose prácticamente constante C2. Sin embargo, esto será cierto únicamente si el reparto de la carga de los baños de limpieza se sigue manteniendo constante. Si este varía, se reduce por ejemplo, y la carga total de trabajo de trabajo aumenta, aumentan los m² de superficie limpiada antes del fresado químico, mientras que el coste de la limpieza de fresado químico al mes se vería reducido. Por lo tanto, que la carga de trabajo afecte en mayor o menor medida al cálculo de C2 dependerá del reparto de la carga de trabajo de los baños de limpieza.

6.3 Costes asociado al enmascaramiento de la pieza

El enmascaramiento, como ya se explicó en mayor profundidad en el Capítulo 4 “*Fresado Químico*”, es el proceso en el cual se aplica una capa de material resistente a las sustancias abrasivas sobre la pieza con el fin de evitar que sean grabadas zonas que no deben serlo.

El producto empleado en la empresa colaboradora y que por tanto ha sido objeto de este estudio es Masking D, del fabricante TURCO, el cual es adquirido en bidones de 200 L. Este es el único producto químico empleado en el proceso de enmascaramiento, por lo que *C3: Coste asociado al producto químico de enmascaramiento* dependerá sólo de la cantidad de Masking D aplicado en cada pieza. La ficha técnica del Masking D se adjunta en el apartado ANEXO.

Para calcular la cantidad de enmascarante aplicado sobre la pieza de estudio se llevó a cabo un control el número de piezas enmascaradas por el operario con un único bidón, así como las dimensiones de dichas piezas. Fueron analizados 4 bidones en total, cuyos datos, mostrados en la *Tabla 9*, se emplearon para comparar la cantidad de enmascarante que ha llegado a cada pieza realmente con los que teóricamente deberían haber llegado (200 L), es decir, permitirán calcular la cantidad de enmascarante que es desaprovechado en cada bidón.



Figura 28. Bidón de producto enmascarante Masking D.

Se tuvo en cuenta también para el cálculo de *C3* que el volumen final de enmascarante adherido a las piezas no es la cantidad total de enmascarante que llega a las piezas en un primer momento. Esto se dedujo tras la revisión de las propiedades del enmascarante Masking D, el cual se observó que presenta un contenido en sólidos del 21,5%, lo cual quiere decir que, una vez aplicada la máscara sobre la pieza, el 78,5% del producto que llega a esta se evapora al ser contenido en volátiles.

Tabla 9. Datos obtenidos durante el enmascaramiento de las piezas con 4 bidones distintos.

Bidón	Nº de piezas imprimadas	Superficie (m ²)
1	4	1,63 x 2,05
	4	4,53 x 0,85
	2	3,72 x 1,48
	2	3,9 x 1,48
	4	3,72 x 1,48
2	4	1,95 x 0,62
	12	1,95 x 0,62
	12	1,8 x 0,9
	8	3,8 x 1,48
3	11	1,58 x 0,69
	13	1,58 x 0,69
	12	1,37 x 0,48
	6	1,5 x 1
	5	0,6 x 0,63
	2	1,3 x 0,6
	10	0,93 x 0,84
4	6	1,18 x 0,76
	4	1,23 x 0,5
	12	2 x 0,64
	4	3,81 x 1,49
	5	3,81 x 1,49

Teniendo en cuenta lo anterior, se ideó el siguiente procedimiento para el cálculo de C3:

1. Se calcula el volumen de enmascarante que se aplica sobre la pieza de la siguiente manera:

$$V_{\text{enmascarante en pieza}}[l] = 2 * A[m^2] * e_{\text{masking}}[m] * 1.000 \left[\frac{l}{m^3} \right] \quad (8)$$

La máscara es aplicada sobre ambas caras de la pieza y posee un espesor uniforme, el cual oscila entre 200 µm y 400 µm. El espesor empleado para estos cálculos, y el empleado normalmente en la empresa colaboradora, es de 300 µm. Este espesor es el que se consigue una vez se ha evaporado todo el contenido en volátiles del enmascarante, por lo que el volumen calculado no es aún todo el que ha salido del bidón, sino el que se ha quedado adherido a la pieza.

2. Para calcular el enmascarante que sale del bidón y llega a la pieza se realiza una sencilla regla de tres, de forma que:

$$V_{\text{Enmascarante que ha llegado a la pieza}} [L] = \frac{100 * V_{\text{Enmascarante en pieza}}}{21,5} \quad (9)$$

De esta forma si se conoce la totalidad del enmascarante que ha salido del bidón y ha llegado en un primer momento a la pieza. A continuación, se pasa a kg multiplicando por la densidad del Masking D, obtenida del certificado del producto proporcionado por la empresa colaboradora.

3. Lo que se ha hecho hasta ahora es calcular cuántos kg de enmascarante han llegado en un primer momento hasta una pieza, por lo que, a partir de los datos conseguidos durante el control de la operación, se multiplica el resultado obtenido por el número de piezas totales imprimadas que tengan las mismas dimensiones, y se lleva a cabo el mismo procedimiento con el resto de piezas de dimensiones diferentes a las que se les ha aplicado el producto del mismo bidón.

Por último, se suma el total de kg que han salido del bidón y han llegado a las piezas imprimadas.

Estos tres pasos se realizan para cada una de las cuatro muestras obtenidas inicialmente.

El resultado obtenido mostró que la cantidad de enmascarante que salía del bidón y llegaba a las piezas no coincidía con la cantidad total de enmascarante que poseía el bidón, por lo que obviamente existe un coeficiente de pérdidas. Esto se debe a que la imprimación del enmascarante es llevado a cabo por el operario de la empresa colaboradora mediante sprays, y parte del producto durante su imprimación se pierde por los bordes de la pieza. También es debido a que en el resultado teórico obtenido se considera el espesor de la máscara uniforme en todas las piezas tratadas, mientras que realmente es muy complicado que esto suceda.

Para calcular ese coeficiente de pérdidas se restó al total de producto que contiene un bidón, 308 kg, la cantidad de enmascarante que llega a la pieza, obteniendo así cuanto producto es desperdiciado. A continuación, se calculó el área total que es imprimada con ese mismo bidón. Dividiendo la cantidad de enmascarante desperdiciado entre la totalidad de la superficie que se ha imprimado con ese bidón se obtienen las pérdidas en kg/m² del bidón estudiado. Para facilitar cálculos posteriores se convierte esas pérdidas en l/m² dividiendo entre la densidad del enmascarante.

Realizando esa sencilla operación para cada una de las cuatro muestras de bidones obtenidas inicialmente y haciendo la media de todos los resultados se llegó a un coeficiente de pérdidas de 0,295 l/m².

$$\text{Coeficiente de pérdidas} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{(308 - C)}{\text{Superficie total imprimada}_i}}{4} * \frac{1}{\rho_{\text{Enmascarante}}} = 0,295 \frac{l}{m^2} \quad (10)$$

Donde:

- C es la cantidad de enmascarante que llega a la pieza.

- $\rho_{\text{enmascarante}}$ es la densidad del Masking D (1,54 kg/l)

Por lo tanto, para calcular C3 basta con conocer la cantidad total de enmascarante que es empleado para imprimir una pieza, que es la suma de la cantidad de producto que ha llegado a la pieza más las pérdidas, y el precio de un bidón de Masking D, que proporcionó la empresa colaboradora (1432 €).

$$C3 = \left[2 * A[m^2] * e_{\text{masking}}[m] * 1000 \left[\frac{l}{m^3} \right] * \frac{1}{0,215} + 0,295 \left[\frac{l}{m^2} \right] * 2 * A[m^2] \right] * \frac{1.432}{200} \left[\frac{\text{€}}{l} \right] \quad (11)$$

Asociado al proceso de enmascaramiento de la pieza, a parte del coste debido al producto químico empleado, también se distingue otro coste ligado a la mano de obra encargada de la realización de dicho proceso. Calculando el tiempo que le dedican los operarios a cada una de las tareas en las que se divide este proceso puede definirse C4: *Coste asociado a la mano de obra encargada de aplicar la máscara.*

Para ello, se llevó a cabo un estudio del proceso que llevan a cabo los operarios desde que reciben la pieza tras su limpieza previa hasta que las piezas son almacenadas antes de ser trazadas.

El proceso de aplicación del Masking D, en la empresa colaboradora, se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Las piezas ya limpias y secas son trasladadas a la cabina donde se lleva a cabo la imprimación del enmascarante.
2. El operario cuelga la pieza en soportes de forma que se mueva lo menos posible durante la aplicación del Masking D.
3. El operario agita y controla la viscosidad del producto previo a su aplicación.
4. Se aplica la máscara sobre la pieza mediante pistola aerográfica hasta que esta alcanza aproximadamente el espesor deseado (dicho espesor se define en función del espesor de ataque, aunque para el presente proyecto ha quedado definido como 300 μm). Esto no suele conseguirse en la primera aplicación del producto, por lo que el operario debe aplicar el enmascarante hasta alcanzar el espesor deseado.
5. Una vez conseguido el espesor determinado, se deja secar la máscara un mínimo de 16 horas. Si es necesario un curado acelerado, el secado puede realizarse mediante estufa a $90 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 1 hora o bien $60 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 3 horas, habiendo sufrido previamente un secado natural durante 30 minutos.

- Una vez secada según lo estipulado en el punto anterior, el operario descuelga la pieza y se almacena antes de ser trazada.



Figura 29. Piezas colgadas por el operario para la imprimación del enmascarante.

Conociendo el proceso anterior se controló el tiempo que dedicaba el operario en la mezcla de varios bidones por separado y se llevó a cabo la media, obteniendo un tiempo medio de mezcla de 10 minutos.

El tiempo de cuelgue y descuelgue de las piezas fue proporcionada por la empresa colaboradora, la cual estimó que el tiempo total era de 6 min/m^2 de pieza.

Para calcular el tiempo dedicado a la aplicación del enmascarante se tomó nota del tiempo que dedicaba el operario en la imprimación de varias piezas y se anotaron sus números de identificación para poder observar más tarde sus dimensiones en los planos. A partir de los tiempos obtenidos y conociendo las dimensiones de cada pieza gracias a sus planos se determinó, para cada pieza por separado, el tiempo que tardaba en imprimirse un m^2 de la pieza con el enmascarante. Para usar un tiempo de referencia se realizó la media de los resultados, obteniendo un tiempo de aplicación del enmascarante de 15 min/m^2 .

No es necesario tener en cuenta el tiempo de secado de la pieza en el cálculo de C4 ya que el operario encargado, durante el proceso de secado, está ocupado en otras labores.

Por lo tanto, para calcular C4 en una pieza con unas dimensiones $a * b$ cualesquiera, se empleará la siguiente expresión:

$$C4[\text{€}] = \frac{CH \left[\frac{\text{€}}{h} \right]}{60 \left[\frac{\text{min}}{h} \right]} * \left(10[\text{min}] + \left(6 \left[\frac{\text{min}}{\text{m}^2} \right] * A [\text{m}^2] \right) + \left(15 \left[\frac{\text{min}}{\text{m}^2} \right] * A [\text{m}^2] \right) \right) \quad (12)$$

Donde:

- El término $6 * A$ hace referencia al tiempo que tarda el operario en colgar y descolgar la pieza estudiada en la cabina de imprimación.
- El término $15 * A$ hace referencia al tiempo de aplicación de la máscara sobre la pieza estudiada.

6.4 Coste asociado al trazado de la máscara

Para analizar el coste que supone el trazado del área a fresar químicamente fue necesario controlar el tiempo que dedicaba el operario en dicha operación.

Se ideó un método basado en los datos de tiempo de trazado por parte del operario que se obtuviese y el perímetro total trazado, calculado a partir de los planos de cada pieza, el cual tenía como finalidad definir un tiempo de trazado unificado. En el cálculo de este tiempo, la gran variedad de morfologías de áreas de fresado supone uno de los principales problemas, por lo que para la realización del estudio se empleó el mayor número de piezas diferentes posible.

De los datos de tiempo recopilados y los perímetros totales calculados a partir de los planos de las piezas se obtuvieron la *Tabla 10* y la *Gráfica 1*:

Tabla 10. Tiempos de trazado y perímetros totales trazados.

	Nº Identificativo	Perímetro Total (mm)	Tiempo (min)
1	Part number Pieza 1	2.040,0	3
2	Part number Pieza 2	4.499,6	8
3	Part number Pieza 3	6.054,8	10
4	Part number Pieza 4	6.269,5	26
5	Part number Pieza 5	6.454,0	10
6	Part number Pieza 6	7.100,0	7
7	Part number Pieza 7	9.770,0	30
8	Part number Pieza 8	12.835,0	21
9	Part number Pieza 9	13.776,0	23
10	Part number Pieza 10	21.866,4	17
11	Part number Pieza 11	22.860,0	20
12	Part number Pieza 12	32.223,2	90
13	Part number Pieza 13	37.040,0	100

	N° Identificativo	Perímetro Total (mm)	Tiempo (min)
14	Part number Pieza 14	49.500,0	90
15	Part number Pieza 15	49.500,0	82

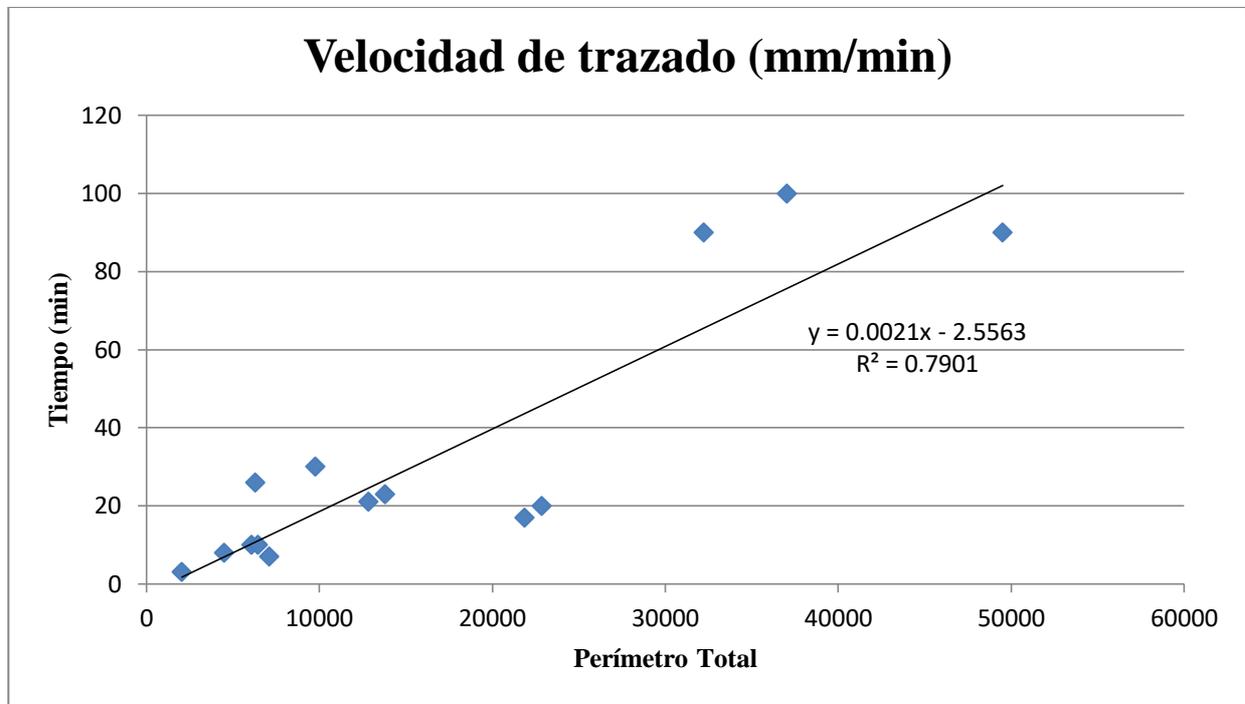


Figura 30. Velocidad de trazado de las piezas.

Al representar la *Gráfica 1* se observó la gran disparidad entre cada uno de los puntos, por lo que se recurrió al trazado de la recta de regresión y se analizó si el coeficiente de correlación de Pearson, R^2 , de esta era lo suficientemente alto para considerar aceptable la ecuación obtenida. Al ser $R^2 = 0,79$ se dio por válida la recta de regresión mostrada en la *Gráfica 1*.

$$Y[\text{minutos}] = 0,0021 * X[\text{mm}] - 2,5563 \quad (13)$$

Donde:

- Y es el tiempo en minutos dedicado al trazado de las áreas a fresar de la pieza.
- X es el perímetro total a trazar de la pieza en mm.

Algunos comentarios finales sobre la disparidad de datos obtenidos. Como se ha visto anteriormente, se ha obtenido un cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, R^2 , de 0,79, algo lejos de 1 aunque el ajuste puede considerarse razonable a efectos de aproximación. El motivo de esta dispersión de puntos hay que buscarlo fundamentalmente en la morfología, que no sólo el perímetro, del área a trazar así como la forma de la superficie de trazado, el acceso a la misma y un último factor que se citará al final. Existen por tanto una gran

cantidad de variables: perímetro, forma de la línea de trazado (fundamentalmente rectas, curvas, rectas y curvas, zonas redondeadas, angulosas, etc.), forma de la superficie de la pieza sobre la que se realiza el trazado (superficie plana, aproximadamente plana o curva), acceso al área de trazado (zona abierta para el trabajo de trazado del operario o por el contrario zona semi-cerrada como el interior de un borde de ataque). A todos estos factores hay que incluir el número de ataques. Obviamente un incremento en el número de ataques a realizar a la pieza en la operación de fresado químico, aumenta el perímetro a trazar pero no es menos cierto que también incrementa la complejidad del trazado, siendo necesario además, en esta operación, la identificación de las distintas áreas trazadas con el fin de indicar el orden de pelado posterior. Es por ello por lo que difícilmente en base a una sola de esas variables, el perímetro del área a trazar en este caso, pudiese obtenerse un coeficiente de correlación mejor que el obtenido, con independencia de que la solución no parecía estar en el intento de un ajuste no lineal de los puntos. Pensar en tener en cuenta todos los factores anteriores para la obtención de un tiempo de trazado más fino no parece demasiado práctico y sería, en todo caso, motivo de un trabajo aparte en el que no habría que olvidar, además, la destreza y la experiencia del operario. En cualquier caso, el ajuste realizado se considera aceptable a los efectos de este trabajo y se ha comprobado que se ajustó razonablemente a un buen número de situaciones posteriores.

Un último matiz respecto a los tiempos obtenidos. Los tiempos obtenidos no incluyen el tiempo de colocación de la PLFQ sobre la pieza. Estas plantillas han de cogerse a la pieza mediante los taladros de utillaje practicados a la pieza y a la propia plantilla con el fin de asegurar un correcto asentamiento de la plantilla a la pieza. Con independencia del tamaño de la plantilla, que son plantillas ligeras, se ha podido comprobar un tiempo de colocación y desmontaje posterior medio de la plantilla de 7 min, que habrá de ser sumado al valor del coste C5 para disponer del coste total de esta operación.

De esta forma se obtuvo una ecuación con la cual, a partir del perímetro a trazar en la pieza de estudio, proporcionado en los planos de la pieza, puede conocerse el tiempo aproximado que dedicará el operario en el trazado de las áreas a fresar químicamente de la pieza. Para convertir ese tiempo en un coste es necesario únicamente multiplicar dicho tiempo por el coste horario de la empresa. Por lo que *C5: Coste asociado al trazado del área a fresar de la pieza* puede obtenerse de la siguiente manera:

$$C5 = [(0,0021 * X - 2,5563)[min] + 7[min]] * \frac{CH \left[\frac{€}{h} \right]}{60 \left[\frac{min}{h} \right]} \quad (14)$$

6.5 Coste asociado al pelado de la máscara

Para la evaluación del coste que supone la operación de pelado de la máscara del área a fresar químicamente se llevó a cabo la misma metodología que en la evaluación del coste anterior. Se controló el tiempo que dedicaba el operario en pelar las áreas a fresar químicamente de distintas piezas (las mismas piezas de la *Tabla 10*). A través de los planos de cada una de las piezas proporcionadas se calculó el perímetro total de

las superficies a fresar. Con ambos datos se realizaron la *Tabla 11* y la *Gráfica 2*.

Tabla 11. Tiempos de pelado y perímetros totales de superficies a pelar.

	N° Identificación	Perímetro Total (mm)	Tiempo (min)
1	Part number Pieza 1	2.040,0	2
2	Part number Pieza 2	4.499,6	5
3	Part number Pieza 3	6.054,8	5
4	Part number Pieza 4	6.269,5	5
5	Part number Pieza 5	6.454,0	5
6	Part number Pieza 6	7.100,0	5
7	Part number Pieza 7	9.770,0	25
8	Part number Pieza 8	12.835,0	15
9	Part number Pieza 9	13.776,0	11
10	Part number Pieza 10	21.866,4	10
11	Part number Pieza 11	22.860,0	10
12	Part number Pieza 12	32.223,2	13
13	Part number Pieza 13	37.040,0	40
14	Part number Pieza 14	49.500,0	45
15	Part number Pieza 15	49.500,0	40

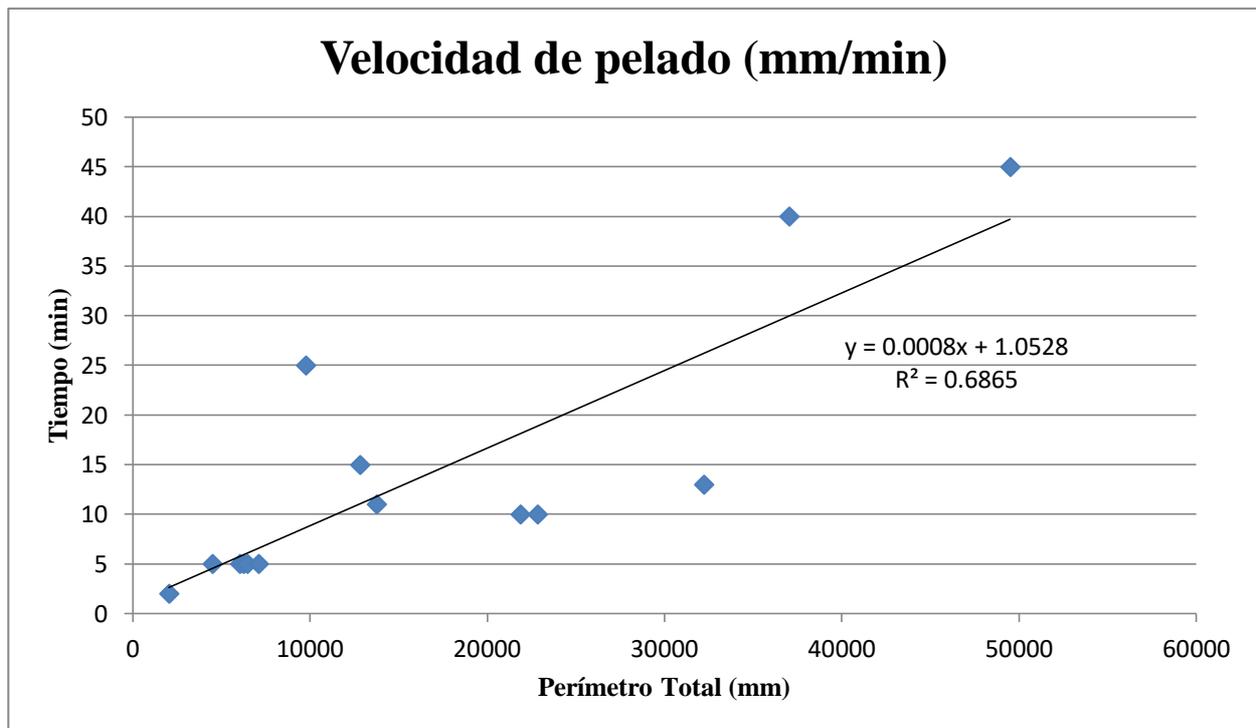


Figura 31. Velocidad de pelado de las piezas.

Igual que en el coste anterior, se observó que los puntos de la *Gráfica 2* son muy dispares, por lo que se volvió a recurrir a la recta de regresión de la gráfica. En este caso se obtuvo un coeficiente $R^2 = 0,69$, el cual fue considerado satisfactorio.

$$Y = 0,0008 * X + 1,0528 \quad (15)$$

Donde:

- **Y** es el tiempo en minutos dedicado al pelado del área a fresar químicamente.
- **X** es el perímetro total en mm del área a fresar.

Con esta ecuación se obtuvo una forma de calcular, a partir del perímetro total de las áreas a fresar, el cual es un dato sacado de los planos de las piezas, el tiempo que emplea el operario en pelar las áreas a fresar de la pieza. Multiplicando ese tiempo por el coste horario de la empresa se definió *C6: Coste asociado al pelado del área a fresar* con la siguiente expresión:

$$C6 = (0,0008 * X + 1,0528)[min] * \frac{CH \left[\frac{€}{h} \right]}{60 \left[\frac{min}{h} \right]} \quad (16)$$

6.6 Coste asociado al repaso de la máscara

Como ya se explicó en mayor detalle en el Capítulo 4, el repaso es una operación en la cual se protegen las zonas de la máscara que han sido dañadas en las operaciones anteriores para evitar que la pieza sea fresada químicamente en zonas donde no lo requieran. Esta protección es aplicada mediante brocha o rotuladores especiales cuando las zonas dañadas son demasiado pequeñas.

Una superficie de máscara arañada o picada pueden ser la causa de una picadura sobre el metal base una vez que la pieza se ha atacado químicamente. El proceso de aplicación por pistola aerográfica del masking tiene sus ventajas pero también sus inconvenientes. En ocasiones se forman burbujas de enmascarante sobre la superficie de la pieza que deben ser pinchadas, con el fin de extraer el aire contenido en su interior, y después reparadas con producto protector para sellar cualquier resto de apertura en la máscara. En otras ocasiones las burbujas ya han eclosionado y es necesaria una inspección superficial con el fin de detectar esos potenciales poros que posteriormente podrían originar defectos indeseables, incluso con consecuencias de inutilidad, sobre la pieza. Por tanto, se trata de una operación que requiere la revisión y, protección si procede, de la superficie que no ha de ser fresada.

Efectivamente, a diferencia de los costes de trazado y pelado de áreas a fresar de la pieza, el coste de repasar no dependerá directamente del perímetro total de las superficies trazadas, ya que como se ha dicho antes

la protección se aplica sobre las zonas que no requieren fresado. Por lo tanto, se pensó que la variable de la que debía depender el coste del repaso era el área de la pieza que debía ser protegida, es decir, el área total de la pieza menos el área a fresar de esta.

$$AP = \text{Área total de la pieza} - \text{Área a fresar de la pieza} \quad (17)$$

El procedimiento a seguir fue el mismo que en los procesos de trazado y pelado de la pieza. Se controló el tiempo que dedicaba el operario en inspeccionar y reparar el enmascarante de distintas piezas (las mismas piezas de las tablas 10 y 11). En este caso, el cálculo del área a partir de los planos físicos es bastante más difícil, pues las formas de las áreas de fresado son muy diversas y a veces complejas para su cálculo manual. Por ello, se solicitó a la empresa colaboradora que proporcionase el área de cada una de las piezas anteriormente mencionadas, los cuales se representan en la *Tabla 12* y la *Grafica 3*.

Tabla 12. Tiempos de repaso y áreas de revisión de la pieza para analizar si es necesario o no repasar.

	Nº Identificación	Área (m ²)	Tiempo (min)
1	Part number Pieza 1	0,589	5
2	Part number Pieza 2	0,826	15
3	Part number Pieza 3	0,638	10
4	Part number Pieza 4	0,653	15
5	Part number Pieza 5	0,721	15
6	Part number Pieza 6	0,692	15
7	Part number Pieza 7	7,125	50
8	Part number Pieza 8	0,677	15
9	Part number Pieza 9	2,158	17
10	Part number Pieza 10	2,376	14
11	Part number Pieza 11	5,988	40
12	Part number Pieza 12	6,213	45
13	Part number Pieza 13	7,689	60
14	Part number Pieza 14	3,689	30
15	Part number Pieza 15	4,895	40

Como en los costes anteriores, se empleó la recta de regresión de la *Gráfica 3*, con un coeficiente $R^2 = 0,9448$, para definir el tiempo que tarda el operario en repasar una pieza cualquiera.

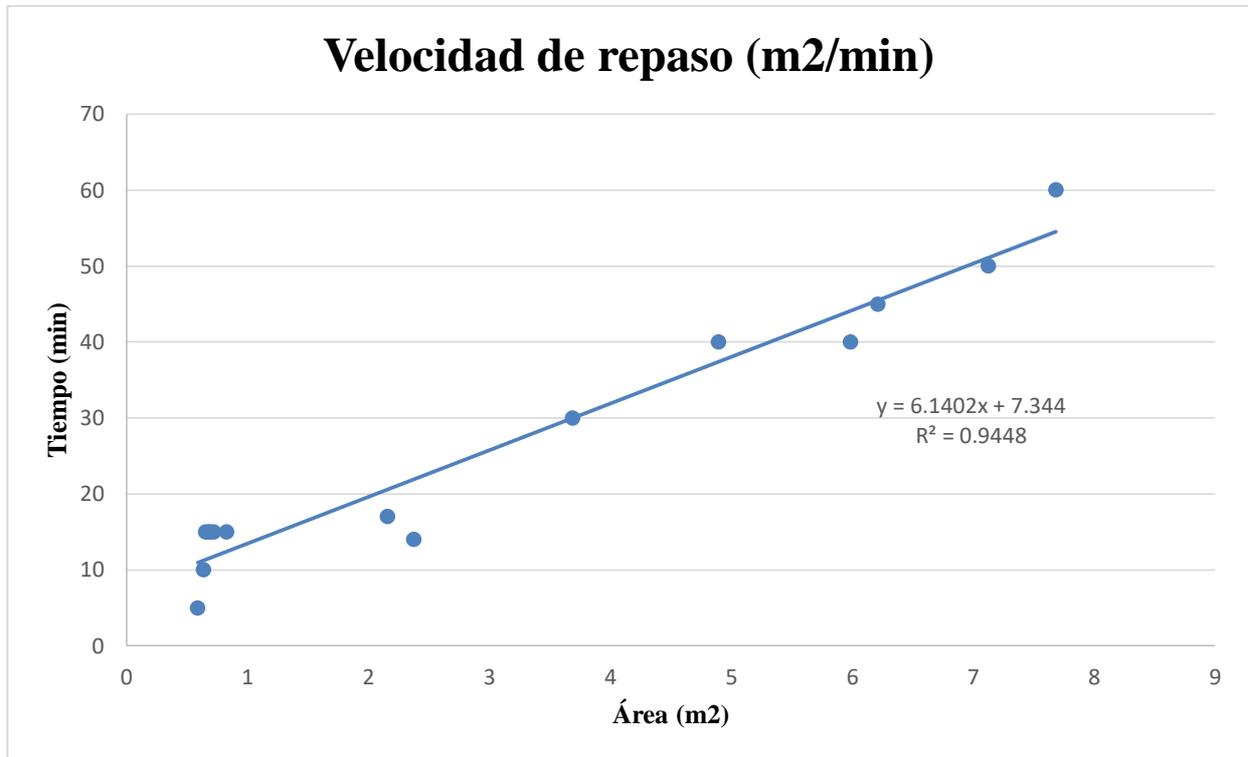


Figura 32. Velocidad de repaso de las piezas.

Una vez conocido el tiempo que emplea en repasar la pieza de estudio el operario, multiplicando dicho tiempo por el coste horario de la empresa se obtiene *C7: Coste asociado al repaso y protección del enmascarante*.

$$C7 = (6,1402 * AP + 7,344)[min] * \frac{CH \left[\frac{\text{€}}{h} \right]}{60 \left[\frac{min}{h} \right]} \quad (18)$$

Nota: En el mercado existen actualmente equipos de diferentes principios físicos para medir la discontinuidad de las superficies. Para la inspección previa que es necesaria hacer con el fin de localizar potenciales discontinuidades en la superficie de la máscara, se probaron en la empresa un par de equipos de distintos fabricantes con el ánimo de reducir el tiempo de inspección y/o aumentar la fiabilidad de la misma. Desgraciadamente, los equipos probados no se mostraron eficaces para este propósito y no detectaban discontinuidades visibles por los propios operarios, siendo además el tiempo necesario para barrer toda la superficie de la pieza excesivamente grande, inaceptable desde el punto de vista de la fabricación industrial. Se trata éste, por tanto, de un campo sobre el que habrá que seguir dando pasos porque la importancia de la detección, y de la reparación, de estas discontinuidades es fundamental para evitar piezas que tengan que ser declaradas inútiles al final del proceso.

6.7 Coste asociado al fresado químico

Como ya se explicó con más detalle en el Capítulo 4, el fresado químico es una técnica de remoción que se fundamenta en la eliminación de material no deseado por ataque de una sustancia química activa. El material removido no desaparece, sino que queda disuelto en los baños de ataque, acortando la vida de los mismos. Ese material disuelto en los baños una vez se fresa la pieza, que en el presente proyecto se trata únicamente de aluminio, ha sido la base del método desarrollado para el análisis del coste del fresado químico. Dicho método está basado en la cantidad de aluminio que aporta la pieza de estudio al baño en relación con la máxima cantidad de aluminio que es capaz de contener el baño.

En la norma de uno de los principales fabricantes del sector, en la cual basa sus especificaciones la empresa colaboradora, el máximo aluminio disuelto permitido en el baño de fresado químico es de 75 g/l. Una vez se alcanza dicha composición debe conformarse un baño nuevo. En la norma también se estipula, como ya se mostró en la *Tabla 2*, que un baño de fresado nuevo debe contener una concentración de aluminio de preparación de 22 g/l. Por lo tanto, tras la formación de un baño nuevo, la concentración máxima que puede ser aportada por las piezas antes de tener que retirar el baño de fresado es de 53 g/l de aluminio.

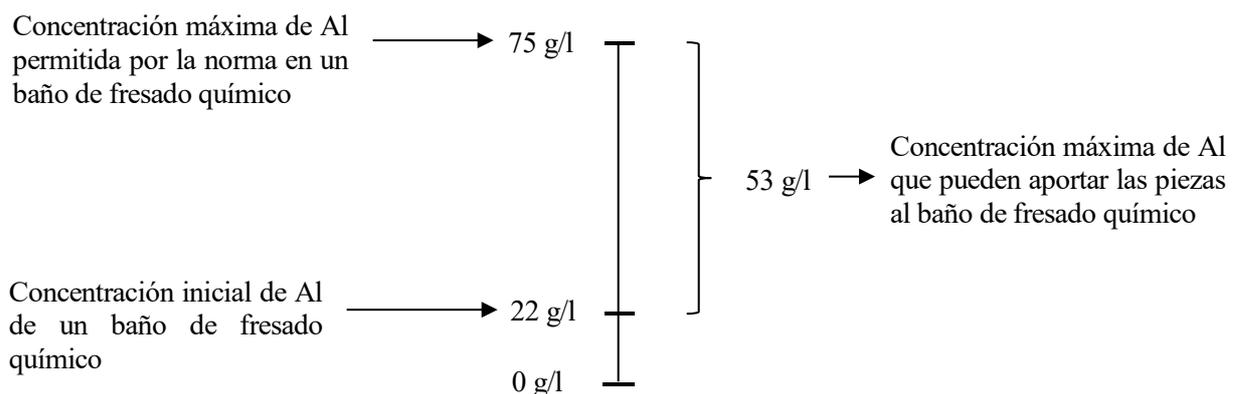


Figura 33. Concentración máxima de aluminio que pueden aportar las piezas al baño de fresado químico

A partir de lo explicado anteriormente, se decidió llevar a cabo una relación lineal entre la concentración de aluminio en el baño y los costes de la vida del baño, de forma que si una sola pieza aportase al baño de fresado una concentración de 53 g/l de aluminio se le imputaría el coste de la vida del baño.

Para el cálculo del coste asociado al fresado químico de la pieza se pensó entonces en asociar a la cantidad de aluminio aportada por la pieza de estudio un porcentaje del coste de la vida del baño, el cual se obtiene realizando una sencilla regla de tres:

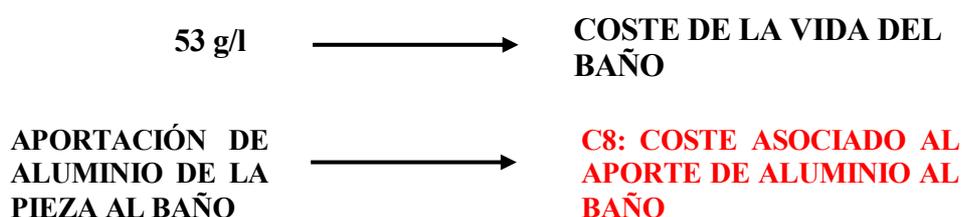


Figura 34. Regla de tres empleada para calcular el coste de la aportación de aluminio de la pieza estudiada al baño

Una vez se decidió la forma de calcular el coste *C8: Coste asociado al aporte de aluminio al baño*, se estudió el proceso de formación de un baño nuevo de fresado para poder evaluar su coste. Para definir el coste de la vida de un baño de fresado no se puede tener en cuenta únicamente los productos químicos empleados, los cuales ya se mencionaron junto con sus respectivas concentraciones en el Capítulo 4. Aparte de los productos químicos que se emplean en la formación del baño nuevo también hay que tener en cuenta las recargas de dichos productos que se llevan a cabo en el baño a lo largo de su vida. Estas recargas, aunque pueden hacerse de cualquiera de sus productos, son en su mayoría recargas de hidróxido sódico, por lo que para el presente proyecto son las únicas que se tuvieron en cuenta.

También se decidió incluir fue el coste del gasoil. El baño de fresado debe mantenerse durante su funcionamiento a una temperatura de 91-107 °C, al tratarse de un baño Tipo II el que posee la empresa colaboradora. Para ello el baño dispone de un intercambiador de calor, siendo el fluido calefactor aceite térmico, que a su vez es calentado en una caldera provista de quemadores de gasoil.

Otro coste que hay que tener en cuenta durante la vida del baño es el de la recogida de los productos químicos del baño de fresado químico sustituido. Esta retirada se lleva a cabo mediante una empresa autorizada para ello.

Finalmente, también se tuvo en cuenta el coste asociado a la depuración de las aguas de lavado de fresado químico. Como ya se comentó en el Capítulo 4, es necesario enjuagar la pieza tras la etapa de fresado químico antes de introducir la pieza en el siguiente baño. Ese enjuague se realiza inicialmente mediante nebulización de la pieza con el objetivo de eliminar la mayor parte de los productos corrosivos esta aún posee. El agua producto del enjuague, debido a la alta cantidad de reactivos que contiene no puede ser vertida directamente a la red, sino que debe ser previamente tratada y depurada.

Para calcular el coste de los productos del baño de fresado, la empresa colaboradora proporcionó los pedidos de cada uno de ellos y sus certificados de calidad. De los pedidos se extrajo el precio unitario de cada producto, y de los certificados de calidad se obtuvieron sus propiedades. La empresa también proporcionó información sobre la capacidad del baño, el cual es capaz de contener 20.500 l, y la proporción de cada producto una vez formado el baño. En la *Tabla 13* se muestra el precio unitario de cada uno de los productos que conforman el baño y en la *Tabla 14* la cantidad de cada producto y el coste de los productos del baño.

Tabla 13. Precio unitario de los productos del baño de fresado.

Producto	Precio unitario (€/kg)	Precio unitario (€/l)
Hidróxido sódico	0,490	0,745
Sulfuro sódico	0,573	0,940
TEA	1,543	1,734
Masking D	4,650	7,160

Tabla 14. Cantidades de los productos que componen el baño de fresado y coste de los productos.

Producto	Cantidad de producto (l)	Coste del producto (€)
Licor madre	3.000	150,0
Hidróxido sódico	3.000	2.235,0
Sulfuro sódico	600	564,0
TEA	750	1.300,5
Agua	13.150	39,1
TOTAL		4.288,6

Como se dijo al principio de este mismo apartado, cuando el baño de fresado químico alcanza una concentración de 75 g/l de aluminio debe cesar su actividad. Una vez alcanzada dicha concentración se deja reposar el baño durante dos días, con el objetivo de que las partículas en suspensión que pueda contener caigan y se depositen en el fondo. Tras esos dos días se lleva a cabo un bombeo superficial y se extrae del baño una cantidad determinada de disolución de ataque. Esta cantidad extraída posee una concentración de aluminio de 22 g/l, y será depositada en el baño de fresado que se formará posteriormente. Esta disolución de ataque extraída del baño anterior se conoce como licor madre, y debe incluirse en cada baño de fresado químico de formación nueva a fin de conseguir un “envejecimiento” artificial del mismo. Si esto no se llevase a cabo, el baño sería demasiado reactivo, lo que dificultaría en gran medida el control del factor de ataque, pudiendo llegar a dañar la pieza. Por esta razón, aunque no se puede contabilizar el coste de los productos que componen el licor madre, dado que ya fueron contabilizados en el baño de fresado químico anterior, si se tienen en cuenta para calcular su coste el tiempo dedicado a su obtención, el cual, en la empresa colaboradora, es de 5 horas, y considerando un coste horario de la empresa de 30 €/h se obtiene el coste mostrado en la *Tabla 14*.

La recarga de hidróxido sódico que se lleva a cabo en el baño a lo largo de su vida útil es de 2.000 l, por lo que a partir de su precio unitario mostrado en la *Tabla 13* se tiene que el coste de las recargas del baño de fresado asciende a **1490 €**.

Los costes restantes, el del gasoil, la retirada de productos de los baños y la depuradora fueron proporcionados directamente por la empresa colaboradora, y se resumen en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Coste del gasoil, la retirada de los productos del baño antiguo y la depuradora.

Coste	€
Gasoil	3.245
Retirada de productos	5.450
Depuradora	1.200

Una vez conocidos todos los costes de la vida del baño, se calculó obteniendo:

$$\text{Coste de la vida del baño} = 4.288,6 + 1.490 + 3.245 + 5.450 + 1.200 = \mathbf{15.673,6 \text{ €}}$$

Sin embargo, aún quedaba encontrar una manera para calcular el aporte de aluminio de la pieza de estudio en g/l al baño de fresado. Para ello se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se calcula el volumen de aluminio que genera el área o las áreas de ataque. Hay que tener en cuenta que pueden existir más de un área de ataque o espesores distintos a fresar, algo que debe estar reflejado en la fórmula. El espesor de ataque reflejado en los planos de la pieza hace referencia siempre al espesor final esperado en el área de ataque correspondiente, por lo que el espesor fresado será el espesor base de la pieza menos el espesor final esperado en el superficie de ataque.

$$V_{fresado} [l] = \sum_{i=1}^n \left(A_{ataque\ i} [m^2] * (e_{base} - e_{fresado\ final\ i}) [m] * 1.000 \left[\frac{l}{m^3} \right] \right) \quad (19)$$

2. Se calcula la cantidad de aluminio aportado al baño tras el fresado químico. Para ello se multiplica $V_{fresado}$ por la densidad del aluminio, 2.780 g/l:

$$\text{Cantidad de aluminio al baño [g]} = V_{fresado} [l] * 2.780 \left[\frac{g}{l} \right] \quad (20)$$

3. Una vez calculada la cantidad de aluminio que aporta la pieza tras el fresado puede conocerse la concentración de aluminio que es aportada al baño:

$$\text{Aportación de aluminio} \left[\frac{g}{l} \right] = \frac{\text{Cantidad de aluminio al baño [g]}}{\text{Volumen baño [l]}} \quad (21)$$

Una vez conocidas la concentración de aluminio que aportaría al baño la pieza de estudio y el coste total de la formación del baño de fresado químico, el cálculo de C8 puede realizarse según la regla de tres mencionada anteriormente en este mismo apartado:

$$C8 = \frac{\text{Aportación de aluminio} \left[\frac{g}{l} \right]}{53 \left[\frac{g}{l} \right]} * 15.673,6 \quad (22)$$

Al igual que en los procesos anteriores, es necesario tener en cuenta, además de los productos químicos que intervienen en el proceso, la manipulación de las piezas por parte de los operarios, definiendo de esta forma el coste C9: *Coste asociado a la mano de obra encargada del fresado químico.*

Como en los casos anteriores, se estudio el proceso de manipulación de la pieza por parte del operario para definir los tiempos que se tendrían en cuenta para el cálculo de C9. A partir del procedimiento interno de la empresa colaboradora, donde se explica cada uno de los pasos que deben llevarse a cabo durante el proceso de fresado por parte del operario encargado, se definieron las siguientes variables:

$$T = F \text{ (Cálculo factor de ataque; Preparación bastidor de carga; Duración del fresado químico; Tiempo en duchas)} \quad (23)$$

Para conocer el tiempo que se tarda en calcular el factor de ataque se controló el tiempo aproximado que dedicaba el operario encargado de la operación en calcular el factor de ataque del lote de piezas que componen la bañada. Se estimó el tiempo de cálculo del factor de ataque en unos 3 minutos aproximadamente. Se obtuvo por tanto un tiempo de cálculo de factor de ataque de 3 minutos/bañada. Sin embargo, en una bañada se introducen múltiples piezas, por lo que ese tiempo hay que referenciarlo únicamente a la pieza de estudio, lo que se lleva a cabo de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo cálculo factor de ataque [min]} = \frac{3 \left[\frac{\text{min}}{\text{bañada}} \right] * 2 * A_{\text{proyectada}} [\text{m}^2]}{20 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{bañada}} \right]} \quad (24)$$

Donde:

- $2 * A_{\text{proyectada}}$ es el área proyectada total de la pieza de estudio sobre el bastidor de carga.
- $20 \frac{\text{m}^2}{\text{bañada}}$ es la superficie total de bastidor de carga disponible para la colocación de piezas durante una bañada en el baño de fresado químico.

El tiempo de preparación del bastidor de carga fue proporcionado por la empresa colaboradora tras la estimación del tiempo que deben invertir los operarios en la colocación y preparación de varias piezas. Dicho tiempo fue de 7 min/m². Para imputar este únicamente a la pieza de estudio se multiplica el tiempo proporcionado por el área de la pieza.

La duración del fresado químico se basó en una de las normas de los principales fabricantes del sector. En dicha norma no se estipula un tiempo de fresado, sino un rango de factor de ataque, el cual proporciona una velocidad de referencia de eliminación de aluminio. Para el presente proyecto se tomó el caso más desfavorable, que suponía emplear el extremo inferior del rango de factores de ataque, 1,8 mm/h. En la norma se especifica también que, como ya se comentó en el capítulo 4, cuando haya transcurrido el 80% del tiempo estimado del fresado debe comprobarse si el espesor era el esperado en dicho punto de la operación, y en caso de que no sea así recalcularse el factor de ataque. Esto se tuvo en cuenta también en el cálculo de la duración del fresado químico, añadiendo 3 minutos en cada escalón de la pieza para recalcularse su factor de ataque.

Para conocer el tiempo que se tarda en obtener un único espesor de ataque de una pieza fresada químicamente se empleó entonces la siguiente expresión:

$$\text{Duración fresado químico [min]} = \frac{(e_{\text{base}} - e_{\text{fresado final}}) [\text{m}] * 60 \left[\frac{\text{min}}{\text{h}} \right]}{FA \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right] * \frac{1}{1.000} \left[\frac{\text{m}}{\text{mm}} \right]} + 3 [\text{min}] \quad (25)$$

Si la pieza tratada posee n espesores de ataque, la expresión será entonces la siguiente:

$$Duración\ fresado\ químico\ [min] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(e_{base} - e_{fresado\ final\ i})[m] * 60 \left[\frac{min}{h}\right]}{FA \left[\frac{mm}{h}\right] * \frac{1}{1.000} \left[\frac{m}{mm}\right]} + 3[min] \right) \quad (26)$$

Por último, el tiempo de la pieza en lavado por nebulización es de 3 minutos. Se pudo comprobar que este tiempo es suficiente para eliminar los productos reactivos que posee la pieza una vez sale del baño de fresado químico.

Una vez definidos todos los tiempos que influyen en el manejo de la pieza por parte del operario, multiplicando el tiempo total por el coste horario de la empresa se obtiene C9:

$$C9\ [€] = \frac{CH \left[\frac{€}{h}\right]}{60 \left[\frac{min}{h}\right]} * \left(3[min] + 7 \left[\frac{min}{m^2}\right] * A[m^2] + \frac{3 \left[\frac{min}{bañada}\right] * 2 * A_{proyectada}[m^2]}{20 \left[\frac{m^2}{bañada}\right]} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{(e_{base} - e_{fresado\ final\ i})[m] * 60 \left[\frac{min}{h}\right]}{FA \left[\frac{mm}{h}\right] * \frac{1}{1.000} \left[\frac{m}{mm}\right]} + 3[min] \right) \right) \quad (27)$$

6.8 Costes asociados al desoxidado posterior

Para calcular los costes asociados al desoxidado posterior al fresado químico se tuvieron en cuenta, al igual que en el cálculo de los costes asociados a la limpieza previa, el coste de los productos químicos que conforman el baño de desoxidado, C10: *Coste asociado a los productos químicos del baño de desoxidado*, y el coste de la mano de obra encargada de la manipulación de la pieza durante el proceso de desoxidado, C11: *Coste de la mano de obra encargada del baño de desoxidado*.

Para el cálculo de C10 se llevó a cabo el mismo procedimiento que para el cálculo de C2, solo que en este caso, al tratarse el desoxidado de un procedimiento que se realiza únicamente tras el fresado químico de una pieza, los productos químicos del baño de desoxidado se imputarán en su totalidad al tratamiento de fresado químico.

Por lo tanto, se solicitó a la empresa colaboradora información acerca de la vida útil del baño de desoxidado, el coste de formación de un baño nuevo y el coste de las recargas que se llevan a cabo. Al igual que en el apartado 6.1, el coste de las recargas del baño fue proporcionado de forma anual. Con los datos proporcionados por la empresa se elaboró la *Tabla 16*.

Tabla 16. Producto empleado en el desoxidado posterior y costes de formación y recargas del baño.

Etapa	Producto	Coste formación (Cada 3 años)[€]	Coste recargas (anual)[€]
Desoxidado posterior	TURCO Smut GO-NC-B	12.800	1.000

Como se comentó anteriormente, el baño de desoxidado es empleado únicamente para piezas a las que se les realiza un tratamiento de fresado químico, por lo que el coste de los productos del baño se le imputarán únicamente a dicho tratamiento. Para calcular C10 se empleó entonces el mismo método que se usó en el cálculo del coste asociado a los productos químicos de los baños de limpieza, es decir, el coste de la pieza de estudio asociado a los productos químicos del baño de desoxidado se calculó a partir del coste que supone el desoxidado posterior del m² de pieza que se introduce en dicho baño cada mes.

$$\frac{\text{Coste productos del baño de desoxidado al mes } \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right]}{m^2 \text{ de superficie introducidos en el baño de desoxidado al mes } \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right]} \quad (28)$$

El coste de los productos del baño de desoxidado al mes será la suma de los costes de formación y de recargas mensuales:

$$\text{Coste formación mes } \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] = \frac{12.800[\text{€ cada 3 años}]}{3 [\text{años}]} * \frac{1 [\text{año}]}{12[\text{meses}]} = 355,6 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \quad (29)$$

$$\text{Coste recarga mes } \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] = 1.000 \left[\frac{\text{€}}{\text{año}} \right] * \frac{1 [\text{año}]}{12 [\text{meses}]} = 83,3 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] \quad (30)$$

$$\text{Coste productos del baño de desoxidado al mes } \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] = 355,6 + 83,3 = 438,9 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] \quad (31)$$

Para calcular los m² de superficie que son desoxidados en el baño de desoxidado al mes se hizo uso del dato de m² que son fresados mensualmente obtenido en apartados anteriores. Mensualmente se fresan 400 m² en la empresa colaboradora y, por lo tanto, son introducidos también en el baño de desoxidado. Entonces:

$$m^2 \text{ de superficie introducidos en el baño de desoxidado al mes } \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right] = 400 \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right]$$

De esta forma, sustituyendo los resultados de las ecuaciones (32) y (33) en la ecuación (29), se obtendría el coste asociado a los productos químicos del baño de desoxidado en función del m² de pieza introducido en el baño. Para imputar dicho precio a la pieza de estudio se multiplica por la superficie total de esta, obteniendo C10: Coste asociado a los productos químicos del baño de desoxidado:

$$C10[\text{€}] = \frac{438,9 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right]}{400 \left[\frac{m^2}{\text{mes}} \right]} * 2 * A[m^2] = 2,19 * A \quad (32)$$

Para calcular C11: Coste de la mano de obra encargada del baño de desoxidado, se estudió el procedimiento interno de la empresa colaboradora. En el se recoge que el tiempo de permanencia de la pieza en el baño de desoxidado es de 10 minutos/bañada. Considerando dicho tiempo e imputandoselo únicamente a la

pieza de estudio se llegó a la siguiente expresión para calcular C11:

$$C11[\text{€}] = \frac{CH \left[\frac{\text{€}}{h} \right]}{60 \left[\frac{\text{min}}{h} \right]} * \left(10 \left[\frac{\text{min}}{\text{bañada}} \right] * \frac{2 * A_{\text{proyectada}}[\text{m}^2]}{20 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{bañada}} \right]} \right) \quad (33)$$

Donde:

- $2 * A_{\text{proyectada}}$ es la superficie proyectada sobre el bastidor de carga total de la pieza de estudio.
- $20 \frac{\text{m}^2}{\text{bañada}}$ es la superficie total disponible del bastidor de carga del baño de desoxidado.

6.9 Coste asociado al pelado completo de la pieza

En este punto del tratamiento del fresado químico, como ya se explicó en el Capítulo 4, el operario elimina, manualmente o mediante algún desengrasante o vapor, el resto de enmascarante que queda en la pieza.

Para calcular C12: *Coste asociado al pelado completo de la pieza* se llevó a cabo un control del tiempo que dedicaba el operario en pelar completamente distintas piezas. Con los datos obtenidos se realizó una media, obteniendo un tiempo medio por m² de pieza de 1,2 min/m². Con este tiempo unitario, y conocida el área total a pelar de la pieza en este punto, junto con el coste horario de la empresa se llega a la siguiente expresión:

$$C12[\text{€}] = \frac{CH \left[\frac{\text{€}}{h} \right]}{60 \left[\frac{\text{min}}{h} \right]} \left(2 * A[\text{m}^2] - \sum A_{\text{fresada}}[\text{m}^2] \right) * 1,2 \left[\frac{\text{min}}{\text{m}^2} \right] \quad (34)$$

6.10 Coste asociado a los ensayos

Los ensayos son análisis que se llevan a cabo sobre cada uno de los baños que intervienen en el tratamiento de fresado químico, los baños de limpieza previa, el baño de fresado químico, el del dexoxidado posterior y los baños de enjuague. Estos análisis son tan importantes como rutinarios, son realizados cada vez que se producen variaciones en los baños: cambios de carga de trabajo, recargas de productos, etc.

La frecuencia con la que se lleven a cabo estos ensayos dependerá, en gran medida, de la carga de trabajo de la empresa. Los datos empleados en este proyecto son los proporcionados por la empresa colaboradora para su carga actual de trabajo. Sin embargo, si dicha carga aumentase, obviamente la vida útil del baño se vería reducida, así como serían necesarias una mayor cantidad de recargas de productos. Es decir, cuanto mayor sea la carga de trabajo mayor será la frecuencia con la que deban llevarse acabo ensayos en los baños. Hay que tener en cuenta que, como ya se explicó en el apartado 6.1 *Costes asociados a la limpieza previa*, lo explicado anteriormente se cumpliría siempre que la carga de trabajo aumente en igual medida en todos los procesos para los cuales son necesarios los baños, ya que si aumenta la carga de trabajo, pero el número de piezas a las cuales

hay que realizarle un tratamiento de fresado químico se mantiene constante, el coste asociado a los ensayos de dicho tratamiento se vería reducido, ya que el reparto de la carga porcentual en los baños de limpieza previa y de enjuague se vería reducido respecto al resto de tratamientos.

La empresa proporcionó un coste anual medio de los ensayos de 2400 € por baño. Los baños que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

- Baño de desengrase alcalino
- Baño de limpieza alcalina
- Baño de decapado ácido
- 3 baños de enjuague
- Baño de fresado químico
- Baño de desoxidado

Se procedió entonces a calcular el coste mensual que supondrían los ensayos de todos los baños. Para ello, como se comentó al principio de este apartado, se tuvo en cuenta el reparto de la carga actual de trabajo en los baños de limpieza previa y de enjuague mostrado en la *Tabla 7*.

$$\text{Coste ensayos al mes} \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] = 2.400 \left[\frac{\text{€}}{\text{año}} \right] * \frac{1[\text{año}]}{12[\text{meses}]} * 2 + 2.400 \left[\frac{\text{€}}{\text{año}} \right] * \frac{1[\text{año}]}{12[\text{meses}]} * 0.25 * 6 = 700 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right] \quad (35)$$

Los m² de superficie fresada al mes es un dato que ya se obtuvo en apartados anteriores, 400 m²/mes. Conocidos el coste de los ensayos al mes y los m² de superficie de piezas que son fresadas puede obtenerse un coste de los ensayos en función de los m² de superficies de piezas que se fresan químicamente. Para imputar dicho coste a la pieza de estudio se multiplica por la totalidad de la superficie de esta, obteniendo así *C13: Coste asociado a los ensayos*.

$$C13[\text{€}] = \frac{700 \left[\frac{\text{€}}{\text{mes}} \right]}{400 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{mes}} \right]} * 2 * A[\text{m}^2] = 3,5 * A \quad (36)$$

6.11 Coste asociado a la documentación a formalizar en el proceso

En este apartado se ha tenido en cuenta el coste que supone el tiempo que deben dedicar los operarios en la formalización y redacción de los distintos informes y registros del tratamiento de fresado químico. Estos registros se llevan a cabo tras cada una de las etapas del tratamiento, y se emplean para verificar que las piezas cumplen los requisitos marcados por las normas y el cliente.

Por lo tanto, el tiempo que dedican los operarios en la generación de los documentos y registros fue

estimado en 0,5 h/bañada tras el control de varias bañadas. Dicho tiempo es el que dedican los operarios en una bañada entera, es decir, a toda la carga de piezas que contiene el bastidor de carga. Para imputar este tiempo únicamente a la pieza de estudio se tuvo en cuenta el porcentaje de área que ocupaba esta en el bastidor de carga, así como el coste horario de la empresa, obteniendo de esta forma *C14: Coste asociado a la documentación a formalizar en el proceso.*

$$C14[\text{€}] = 0,5 \left[\frac{h}{\text{bañada}} \right] * CH \left[\frac{\text{€}}{h} \right] * \frac{2 * A_{\text{proyectada}} [m^2]}{20 \left[\frac{m^2}{\text{bañada}} \right]} \quad (37)$$

6.12 Coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica de aluminio

A lo largo de los apartados anteriores se ha definido, para cada una de las etapas del tratamiento de fresado químico, una metodología a seguir para calcular cada uno de los costes asociados a dicho tratamiento. En este apartado se recopilarán cada una de las ecuaciones obtenidas los apartados anteriores referidos a los costes de cada etapa a fin de desarrollar la ecuación (1) mostrada al principio del presente capítulo. Se desarrollará, por tanto la ecuación (1) y a continuación se mostrará la misma ecuación simplificada.

$$\begin{aligned} CT = & \left[\frac{CH}{60} * \left(A * 7 + \frac{2 * A_{\text{proyectada}} * 48}{20} \right) \right] + [1,25 * A] + \left[\frac{1432}{200} * \left(2 * A * 1.000 * \frac{e_{\text{masking}}}{0,215} + 0,295 * 2 * \right. \right. \\ & \left. \left. A \right) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (10 + 6 * A + 15 * A) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (0,0021 * X - 2,5563) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (0,0008 * X + \right. \\ & \left. 1,0528) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (4,9559 * AP + 8,4115) \right] + \left[\frac{\text{Aportación de Al}}{53} * 15.673,6 \right] + \left[\frac{CH}{60} * \left(3 + 7 * A + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{3 * 2 * A_{\text{proyectada}}}{20} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{(e_{\text{base}} - e_{\text{fresado final } i}) * 60}{FA * \frac{1}{1000}} + 3 \right) \right) \right] + [2,19 * A] + \left[\frac{CH}{60} * \left(10 * \frac{2 * A_{\text{proyectada}}}{20} \right) \right] + \\ & \left[\frac{CH}{60} * (2 * A - \sum A_{\text{fresada}}) * 1,2 \right] + [3,5 * A] + \left[0,5 * CH * \frac{2 * A_{\text{proyectada}}}{20} \right] \end{aligned} \quad (38)$$

Agrupando términos:

$$\begin{aligned} CT = & \frac{CH}{60} * \left[37,4 * A + 6,15 * A_{\text{proyectada}} + 0,0029 * X + 4,9559 * AP + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n \left(\frac{(e_{\text{base}} - e_{\text{fresado final } i}) * 60}{FA * \frac{1}{1000}} + 3 \right) - 1,2 * \sum A_{\text{fresada}} + 9,908 \right] + A * [11,2 + 66.604,7 * \\ & e_{\text{masking}}] + [295,7 * \text{Aportación de Al}] \end{aligned} \quad (39)$$

7 APLICACIÓN DEL MÉTODO

En capítulos anteriores se habló tanto de las distintas variables que han tenido en cuenta para el desarrollo del método objeto de este proyecto y se ha realizado un desglose de los costes asociados a cada una de las etapas que conforman el tratamiento de fresado químico. En el capítulo 5 se enumeraron cada una de las variables que influyen en el cálculo del coste asociado a una pieza aeronáutica. Dichas variables eran:

- **Superficie de la pieza**
- **Área a fresar**
- **Espesor de fresado**
- **Número de áreas a fresar**
- **Morfología del área a fresar**
- **Coste horario**

De estas variables, el número de áreas a fresar y la morfología del área a fresar no han sido datos a introducir directamente en la fórmula obtenida, pero si se han tenido en cuenta.

En el capítulo 6 se desarrolló el método con el cual se puede obtener el precio de una pieza fresada químicamente.

De este método se obtuvo la ecuación (38), en la cual se recogen todos los costes asociados a cada etapa del tratamiento de fresado químico.

$$\begin{aligned}
 CT = & \left[\frac{CH}{60} * \left(A * 7 + \frac{2 * A_{proyectada} * 48}{20} \right) \right] + [1,25 * A] + \left[\frac{1432}{200} * \left(2 * A * 1.000 * \frac{e_{masking}}{0,215} + 0,295 * 2 * \right. \right. \\
 & \left. \left. A \right) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (10 + 6 * A + 15 * A) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (0,0021 * X - 2,5563) \right] + \left[\frac{CH}{60} * (0,0008 * X + 1,0528) \right] + \\
 & \left[\frac{CH}{60} * (4,9559 * AP + 8,4115) \right] + \left[\frac{Aportación\ de\ Al}{53} * 15.673,6 \right] + \left[\frac{CH}{60} * \left(3 + 7 * A + \frac{3 * 2 * A_{proyectada}}{20} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \sum_{i=1}^n \left(\frac{(e_{base} - e_{fresado\ final\ i}) * 60}{FA * \frac{1}{1000}} + 3 \right) \right) \right] + [2,19 * A] + \left[\frac{CH}{60} * \left(10 * \frac{2 * A_{proyectada}}{20} \right) \right] + \left[\frac{CH}{60} * \right. \\
 & \left. (2 * A - \sum A_{fresada}) * 1,2 \right] + [3,5 * A] + \left[0,5 * CH * \frac{2 * A_{proyectada}}{20} \right]
 \end{aligned} \tag{38}$$

En el presente capítulo se hará uso de los resultados obtenidos en los capítulos 5 y 6, y se aplicará el método obtenido sobre varias piezas con tipologías diferentes, es decir, áreas a fresar diferentes, morfologías de dichas áreas distintas, piezas planas y piezas curvas, etc.

El método explicado fue desarrollado para ser usado por la empresa colaboradora, por lo que se realizó en un formato que fuera fácil de usar y se introdujeran los datos necesarios de manera mecánica. Para ello se eligió el programa Excel, ya que reunía las características mencionadas anteriormente y además era de uso habitual por los empleados de la empresa colaboradora. La interfaz del programa creado se muestra a continuación en la *Figura 32*.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DE UNA PIEZA A LA QUE SE LE REALIZARÁ UN TRATAMIENTO DE FRESADO QUÍMICO		
INTRODUCE LONGITUD DE LA PIEZA + 25 mm (L) (mm)		
INTRODUCE ANCHO DE LA PIEZA + 25 mm (An) (mm)		
INTRODUCE ALTURA DE LA PIEZA PROYECTADA SOBRE EL BASTIDOR + 25 mm (H) (mm)		
INTRODUCE LONGITUD TRAZADO (X) (mm)		
ESPESOR BASE DE LA PIEZA (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 1, A1 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 1, e1 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 2, A2 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e2 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 3, A3 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e3 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 4, A4 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 4, e4 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 5, A5 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 5, e5 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 6, A6 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 6, e6 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 7, A7 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 7, e7 (mm)		
COSTE HORARIO (€/h)		
VOLUMEN DE ATAQUE (l)	0	
PRECIO TOTAL UNITARIO (€ POR UNIDAD DE PIEZA)(C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7+C8+C9+C10)	0.00	

	m3	l
VOLUMEN DE ATAQUE TOTAL	0	0
TOTAL AI DISUELTO POR PIEZA	g	kg
Nº DE PIEZAS	0	0
TOTAL AI DISUELTO TODAS LAS PIEZAS	0	0

%BAÑO SATURADO POR AI DISUELTO	0.000
--------------------------------	-------

DESGLASE DE COSTES	
C1 (M.O ENCARGADA DE LA LIMPIEZA PREVIA)	0.00
C2 (PRODUCTOS QUÍMICOS DE LIMPIEZA PREVIA)	0.00
C3 (MATERIA PRIMA MASKING)	0.00
C4 (M.O ENMASCARADO)	0.00
C5 (TRAZADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	0.00
C6 (PELADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	0.00
C7 (REPASO Y PROTECCIÓN DEL ENMASCARANTE)	0.00
C8 (FRESADO QUÍMICO APORTE DE AL)	0.00
C9 (FRESADO QUÍMICO M.O)	0.00
C10 (PRODUCTOS QUÍMICOS DEL BAÑO DE DESOXIDADO)	0.00
C11 (M.O DESOXIDADO POSTERIOR)	0.00
C12 (PELADO PIEZA COMPLETA)	0.00
C13 (ENSAYOS)	0.00
C14 (DOCUMENTACIÓN)	0.00

Figura 35. Interfaz del programa creado en excel para el cálculo del coste asociado al fresado químico de una pieza aeronáutica.

Debe mencionarse que la fórmula final empleada en el programa de Excel presenta pequeñas variaciones con respecto a la ecuación (41), dado que esta última fue desarrollada de forma más conceptual y teórica para facilitar su comprensión. Estas variaciones son:

- Al deber introducirse los datos de longitud, ancho y altura de la pieza sobre el bastidor en el programa Excel en milímetros, ya que así es como aparecen en los planos de la pieza, se lleva a cabo la conversión de milímetros a metros en cada término que contiene la superficie de la pieza.
- De igual manera, el espesor de ataque de cada superficie de ataque es dado en los planos en milímetros, por lo que se lleva a cabo también una conversión a metros.

Además se tuvo que hacer frente a un problema relacionado con C9: *Coste asociado a la mano de obra del fresado químico*. Como ya se mencionó en el capítulo 6, en cada escalón de ataque, tras transcurrir el 80% del tiempo de fresado químico esperado, debe realizarse una comprobación del factor de ataque y de si el resultado obtenido en dicho punto era el esperado. A esta comprobación se le asoció un tiempo de 3 minutos por cada escalón de ataque. El problema se encontró a la hora de desarrollar el sumatorio de la ecuación (28), ya que en el programa propuesto debían tenerse en cuenta todos los posibles espesores de ataque con sus respectivos 3 minutos de añadido mencionados anteriormente. Para evitar incluir al proceso más tiempo del realmente

dedicado se introdujeron una serie de condicionales, de forma que si se añade algún dato en alguna de las celdas de los espesores se sumen 3 minutos, mientras que si no se introduce nada no se sumen esos 3 minutos. De la misma forma se añadieron condicionales para tener en cuenta o no el espesor base de la pieza en función de si un espesor de ataque ha sido o no introducido. La expresión empleada se representa en la ecuación (41).

$$\begin{aligned}
 &= \left(3 + \left(3 * 2 * G5 * G6 * \frac{0.0000001}{20} \right) + (7 * G5 * G6 * 0.000001) + \left(\frac{60}{1.8} \right) * \right. \\
 &((SI(G10; G8; 0) - G10) + (SI(G12; G8; 0) - G12) + (SI(G14; G8; 0) - G14) + \\
 &(SI(G16; G8; 0) - G16) + (SI(G18; G8; 0) - G18) + (SI(G20; G8; 0) - G20) + \\
 &(SI(G22; G8; 0) - G22)) \left. \right) + SI\left(\frac{G10}{1.8}; 3; 0\right) + SI\left(\frac{G12}{1.8}; 3; 0\right) + SI\left(\frac{G14}{1.8}; 3; 0\right) + SI\left(\frac{G16}{1.8}; 3; 0\right) + \\
 &SI\left(\frac{G18}{1.8}; 3; 0\right) + SI\left(\frac{G20}{1.8}; 3; 0\right) + SI\left(\frac{G22}{1.8}; 3; 0\right) \left. \right) * \left(\frac{G23}{60}\right)
 \end{aligned} \tag{40}$$

Donde:

- **G5** y **G6** son las celdas donde deben introducirse el **ancho** de la pieza y la **altura de la pieza proyectada sobre el bastidor** respectivamente en milímetros.
- **G10, G12, G14, G16, G18, G20** y **G22** son las celdas donde deben introducirse los espesores de ataque **e₁, e₂, e₃, e₄, e₅, e₆** y **e₇** respectivamente en milímetros.
- **G8** es la celda donde debe introducirse el espesor base de la pieza.

Como puede observarse en la *Figura 32*, los datos que debe introducir el empleado se encuentran en las casillas verdes. Dichos datos son las dimensiones de la pieza, alto y ancho, a partir de las cuales se calculará el área de la pieza, la longitud de trazado, el espesor base de la pieza y las distintas áreas de ataque con sus respectivos espesores de ataque. Se han introducido únicamente 7 áreas de ataque con sus respectivos espesores de ataque porque en la empresa colaboradora nunca se ha fresado químicamente una pieza con más superficies de ataque.

Hay que destacar que, aunque en la *Figura 32* aparece sin definir y hasta ahora se ha considerado una variable, el coste horario de la empresa está definido en todo momento. Hasta ahora, para dotar de mayor generalidad al método se había considerado una variable en función del coste horario de la empresa que lo aplicase. Sin embargo, de ahora en adelante este será un dato, de forma que CH = 30 €/h.

Se introdujo en el programa también una forma de conocer la saturación del baño de fresado químico tras el tratamiento de la pieza de estudio. Esto se consigue introduciendo en la casilla contigua a la celda “Nº DE PIEZAS” un 1. Esta función no se introdujo realmente solo para ver el porcentaje de saturación que supone la pieza de estudio, sino para conocer la cantidad de aluminio que aporta al baño el lote completo de piezas, y en consecuencia, el porcentaje de baño saturado tras la finalización del tratamiento. De esta forma se le facilitaría a la empresa colaboradora el seguimiento de la saturación del baño y la preparación de los procedimientos

pertinentes para la conformación del baño de fresado químico nuevo.

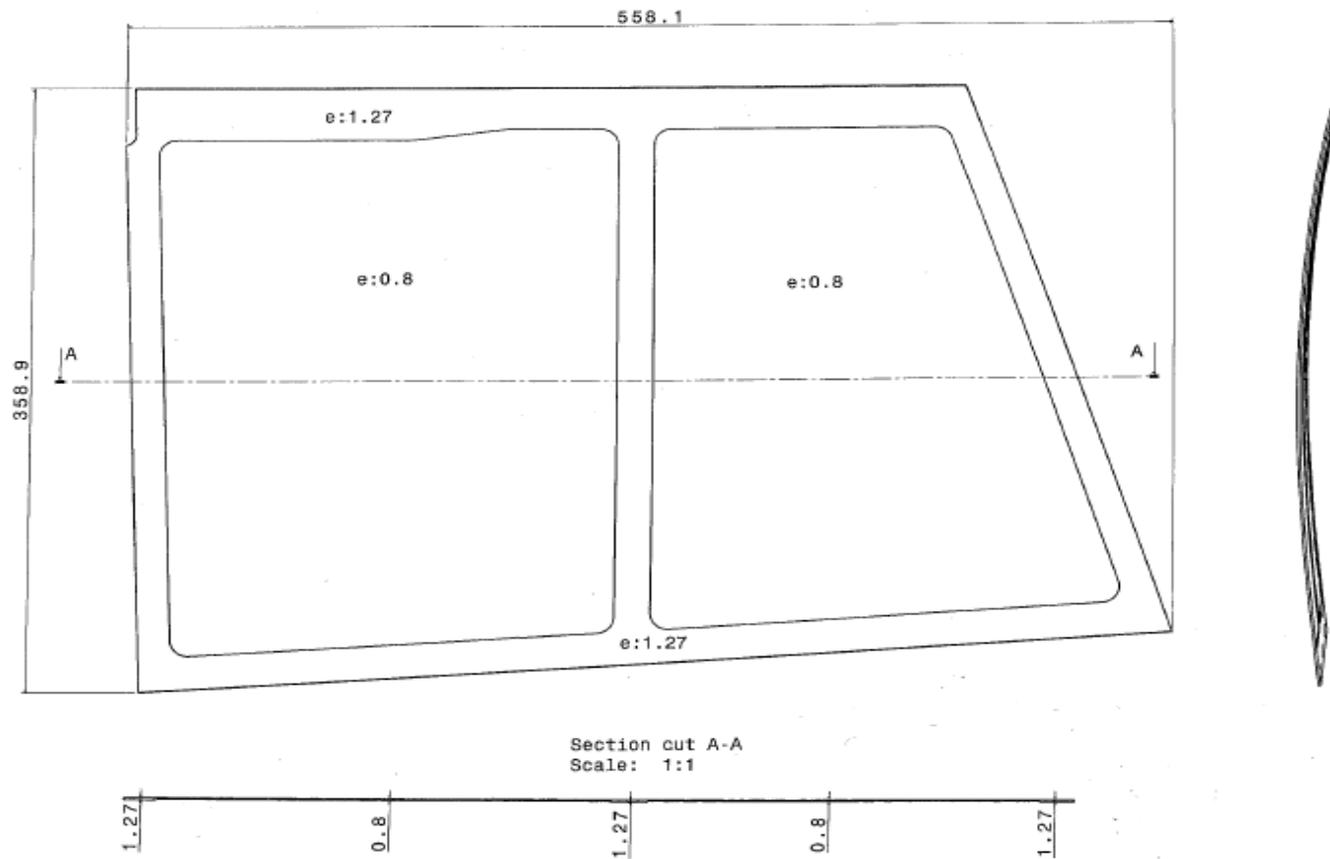
Por último, se introdujo también en el programa un desglose de cada uno de los costes que existen en las distintas etapas del fresado químico y que fueron definidos previamente en el capítulo 6. De esta manera puede observarse que costes influyen más en el tratamiento de la pieza y se facilita la explicación del coste final al cliente que solicitó la pieza.

A continuación se aplicará el método sobre distintas piezas proporcionadas por la empresa colaboradora, las cuales cumplirán los requisitos estipulados al principio de este capítulo, a fin de observar el funcionamiento del método y programa diseñados para una tipología de piezas variada.

7.1 Revestimiento de refuerzo de fuselaje central

Revestimiento de refuerzo de fuselaje central

e:0.8 - 0.133 m²



En el plano de la Pieza 1 mostrado en la página anterior puede observarse que dicha pieza posee únicamente dos áreas a fresar químicamente, ambas con el mismo espesor de ataque, por lo que tendrá una única área de ataque a efectos prácticos para la fórmula desarrollada, que será la suma de ambas superficies. Como puede observarse en el plano, se trata de una pieza prácticamente plana, al tener una curvatura muy abierta, y de pequeño tamaño.

Hay que destacar que todas las dimensiones que aparecen en el plano son dimensiones finales, es decir, las dimensiones de la pieza tras todos los tratamientos a los que debía ser sometida y lista para ser entregada al cliente. Sin embargo, hay que tener en cuenta para el cálculo del coste del tratamiento de fresado químico sobre la pieza que las dimensiones de la misma al inicio del tratamiento no son las representadas en el plano, sino que posee creces. Estas creces son de gran importancia, ya que proporcionan varios beneficios. En esta zona se llevan a cabo los taladros que se emplearán para la sujeción de las piezas en los bastidores de carga en los baños tanto de limpieza previa como de fresado químico y desoxidado. Además, esos agujeros se usarán también para la sujeción de las plantillas empleadas para el trazado de las áreas a fresar en la pieza, y la colocación de la pieza para su enmascarado. Pero esta no es la única función de las creces. Como se explicó en el capítulo 4, el enmascarante se aplica inicialmente sobre ambas caras de la pieza, ya sea por inmersión o por aplicación del producto mediante pistolas aerográficas, siendo este último método de aplicación el empleado por la empresa colaboradora. Sin embargo, por aplicación mediante pistola aerográfica no se protegen los bordes de la pieza, teniendo estos que ser enmascarados con rotuladores especiales del producto enmascarante, lo que generalmente supone un incremento sustancial del tiempo de aplicación del enmascarante. Para evitar el aumento de tiempo que supondría la aplicación del enmascarante sobre los bordes de la pieza y sobre los taladros realizados en la pieza para su sujeción en los bastidores de carga y la colocación de las plantillas de trazado, se dejan estas creces, en las cuales los bordes y los taladros no son protegidos, dado que una vez finalizados todos los tratamientos que deban llevarse a cabo sobre la pieza estas serán eliminadas mecánicamente. En función del factor de ataque determinado en el capítulo 6 y los espesores de ataque que lleva a cabo la empresa colaboradora, se determinó que el tamaño de las creces debía ser de 25 mm, suficientes para que durante el fresado no se vea afectado el borde final de la pieza.

Como se dijo antes en el presente capítulo, los datos que deberán introducirse en el programa desarrollado son: alto y ancho de la pieza en mm, la longitud de trazado en mm, espesor base de la pieza en mm y las distintas áreas de ataque con sus respectivos espesores de ataque en m^2 . Del plano de la pieza se extrae entonces:

- **Longitud de la pieza:** $358,9 \text{ mm} + 25 \text{ mm}$
- **Ancho de la pieza:** $558,1 \text{ mm} + 25 \text{ mm}$
- **Altura de la pieza proyectada sobre el bastidor:** $358,9 + 25 \text{ mm}$
- **Longitud de trazado:** 2.050 mm
- **Espesor base de la pieza:** 1,27 mm

- Áreas de ataque: 1; 0,133 m²
- Espesores finales: 1; 0,8 mm

Introduciendo todos estos datos en el programa desarrollado en Excel se obtendrá el coste de la pieza para el coste horario definido. El resultado se muestra en la *Figura 33*.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DE UNA PIEZA A LA QUE SE LE REALIZARÁ UN TRATAMIENTO DE FRESADO QUÍMICO		
INTRODUCE LONGITUD DE LA PIEZA + 25 mm (L) (mm)	383.9	
INTRODUCE ANCHO DE LA PIEZA + 25 mm (An) (mm)	583.1	
INTRODUCE ALTURA DE LA PIEZA PROYECTADA SOBRE EL BASTIDOR + 25 mm (H) (mm)	383.9	
INTRODUCE LONGITUD TRAZADO (X) (mm)	2050	
ESPESOR BASE DE LA PIEZA (mm)	1.27	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 1, A1 (M2)	0.133	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 1, e1 (mm)	0.8	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 2, A2 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e2 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 3, A3 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e3 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 4, A4 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 4, e4 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 5, A5 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 5, e5 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 6, A6 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 6, e6 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 7, A7 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 7, e7 (mm)		
COSTE HORARIO (€/h)	30	
VOLUMEN DE ATAQUE (l)	0.06251	
PRECIO TOTAL UNITARIO (€ POR UNIDAD DE PIEZA)(C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7+C8+C9+C10)	39.79	

	m3	l
VOLUMEN DE ATAQUE TOTAL	0.00006251	0.06251
TOTAL AI DISUELTO POR PIEZA	173.7778	0.1737778
Nº DE PIEZAS		1
TOTAL AI DISUELTO TODAS LAS PIEZAS	173.7778	0.1737778

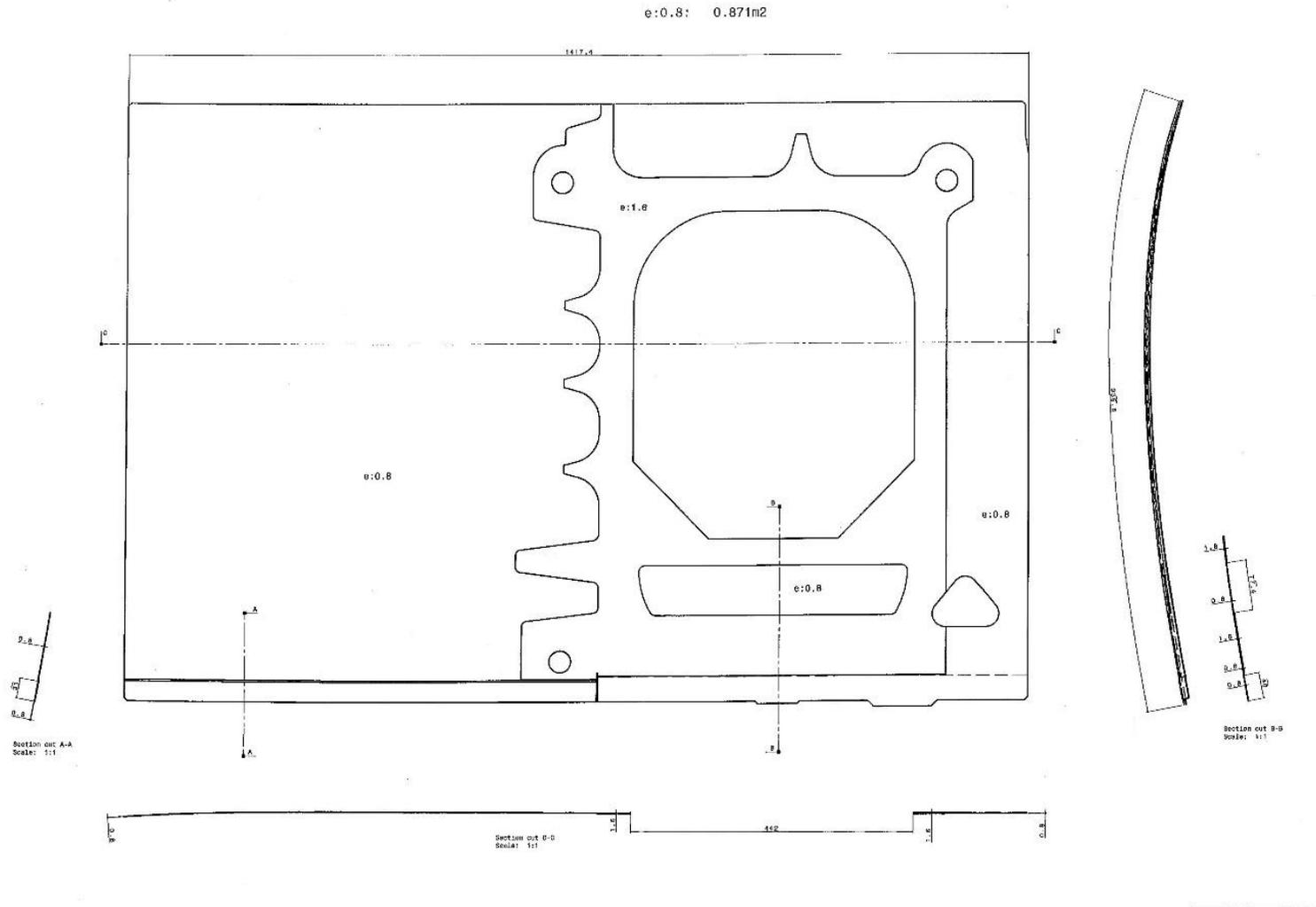
%BAÑO SATURADO POR AI DISUELTO	0.016
--------------------------------	-------

DESGLOSE DE COSTES	
C1 (M.O ENCARGADA DE LA LIMPIEZA PREVIA)	1.32
C2 (PRODUCTOS QUÍMICOS DE LIMPIEZA PREVIA)	0.28
C3 (MATERIA PRIMA MASKING)	4.95
C4 (M.O ENMASCARADO)	7.35
C5 (TRAZADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	4.37
C6 (PELADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	1.35
C7 (REPASO Y PROTECCIÓN DEL ENMASCARANTE)	3.95
C8 (FRESADO QUÍMICO APORTE DE AL)	2.69
C9 (FRESADO QUÍMICO M.O)	11.62
C10 (PRODUCTOS QUÍMICOS DEL BAÑO DE DESOXIDADO)	0.49
C11 (M.O DESOXIDADO POSTERIOR)	0.11
C12 (PELADO PIEZA COMPLETA)	0.19
C13 (ENSAYOS)	0.78
C14 (DOCUMENTACIÓN)	0.34

Figura 36. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre la Pieza 1.

7.2 Revestimiento puerta fuselaje posterior

Revestimiento puerta fuselaje posterior



En el plano de la Pieza 2 mostrado en la página anterior se observa que dicha pieza posee tres áreas a fresar químicamente, todas con el mismo espesor de ataque, por lo que tendrá una única área de ataque a efectos prácticos para la fórmula desarrollada, que será la suma de todas las superficies a fresar. Se trata de una pieza con una ligera curvatura como puede observarse en el plano. Ha sido elegida para la aplicación del método desarrollado por la morfología del trazado de la superficie a fresar, dado que difiere considerablemente con la morfología de las superficies a fresar de otras piezas.

Los datos que pueden extraerse del plano son los siguientes:

- **Longitud de la pieza:** 935,8 mm + 25 mm
- **Ancho de la pieza:** 1.417,4 mm + 25 mm
- **Altura de la pieza proyectada sobre el bastidor:** 737,4 + 25 mm
- **Longitud de trazado:** 10.454 mm
- **Espesor base de la pieza:** 1,6 mm
- **Áreas de ataque:** 1; 0,871 m²
- **Espesores finales:** 1; 0,8 mm

Introduciendo todos estos datos en el programa desarrollado en Excel se obtendrá el coste de la pieza para el coste horario definido. El resultado se muestra en la *Figura 34*.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DE UNA PIEZA A LA QUE SE LE REALIZARÁ UN TRATAMIENTO DE FRESADO QUÍMICO		
INTRODUCE LONGITUD DE LA PIEZA + 25 mm (L) (mm)	960.8	
INTRODUCE ANCHO DE LA PIEZA + 25 mm (An) (mm)	1442.4	
INTRODUCE ALTURA DE LA PIEZA PROYECTADA SOBRE EL BASTIDOR + 25 mm (H) (mm)	762.4	
INTRODUCE LONGITUD TRAZADO (X) (mm)	10454	
ESPESOR BASE DE LA PIEZA (mm)	1.6	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 1, A1 (M2)	0.871	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 1, e1 (mm)	0.8	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 2, A2 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e2 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 3, A3 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e3 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 4, A4 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 4, e4 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 5, A5 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 5, e5 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 6, A6 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 6, e6 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 7, A7 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 7, e7 (mm)		
COSTE HORARIO (€/h)	30	
VOLUMEN DE ATAQUE (l)	0.6968	
PRECIO TOTAL UNITARIO (€ POR UNIDAD DE PIEZA) (C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7+C8+C9+C10)	155.30	

	m3	l
VOLUMEN DE ATAQUE TOTAL	0.0006968	0.6968
	g	kg
TOTAL AI DISUELTO POR PIEZA	1937.104	1.937104
Nº DE PIEZAS		1
TOTAL AI DISUELTO TODAS LAS PIEZAS	1937.104	1.937104

%BAÑO SATURADO POR AI DISUELTO	0.178
--------------------------------	-------

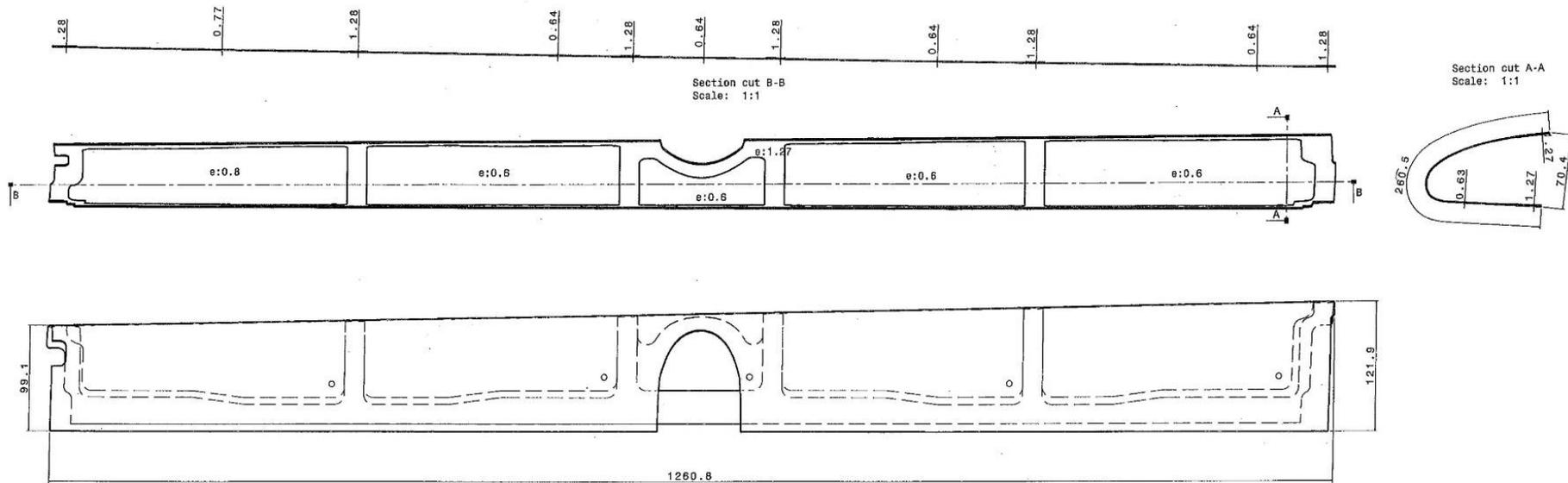
DESGLOSE DE COSTES	
C1 (M.O ENCARGADA DE LA LIMPIEZA PREVIA)	7.49
C2 (PRODUCTOS QUÍMICOS DE LIMPIEZA PREVIA)	1.73
C3 (MATERIA PRIMA MASKING)	30.62
C4 (M.O ENMASCARADO)	19.55
C5 (TRAZADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	13.20
C6 (PELADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	4.71
C7 (REPASO Y PROTECCIÓN DEL ENMASCARANTE)	5.25
C8 (FRESADO QUÍMICO APORTE DE AL)	40.32
C9 (FRESADO QUÍMICO M.O)	21.20
C10 (PRODUCTOS QUÍMICOS DEL BAÑO DE DESOXIDADO)	3.04
C11 (M.O DESOXIDADO POSTERIOR)	0.55
C12 (PELADO PIEZA COMPLETA)	1.14
C13 (ENSAYOS)	4.85
C14 (DOCUMENTACIÓN)	1.65

Figura 37. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre la Pieza 2.

7.3 Borde de ataque

Borde de ataque

- e:1.27 - Base
- e:0.8 - 0.042 m²
- e:0.6 - 0.148 m³



En el plano de la Pieza 3 mostrado en la página anterior se observa que dicha pieza posee cinco superficies a fresar químicamente, pero tiene dos espesores de ataque distintos, por lo que en la fórmula desarrollada tendrá áreas de ataque, que será la suma de todas las superficies a fresar que tengan el mismo espesor. Esta pieza constituye el borde de ataque de las alas del avión, por lo que presenta una gran curvatura. Ha sido elegida para la aplicación del método desarrollado por esta gran curvatura y por poseer dos espesores de ataque distintos, a la vez que varias superficies de ataque.

Los datos que pueden extraerse del plano son los siguientes:

- **Longitud de la pieza:** 260,5 mm + 25 mm
- **Ancho de la pieza:** 1260,8 mm + 25 mm
- **Altura de la pieza proyectada sobre el bastidor:** 121,9 + 25 mm
- **Longitud de trazado:** 8.835 mm
- **Espesor base de la pieza:** 1,27 mm
- **Áreas de ataque:** 2
 - $A_1 = 0,042 \text{ m}^2$
 - $A_2 = 0,148 \text{ m}^2$
- **Espesores finales:** 2
 - $e_1 = 0,8 \text{ mm}$
 - $e_2 = 0,6 \text{ mm}$

Introduciendo todos estos datos en el programa desarrollado en Excel se obtendrá el coste de la pieza para el coste horario definido. El resultado se muestra en la *Figura 35*.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DE UNA PIEZA A LA QUE SE LE REALIZARÁ UN TRATAMIENTO DE FRESADO QUÍMICO	
INTRODUCE LONGITUD DE LA PIEZA + 25 mm (L) (mm)	285.5
INTRODUCE ANCHO DE LA PIEZA + 25 mm (An) (mm)	1285.8
INTRODUCE ALTURA DE LA PIEZA PROYECTADA SOBRE EL BASTIDOR + 25 mm (H) (mm)	146.9
INTRODUCE LONGITUD TRAZADO (X) (mm)	8835
ESPESOR BASE DE LA PIEZA (mm)	1.27
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 1, A1 (M2)	0.042
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 1, e1 (mm)	0.8
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 2, A2 (M2)	0.148
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e2 (mm)	0.6
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 3, A3 (M2)	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e3 (mm)	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 4, A4 (M2)	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 4, e4 (mm)	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 5, A5 (M2)	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 5, e5 (mm)	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 6, A6 (M2)	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 6, e6 (mm)	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 7, A7 (M2)	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 7, e7 (mm)	
COSTE HORARIO (€/h)	30
VOLUMEN DE ATAQUE (l)	0.1189
PRECIO TOTAL UNITARIO (€ POR UNIDAD DE PIEZA)(C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7+C8+C9+C10)	71.85

	m3	l
VOLUMEN DE ATAQUE TOTAL	0.0001189	0.1189
TOTAL AI DISUELTO POR PIEZA	g	kg
	330.542	0.330542
Nº DE PIEZAS		1
TOTAL AI DISUELTO TODAS LAS PIEZAS	330.542	0.330542

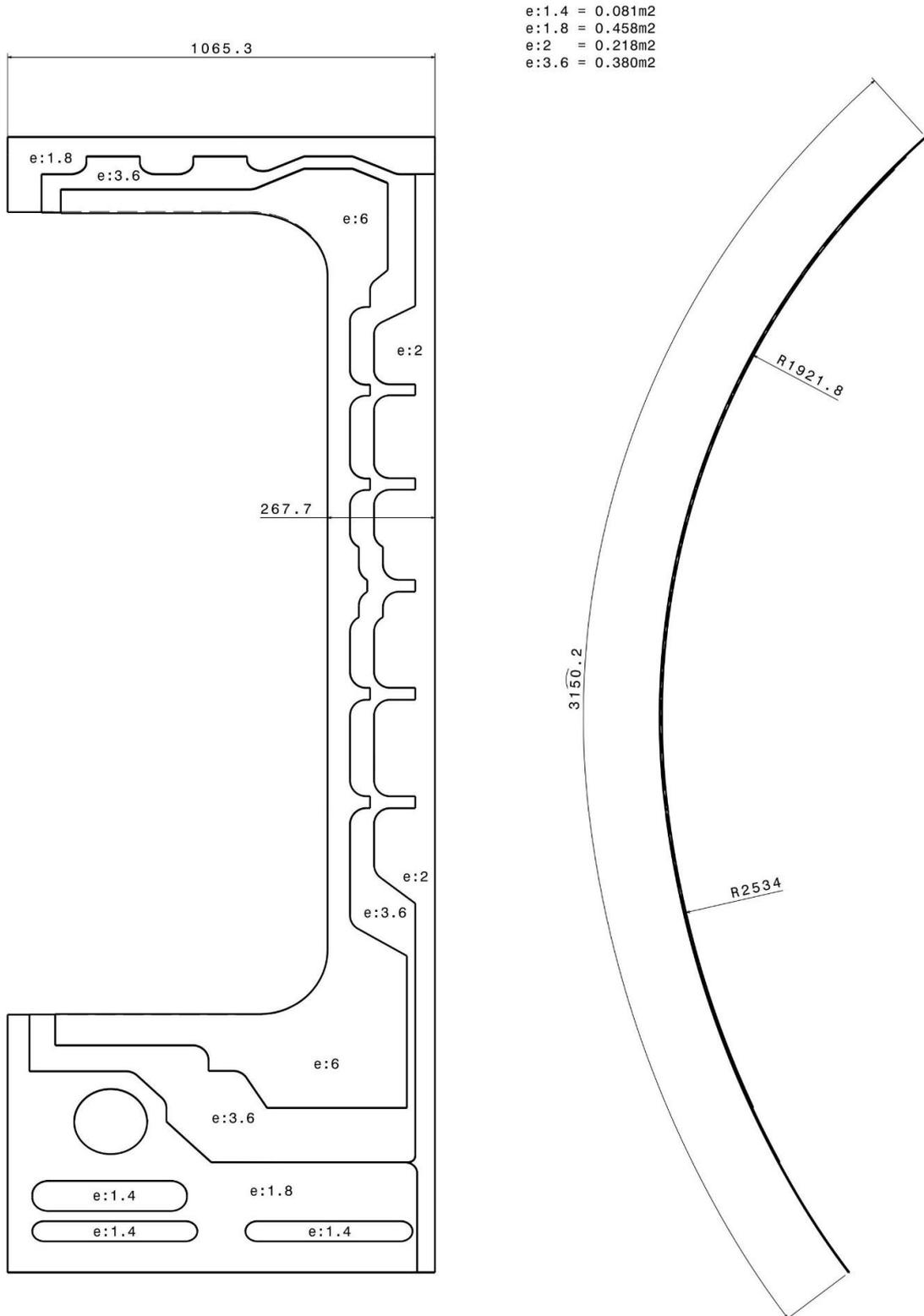
%BAÑO SATURADO POR AI DISUELTO	0.030
--------------------------------	-------

DESGLOSE DE COSTES	
C1 (M.O ENCARGADA DE LA LIMPIEZA PREVIA)	1.74
C2 (PRODUCTOS QUÍMICOS DE LIMPIEZA PREVIA)	0.46
C3 (MATERIA PRIMA MASKING)	8.11
C4 (M.O ENMASCARADO)	8.85
C5 (TRAZADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	11.50
C6 (PELADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	4.06
C7 (REPASO Y PROTECCIÓN DEL ENMASCARANTE)	4.22
C8 (FRESADO QUÍMICO APORTE DE AL)	5.33
C9 (FRESADO QUÍMICO M.O)	24.79
C10 (PRODUCTOS QUÍMICOS DEL BAÑO DE DESOXIDADO)	0.80
C11 (M.O DESOXIDADO POSTERIOR)	0.09
C12 (PELADO PIEZA COMPLETA)	0.33
C13 (ENSAYOS)	1.28
C14 (DOCUMENTACIÓN)	0.28

Figura 38. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre la Pieza 3.

7.4 Visera puerta A400M

Visera puerta A400M



En el plano de la Pieza 4 mostrado en la página anterior puede observarse que dicha pieza posee siete superficies a fresar químicamente con cuatro espesores de ataque distintos. Deberán introducirse en la fórmula desarrollada cuatro áreas de ataque, siendo cada una el sumatorio de todas las superficies con el mismo espesor de ataque. Esta pieza posee cierta curvatura y, al igual que en el caso de la Pieza 2, su altura no se ha dado de manera explícita en los planos, por lo que se supondrá para la aplicación de este método que su longitud y su altura proyectada sobre el bastidor son iguales. Ha sido elegida para la aplicación del método desarrollado por la gran cantidad de superficie de la pieza atacada y los distintos espesores de ataque que posee.

Los datos que pueden extraerse del plano son los siguientes:

- **Longitud de la pieza:** 3.150,2 mm + 25 mm
- **Ancho de la pieza:** 1.065,3 mm + 25 mm
- **Altura de la pieza proyectada sobre el bastidor:** 2.748,4 + 25 mm
- **Longitud de trazado:** 27.865 mm
- **Espesor base de la pieza:** 6 mm
- **Áreas de ataque:** 4
 - $A_1 = 0,081 \text{ m}^2$
 - $A_2 = 0,458 \text{ m}^2$
 - $A_3 = 0,218 \text{ m}^2$
 - $A_4 = 0,380 \text{ m}^2$
- **Espesores finales:** 4
 - $e_1 = 1,4 \text{ mm}$
 - $e_2 = 1,8 \text{ mm}$
 - $e_3 = 2 \text{ mm}$
 - $e_4 = 3,6 \text{ mm}$

Introduciendo todos estos datos en el programa desarrollado en Excel se obtendrá el coste de la pieza para el coste horario definido. El resultado se muestra en la *Figura 36*.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL COSTE DE UNA PIEZA A LA QUE SE LE REALIZARÁ UN TRATAMIENTO DE FRESADO QUÍMICO		
INTRODUCE LONGITUD DE LA PIEZA + 25 mm (L) (mm)	3175.2	
INTRODUCE ANCHO DE LA PIEZA + 25 mm (An) (mm)	1090.3	
INTRODUCE ALTURA DE LA PIEZA PROYECTADA SOBRE EL BASTIDOR + 25 mm (H) (mm)	2773.4	
INTRODUCE LONGITUD TRAZADO (X) (mm)	27865	
ESPESOR BASE DE LA PIEZA (mm)	6	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 1, A1 (M2)	0.081	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 1, e1 (mm)	1.4	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 2, A2 (M2)	0.458	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e2 (mm)	1.8	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 3, A3 (M2)	0.218	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 3, e3 (mm)	2	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 4, A4 (M2)	0.38	
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 4, e4 (mm)	3.6	
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 5, A5 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 5, e5 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 6, A6 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 6, e6 (mm)		
INTRODUCE ÁREA DE ATAQUE 7, A7 (M2)		
INTRODUCE ESPESOR FINAL DE ÁREA 7, e7 (mm)		
COSTE HORARIO (€/h)	30	
VOLUMEN DE ATAQUE (l)	4.0802	
PRECIO TOTAL UNITARIO (€ POR UNIDAD DE PIEZA)(C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7+C8+C9+C10)	842.23	

	m3	l
VOLUMEN DE ATAQUE TOTAL	0.0040802	4.0802
	g	Kg
TOTAL AI DISUELTO POR PIEZA	11342.956	11.342956
Nº DE PIEZAS		1
TOTAL AI DISUELTO TODAS LAS PIEZAS	11342.956	11.342956

%BAÑO SATURADO POR AI DISUELTO	1.044
--------------------------------	-------

DESGLOSE DE COSTES	
C1 (M.O ENCARGADA DE LA LIMPIEZA PREVIA)	19.37
C2 (PRODUCTOS QUÍMICOS DE LIMPIEZA PREVIA)	4.33
C3 (MATERIA PRIMA MASKING)	76.49
C4 (M.O ENMASCARADO)	41.35
C5 (TRAZADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	31.48
C6 (PELADO DEL ÁREA A FRESAR DE LA PIEZA)	11.67
C7 (REPASO Y PROTECCIÓN DEL ENMASCARANTE)	10.81
C8 (FRESADO QUÍMICO APORTE DE AL)	344.52
C9 (FRESADO QUÍMICO M.O)	273.00
C10 (PRODUCTOS QUÍMICOS DEL BAÑO DE DESOXIDADO)	7.58
C11 (M.O DESOXIDADO POSTERIOR)	1.51
C12 (PELADO PIEZA COMPLETA)	3.47
C13 (ENSAYOS)	12.12
C14 (DOCUMENTACIÓN)	4.54

Figura 39. Resultados proporcionados por el método aplicado sobre la Pieza 4.

7.5 Resumen de resultados

Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos tras la aplicación del método en las distintas piezas.

	Dimensiones (L x An x H) [mm]	Longitud trazado [mm]	A _{fresada} [m ²]; e _{ataque} [mm]	C ₁ [€]	C ₂ [€]	C ₃ [€]	C ₄ [€]	C ₅ [€]	C ₆ [€]	C ₇ [€]	C ₈ [€]	C ₉ [€]	C ₁₀ [€]	C ₁₁ [€]	C ₁₂ [€]	C ₁₃ [€]	C ₁₄ [€]	CT [€]
Pieza 1	358,9 x 558,1 x 358,9	2.050	A ₁ = 0,133; e ₁ = 0,8	1,32	0,28	4,95	7,35	4,37	1,35	3,95	2,69	11,62	0,49	0,11	0,19	0,78	0,34	39,79
Pieza 2	935,8 x 1417,4 x 737,4	10.450	A ₁ = 0,871; e ₁ = 0,8	7,49	1,73	30,62	19,55	13,20	4,71	5,25	40,32	21,20	3,04	0,55	1,14	4,85	1,65	155,30
Pieza 3	260,5 x 1260,8 x 121,9	8.835	A ₁ = 0,042; e ₁ = 0,8 A ₂ = 0,148; e ₂ = 0,6	1,74	0,46	8,11	8,85	11,50	4,06	4,22	5,33	24,79	0,80	0,09	0,33	1,28	0,28	71,85
Pieza 4	3.150,2 x 3150,2 x 1065,2	27.865	A ₁ = 0,081; e ₁ = 1,4 A ₂ = 0,458; e ₂ = 1,8 A ₃ = 0,218; e ₃ = 2 A ₄ = 0,380; e ₄ = 3,6	19,37	4,33	76,49	41,35	31,48	11,67	10,81	344,52	273,00	7,58	1,51	3,47	12,12	4,54	842,23

8 CONCLUSIONES

Para bastantes procesos de fabricación en una chapistería aeronáutica, son suficientes uno o dos parámetros de la pieza a tratar para determinar el coste asociado a dichos procesos. Así, por ejemplo, en el caso del anodizado de una pieza para la determinación del coste suele ser suficiente con el conocimiento de su área, lo mismo para el proceso de pintura, y, por citar otro ejemplo, para el tratamiento térmico serían necesarios el conocimiento del área y el espesor. Los procesos anteriores podrán ser bastante complejos pero, como se ha dicho, con esa información es suficiente para determinar el coste del proceso imputable a una pieza determinada.

Sin embargo, como se ha visto, son bastantes más los factores que hay que tener en cuenta para la estimación de los costes asociados con el proceso de fresado químico. De entrada, el área de la pieza, el espesor inicial, las áreas de ataque, los espesores de ataque, la morfología de trazado, etc., son datos absolutamente imprescindibles para la determinación de esos costes.

Y esta estimación de costes, y no sólo en el proceso de fresado químico, es un paso obviamente necesario para la cotización de dicho proceso. Sin entrar en detalles, normalmente la empresa aplicará a los costes obtenidos un porcentaje de beneficio con el fin de obtener el precio cotizado, que podrá ser o no en el futuro el precio de venta del producto tras las potenciales negociaciones que pueden surgir tras una oferta inicial.

Desde esta perspectiva resulta claro que una estimación de costes errónea que condujese a costes demasiado bajos, podría no hacer rentable o hacer poco rentable el proceso de fresado químico si se produce una adjudicación de los trabajos con precios cotizados demasiado bajo. Por otra parte, una estimación de costes por exceso podría hacer que la cotización de la empresa no fuese competitiva en un mercado cada vez más global y con mayor competencia, con la consecuencia de la no adjudicación de los trabajos. Por tanto, la estimación de costes ha de hacerse con bastante rigor, con el objetivo de que represente lo más fielmente posible la realidad de los costes en los que incurre la empresa. Y este análisis riguroso de costes se complica evidentemente a medida que son necesarios más datos para afrontarlo. Como se ha visto, para la obtención de la fórmula final de costes del fresado químico, se han tenido que hacer algunas aproximaciones e hipótesis, si bien se ha procurado que las primeras sean válidas y las segundas razonables. Aún así, el lector puede entender que quizás algunos factores o costes no se han tenido en cuenta, pero no hay que olvidar que algunos de esos costes ya estaban incluidos implícitamente en el coste horario proporcionado por la empresa, en el que estaban implícitos todos los costes estructurales y algunos costes semidirectos.

Como ya era sabido desde el planteamiento del problema por un simple razonamiento lógico, no resulta posible la extracción de conclusiones generales sobre el coste del proceso para una pieza determinada. Efectivamente la amplia diversidad de piezas con la que nos podemos encontrar no permite, salvo proposiciones obvias, ninguna conclusión general cualitativa acerca del coste del proceso para una pieza determinada. Diferentes trazados, diferentes espesores de ataque, diferentes áreas de ataque, diferentes áreas totales, etc... hacen que una conclusión general respecto a los costes no sea viable.

Por otra parte y sin embargo, sí se considera bastante general el método de cálculo de costes del proceso de fresado químico presentado en este trabajo. Es más, la fórmula final a la que se ha llegado para un caso concreto puede generalizarse aún más sólo con cambiar algunas constantes por variables, por ejemplo el área del bastidor de carga de los baños de procesos químicos disponibles pero, eso sí, siguiendo el método descrito. Se considera, por tanto, que el trabajo realizado está dotado de utilidad práctica para establecer los costes asociados al proceso de fresado químico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] [Industria Aeroespacial]. (sin fecha). (Disponible en: <https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/Informe%202006/Index.html>. Consultado el: 14 de Julio de 2018).
- [2] ASOCAE. (sin fecha). [Industria Aeroespacia]. (Disponible en: <https://natureduca.com/tecnologia-aeronautica-historia-01.php>. Consultado el: 14 de Julio de 2018).
- [3] Ibon Serrano y Roberto Osés de IK4-Ideko; Begoña Canflanca, Miguel Lagos y Malen Caño de Tecnalía; Santiago Fernández y Susana Ferreiro de IK4-Tekniker. 2012. *Materiales metálicos de uso frecuente en aeronáutica: aleaciones ligeras Al-Li*.
- [4] *Aleaciones de aluminio*. (sin fecha). (Disponible en: <https://aeronautica.info/materiales-metalicos-aeronaves/aleaciones-de-aluminio/>. Consultado el: 16 de Julio de 2018).
- [5] *Aleaciones para ingeniería*. (sin fecha). (Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html. Consultado el: 16 de Julio de 2018).
- [6] Ricardo Pinto. 2017. *Aluminio y sus aleaciones*. (Disponible en: <https://inicioaeronautico.wordpress.com/2017/05/14/aluminio-y-sus-aleaciones/>. Consultado el: 17 de Julio de 2018).
- [7] Apuntes y documentación proporcionada por la empresa colaboradora referente a los tratamientos superficiales realizados en la industria aeroespacial.
- [8] Eugene M. Langworthy. 1989. "Chemical Milling". ASM Handbook, Volume 16: Machining.
- [9] AIRBUS. *Fresado químico del aluminio y sus aleaciones*. I+D-P-152. Última revisión 30-06-2009. 1982.
- [10] Norma interna de empresa. *Fresado químico del aluminio y sus aleaciones*. AER 8.5.1.2 PT-23. 2017.
- [11] AIRBUS. *Limpieza y decapado del aluminio y sus aleaciones*. I+D-P-072. Última revisión 17-07-2017. 1980.
- [12] Norma interna de empresa. *Limpieza y decapado del aluminio y sus aleaciones*. AER 8.5.1.1 PT-22. 2017.
- [13] BOEING. *Chemical milling aluminum alloys*. BAC 5772. Última revisión 17-05-2005. 1960.
- [14] Andrés Monjo. *Procesos avanzados de maquinado*. [en línea]. (Disponible en: https://web.archive.org/web/20111122144824/http://ib.cnea.gov.ar/~mater2/MATERIALESII/ProcA_van.pdf. Consultado el: 27 de Julio de 2018).

- [15] Rocío Olalla García. 2018. *Estructura de costos*. (Disponible en: <http://blog.finutive.com/formacion/diccionario/empresas/estructura-de-costos/>. Consultado el 6 de Agosto de 2018).

GLOSARIO

CETA: Compañía Española de Tráfico Aéreo

LAPE: Líneas Aéreas y Postales de España

CASA: Construcciones Aeronáuticas S.A.

PLFQ: Plantilla de Fresado Químico

TEA: Trietanolamina

EDM: Electrical Discharge Machining

MOD: Mano de Obra Directa

PRL: Prevención de Riesgos Laborales

EPIs: Equipos de Protección Individual

ANEXO



MASKING D

**TURCO
ESPAÑOLA, S.A.**

OFICINA Y FACTORIA
Feixa Llarga, 19
Sector F, Zona Franca
08040 BARCELONA
Tel.: (34) 93 335 03 58/62/66
Fax: (34) 93 335 77 19
www.turco-spain.com

DESCRIPCIÓN

MASKING D es un recubrimiento de protección monocomponente, pelable que posee un alto grado de resistencia química.

MASKING D es un reciente desarrollo de producto de enmascarado que proporciona una protección adicional contra la acción corrosiva de las soluciones calientes ácidas y alcalinas, estando especialmente desarrollado para utilizar en el Proceso Chem Mill.

Este producto presenta las últimas mejoras de formulación, tales como alta capacidad de espesamiento (generalmente con aplicaciones por inmersión darán un espesor de película seca de 13 mils o 300 microns), alta capacidad de eliminación de burbujas y una mayor facilidad de detección de defectos debida a una película fluorescente. El producto viene ya preparado a la viscosidad de uso para aplicaciones por inmersión.

MASKING D cumple con la Regla 66 de Air Pollution Control Districts de Los Angeles y la regulación 3 de Bay Area.

PROPIEDADES DEL LIQUIDO

Viscosidad a 25°C:	38 - 42 seg. Copa Zahn 5
Contenido en sólidos en peso:	23 ± 2%
Peso específico:	1.51
Almacenamiento a 25°C:	1 año mínimo
Color:	Verde claro
Punto inflamación:	Por encima de 90° C

PROPIEDADES DE LA PELÍCULA

Resistencia a la tracción:	1.000 p.s.i. mínimo
Elongación hasta ruptura:	580 -
610% Adherencia de la película gr/2.5 cm sobre aluminio antes del mordentado:	380 - 400 gr.
Después del mordentado:	600 - 800 gr.

ESPESOR DE LA PELÍCULA.

Una película seca de 250 microns (10 mils) de espesor proporciona normalmente una adecuada protección en el proceso del aluminio y del magnesio.

Para el acero y el titanio se recomienda un mínimo de 300 microns (12 mils) para evitar que pueda ocurrir algún deterioro de la película con estos reactivos.

NUMERO DE CAPAS

MASKING D proporcionará el espesor de película requerido en sólo dos capas dependiendo de la temperatura de uso. (Ver el diagrama adjunto).

VISCOSIDAD

En principio el producto se usa tal como se suministra con la viscosidad indicada de 38 - 42 sec. Copa Zahn N° 5 a 25° C.

Technical Data
BULLETTIN



CONTROL DE VISCOSIDAD

Según las condiciones de temperatura y humedad ambiental y la medida de la pieza puede usarse para controlar la viscosidad, xileno, tolueno o percloroetileno. Cuando se desee una evaporación más rápida del solvente, por ejemplo durante la estación fría, deberá usarse tolueno. No añadir demasiado Tolueno ya que éste disminuirá sustancialmente el punto de inflamación del material. Las adiciones de percloroetileno, no cambiarán el punto de inflamación del producto.

PROGRAMA DE SECADO

1. PROCESADO DEL ALUMINIO Y MAGNESIO

1.1. Secado al aire

Cuando la última capa de mask no esté pegajosa al tacto, dejar que la película se seque de 4 a 24 horas mínimo, antes del mordentado, dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad del ambiente.

1.2. Secado al horno

Después de un secado al aire de 2 a 4 horas, el mask puede secarse al horno durante 30 minutos a 105°C, para apresurar el ciclo de secado.

2. PROCESADO DEL ACERO Y TITANIO

2.1. Secado al aire

Secado durante la noche. No es necesario el horneado.

2.2. Secado al horno

Después de 2 a 4 horas de secado al aire, el mask puede secarse al horno durante 30 minutos a 105° C.

MODO DE EMPLEO

Para asegurar un resultado uniforme y homogéneo en la aplicación del mask, es necesaria una mezcla adecuada de la solución, antes y durante el uso. Deberá tenerse cuidado para evitar que entre aire en el mask por la acción de la mezcla. Dado que algo de solvente se pierde durante el uso, se requerirán adiciones periódicas de diluyentes basadas en las medidas de viscosidad. Después de medir la viscosidad con un copa ZahnNº 5 ajustar con el diluyente a la viscosidad operativa deseada. En los sistemas de inmersión y "flowcoat" es necesario un filtro para eliminar las materias extrañas o partículas de mask parcialmente secas que hayan caído dentro de la solución. Evitar excesivo calentamiento y corrientes de aire sobre la película húmeda ya que esto podría ser causa de resecamiento superficial de la misma. El calor y la ventilación usados para forzar el secado de la película húmeda deberá aplicarse solamente si los usuarios observan que la calidad de la película es satisfactoria bajo esas condiciones.

APLICACIONES POR INMERSIÓN

Aunque **MASKING D** contiene agentes antisedimento, se recomienda una adecuada circulación del mask en el tanque de inmersión, a fin de evitar la inmersión en el drenado procedente de piezas anteriores.

1. Utilizar el mask tal como se suministra, comprobando la adecuada viscosidad.
2. Sumergir lentamente la pieza ya limpia dentro del mask, hasta quedar cubierta totalmente la parte más alta de la pieza. Evitar sumergir la pieza rápidamente en el mask, ya que esto introduciría aire y daría lugar a la formación de burbujas en la película. Sacar la pieza del tanque de inmersión.
3. Dejar secar la película hasta que esté seca al tacto, girar 180° y volver a recubrir. La película que se forme ahora, tendrá el espesor deseado.

La aplicación por inmersión del **MASKING D** tiene diversas ventajas sobre las aplicaciones por aspersión.

El recubrimiento por inmersión contiene por lo general más sólidos y menos solvente por lo que

resulta más económico en razón de la superficie del metal cubierta. Además no hay exceso de pulverización.

La propiedad que tiene **MASKING D** de proporcionar en dos capas el espesor de recubrimiento deseado, ofrece la posibilidad de tener en un área cerrada una evaporación controlada con un sistema solvente reformado. Todo esto, atendiendo a las futuras regulaciones ambientales sobre el uso de los solventes.

APLICACIÓN POR AIRLESS EN FRÍO O EN CALIENTE

1. Reducir el mask a una viscosidad de 13 a 18 segundos en una copa Zahn N° 5, usando una mezcla de tolueno/xileno, 1/1 o Percloroetileno.
2. La boquilla "Reverse A Clean" facilita la limpieza de las puntas obturadas.
3. Usar una presión de fluido 145 - 160 bar
4. Aplicación del mask:
 - 4.1. Aplicar un recubrimiento horizontal, una pasado con 50% de recubrimiento.
 - 4.2. Aplicar un recubrimiento en caja (una pasado horizontal, una pasada vertical). Dejarsecar.
 - 4.3. Aplicar dos recubrimientos en caja, dejando un adecuado tiempo de secado entre los recubrimientos. La película que se forme será de 10 mils.
5. La aplicación en caliente deberá proporcionar una película igual a la de la aplicación en frío pero con una capa menos. Temperatura 65 – 80° C, presión 100 Bar.

PRECAUCIONES Y TOXICIDAD

Leer cuidadosamente la información sobre precauciones antes de abrir.

Atención: La prolongada exposición a altas concentraciones de vapor puede causar irritaciones a los ojos y vías respiratorias. Contiene hidrocarburos clorados. Evitar el contacto con la piel y ojos. Evitar prolongada respiración de los vapores. No ingerir. Abrir el recipiente cuidadosamente para evitar salpicaduras.

Rogamos consulten la Ficha de Datos de Seguridad del producto antes de su utilización.

TRATAMIENTO DE VERTIDOS

Para el tratamiento de los vertidos, rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.

NOTA

La información y recomendaciones concernientes al producto, están basadas en nuestros análisis y experiencia directa. Sin embargo, y considerando que las condiciones finales de uso están fuera de nuestro control, todas las recomendaciones son hechas sin garantía, expresa o implícita.

Es obligación del fabricante y vendedor reemplazar aquel producto que se demuestre defectuoso. No nos responsabilizamos por ninguna pérdida, accidente o daño, directo o consecuente del uso de este producto.