



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

INGENIARITZA GOI ESKOLA TEKNIKOA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
BILBAO

PROYECTO

DE

**COMBINACION DE TALADRADO POR FRICCIÓN
Y ROSCADO CON MACHO: CAMINO DE
UNIONES SIN TUERCA EN ALEACIONES
METÁLICAS DISIMILARES**

Alumno Estefanía García Suárez
Titulación Master *Ingeniería Industrial*

Director del Proyecto
Luis Norberto Lopez de Lacalle

Curso Académico
2015/2016

ÍNDICE

1. OBJETIVOS	1
2. ALCANCE Y CONTEXTO	3
2.1 Intereses de las disimilares	3
2.2 Contexto general	4
2.3 Necesidad de exploración de tecnologías: uso de la escala TRL/MRL.....	6
3. BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO.....	9
3.1 Contribuciones científicas y técnicas.....	9
3.2 Contribuciones económicas	9
3.3 Plan de difusión y explotación	12
4. ESTADO DE LA TÉCNICA	13
4.1 Taladrado por fricción.....	13
4.2 Roscado por laminación	22
4.3 Aspectos de comportamiento de las uniones	24
5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	34
5.1 Descripción General.....	34
5.2 Identificación de las Alternativas	34
5.3 Criterios de selección	43
5.4 Solución propuesta.....	43
6. ANÁLISIS DE RIESGOS	45
6.1 Riesgos tecnológicos	45
6.2 Riesgos operativos.....	48
6.3 Riesgos financieros	49
7. METODOLOGÍA.....	51
7.1 Estructura organizativa y de personal	54
7.2 Medios y técnicas básicas.....	55
7.3 Definición de los paquetes de trabajo, tareas e hitos	63

7.4	Descripción de etapas y parámetros a controlar	64
7.5	Duración del proyecto y Diagrama de Gantt	68
8.	ENSAYOS DEL PROCESO COMBINADO	70
8.1	Pruebas iniciales para el estudio de la sensibilidad de los parámetros sobre materiales distintos y discusión.	70
8.2	Pruebas sistemáticas de caracterización del proceso de Friction drilling con AISI 1045 y A15754.	73
8.2.1	Monitorización de los ensayos	75
8.3	Roscado por laminación de la copa generada por Friction Drilling	92
8.4	Análisis experimental de los mecanismos de corrosión	93
8.4.1	Análisis teórico: corrosión galvánica.....	93
8.4.2	Análisis experimental.....	94
8.5	Análisis experimental del comportamiento de la unión frente a corrosión.....	100
8.6	Análisis de las microdurezas a lo largo de la copa.....	104
8.7	Proceso de ACV. Balance del impacto ambiental.	105
8.7.1	Evaluación del impacto ambiental	107
8.7.2	Interpretación del ACV	119
9.	ASPECTOS ECONÓMICOS	123
9.1	Presupuesto	123
10.	CONCLUSIONES	129
11.	LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO.....	133
12.	REFERENCIAS	134
	ANEXO I: PLIEGO DE CONDICIONES.NORMATIVA APLICABLE.....	137
	ANEXO II: PLANOS Y ESQUEMAS.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Costes totales del proceso para un agujero para una unión atornillada clásica y para una unión mediante FD + RL</i>	11
<i>Tabla 2. Matriz probabilidad-impacto</i>	50
<i>Tabla 3. Relaciones entre los diámetros y las métricas</i>	58
<i>Tabla 4. Descripción de tareas e hitos</i>	63
<i>Tabla 5. Condiciones del proceso de taladrado por fricción que se emplearán en los ensayos</i>	74
<i>Tabla 6. Fuerzas de avance máximos para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos</i>	80
<i>Tabla 7. Pares máximos para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos</i>	81
<i>Tabla 8. Combinación de fuerzas axiales máximas y pares máximos más favorables</i>	81
<i>Tabla 9. Condiciones del fabricante en relación al diámetro del agujero</i>	90
<i>Tabla 10. Parámetros óptimos de mecanizado</i>	91
<i>Tabla 11. Tabla de condiciones de mecanizado para las pruebas de corrosión</i>	95
<i>Tabla 12. Condiciones de mecanizado de las probetas para ensayo de cizalladura</i>	97
<i>Tabla 13. Condiciones de mecanizado de las probetas del ensayo de cizalladura</i>	101
<i>Tabla 14. Cargas máximas para cada probeta</i>	102
<i>Tabla 15. Comparación del taladrado y Friction Drilling</i>	108

<i>Tabla 16. Categorías de impacto para el consumo de energía en el taladrado-----</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 17. Categorías de impacto para el consumo de energía en el Friction drilling-110</i>	
<i>Tabla 18. Categorías de impacto totales para la fabricación de 22,05 litros de taladrina -----</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 19. Categorías de impacto de la construcción de una planta de reciclado -----</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 20. Categorías de impacto de consumo de energía en fundición-----</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 21. Categorías de impacto de construcción de una fundición -----</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 22. Categorías de impacto totales para el tratamiento de viruta en taladrado -116</i>	
<i>Tabla 23. Categorías de impacto para el tratamiento de 0,3368 litros de taladrina agotada-----</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 24. Categorías de impacto totales -----</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 25. Horas internas -----</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 26. Amortizaciones -----</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 27. Gastos -----</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 28. Subcontrataciones-----</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 29. Resumen presupuesto final -----</i>	<i>128</i>

ÍNICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Taladrado por fricción y roscado por laminación</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Clasificación de los niveles de madurez.....</i>	<i>7</i>

<i>Figura 3. Tiempo y coste del proceso de fabricación de un agujero en una unión atornillada clásica y en una mediante FD + RL</i>	10
<i>Figura 4. Secuencia del proceso de taladrado por fricción con roscado por laminación</i>	13
<i>Figura 5. Sistemas de suspensión de vehículos</i>	14
<i>Figura 6. Sillas y mesas</i>	14
<i>Figura 7. Estructuras metálicas</i>	14
<i>Figura 8. Máquina de control numérico</i>	15
<i>Figura 9. Geometría de la herramienta de taladrado por fricción</i>	15
<i>Figura 10. Geometría de distintas herramientas de taladrado por fricción</i>	16
<i>Figura 11. Evolución del momento y del esfuerzo en el taladrado por fricción</i>	18
<i>Figura 12. Fuentes de calor en función de la zona de la herramienta</i>	19
<i>Figura 13. Dimensiones principales del agujero</i>	21
<i>Figura 14. Calidades tipo 1 y tipo 2</i>	21
<i>Figura 15. Comparación macho de laminación y macho de corte</i>	22
<i>Figura 16. Cargas transversales (a) y axiales (b)</i>	24
<i>Figura 17. Modos de fallo en una unión atornillada</i>	25
<i>Figura 18. Curva de resistencia a la fatiga (S-N) para ensayos con cargas de amplitud constante</i>	26
<i>Figura 19. Serie fem estándar</i>	30
<i>Figura 20. Serie galvánica</i>	31
<i>Figura 21. Esquema de ciclo de vida de un producto</i>	32
<i>Figura 22. a) Unión tornillo-agujero roscado b) Unión tornillo-tuerca</i>	35
<i>Figura 23. Uniones remachadas</i>	36
<i>Figura 24. Ejemplo de soldaduras por FSW</i>	40

<i>Figura 25. Principio de funcionamiento</i>	41
<i>Figura 26. Metodología a seguir</i>	51
<i>Figura 27. Máquina herramienta CNC: Kondia A6</i>	55
<i>Figura 28. Sierra de cinta semiautomática 370 SA 60</i>	56
<i>Figura 29. Remet IPA 40</i>	56
<i>Figura 30. Geometría de la punta de FD</i>	57
<i>Figura 31. Puntas de taladrado por fricción (izquierda) y macho para roscado por laminación (derecha)</i>	57
<i>Figura 32. Lubricantes</i>	59
<i>Figura 33. Equipo DDU4 Artis</i>	59
<i>Figura 34. Tarjeta adquisición de datos</i>	60
<i>Figura 35. Pirómetro Impac© IGAR 12 LO</i>	60
<i>Figura 36. Microscopio Leica Z6PAO</i>	61
<i>Figura 37. Durómetro FM-800</i>	61
<i>Figura 38. Micrómetro de interiores</i>	62
<i>Figura 39. Reloj comparador</i>	62
<i>Figura 40. Calibre</i>	62
<i>Figura 41. a) Probetas empleadas en los ensayos, b) utillaje para pruebas</i>	71
<i>Figura 42. Características de la herramienta que se usará en los ensayos</i>	74
<i>Figura 43. Utillaje empleado en los ensayos sistemáticos</i>	75
<i>Figura 44. DDU Artis para la medición del par y la fuerza</i>	75
<i>Figura 45. Avance del par (Nm) en función del tiempo del contacto para S2000_F350</i>	76
<i>Figura 46. Avance de la fuerza (N) en función del tiempo del contacto para S2000_F350</i>	77

<i>Figura 47. Fuerza axial máxima de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance</i>	<i>78</i>
<i>Figura 48. Momento torsor máximo de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance</i>	<i>78</i>
<i>Figura 49. Fuerza axial máxima en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 50. Momento torsor máximo en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 51. Temperaturas máximas en función de la rotación del husillo para distintos avances</i>	<i>82</i>
<i>Figura 52. Probetas cortadas individualmente tras los ensayos de Friction Drilling</i>	<i>83</i>
<i>Figura 53. Proceso para la medición de las características geométricas de los agujeros</i>	<i>83</i>
<i>Figura 54. Diámetros</i>	<i>84</i>
<i>Figura 55. Programa PCE-MM200 para realizar las mediciones.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 56. Espesores.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 57. Diámetro a la entrada del agujero en función de la velocidad de giro y para distintos avances</i>	<i>85</i>
<i>Figura 58. Diámetro a la salida en función de la velocidad de giro y para distintos avances</i>	<i>86</i>
<i>Figura 59. Longitud de copa, longitud total y hueco mínimo.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 60. Longitud de copa en función de la velocidad de giro y para distintos avances</i>	<i>87</i>
<i>Figura 61. Longitud de copa en función de la velocidad de avance y para distintas revoluciones</i>	<i>87</i>
<i>Figura 62. Longitud total en función de la velocidad de giro y para distintos avances</i>	<i>88</i>
<i>Figura 63. Hueco mínimo entre materiales en función de la velocidad de giro y para distintos avances</i>	<i>88</i>
<i>Figura 64. Variación de los espesores para distintas velocidades de giro.....</i>	<i>89</i>

<i>Figura 65. Relación entre hueco y diámetro con la velocidad de giro.....</i>	91
<i>Figura 66. Probeta para ensayo de corrosión antes de ensayar</i>	96
<i>Figura 67. Estado de las probetas al transcurrir 48 horas</i>	96
<i>Figura 68. Probetas de acero inoxidable ensayadas (360 horas).....</i>	97
<i>Figura 69. Diversos casos de picadura que se han producido</i>	99
<i>Figura 70. Comparativa de la rebaba producida en el proceso, para condiciones de diámetro óptimo (izquierda) y para mayor espesor de copa (derecha).....</i>	99
<i>Figura 71. Dimensiones de probeta de cizalladura según norma UNE-EN 15048-2101</i>	
<i>Figura 72. Probetas para el ensayo de cizalladura</i>	102
<i>Figura 73. Probetas ensayadas</i>	102
<i>Figura 74. Mediciones de dureza a lo largo de la copa</i>	104
<i>Figura 75. Indentación en acero. Indentación en intercara acero-aluminio.....</i>	105
<i>Figura 76. Proceso de taladrado convencional de tubo de acero AISI 1045 junto a chapa de aluminio Al5754</i>	106
<i>Figura 77. Proceso de Friction Drilling de tubo de acero AISI 1045 junto a chapa de aluminio Al5754</i>	107
<i>Figura 78. Parámetros medioambientales para cada proceso</i>	111
<i>Figura 79. Valores correspondientes a la fabricación de taladrina</i>	113
<i>Figura 80. Volumen viruta generada en un agujero</i>	114
<i>Figura 81. Sistema de reciclado de viruta</i>	115
<i>Figura 82. Valores correspondientes al tratamiento de virutas.....</i>	117
<i>Figura 83. Valores correspondientes al tratamiento de taladrina.....</i>	119
<i>Figura 84. Valores totales</i>	121
<i>Figura X85. Serie galvánica</i>	158

RESUMEN

En el presente proyecto, se expone un estudio experimental del proceso de taladrado por fricción, más conocido como Friction Drilling y posterior roscado por laminación, en uniones de chapas de acero y aluminio. Se caracteriza por la ausencia de tuercas. Dicho proceso está orientado a la calderería fina, sector en el cual tiene gran número de aplicaciones.

La base de este proceso es el calor producido por el rozamiento al entrar en contacto la herramienta rotativa con el material, que provoca el reblandecimiento del material, la fluencia y la deformación de éste. De este modo, se generará una copa cónica, que será posteriormente roscada por laminación.

Se va a estudiar la viabilidad de dicho método y para ello se realizarán una serie de ensayos sistemáticos que serán monitorizados y a partir de los cuales se obtendrán unos parámetros óptimos para el taladrado por fricción. Posteriormente se analizará la calidad de la unión atendiendo a su comportamiento mecánico y a su comportamiento en ambientes corrosivos. Finalmente, se realizará una comparación de su impacto ambiental frente al del taladrado convencional utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta.

Tras finalizar el proyecto, se pretende obtener un proceso de unión de materiales disímiles sin tuerca, ofreciendo una mayor calidad y una alternativa menos contaminante que los procesos utilizados hasta el momento.

ABSTRACT

This project presents an experimental study of Friction Drilling process and the next Form Threading in joints of steel and aluminum plates, widely used in many sectors, characterized by the absence of nuts. The cited process is aimed at the fine boiler making, a sector which has many applications.

The basis of this technique is the heat produced by friction because of the contact between the rotary tool and the material, causing the softening of the material, and the creep deformation of it. In that way, a tapered cup to be threaded by forming.

It will study the feasibility of the method and will be a series of systematic tests to be monitored and from them optimum parameters for Friction Drilling will be obtained. Subsequently, the bond quality according to their mechanical behavior and their behavior in corrosive environments is analyzed. Finally, a comparison of their environmental impact is performed, using the Life Cycle Assessment as a tool.

Once the work is finalized, it is expected to get a process of bonding dissimilar materials without nut, providing a higher quality and cleaner than the processes currently implemented.

LABURPENA

Aurkeztutako proiektuan, bi material desberdineko xaflen arteko lotura hariztatua optimizatzea nahi da (altzairua eta aluminioa) ez-ohiko prozesu baten bitartez, marruskadura bidezko zulaketa. Aipaturiko prozesua galdaragintza mehera bideratua dago, aplikazio asko dauzkan sektorea.

Metodo horren funtzionagarria aztertuko da eta horretarako monitorizatuko diren sistematiko probak egingo dira eta horietatik marruskaduraz egindako zulaketarako parametro onenak eskuratuko ditugu. Ondoren, batueraren kalitatea aztertuko da bere mekaniko eta korrosibo ingurune komportamenduaren arabera. Azkenik, bere inguruneko inpaktoa ohiko zulaketaren aurka konparatuko da bizi-zikloaren azterketa tresna erabilita.

Agiri hau, loturaren portaera mekanikoa aztertzean zentratuko da trakzioaren bidez. Honek, etorkizuneko kalitatezko saiakerak egiteko balioko zaizkigu eta geroago ohiko prozesuen bidez lortutako emaitzekin konparatuko da.

1. OBJETIVOS

Se trata de desarrollar un proyecto de I+D+i en el que se va a estudiar la viabilidad del proceso de Friction Drilling (taladrado por fricción) como un proceso alternativo de fabricación para la unión de chapas de poco espesor de metales disimilares (acero y aluminio) y su posterior roscado por laminación, el cual ofrece una alternativa al uso de tuercas soldadas y soldadura. Mediante esta técnica se utilizará una herramienta cónica de metal duro en el contacto con el material, provocando su reblandecimiento y facilitando la generación de agujeros que se podrán roscar posteriormente, sin cortar el material ni generar viruta, únicamente deformando el material.

Se analizará la calidad de la unión en términos de comportamiento mecánico y comportamiento frente a la corrosión. Al mismo tiempo, se comparará su impacto ambiental frente al del taladrado convencional mediante el análisis del ciclo de vida (ACV).

Al mismo tiempo mediante dicho proyecto se pretende:

- Llevar a cabo una metodología adecuada para la obtención de los parámetros de taladrado óptimos del proceso. Durante dicho proceso se estudiarán las fuerzas de avance, el momento torsor, la temperatura desarrollada, la geometría y calidad del agujero, la profundidad de la copa generada y hueco mínimo.
- Identificar los posibles problemas que surjan y proponer soluciones que se ajusten al resultado buscado. Entre las posibles problemáticas destaca la corrosión galvánica debida al contacto entre dos tipos de metales distintos, así como la adhesión de aluminio y separación de las chapas debido a la aparición de una rebaba en la intercara de ambos materiales.
- Estudiar cómo afecta la elección de los parámetros adecuados en la calidad del agujero roscado. Para ellos se realizarán una serie de ensayos experimentales para la caracterización de la unión.
- Reducir el número de pasos del proceso de unión. Las uniones roscadas hasta ahora se realizaban mediante taladrado convencional. En el taladrado por fricción en una misma operación se obtendría el agujero y la copa cónica de ambos materiales a la vez, y posteriormente, se roscaría mediante laminación y se colocaría el tornillo. La reducción de pasos en el proceso, además del ahorro de tiempo, supondría una menor necesidad de operarios. Por otra parte, el hecho prescindir de la tuerca abarataría el coste de la unión.

- Analizar cuál es la diferencia existente entre dos procesos alternativos de fabricación del mismo producto (Taladrado por Fricción y Taladrado Convencional) en términos de utilización de recursos o cuáles son las contribuciones relativas de las distintas etapas del ciclo de vida de este producto a las emisiones totales.

Al tratarse de un proyecto de I+D+i, su objetivo principal es ahondar en el conocimiento del proceso de taladrado por fricción, del comportamiento de la unión, y desarrollarlo y mejorarlo hasta optimizarlo al máximo y poder darle salida en el mercado industrial del País Vasco. Además, se plantea analizar el impacto socioeconómico, así como dar una visión de la problemática ambiental asociada a la fabricación y manipulación de los productos y servicios que rodean a la sociedad y que son necesarios para su desarrollo y buen funcionamiento.

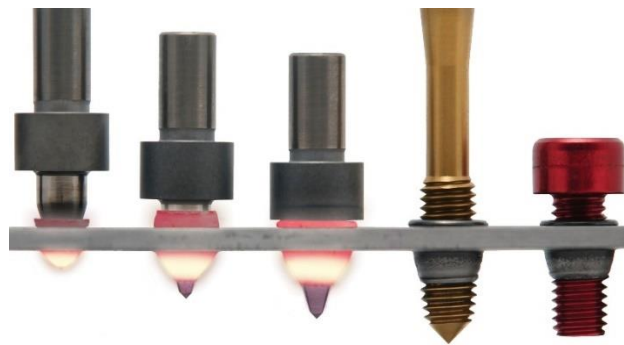


Figura 1. Taladrado por fricción y roscado por laminación

2. ALCANCE Y CONTEXTO

2.1 Intereses de las disimilares

Actualmente hay multitud de tecnologías destinadas a la unión de elementos: entre ellas están el remachado, la unión atornillada, soldadura, etc.

Cada vez mayor número de industrias se percatan de los beneficios que lleva consigo la unión de materiales de diferentes propiedades. Uno de los casos más claros es el del sector de automoción. Hoy en día, el chasis de cualquier vehículo está formado por varios materiales, cada uno de los cuales con propiedades muy diferentes. Gracias a los avances tecnológicos en el análisis de elementos finitos, se ha visto que zonas son las más solicitadas mecánicamente y se puede con ello prever en que partes hay que poner un material muy resistente y las zonas en las que una simple cobertura de material menos resistente es suficiente.

También, la industria de la ingeniería de materiales ha avanzado enormemente, por lo que para elaborar un producto se puede elegir el material de cada pieza de forma apropiada. Pero con ese hecho aparece el problema de unir dos piezas que pueden ser de materiales muy distintos, tanto en estructura como en su comportamiento (mecánico, térmico...).

El problema de unir dos piezas de materiales diferentes no es simple. No se trata únicamente de unir dos piezas, sino que también hay que tener en cuenta que las empresas quieren métodos reduzcan los costes de fabricación de producto, por lo tanto, el método de unión que se utilice debe tener unos costes de ejecución bajos, así como un bajo coste de utillaje, o que sea algo que se pueda acoplar fácilmente a las máquinas ya disponibles. El hecho de que la unión se haga de la forma más rápida posible también se refleja en el coste final del producto, por lo que las empresas utilizarán un método de unión que se haga lo más rápido posible, y de forma automática.

Esto destaca la importancia de las tecnologías que utilizan la fricción como método de unión, ya que pueden hacer que el metal fluya sin que llegue a fundirse, lo que es una gran ventaja. Además, que permite unir elementos de materiales disimilares, reduce los tiempos de procesado frente a la utilización de uniones atornilladas y es un proceso más limpio en términos medio ambientales.

2.2 Contexto general

En lo que respecta al área de la máquina herramienta, España ocupa el tercer lugar en la clasificación de la Unión Europea de los principales países productores y exportadores de máquina herramienta. Cabe destacar que el 80% de las empresas españolas fabricantes de máquina-herramienta se encuentran ubicadas en el País Vasco. Esto es debido a que durante muchos años el sector industrial ha sido de vital importancia en el País Vasco, conservando hoy en día aún su supremacía.

Desgraciadamente, están aflorando países en los que el bajo coste de la producción ha hecho que empresas locales hayan tenido que apostar por la calidad tanto de los procesos utilizados como de sus productos. Es por ello que existe una indiscutible exigencia de aumento de la productividad en el País Vasco en diversos sectores, para hacer frente a la competencia de países cuyos precios no se pueden igualar, como China o India.

Dicho aumento de la productividad de un producto o proceso implica una inevitable apuesta por la implantación de nuevas tecnologías de fabricación, y es en este punto donde toma importancia la inversión en proyectos de I+D+i (investigación, desarrollo e innovación). Sin embargo, esto conlleva un alto riesgo ya que lleva asociado consigo un largo tiempo de desarrollo y no ofrece garantía alguna. Aun así, cuando un proyecto de I+D+i se finaliza con éxito, los resultados que ofrece aportan un valor añadido en el proceso y se convierte en un arma clave contra cualquier tipo de competencia.

Además de la relación productividad-competitividad inherente al sector industrial, surge la problemática de la eficiencia energética y medioambiental que deriva de cualquier proceso de fabricación.

En un mundo de recursos limitados y sobreabundancia de residuos la búsqueda de un nuevo sistema productivo se ha vuelto inaplazable. La alternativa pasa por un modelo económico capaz de detener el deterioro medioambiental, sortear la crisis de abastecimiento de materias primas y asegurar la eficiencia y sostenibilidad: “la Economía Circular” [1]. Cabe mencionar que la industria también está haciendo grandes esfuerzos por potenciar la vida útil de sus productos.

Por todo lo mencionado anteriormente, la Unión Europea está actualmente destinando una gran cantidad de dinero con el fin de financiar este tipo de proyectos de I+D+i.

En concreto, en 2008, la asociación de las “fábricas del futuro” (Factories of the Future, FoF) se puso en marcha bajo el Plan Europeo de Recuperación Económica.

A través de Horizon 2020, programa de investigación e Innovación para el período 2014-2020, se trazan las rutas hacia las tecnologías de fabricación de alto valor añadido para las fábricas del futuro; fabricación que será más limpia y respetuosa con el medio ambiente, más sostenible socialmente y mejor desde el punto de vista tecnológico. [2]

Con estos programas se pretende dar cobertura a proyectos entre los cuales están aquello cuyo objetivo es la unión de materiales disimilares con características muy distintas.

Como es sabido, el aluminio y el acero son dos materiales muy distintos ya que presentan puntos de fusión muy alejados, lo cual dificulta su unión por procesos convencionales. Por ello, es interesante la investigación de técnicas como el Friction Drilling junto con el roscado por laminación que se expone en este proyecto.

De entre los posibles clientes de esta técnica destaca el sector de la calderería fina, con una larga tradición en Vizcaya. Este sector se caracteriza por la necesidad de unir chapas de poco espesor de acero y aluminio, materiales usados en aplicaciones comunes como ensamblaje de estructuras metálicas, uniones de carrocería y chasis, mobiliario, etc.

No solo el sector de la calderería o el de automoción como se ha mencionado anteriormente podría estar interesado en la aplicación de esta técnica. En el sector eléctrico un posible uso es la unión de acero y cobre, donde el acero actuaría como elemento estructural y el cobre como elemento conductor de electricidad.

En la actualidad, los estudios sobre la unión de dichos materiales metálicos mediante la técnica mencionada son escasos, lo cual justifica dicha investigación en busca de parámetros óptimos, con el fin asegurar la propuesta de un método más rápido, económico y más saludable para el medio ambiente.

Es importante mencionar que la inversión en este tipo de proyectos supone un alto riesgo por lo que muchas empresas se echan atrás a la hora de destinar fondos a investigar. Por ello, estos proyectos encajan perfectamente en las universidades, ya que ayudan a la consecución de conocimientos que luego pueden servir para ayudar a las

empresas locales a implantar nuevas tecnologías a un precio mucho menor y con un riesgo mínimo, ya que es la universidad la que toma el proyecto.

En este caso el proyecto se realizará en las instalaciones de la Universidad del País Vasco, concretamente en el Departamento de mecánica.

2.3 Necesidad de exploración de tecnologías: uso de la escala TRL/MRL

Los TRL (Technology Readiness Levels) o MRL (Manufacturing Readiness Levels) son unos indicadores utilizados para evaluar el grado de madurez de una tecnología en particular. Estos se utilizan principalmente para ayudar en el desarrollo de tecnologías de seguimiento y en su transición a la producción. Por lo tanto, si se considera una tecnología concreta y se dispone de información del TRL en el que se encuentra se puede identificar su nivel de madurez.

El conocimiento del TRL es de gran utilidad, a la hora de abordar proyectos de desarrollo de una tecnología como en este caso el taladrado por fricción en la unión de materiales disimilares. Es evidente que no se puede considerar el mismo grado de innovación el que se aborda para la realización de un determinado proyecto si se parte de tecnologías maduras o probadas en entornos reales (TRL8-TRL9) y que pueden encontrarse disponibles de forma libre y sin licencia, que el que se aborda a partir de tecnologías en fase de desarrollo y validación (TRL4-TRL7) o el abordado incluso en tecnologías que se encuentran todavía en un nivel más básico a nivel de idea de concepto(TRL1-TRL3).
[3]

Se han establecido 9 niveles de madurez que comprenden la evolución de una nueva tecnología desde el concepto o la idea, pasando por diversas validaciones en distintos entornos hasta la realización de pruebas con éxito en un entorno real.

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados.
- TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.

- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real

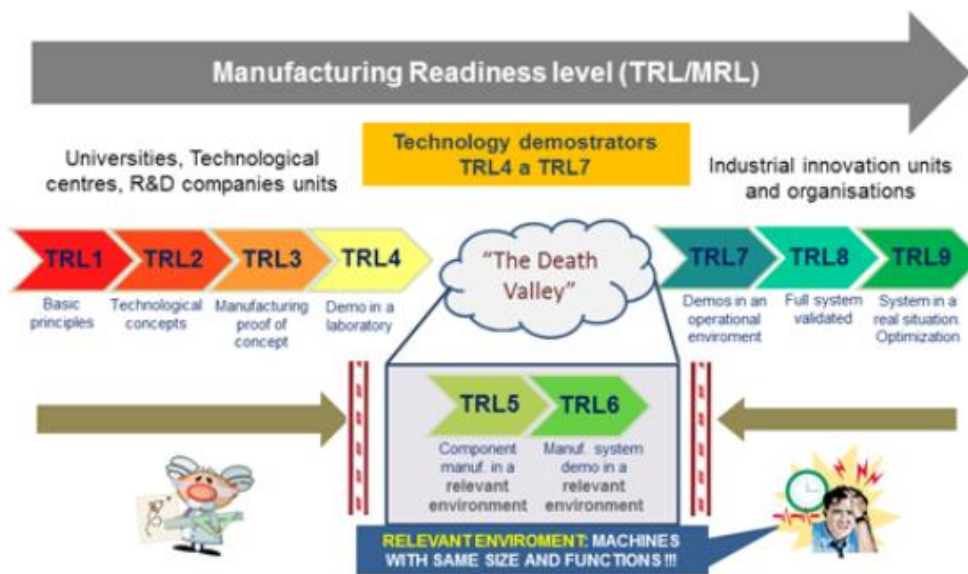


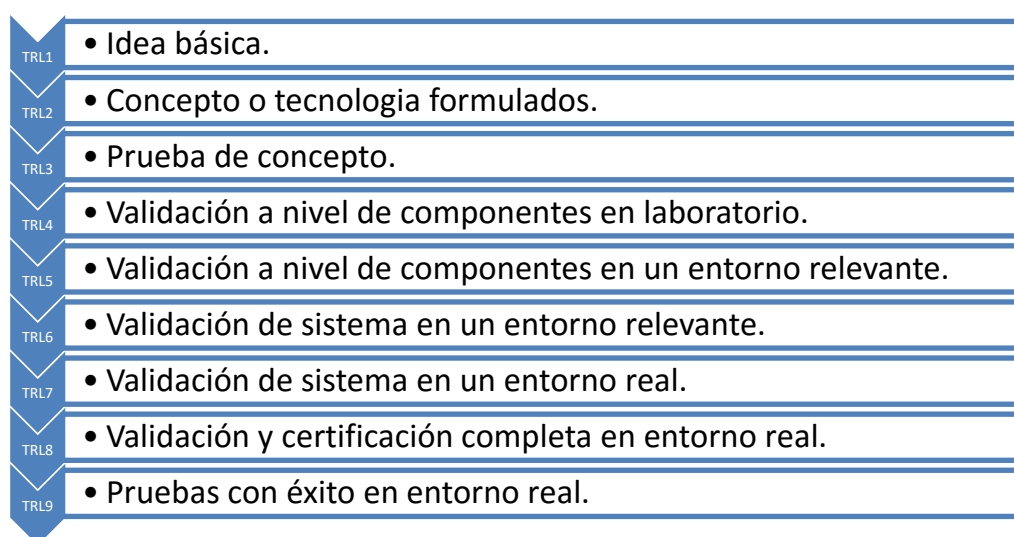
Figura 2. Clasificación de los niveles de madurez

Atendiendo a dicha clasificación podemos enmarcar este proyecto en el TRL4. En este nivel se pueden llevar a cabo fácilmente modificaciones a nivel de componente ya que posteriormente en niveles a partir del TRL 6, nos encontraremos a nivel de sistema o subsistema.

El TRL4 hace referencia al desarrollo tecnológico, dicho nivel indica que la tecnología está lista para la fase de desarrollo de la tecnología de adquisición. En este punto, han sido identificadas las inversiones necesarias para el desarrollo de la tecnología de fabricación y se han identificacado los riesgos que pueden derivarse de dicha tecnología así como las medidas para afrontalos. Así mismo, se establecen los objetivos y se

identifican los parámetros clave, las herramientas, instalaciones, material y habilidades requeridas.

Con todo esto en dicho nivel se realizan pruebas en entornos de laboratorios tras las cuales se obtendrán los resultados que permitirán la validación del fricción drilling como método de unión a nivel de componente. A partir de aquí se podrá ir pasando a los siguientes niveles para validar dicha tecnología en entornos relevantes y finalmente en un entorno real hasta llegar a un prototipo no comercializable. Por entorno relevante se entiende un entorno con unas condiciones que se aproximan o simulan suficientemente a las condiciones existentes en un entorno real. Por ultimo, quedaría la puesta en el mercado y su despliegue a partir del TRL8 donde estan los proyectos de innovación tecnológica, ya que la innovación tecnológica requiere la introducción de un nuevo producto o servicio en el mercado y para ello se deben haber superado las pruebas y certificaciones así como todas las homologaciones requeridas.



La mayor ventaja de la utilización de los TRLs sería conocer el punto de partida de un nuevo proyecto a financiar y hasta que TRL se llegaría.

En general, cuanto más maduras sean las tecnologías que se utilizan menor será el riesgo y también menor el grado de desarrollo tecnológico y cuánto más inmaduras sean las tecnologías que se introducen mayor grado de desarrollo tecnológico propio y mayor riesgo tecnológico será necesario. Por lo tanto, conocer el punto de inicio y el punto de finalización en términos de TRL de un determinado proyecto significa mayor conocimiento del alcance del proyecto susceptible de financiación.

3. BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO

Los programas de fomento de la I+D y la innovación, tanto en el ámbito nacional como regional o europeo otorgan una importancia creciente a la posible utilidad futura de los resultados de los proyectos y a su repercusión social.

Dentro de los beneficios que puede aportar un proyecto de esta naturaleza se encuentran las contribuciones tecnológicas, es decir, todo lo que pueda aportar en el ámbito del conocimiento de la técnica.

También se describen las contribuciones económicas, dentro de las cuales además de los beneficios puramente económicos se incluirá el ahorro de tiempo durante el proceso de fabricación y los beneficios que acarrea.

Por último, se expone el plan de difusión y explotación.

3.1 Contribuciones científicas y técnicas

La presente investigación se centra en el proceso de generación de agujeros en chapas mediante la generación de calor. En particular se va a centrar en la unión de chapas de dos materiales con propiedades distintas como son el acero y el aluminio, muy utilizados en calderería fina donde se ha detectado una oportunidad de mejorar los procesos utilizados hasta ahora. Para lograr este fin, se plantean las actividades recogidas en el presente trabajo.

Este trabajo de investigación supone un aumento de la mejora del conocimiento ya que mediante él se han optimizado los procesos y la experimentación.

La relación de los responsables del aula de máquina herramienta con empresas interesadas en las líneas propuestas facilita el interés de las empresas en los proyectos. Además, existe una buena relación con los centros tecnológicos del entorno, compartiendo proyectos de I+D, recursos e ideas.

3.2 Contribuciones económicas

Para el estudio de los beneficios económicos que aporta dicha investigación, se va a comparar el taladrado por fricción frente a un método convencional como es la unión atornillada clásica mediante tuercas.

En la figura 3 se muestra el tiempo de procesado de un agujero mediante ambos procesos. Se puede observar que el tiempo total destinado a la fabricación de un agujero mediante la unión clásica es de 1,18 minutos, el cual es superior a 0,93 minutos en una unión mediante taladrado por fricción y posterior roscado por laminación. Esta diferencia es debida a que, en el primer caso, es necesaria la preparación de la arandela y tuerca con su posterior colocación y ajuste, lo que implica mayor carga manual. Mientras que, en el segundo caso, la rosca la realiza la propia máquina y el operario solo interviene en la colocación del tornillo.

Teniendo en cuenta que la tasa horaria de la máquina herramienta CNC de tres ejes es 32 €/h y que la de un trabajador medio vasco es 42 €/h se saca el coste por agujero en el proceso de fabricación.

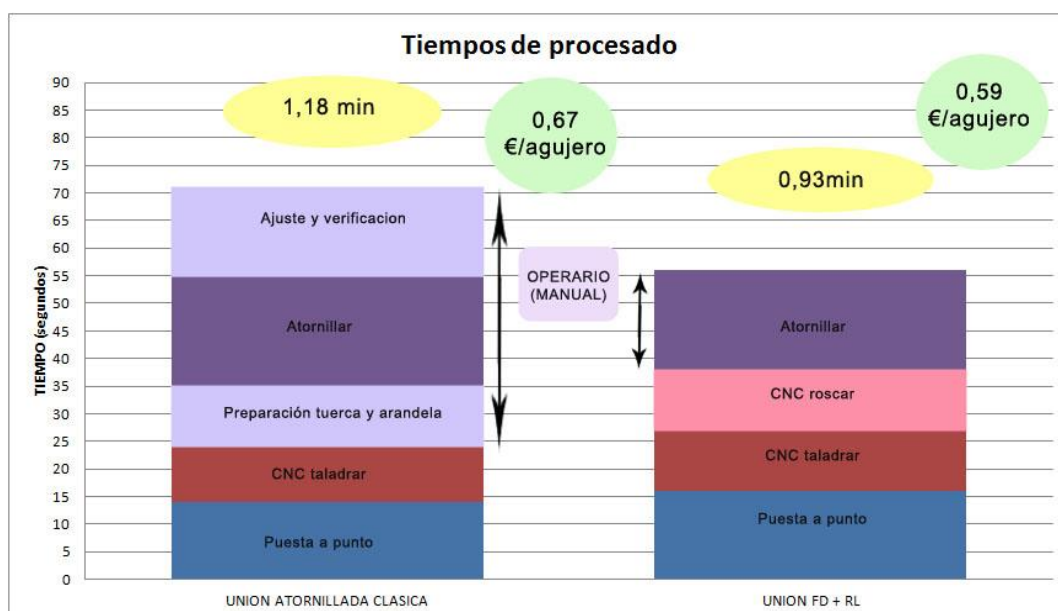


Figura 3. Tiempo y coste del proceso de fabricación de un agujero en una unión atornillada clásica y en una mediante FD + RL

Por otro lado, hay que tener en cuenta el precio de la punta o broca utilizada, se muestra en la tabla 1. Una broca para un taladrado clásico tiene un coste de 20 €/ud y su vida útil es de 5000 agujeros, lo que da un coste de 0,01 €/agujero. Mientras que el precio de una punta de FD es de 160 y sirve para realizar 6000 agujeros, el coste total es de 0,03€/agujero.

El coste final del proceso por agujero es:

Unión clásica: 0,68 €/agujero

Unión FD + RL: 0.62 €/agujero

Tabla 1. Costes totales del proceso para un agujero para una unión atornillada clásica y para una unión mediante FD + RL

Proceso	UNION ATORNILLADA CLASICA		UNION FD + RL	
	Tiempo	Coste	Tiempo	Coste
Puesta a punto	14 sg	0,163 €	16 sg	0,187
CNC taladrar	10 sg	0,089 €	11 sg	0,098
CNC roscar			11 sg	0,098
Preparar arandela y tuerca	11 sg	0,128 €		
Atornillar	20 sg	0,233 €	18 sg	0,210
Ajuste y verificación	16 sg	0,187 €		
TOTAL		0,67 €/agujero		0,59 €/agujero
Broca	20,00 €	5000 Agujeros	160,00 €	6000 Agujeros
	TOTAL	0,01 €/agujero		0,03 €/agujero
TOTAL COSTE PROCESO	UNION CLASICA	0,68 €/agujero	UNION FD + RL	0,62 €/agujero
Disminucion de Coste		8,79%		

De esto se deduce que, aunque el precio de la broca por agujero sea mayor en la unión mediante taladrado por fricción más roscado por laminación, como la carga manual y el número de procesos es menor, el coste final se reduce en un 8,69% respecto a la unión atornillada clásica.

En general, el taladrado por fricción en comparación a los procesos actualmente utilizados para la unión de chapas finas de acero y aluminio presenta una alternativa de mejora en varios aspectos:

- Se evita el proceso de refrigeración, por lo tanto, se convierte en un proceso limpio.
- La rebaba generada es susceptible de ser roscada, lo que permite sustituir el empleo de tuercas soldadas.
- La vida útil de la herramienta es prolongada, ya que carece de filos de corte que se desgasten.
- Proceso fácil de automatizar.
- Disminución de gastos económicos.
- Proceso muy rápido.
- A pesar de tratarse de una técnica no convencional, no se utilizan maquinas especiales o complejas que impliquen elevados costos de inversión.

- Se obtiene un incremento de la vida útil de la herramienta ya que carece de filos de corte que se desgasten.

3.3 Plan de difusión y explotación

Para fijar las líneas de la difusión y explotación de los resultados del presente proyecto, es primordial identificar las aplicaciones en las que tendría salida, para orientarlos hacia su comercialización posterior en la industria y la protección de la propiedad intelectual por medio de patentes.

En primer lugar, ha de remarcarse que el plan de difusión de los resultados de este trabajo es de especial importancia, y habrá de divulgarse por todos los medios de comunicación de los que se dispone habitualmente en el mundo de la fabricación industrial, entre los que se encontrarían los siguientes:

1. Publicaciones de artículos en revistas JCR de prestigio y ponencias científicas sobre esta materia en Congresos científico- técnicos.
2. Transmisión del conocimiento de carácter industrial hacia las empresas se informará, con especial atención, sobre el avance del proyecto a las empresas que son posibles clientes, con el propósito de formarles en la temática del trabajo realizado, y con el fin de iniciar nuevas colaboraciones de carácter industrial.
3. Internet y páginas web. El más claro ejemplo podría ser la página web <http://www.ehu.es/manufacturing/>, en la que se recogen todos los detalles de los trabajos que se llevan a cabo en el Taller de Mecánica, perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Todo esto siempre y cuando no sea susceptible de patente, ya que un solo artículo la invalidaría.

Por el contrario, el plan de explotación es muy desconocido. Al tratarse de un proyecto de I+D+i, los resultados son a priori desconocidos, por lo que en el caso de que se llevase a cabo con éxito y en función de los resultados, se le buscaría una salida u otra.

4. ESTADO DE LA TÉCNICA

4.1 Taladrado por fricción

Fundamentos de la técnica

El taladrado por fricción es un método para la generación de agujeros en el cual se utiliza una herramienta rotativa, de metal duro normalmente, y con forma geométrica especial. Aunque no es una tecnología reciente, ya que el primer intento de generar agujeros por este proceso fue en 1923 [5], está todavía en desarrollo.

Durante el proceso la herramienta presiona contra superficie de la pieza produciendo calor por fricción y deformación plástica a fin de ablandar y hacer fluir el material durante la penetración de la herramienta [6].

El material de pieza de trabajo fluye en la dirección axial y radial, y luego formará una copa (Figura 4) De ahí que esta aplicación sea de interés cuando se trata de hacer agujeros roscados en chapas de poco espesor, tubulares o con geometrías complejas

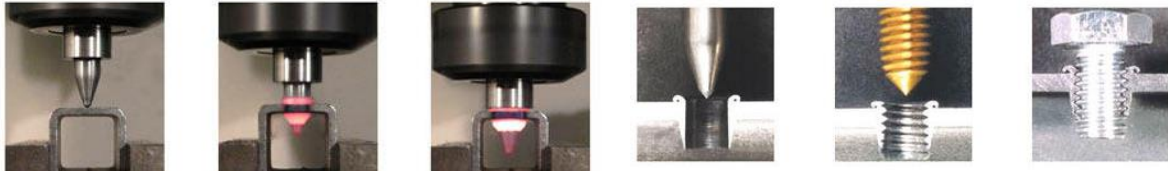


Figura 4. Secuencia del proceso de taladrado por fricción con roscado por laminación

Este proceso, debido a sus características, se ha introducido en varias aplicaciones en el área industrial como:

- Automoción
- Bicicletas
- Muebles
- Equipos para gimnasia

En las siguientes imagines se muestran algunas de estas aplicaciones:



Figura 5. Sistemas de suspensión de vehículos



Figura 6. Sillas y mesas



Figura 7. Estructuras metálicas

Características del proceso

En el taladrado por fricción se pueden utilizar maquinas herramienta convencional siempre y cuando tengan las características adecuadas.

Sin embargo, las maquinas herramienta CNC, debido a la posibilidad de programación permiten una optimización de los resultados y de tiempo de trabajo.



Figura 8. Máquina de control numérico

En cuanto a la herramienta utilizada, está fabricada en un material de alta dureza, generalmente carburo de tungsteno [7] y presenta una geometría especial (Figura 9).

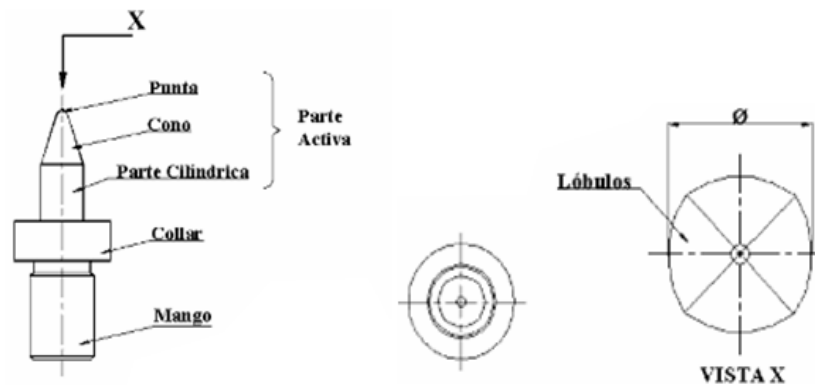


Figura 9. Geometría de la herramienta de taladrado por fricción

Dicha herramienta posee una punta cónica que al contactar con el material a alta velocidad combinada con presión axial produce fricción térmica. Esto plastifica el material y lo desplaza, permitiendo su penetración en él y la formación de un collar alrededor de la superficie superior de la pieza. El resto del material se desplaza

formando una rebaba o copa inferior alrededor al agujero, la cual es susceptible de ser roscada.

La punta es la región de mayor sollicitud, puesto que los estudios han demostrado que durante el proceso el mayor esfuerzo axial se da justo cuando la punta está completamente dentro del material.

En cuanto a la geometría de la herramienta varía en función a la utilización, el espesor de las chapas o los materiales a emplear.

La punta puede tener bordes que realizan el mecanizado previo de la chapa antes de la conformación, utilizado en materiales con una capa superficial indeseable o para reducir la fuerza axial durante el proceso.

Dependiendo de la duración de su parte activa, la herramienta es clasificada como larga, corta o muy corta [5,8]. Esta variación en la longitud de la parte activa hacen posible obtener copas con formas cilíndricas o cónicas.

El collar de la herramienta, además de servir como un soporte de la máquina en el mandril, se puede utilizar para dar forma o, en el caso de haber filo, la perforación del manguito de rebaba superior (rompe virutas). El mango sirve como un dispositivo de sujeción de la herramienta en una máquina herramienta adecuada.

En la figura 10 se pueden mostrar los distintos tipos de herramientas de taladrado, cada una de las cuales generarán formatos de copa diferentes.



Figura 10. Geometría de distintas herramientas de taladrado por fricción

Las herramientas comercialmente están hechas en diámetros que van de 3 a 50 mm [20] y existe la posibilidad de recubrirlas con (TiAl)N o con diamante. El diámetro del agujero queda definido por la parte cilíndrica.

En la mayoría de los casos, el final de vida de la herramienta viene determinada por su ruptura total. En cambio, en aplicaciones de baja solicitud se observó que el final de la vida puede ser medida por el desgaste de la punta de la herramienta que conduce a la generación de copas de menor calidad.

Los valores de vida de la herramienta están en el rango de 8.000 a 15.000 agujeros para metal duro [9,7] y 155.000 agujeros para herramientas recubiertas con (TiAl)N [10,11] Para reducir la fricción entre la herramienta y la pieza, se usan lubricantes en forma líquida o en forma de pasta, compuesta principalmente de sulfuro de cinc (ZnS) que, de acuerdo con el fabricante mantiene su eficiencia rango de temperatura de -20 °C a 1150 °C.

Cinemática del proceso

El comportamiento del taladrado por fricción está definido por la fuerza de avance, el momento torsor y la temperatura de contacto.

Estos esfuerzos dependerán principalmente de las variables de entrada de la herramienta y las características del material y geometría de la pieza. Donde las variables de entrada son velocidad de avance y de giro del husillo.

Cuanto mayor sea el espesor de la pieza, al aumentar el volumen también lo hará la resistencia a la deformación y por lo tanto la fuerza de avance y momento torsor serán mayores.

- Si mantenemos constante el espesor y la velocidad de giro, al aumentar la fuerza de avance disminuirá el tiempo disponible para que el material adquiera la plasticidad [10]. En consecuencia, la fuerza de avance aumentará
- Si se mantiene constante el espesor y la velocidad de avance, un aumento de la velocidad de giro del husillo aumentará la cantidad de energía suministrada al material y adquirirá plasticidad rápidamente, la fuerza de avance y el momento torsor disminuirán.

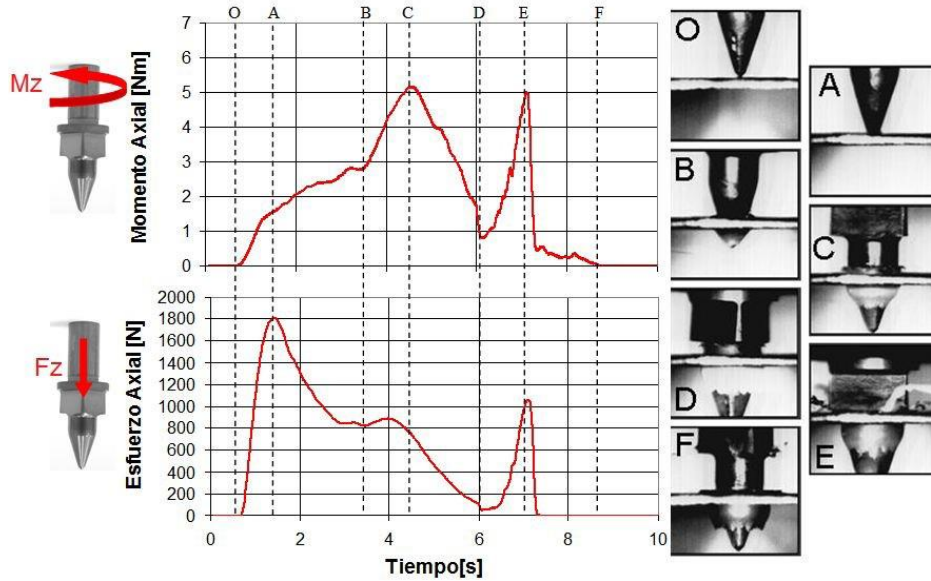


Figura 11. Evolución del momento y del esfuerzo en el taladrado por fricción

La cinemática del proceso de taladrado por fricción se refiere al comportamiento de la fuerza de empuje y momento torsor en dependencia de las variables de entrada. Ambos esfuerzos son variables y se muestran en la figura 11 que está dividida en varias zonas:

- **Tramo O-A:** Con la entrada de la punta de la herramienta, la fuerza axial crece linealmente. Se alcanza el valor máximo de la fuerza de avance cuando debido al aumento de temperatura, disminuye la resistencia a ser deformado. El momento torsor sigue un comportamiento similar debido al mayor área de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo.
- **Tramo A-B:** A medida que la herramienta avanza, aumenta la superficie de contacto entre la zona cónica y la pieza, por lo tanto, se incrementa el momento torsor.
- **Tramo B-C:** Entra en contacto la zona cilíndrica con la parte de la rebaba de mayor espesor, produciéndose un breve incremento de la fuerza de avance y un aumento rápido del par hasta su valor máximo.
- **Tramo C-D:** Cuando la parte activa de la herramienta atraviesa la zona de la copa de menor espesor el momento torsor y el esfuerzo axial disminuyen.
- **Tramo D-E:** Corresponde a la zona de rompevirutas de la herramienta. La rebaba superior es aplastada y arrancada lo que produce un aumento del par y de la fuerza de empuje hasta unos picos.

- **Tramo E-F:** Corresponde al momento de retroceso de la herramienta. La fuerza de empuje se reduce rápidamente hasta cero y debido a una débil fricción entre pieza y herramienta se muestra un ligero momento axial.

Temperaturas del proceso

La temperatura es de gran importancia en el estudio del taladrado por fricción debido a su influencia en los cambios microestructurales en el material de la pieza de trabajo, en el desgaste de la herramienta y en las propiedades mecánicas del material.

Según Lopes [12] para cada etapa diferente del proceso las fuentes predominantes de calor varían (Figura 12).

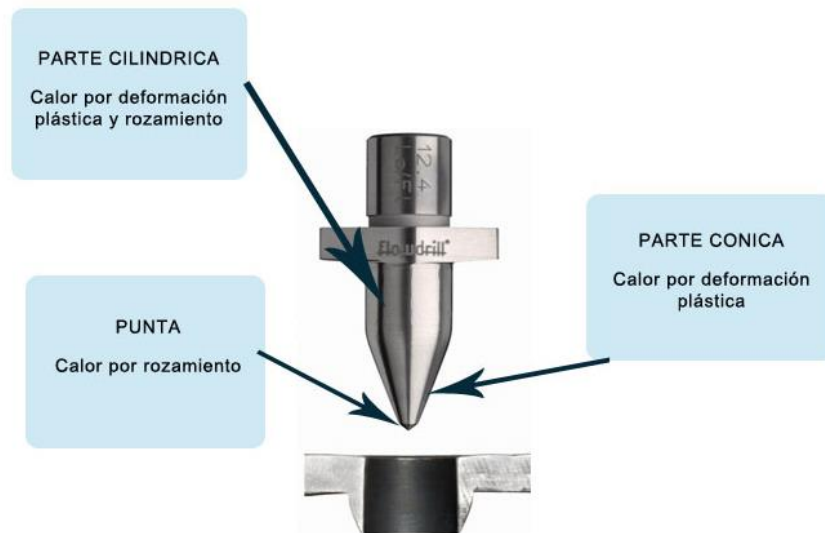


Figura 12. Fuentes de calor en función de la zona de la herramienta

A lo largo de la investigación, varios métodos experimentales de medición se utilizaron para determinar las temperaturas alcanzadas, tales como, pirómetros de infrarrojos, termopares y termocamaras [5,8,12,13,7].

Además de los métodos experimentales, se pueden emplear métodos matemáticos para estimar teóricamente la temperatura máxima en la interfaz de la pieza herramienta, a partir de los datos de temperatura máxima en puntos medidos lejos del centro del orificio de la copa [14]. El método más adecuado para medir la

temperatura en el taladrado por fricción es mediante el pirómetro de dos colores.

En investigaciones realizadas por Kretschmer [15], Lopes [6], Heiler [13] y Duarte Filho [5], dependiendo de las condiciones de trabajo se encontró que la temperatura máxima varía entre 490°C y 890°C. En estos estudios se utilizaron placas de acero de bajo carbono, con espesor de 2,0 y 3,0 mm y herramientas que van desde 5,4 hasta 12,0 mm de diámetro.

Cabe destacar que la temperatura alcanzada por la herramienta influye en la copa formada. Cuando esta temperatura es baja la viruta desplaza el material en dirección radial al agujero, mientras que cuando es alta la copa adquiere forma más cilíndrica [17].

Tiempo del proceso

La determinación del tiempo total de realización del agujero es un factor de gran importancia tecnológica y relevancia económica [5,8].

La duración del proceso se relaciona con el tiempo que tarda en formarse la rebaba inferior. este tiempo se puede reducir de dos maneras: utilizando herramientas más cortas o mediante el aumento de la velocidad de avance. El uso de herramientas más cortas puede reducir el tiempo aproximadamente un 30% [5].

Una solución más reciente se obtuvo con el uso de máquinas herramientas CNC, Duarte Filho [5] utilizando velocidades y avances variables obtiene una reducción de aproximadamente 55% del tiempo de taladrado comparado con condiciones constantes.

Forma y calidad de las copas generadas

La geometría y calidad de la copa generada es de importancia para la resistencia final del agujero roscado. Está definida básicamente por el tipo de herramienta utilizada, la corta origina un agujero cónico y la larga uno cilíndrico. Las principales dimensiones del agujero formado son el espesor de la pared, el diámetro del agujero y la longitud de la copa, como se muestra en la figura 13.

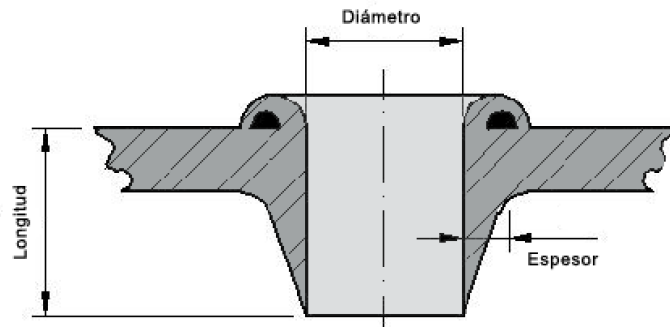


Figura 13. Dimensiones principales del agujero

En experimentos anteriores [8,19] se observó que la longitud del agujero cuando se utilizan velocidades constantes de avance, no se ve afectada de manera significativa por las condiciones. Sin embargo, el uso de altas velocidades de giro y bajas velocidades de avance favorecen la formación de copas largas, influenciando la resistencia a la tracción del agujero roscado.

La profundidad total de la copa depende también del espesor de partida, cuanto mayor sea, se obtienen copas mayores.

La calidad de la copa se determina de acuerdo con un sistema de clasificación creado por Lopes [8] y más tarde optimizado por Heiler [19].

En este sistema la calidad es determinada por la longitud total de la copa en relación al borde de ruptura formado en la extremidad inferior de las copas. Las mejores calidades, tipo 1 y 2 (Figura 14) son susceptibles al roscado según la norma DIN 267, ensayo que determina la carga de resistencia máxima media de tracción.

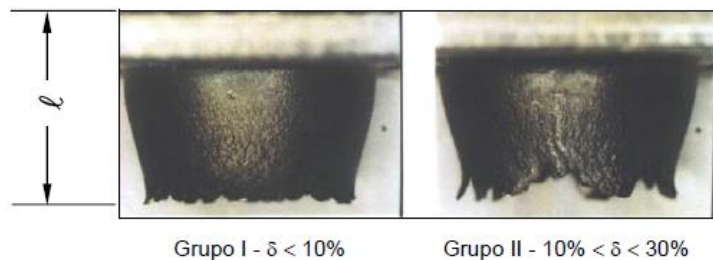


Figura 14. Calidades tipo 1 y tipo 2

4.2 Roscado por laminación

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes procesos de roscado, siendo hoy en día el proceso de roscado por arranque de viruta o corte el más conocido. Sin embargo, cada vez está cobrando más protagonismo el roscado por laminación, debido a las ventajas que ofrece frente al roscado convencional. Estas ventajas son la reducción del tiempo de mecanizado, de los costes, aumento de la seguridad durante el proceso de producción y mejor calidad de la rosca generada.

La reducción del tiempo de mecanizado y de los costes, conllevan un aumento de la productividad, y se debe a que el agujero se realiza en la misma máquina que se ha utilizado para el taladrado por fricción, y al aumento de la vida útil de la herramienta.

Es un proceso más seguro porque, no genera viruta. Esto mismo hace que sea un proceso mucho más limpio, ya que no tiene emisiones ni residuos (más allá de los que emita una máquina CNC). Esto también se traduce en un ahorro en el coste, ya que no hay que gastar en tratar estos residuos.

Por otra parte, la calidad de las roscas generadas por laminación es superior a la de las generadas por corte, lo que supone un incremento de la resistencia de la rosca (hasta un 20 o 50% más que un roscado convencional), ya que durante el roscado por laminación la herramienta deforma las fibras del material, sin cortar ni interrumpir su estructura granular. Además, se produce un fenómeno de endurecimiento por deformación en frío, beneficiosa para la fatiga, siempre que sea a compresión.

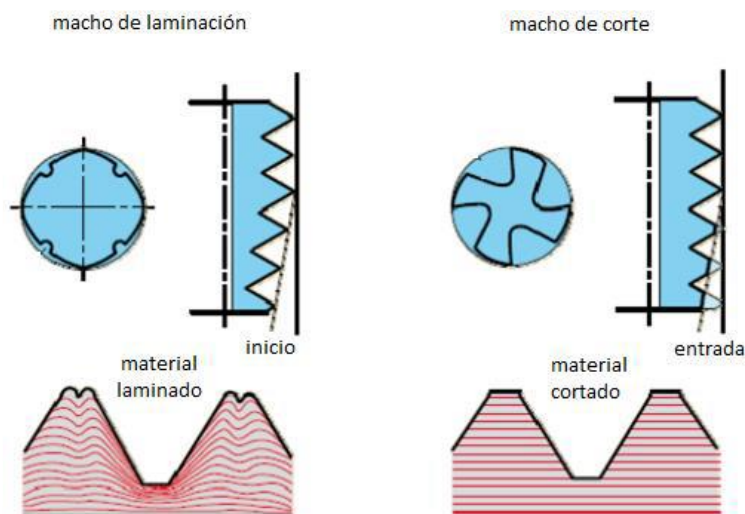


Figura 15. Comparación macho de laminación y macho de corte

Como se puede apreciar en la figura anterior, el roscado por laminación no deja una punta perfecta en la rosca, sino que crea una especie de cresta que se produce cuando los dientes del macho de laminar penetran en el material para deformarlo. Si se hiciese un agujero perfecto con el material exacto, el material a mecanizar ocuparía por completo los espacios entre los filetes del macho y quedaría una punta perfecta, pero esto no es posible, ya que si en vez de quedarse corto con el material, hubiera en exceso (el agujero fuera menor de un cierto diámetro), la rosca se mecanizaría mal. Además, las fuerzas que se generarían en el proceso serían enormes, lo que podría llegar a dañar la máquina. El caso contrario no sería tampoco conveniente, ya que, si el agujero a laminar es demasiado grande, la rosca no se generará bien haciendo que los filetes no tengan la suficiente calidad como para asegurar el correcto funcionamiento de la rosca.

Además, este proceso se aplica en muchos materiales, como aceros, aceros aleados, inoxidable y en aleaciones de aluminios y cobre, lo que lo hace adecuado para roscar la copa generada por el precedente taladrado por fricción.

En cuanto a la geometría de la herramienta, la sección del macho de laminación es poligonal y normalmente se compone de tres, cuatro o más esquinas [12]. Suelen estar fabricado en acero rápido de alta resistencia y puede ser recubierta con nitruro de titanio (TiN) y nitruro de titanio-aluminio (TiAlN), para aportarles dureza [20,21]. Además, disponen de una punta cónica de 2 a 4 filos de menor diámetro que son responsables de iniciar el desplazamiento del material.

En cuanto a los parámetros característicos a la hora de realizar el roscado por laminación, los más relevantes son la máxima profundidad de rosca y el paso de rosca máximo. El paso de rosca está limitado por el tipo de material a roscar y sus propiedades. La profundidad máxima de roscado viene limitada por la longitud de la herramienta y por el lubricante utilizado. Además, la profundidad de roscado máxima de los machos de laminar es mayor que la de los machos de roscar.

Por otra parte, el proceso también presenta algunas limitaciones debido a que no todos los materiales son aptos para ser sometidos a un proceso de roscado por laminación, ya que debido a la deformación intrínseca que conlleva, el material ha de tener un mínimo de ductilidad y no superar una resistencia máxima.

Otro aspecto relevante es la influencia del diámetro de prefabricación, debido a que, si es demasiado pequeño, tanto la laminación como las fuerzas generadas durante el proceso serán excesivas. Por el contrario, si el diámetro de prefabricación es demasiado

grande, la sección del núcleo no se lamina lo suficiente y el diámetro del núcleo resultará pequeño.

También cabe destacar los cambios que produce el proceso de roscado por laminación en el material. Al ser un proceso de deformación, se produce el fenómeno denominado acritud, lo que supone que se producirá un endurecimiento por deformación en la zona afectada del material.

Además, al haber aplastamiento y deformación del material, aparecerán tensiones internas de compresión, beneficiosas, ya que provocan un aumento de la resistencia de la rosca.

4.3 Aspectos de comportamiento de las uniones

Comportamiento resistente

Es necesario garantizar que las uniones atornilladas sean capaces de transmitir adecuadamente las fuerzas, ya que es suficiente que falle una cualquiera de ellas para ocasionar la ruina parcial o total de la estructura. El comportamiento de las uniones es complejo con un alto grado de indeterminación que hace imposible un análisis riguroso, de manera que las fórmulas utilizadas en su dimensionamiento se basan en consideraciones empíricas y en resultados de ensayos ejecutados correctamente.

Las uniones roscadas pueden estar sometidas a cargas de tipo transversal, a cargas de tipo axial, según actúen perpendicular o paralelamente al eje de la unión, a una combinación de ambas o a flexión (Figura 16).

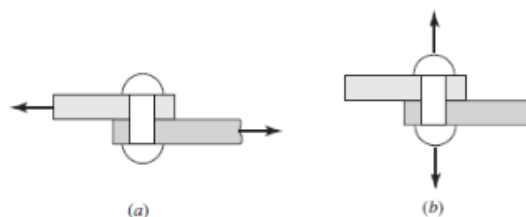


Figura 16. Cargas transversales (a) y axiales (b)

Los modos de fallo clásicos, según la forma en que trabaje la unión son:

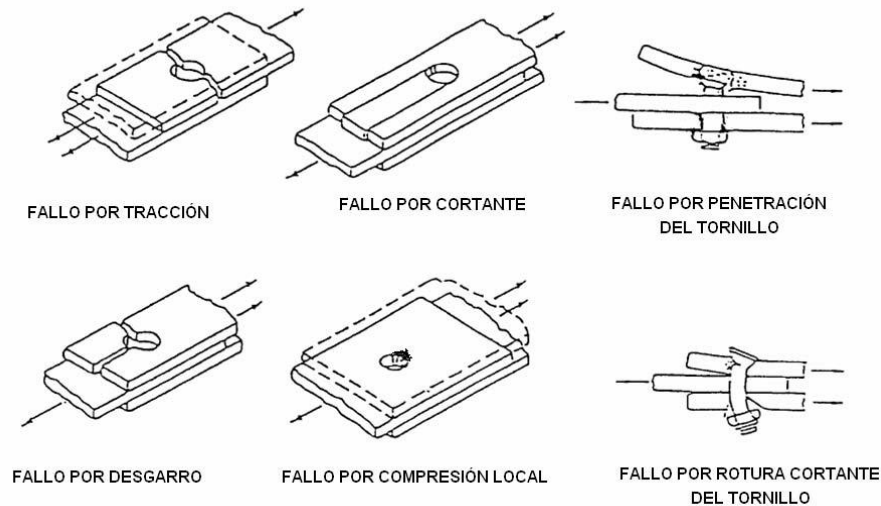


Figura 17. Modos de fallo en una unión atornillada

- La unión podría fallar por agotamiento del material de las chapas a unir en las paredes del taladro efectuado para alojar el tornillo. La resistencia frente al aplastamiento se expresa en función de la tensión de rotura del acero de las chapas a unir y no de la tensión del límite elástico.
- También se tiene que comprobar frente a cortadura, que este esfuerzo se produce cuando, en el vástago, las chapas unidas tratan de deslizarse una con respecto a la otra.
- En una unión atornillada con los tornillos trabajando (por cortadura y aplastamiento) es preciso comprobar las piezas a unir cuando están sometidas a tracción, ya que los taladros son un debilitamiento que, si es excesivo, puede llevar a la rotura de la pieza por desgarramiento.
- En las uniones donde existen esfuerzos de tracción en la dirección del eje del tornillo, se tiene que comprobar la resistencia del tornillo, que depende, como es lógico, de la resistencia de cálculo del tornillo y de su área.
- Si la unión trabaja a tracción y a cortante, es necesario comprobar que no falle bajo esta sollicitación combinada.
- En los tornillos de alta resistencia pretensados. Frente a cargas perpendiculares al eje de los tornillos la unión resiste mediante el rozamiento entre chapas favorecido por el esfuerzo de pretensado.

Cuando la carga perpendicular alcanza el valor de la resistencia por rozamiento, la unión desliza hasta que el vástago del tornillo entra en contacto con las paredes del taladro. A partir de este momento, la parte de las fuerzas exteriores no absorbidas por el rozamiento deberán serlo por el tornillo de alta resistencia trabajando a cortadura y aplastamiento.

Comportamiento a fatiga

La fatiga es el mecanismo mediante el cual las fisuras se incrementan en una estructura. El crecimiento tan sólo se produce bajo tensiones cíclicas. La rotura final se produce normalmente en zonas sometidas a tensión de tracción cuando la sección transversal reducida se hace insuficiente para soportar la carga máxima sin que se produzca la rotura. En condiciones de servicio normales, las fisuras no se propagan mientras la carga sobre la estructura sea estacionaria.

La resistencia a la fatiga de un componente soldado se define como el rango de tensión que, fluctuando a una amplitud constante, origina el agotamiento del componente tras un número especificado de ciclos (N). El rango de tensión es la diferencia entre los puntos máximo y mínimo del ciclo. El número de ciclos hasta la rotura se denomina resistencia o vida a la fatiga.

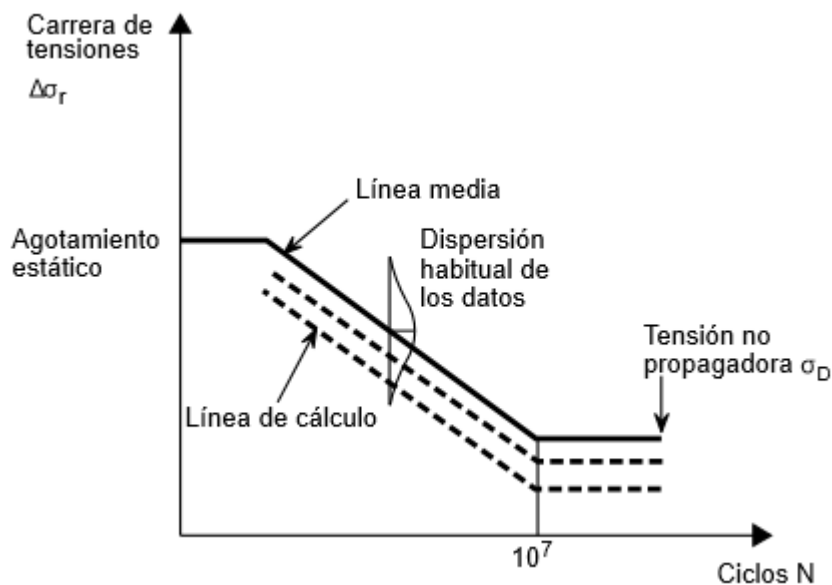


Figura 18. Curva de resistencia a la fatiga (S-N) para ensayos con cargas de amplitud constante

Las presencias de discontinuidades geométricas ocasionan concentraciones de tensiones que aumentan localmente e influyen sobre la resistencia a la fatiga. En los tornillos, las concentraciones de tensiones se producen en el fondo de la rosca, la salida de la rosca y el radio bajo la cabeza. Normalmente el agotamiento de los tornillos sometidos a tensión cíclica se produce en este último emplazamiento o en la primera rosca bajo la tuerca.

El diseño de las uniones tiene una gran importancia; la resistencia a la fatiga depende finalmente del recorrido real de las cargas a través de la unión y de la fluctuación de las tensiones que se produzca en las áreas sensibles a la fatiga.

Es posible distinguir dos casos de carga en una unión atornillada. Uno de ellos se produce cuando la carga está en la dirección axial de los tornillos y el otro cuando la transferencia de la carga es perpendicular al eje del tornillo.

Un tornillo cargado a tracción ofrece un bajo rendimiento ante la fatiga.

- En una unión atornillada cargada a tensión, es posible evitar la fatiga de los tornillos pretensionándolos y teniendo cuidado de que el área de contacto esté situada en un emplazamiento favorable.
- En general, se obtiene una posición favorable del área de contacto con respecto a la fatiga de los tornillos cuando ésta se sitúa tan cerca como sea posible de los componentes en los que esté actuando la fuerza de tracción.

Corrosión galvánica

Todos los materiales de una forma u otra interactúan con el entorno en el que se encuentren, pudiendo en ocasiones causar efectos negativos en la capacidad del elemento para cumplir con la función que se le haya asignado.

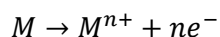
En el caso particular de los metales, la prevención y el mantenimiento de los elementos afectados supone aproximadamente un 5% del Producto Interior Bruto de un país industrializado como el nuestro, dato que justifica la atención que se presta a este fenómeno nocivo.

De entre los diversos tipos de corrosión que podrían afectar a la unión entre acero y aluminio mediante el proceso de taladrado por fricción la más interesante es la corrosión galvánica, por estar dos metales en contacto, pudiéndose formar una pila galvánica.

Dentro de la corrosión electroquímica, producida cuando hay circulación de corriente eléctrica, la forma de corrosión galvánica es una de las más importantes, y se clasifica como corrosión húmeda debido a que tiene lugar en materiales que se encuentran en disoluciones acuosas.

Este tipo de corrosión se produce en dos etapas.

Primero, se produce una reacción de oxidación debido a que un metal con n electrones ha de perderlos. La reacción es la siguiente:



La zona donde tiene lugar la oxidación se denomina ánodo. El material anódico sufre una pérdida progresiva de masa, produciéndose así su degradación.

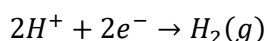
En el segundo paso, los electrones liberados por el metal oxidado se transfieren a otro metal, produciéndose así la reducción de este otro metal, en lo que se denomina una reacción de reducción. La zona donde se produce esta reacción se denomina cátodo.

Existen varias posibilidades de reducción: se pueden reducir los iones de hidrógeno o de oxígeno, o se puede dar la reducción de los iones metálicos que estén presentes en la disolución.

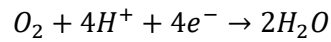
1. Reducción de iones de hidrógeno o de oxígeno: El tipo de reacción que se producirá dependerá del tipo de disolución en la que se encuentre el metal.

a. Disolución ácida: Cuando hay una mayor cantidad de iones H^{+} que de OH^{-} . En este caso, nos podemos encontrar con dos situaciones diferentes, dependiendo de la presencia o no de oxígeno disuelto en ella.

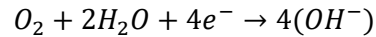
i. Sin oxígeno disuelto: Los iones H^{+} se reducen y de la reacción resulta gas de hidrógeno.



ii. Con oxígeno disuelto: El oxígeno disuelto presente en la disolución se reduce, formándose moléculas de agua.



b. Disolución básica o neutra con oxígeno disuelto:



2. Reducción de un ion metálico presente en la disolución: Puede reducirse a un estado de valencia menor o a un estado neutro (metal).



Cuando dos metales con diferente potencial se ponen en contacto y están sumergidos en un electrolito, que consiste únicamente en una solución de agua y sales que permite la circulación de corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo, un metal se oxida y otro se reduce. Esto es por lo que se produce la corrosión galvánica. Como se puede deducir uno de los electrolitos más eficaces es el agua de mar, debido a su salinidad.

Es posible conocer de entre los dos metales cual se corroerá y para ello se puede utilizar la serie fem estándar o la serie galvánica (Figura 19) que determina el grado de nobleza de los metales según el potencial del electrodo.

Por convención, se da el valor cero a la tensión del hidrógeno. Las especies químicas situadas en la tabla por encima de los iones H^+ se reducen frente a éste, produciéndose la reacción mostrada en la Figura 16. Por el contrario, las especies químicas situadas por debajo se oxidarán, produciéndose una reacción de oxidación. La reacción de oxidación es la misma que la de reducción, pero cambiándola de sentido, por eso no viene reflejada en la tabla de la Figura 19. De la misma forma, el potencial de oxidación de una reacción de oxidación es el mismo que el de su reacción de reducción, pero con signo contrario.

	Reacciones del electrodo	Potencial de electrodo estándar V° (V)
↑ Inactividad creciente (catódicos)	$\text{Au}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Au}$	+1,420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pt}$	~+1,2
	$\text{Ag}^+ + e^- \longrightarrow \text{Ag}$	+0,800
	$\text{Fe}^{3+} + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \longrightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0,401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}$	+0,340
	$2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$	0
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}$	-0,126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}$	-0,136
↓ Actividad creciente (anódicos)	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Ni}$	-0,250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Co}$	-0,277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}$	-0,403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}$	-0,440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}$	-0,744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}$	-0,763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Al}$	-1,662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}$	-2,363
	$\text{Na}^+ + e^- \longrightarrow \text{Na}$	-2,714
	$\text{K}^+ + e^- \longrightarrow \text{K}$	-2,294

Figura 19. Serie fem estándar

Esta tabla es de gran utilidad para estimar la dirección de una reacción de oxidación-reducción, pero ha sido obtenida en condiciones ideales, por lo que podría llevar a error. Es más práctico y realista utilizar la serie galvánica (Figura 20). Lo que nos muestra la serie galvánica es la reactividad relativa entre los materiales metálicos cuando están sumergidos en agua de mar. Si observamos la serie galvánica podemos ver que cuanto más positivo sea el potencial de electrodo, más noble será el material, y por lo tanto se comportará como cátodo (reduciéndose). Por el contrario, cuanto más negativo sea el potencial, mayor comportamiento anódico tendrá el material y se oxidará en contacto con los metales que estén más arriba en la serie galvánica.

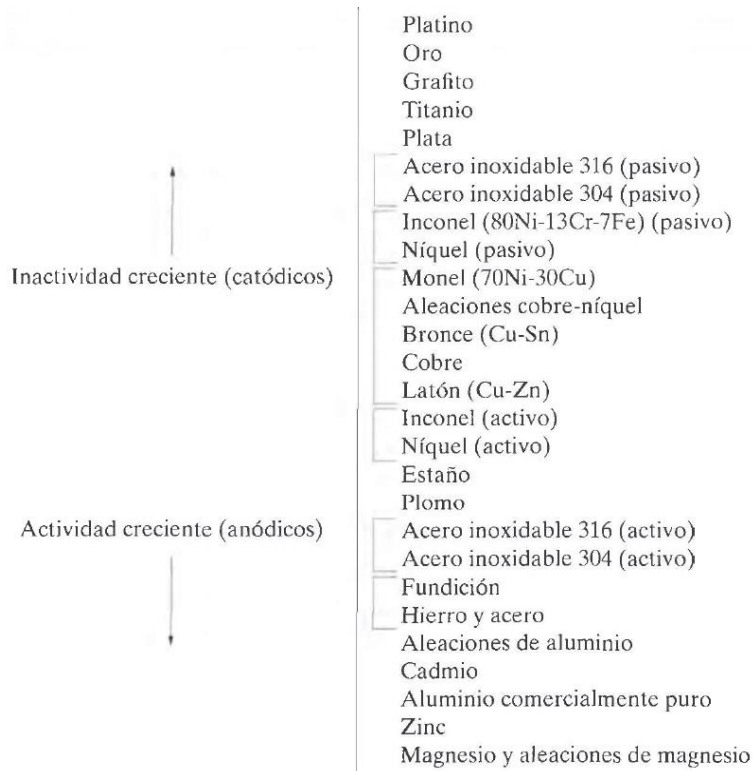


Figura 20. Serie galvánica

Aspectos medioambientales

Actualmente, una de las mayores preocupaciones de la humanidad está siendo dejar como legado a las futuras generaciones un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización. En el marco de la globalización de las economías no es posible estar al margen de esta preocupación. Hoy en día, los consumidores son cada vez más exigentes, tanto en la conservación de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente, como en la calidad de los productos y servicios que reciben. Por ello, la industria apuesta por producir con alta calidad y satisfacer las expectativas de los consumidores y de otras partes interesadas en la protección del medio ambiente.

Un análisis de ciclo de vida (ACV) o *Life Cycle Assessment* (LCA) es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho).



Figura 21. Esquema de ciclo de vida de un producto

El ACV se basa en una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de los procesos de producción en nuestro caso del taladrado por fricción y del taladrado convencional con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente mediante la cuantificación del uso de recursos. Siendo consideradas "entradas" productos como la energía, materias primas, agua y "salidas" el propio producto manufacturado, las emisiones derivadas de su producción y uso. Con el auge del ecodiseño este enfoque se ha ido integrando cada vez con más frecuencia en la sociedad [22].

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la Administración o Gestión Ambiental. Estos estándares incluyen las series ISO-14040 sobre el ACV, que son de carácter voluntario.

Las fases principales del procedimiento para el ACV son cuatro:

1. Definición del objeto y alcance del estudio.
2. Preparación del modelo de ACV incluyendo las entradas y salidas. Esta etapa, en la que se recogen datos, se refiere habitualmente al Inventario de Ciclo de Vida (ICV).
3. La etapa en la que se definen la relevancia de las entradas y salidas se suele conocer como Valoración de Impacto del Ciclo de Vida (VICV).
4. Finalmente, interpretación de los resultados.

En cuanto a los aspectos financieros, el ACV puede ser una ayuda útil para bajar los costos en la medida que el nuevo diseño y los nuevos procesos de fabricación, transporte y distribución, entre otros, promuevan una mayor eficiencia en la asignación y el empleo de materias primas, insumos y energía [23]. De igual modo, provee ventajas comparativas y competitivas al proporcionar todos los elementos de análisis a las empresas que más tarde deseen certificar sus productos bajo esquemas de sellos ambientales o etiquetas ecológicas. El ACV no sólo es un instrumento para proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales, sino un instrumento empresarial para reducir costos y mejorar posiciones en el mercado.

5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

5.1 Descripción General

Actualmente la necesidad de unir acero y aluminio está muy extendida entre los diversos sectores industriales (tales como el sector de automoción, calderería, etc.). Esto es debido a que el aluminio es un material que presenta grandes ventajas en combinación con el acero. Sin embargo, no todos los métodos de unión son adecuados, pues el aluminio supone ciertas dificultades.

Se ha producido una necesidad de aumentar la productividad debido a un incremento de la competitividad entre las empresas cada vez mayor, lo que hace que se busque que la unión no solo sea de calidad, sino que se realice en el menor tiempo posible. Además, también hay un gran aumento en la concienciación de la sociedad en lo que respecta al impacto ambiental que pueda tener el proceso de elaboración de la unión, por lo que habrá que tenerlo en cuenta a la hora de seleccionar el método más adecuado.

5.2 Identificación de las Alternativas

A continuación, se describen los métodos convencionales utilizados hasta la actualidad a la hora de realizar uniones entre diferentes materiales:

Uniones atornilladas

Es de las uniones más comunes que hay hoy en día. Existen dos variantes principales:

- Unión tornillo-agujero roscado

Para esta unión se necesita que en una de las piezas se haya practicado un taladro que posteriormente se ha roscado. De esta forma el tornillo se pasará por el material no roscado (que tendrá un agujero ligeramente mayor a la métrica del tornillo) y se atornillará a la pieza roscada.

Este tipo de unión se utiliza cuando una de las piezas a unir tiene un espesor considerable, donde se pueda alojar un agujero roscado.

- Unión tornillo tuerca (la más común)

En este caso, el tornillo y la tuerca son los elementos que harán la unión y las piezas a unir tendrán un agujero ligeramente mayor a la métrica del tornillo, para que éste pueda pasar sin problemas. Además, se añade una arandela a la unión para evitar que la rosca o su terminal penetren en el agujero y produzcan tensiones adicionales.

La problemática que se puede presentar es que ocasionalmente el acceso a la zona de la unión es limitado y para el operario o máquina que deba atornillarlo quizá sea muy complicado, e incluso a veces imposible, hacerla.

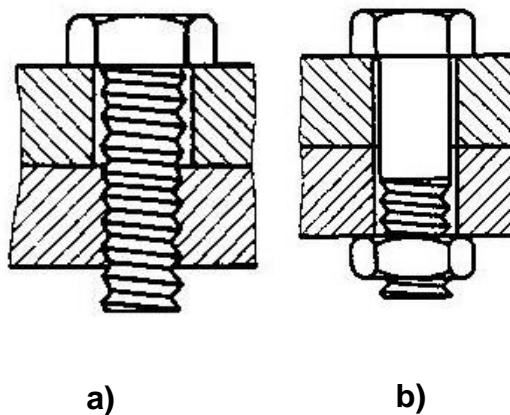


Figura 22. a) Unión tornillo-agujero roscado b) Unión tornillo-tuerca

VENTAJAS

- Se pueden desmontar fácilmente.
- Los costos de operación son muy bajos debido a que se utilizan operarios poco cualificados.
- Presenta facilidad para unir distintos materiales.
- No cambia ni interfiere con el tratamiento térmico de las piezas unidas.
- No se presentan tensiones residuales ni alabeos de la estructura.

INCONVENIENTES

- Los tornillos de pequeño diámetro se pueden romper si se aprietan con demasiada fuerza.
- No son herméticas a los fluidos.

- Trae consigo concentraciones de tensiones en la zona de los agujeros.
- Se puede aflojar o debilitar ante cargas dinámicas o también ante variaciones de temperatura.
- Se suele presentar corrosión en la tuerca o cabeza del perno.

Remachado o roblonado

Un remache es un elemento de fijación que se emplea para unir de forma permanente dos o más piezas. Consiste en un tubo cilíndrico (el vástago) que en la parte final dispone de una cabeza. Las cabezas tienen un diámetro mayor que el resto del remache, para que así al introducir éste en un agujero pueda ser encajado.

Los campos en los que más se usa el remachado como método de fijación entre acero y aluminio son: automotriz, electrodomésticos, muebles, hardware, industria militar, metales laminados, aeronáutica, etc.

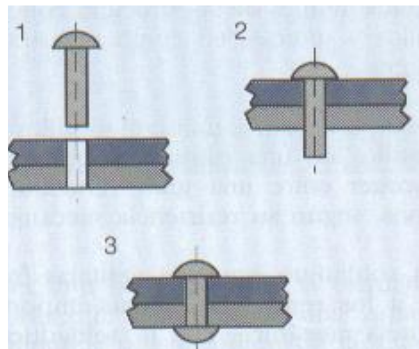


Figura 23. Uniones remachadas

VENTAJAS

- El proceso de remachado es más barato.
- Los remaches se pueden aplicar a dos o más piezas y no tienen que ser necesariamente del mismo material.
- El remachado es un proceso que fácilmente se puede automatizar.
- Se puede aplicar cuando sólo se tiene acceso a la cara externa de las piezas, lo que se conoce como unión ciega.
- Los materiales y diseños de los remaches son variados, lo que permite acabados más estéticos y facilitan la elección del diseño más adecuado por su funcionalidad y visibilidad.

INCONVENIENTES

- La unión es permanente, lo que dificulta el mantenimiento.
- La resistencia que puede alcanzar un remache es más baja a la que se puede alcanzar con un tornillo.
- No es adecuado para piezas de gran espesor.

Soldadura

La soldadura se trata de un método de unión para piezas de igual o distinta naturaleza mediante una perfecta unión entre ellas, en la mayoría de los casos con la aportación de calor, con o sin aplicación de presión, y con o sin empleo de material de aportación, pudiendo tener este la misma o distinta composición que los metales a unir. El material de aporte al solidificarse se denomina cordón de soldadura. Hay que tener en cuenta que para llevar a cabo la soldadura es necesaria una fuente de energía externa.

Los efectos que sobre el material produce la soldadura serán determinantes para el uso que se le quiera dar a la pieza. Dichos efectos pueden ser debidos tanto al metal de aportación como al calor aplicado durante el proceso, que podría afectar a las propiedades del metal.

Además, se ha de tener especial cuidado al problema de la aparición de porosidades y grietas, que se soluciona añadiendo elementos de aleación al metal de aportación, y sujetando firmemente las piezas que se quieren soldar para evitar deformaciones o distorsiones.

Hay efectos derivados de la soldadura que afectan de forma significativa a la utilidad del material soldado. El suministro de calor que se produce durante el proceso puede afectar a las propiedades de la pieza soldada. Hay que tener especial cuidado al amarrar la pieza a soldar para evitar porosidades y grietas. Con este mismo fin, se suelen añadir elementos de aleación al metal de aportación.

Hay distintos tipos de soldadura los cuales se pueden clasificar en:

1. **Soldadura heterogénea:** Se efectúa en materiales de distinta naturaleza con o sin metal de aportación; o entre metales iguales, pero con distinto material de aportación. Dentro de este tipo se diferencian dos.

- a. Soldadura blanda: Se realiza a temperaturas por debajo de los 400°C. El metal de aportación más común es una aleación de estaño y plomo que funde a aproximadamente 230°C.
 - b. Soldadura fuerte: También llamada dura o amarilla. Es similar a la blanda, pero se alcanzan temperaturas de hasta 800°C. Como metal de aportación se suelen utilizar aleaciones de plata y estaño, o de cobre y cinc. Se utiliza cuando se exige una resistencia considerable en la unión de dos piezas metálicas, o que tengan que resistir esfuerzos muy elevados o temperaturas excesivas.
2. **Soldadura homogénea:** Los materiales que se sueldan y el material de aportación (en caso de haberlo) son de la misma naturaleza. En caso de no haber material de aportación se denominan autógenas. Hay varios tipos:
- a. Por presión: Se produce sin aportación de calor. Es muy útil en aplicaciones donde no se deba alterar la estructura o propiedades de los materiales a soldar. Se distinguen dos tipos:
 - i. Por presión en frío o en caliente: Se trata de poner en contacto las dos superficies y aplicar una presión sobre ellas hasta que se produzca la unión.
 - ii. Por fricción: Se hace girar una de las piezas y se pone en contacto con la otra. La fricción une ambas piezas por deformación plástica.
 - b. Por fusión:
 - i. Oxiacetilénica (con gases de aportación): El calor aportado se obtiene e la reacción de combustión del acetileno, con lo que se consiguen unas temperaturas del orden de los 3500°C.
 - ii. Por arco eléctrico: Sistema de reducido coste, fácil y rápida utilización, aplicable a toda clase de metales. Consiste en provocar la fusión de los bordes que se desea soldar mediante el calor desarrollado por un arco eléctrico. Existen varios tipos, por

lo que, dependiendo de la aplicación, se escogería el que mejor se adapte a nuestras necesidades.

iii. Aluminotérmica: Como fuente de calor, se utiliza el hierro líquido y sobrecalentado que se obtiene de la reacción química que se produce entre el óxido de hierro y el aluminio de la cual se obtiene la alúmina, hierro y una temperatura muy alta.

c. Por presión y fusión:

i. Aluminotérmica.

ii. Por resistencia: Se basa en el efecto Joule, el calentamiento se produce al pasar una corriente eléctrica a través de la unión de las piezas. Se puede realizar mediante tres métodos: por puntos, por costura y a tope.

iii. Oxiacetilénica (con gases al soplete).

VENTAJAS

- El tiempo de preparación es menor que para uniones atornilladas.
- Las uniones prácticamente no se deforman y son estancas.
- Tienen buena apariencia estética.
- Bajo unas buenas condiciones, la unión soldada puede ser más fuerte que el material base.
- Se puede realizar no solo en fábrica, sino que también en campo.
- Se pueden unir todo tipo de materiales, de la misma o de distinta naturaleza, eligiendo bien el tipo de soldadura.

INCONVENIENTES

- Puede dañarse con altas temperaturas.
- Los operarios deben tener una alta cualificación.
- Alto costo de la mano de obra.
- Alto consumo de energía.
- La unión es permanente, así que en ciertos casos puede no ser conveniente.
- Los defectos de calidad son difíciles de detectar.

FSSW (Friction Stir Spot Welding)

FSW (Soldadura por Fricción-Agitación) es un proceso de soldadura en estado sólido en el que una herramienta no consumible es rotada a lo largo de la interface entre dos materiales a ser unidos. La herramienta rotativa ejerce presión en el material y se desplaza por la pieza lo que produce un calentamiento por fricción y debido a esto se genera una región plastificada alrededor de la herramienta. A medida que la herramienta se mueve a lo largo de la junta de soldadura, el material plastificado es desplazado. Bajo la presión de forja y el calor de la herramienta, se produce un lazo metalúrgico totalmente consolidado. (Figura 24)



Figura 24. Ejemplo de soldaduras por FSW

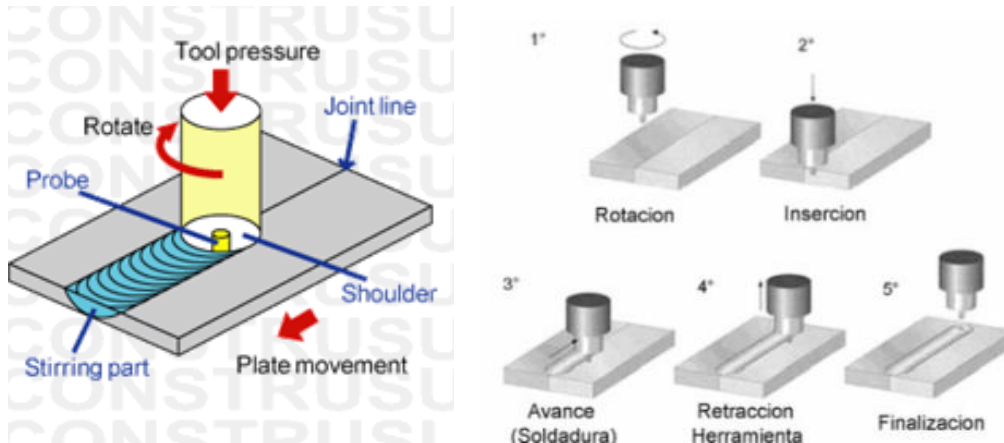


Figura 25. Principio de funcionamiento

Los parámetros de soldadura para la FSW consisten en la velocidad de desplazamiento de la herramienta con respecto al material base, la velocidad de rotación de la herramienta, y la presión de forja aplicada por la herramienta. [18]

VENTAJAS

- Buenas propiedades mecánicas de la zona afectada.
- Fácilmente automatizable.
- Puede operar tanto horizontalmente como verticalmente.
- Al no derretirse el material, no se producen gases que pueden ser tóxicos.
- No es necesario el uso de refrigerante.
- No se producen cambios excesivos en el espesor del material, por lo que no es necesario mecanizar posteriormente.
- Posible el uso en materiales disimilares.

INCONVENIENTES

- Deja marca cuando la herramienta es retirada.
- Se necesitan grandes fuerzas para realizarlo.
- Poco flexible.
- Método poco estudiado, por lo que es posible que aún sea poco fiable.
- Se necesitan operarios cualificados para realizarlo

Láser

Se trata de un tipo de soldadura que utiliza un láser como fuente de calor para unir los dos materiales. En general, se utiliza en piezas de bajo-medio espesor sin aportar material, aunque hay casos en los que se necesita aportar material.

Existen dos variantes del proceso:

1. Soldadura por conducción: La energía del láser se concentra sobre la junta fundiendo el material que se encuentra a ambos lados, el cual se vuelve a enfriar rápidamente quedando la junta soldada.
2. Soldadura por penetración: Se forma un agujero en el baño fundido que captura la práctica totalidad de la energía del láser. El metal vaporizado forma un plasma que llena el keyhole (cavidad dentro del baño de metal fundido) y ejerce una presión que empuja el material fundido de forma que éste se va solidificando a medida que avanza el láser.

VENTAJAS

- Permite la soldadura de diferentes materiales.
- Baja zona afectada térmicamente.
- La energía introducida es menor que en otros procesos de soldadura.
- Puede soldar piezas de espesores pequeños.
- Alta calidad de la unión.
- Permite la unión de chapas de diferentes espesores.
- Muy rápida.
- Fácilmente automatizable.

INCONVENIENTES

- Alto coste de la maquinaria.
- Operarios altamente cualificados.
- Poca flexibilidad.
- La unión es permanente, así que en ciertos casos puede no ser conveniente.
- Alto consumo de energía (a pesar de ser menor que en la soldadura).
- Los defectos de calidad son difíciles de detectar.

5.3 Criterios de selección

A la hora de valorar las alternativas mencionadas con anterioridad se seleccionará la que más se ajuste a los criterios que se mencionan a continuación.

El criterio más importante será el de la influencia que tiene el método de unión en la productividad de un cierto proceso productivo. Cuanto menor sea el tiempo en el que podemos realizar la unión, mayor será el número de uniones que podamos hacer por jornada y, por lo tanto, mayor será el beneficio que se obtenga.

Un segundo criterio será valorar la facilidad con la que con éste método se pueden unir materiales disimilares.

El coste de utillaje también será un criterio a tener en cuenta, ya que cuanto más caro sea éste, mayor coste tendrá la unión.

También, el grado de automatización del método es un factor importante, ya que muchas empresas optan por automatizar los procesos de fabricación lo máximo posible, por lo que cuanto más automatizable sea el método, mejor.

Otro criterio a tener en cuenta será el del impacto medioambiental que tenga el proceso de realizar la unión. Hoy en día, la sociedad está cada vez más concienciada en cuanto a la problemática ambiental y por lo tanto, es un factor que tienen en cuenta muchas empresas.

5.4 Solución propuesta

De entre todos los métodos expuestos, el taladrado por fricción es el que mejor responde a nuestras necesidades, ya que es uno de los métodos que se pueden aplicar más rápidamente, ya que existen tornillos especialmente adaptados para poder hacer el agujero, roscarlo por laminación y, finalmente, hacer las funciones de un tornillo normal en una unión roscada, todo ello de una sola vez (si bien es cierto que se puede hacer por pasos).

Es un método que puede unir tanto materiales de la misma naturaleza como materiales disimilares. Esto requiere un grado de investigación, ya que al unir materiales

disimilares, éstos podrían reaccionar de formas muy distintas, por lo que para unir ambos materiales habría que asegurarse de que la unión es compatible, tal y como habría que hacer con cualquier otro método de unión.

Los utillajes quizá no sean los más baratos, pero con investigación sería posible hacer utillajes con costes al alcance de cualquiera que quiera implantar este método de unión en su proceso de fabricación.

Es fácilmente automatizable, ya sea con la versión directa (taladrado por fricción y roscado por laminación en el mismo paso) o por pasos, ya que con herramientas corrientes se pueden introducir en un centro de mecanizado o en un brazo robótico que soporte las fuerzas que intervienen en el proceso.

Por último, al no desaprovechar material y no necesitar refrigeración, es un método muy limpio, ya que las únicas emisiones que se producen son las que emitan las máquinas en su funcionamiento normal.

6. ANÁLISIS DE RIESGOS

La decisión de iniciar un proyecto de I + D (investigación y desarrollo) para desarrollar una nueva tecnología entraña siempre incertidumbre y riesgo.

Es necesario disponer de un primer instrumento de análisis que permita relacionar riesgo e incertidumbre, para comparar y clasificar, en función de esos dos parámetros, la apuesta que realmente hace una empresa cuando se embarca en un proyecto de I + D.

No existe una clasificación oficial de los riesgos; se pueden clasificar en función de diferentes parámetros. A pesar de la dificultad de clasificación, seguidamente se recoge una clasificación posible:

6.1 Riesgos tecnológicos

Relacionados con los aspectos industriales. Los más abundantes en un proyecto de investigación y desarrollo.

R1

RIESGO

Desgaste por adhesión del aluminio en la herramienta. El coeficiente de fricción entre el aluminio y los metales de corte es elevado.

MEDIDAS

- Variación de los parámetros hasta obtener aquellos que disminuyan este efecto e incluso lo neutralicen.
- Uso de lubricantes en forma líquida o pasta aplicados en la superficie de la herramienta, o recubrimiento de las puntas con TiAlCrN.

R2

RIESGO

Debido a la presencia de los gradientes de deformación y temperatura en la zona afectada térmicamente del agujero final, éste puede sufrir diferentes cambios micro-estructurales.

Este hecho puede originar una copa que no cumpla los requerimientos para llevar a cabo el roscado, o cuyo agujero roscado final tenga unas características resistentes pobres.

Cuanto mayor copa mejor resistencia mecánica final del agujero roscado.

MEDIDAS

- Variación de parámetros, tales como, alta velocidad de avance y la velocidad de giro, hasta lograr una relación adecuada entre el tamaño de copa y las características mecánicas.

R3

RIESGO

Separación entre ambas chapas debido a la presencia de una rebaba por parte del aluminio.

El aluminio tiene un punto de fusión de 660,9 °C mientras que el del acero está en torno a 1375°C. Debido a esto cuando el aluminio ha fundido no encuentra salida, pues el acero necesita mayor tiempo, y, por lo tanto, se dispersa por los alrededores y forma la rebaba.

Este hecho evita también que la unión del acero y el aluminio llegue a producirse de forma correcta.

MEDIDAS

- Variación de parámetros.
- Realizar un pretaladro con una broca adaptada con un filo especial y que puede, con un solo mecanizado hacer el pretaladro y el perforado.
- Uso de un utillaje adecuado (prensa chapa) que ejerza la fuerza suficiente alrededor de la zona donde se va a realizar el agujero, impidiendo el levantamiento de las chapas.
- Otra alternativa sería atacar al acero antes que, al aluminio, lo cual habría que estudiar pues puede no interesar al cliente.

R4

RIESGO

Pérdida del recubrimiento de las herramientas debido a las elevadas temperaturas de trabajo.

MEDIDAS

- Cambio de parámetros.
- Uso de recubrimientos especializados, sin que alcancen precios desorbitados.
- Control y estudio de las temperaturas que llegan a alcanzarse mediante instrumentos como la cámara termográfica.
- Uso de refrigeración líquida o gaseosa para controlar la temperatura del proceso.

R5

RIESGO

Cuando el aluminio se pone en contacto con el acero se produce la corrosión del acero pues de entre ambos es el metal menos noble. Ambos quedan inmersos en un electrolito medio húmedo (formando una pila galvánica), este proceso electroquímico se conoce con el nombre de corrosión galvánica.

MEDIDAS

- Aislar eléctricamente los dos metales entre sí.
- Mantener a los metales secos y / o protegidos de los compuestos iónicos (sales, ácidos, bases), por ejemplo, pintando o recubriendo al metal protegido bajo plástico o resinas epoxi, y permitiendo que se sequen.

6.2 Riesgos operativos

Relacionados con la posibilidad de ocurrencia de pérdidas financieras, originadas por insuficiencias de procesos, personas, sistemas internos y en la presencia de eventos externos imprevistos

R6

RIESGO

Que el proceso sea largo e imposible de automatizar.

MEDIDAS

- Uso de una roscadora eléctrica o neumática de brazo articulado que pueda fijarse a una mesa de taller y permita 360° de giro a un brazo basculante para optimizar el proceso

R7

RIESGO

Falta de disponibilidad de la maquinaria requerida para el proceso, en ocasiones puntuales.

MEDIDAS

- Adaptación de los utillajes a otra maquinaria disponible en el taller.

6.3 Riesgos financieros

Medida de las posibles eventualidades que pueden afectar al resultado de explotación de una empresa, que hacen que no se pueda garantizar ese resultado a lo largo del tiempo.

R8

RIESGO

Falta de financiación para la realización del proyecto.

MEDIDAS

- Difusión y búsqueda de inversores y empresas que puedan estar interesadas en ayudar económicamente a la ejecución del proyecto.

R9

RIESGO

El taladrado por fricción es una técnica rápida, económica y de fácil aplicación, la introducción de procesos que lo encarezcan, hacen que no sea rentable.

MEDIDAS

Estudio de otras alternativas que no encarezcan el proceso, y de no ser posible estudio de una nueva técnica.

R10

RIESGO

Quiebra del proveedor que suministra los recursos, con el consiguiente retraso de la investigación

MEDIDAS

- Disponer de varios proveedores que puedan satisfacer los suministros requeridos, en caso de fallo por parte del proveedor habitual.

A continuación, se adjunta una matriz donde se valora la probabilidad de ocurrencia y su impacto sobre el correcto desarrollo del proyecto y en función de la prioridad del riesgo se adoptarán las medidas necesarias.

Tabla 2. Matriz probabilidad-impacto

		IMPACTO					
		Muy bajo (0,05)	Bajo (0,1)	Moderado (0,2)	Alto (0,4)	Muy alto (0,8)	
PROBABILIDAD	Raramente (0,1)	R10			R4		
	Difícilmente (0,3)				R6		
	Posible (0,5)				R2		
	Probable (0,7)			R7	R9	R3	R8
	Casi seguro (0,9)			R5		R1	

Se puede observar en dicha matriz que los riesgos que precisan mayor atención son los tecnológicos junto a la falta de financiación para el proyecto.

7. METODOLOGÍA

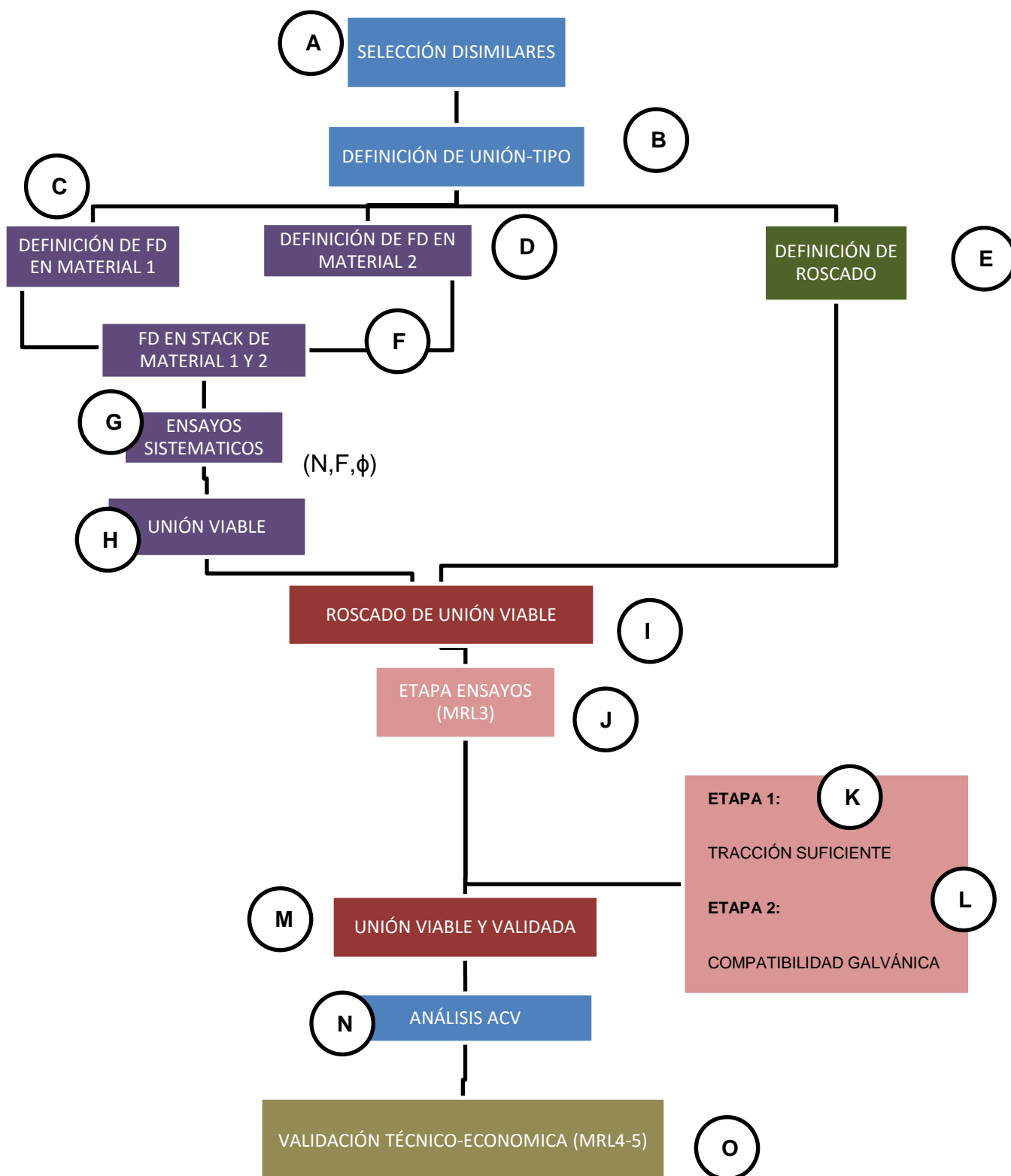


Figura 26. Metodología a seguir

Primeramente, se seleccionó un sector, un nicho de aplicación y se tuvieron en cuenta aspectos económicos y de compatibilidad para llegar a aquellos materiales disimilares cuya unión puede resultar interesante para centrar la investigación. **(A)** Como es sabido, el aluminio y el acero son dos materiales muy distintos ya que presentan puntos de fusión muy alejados, lo cual dificulta su unión por procesos convencionales. Por ello, es interesante la investigación de técnicas como el Friction Drilling junto con el roscado por laminación que se expone en este proyecto. Se procedió a centrar la investigación en un sector en concreto: la calderería fina, este sector se caracteriza por la necesidad de unir chapas de poco espesor de acero y aluminio, materiales usados en aplicaciones comunes como ensamblaje de estructuras metálicas, uniones de carrocería y chasis, mobiliario, etc En particular se estudió la posibilidad de unir chapas procedentes de una familia de aceros y aleaciones de aluminios usados habitualmente y que presentan complicaciones a la hora de ser unidos mediante soldadura. Evidentemente cuando el acero se funde el aluminio se evapora, por lo que solamente se pueden emplear soldaduras de estado plástico (FSW).

En segundo lugar, se definió la unión-tipo. **(B)** En esta fase queda determinada la geometría, espesores necesarios y requisitos básicos de la unión. Los criterios a tener en cuenta en la selección del método a utilizar para la unión fueron la productividad, el coste, el grado de automatización y el impacto ambiental.

A continuación, se hicieron una serie de pruebas de taladrado por fricción y de roscado por laminación en diversos materiales **(C,D,E)**.

Se realizaron una batería de taladrados iniciales **(F)** en dos tipos de aluminio empleando puntas de distintos diámetros y probando con diversas velocidades de giro y fuerzas de avance. Tras el estudio de dichos agujeros se vio que parámetros afectaban al proceso, como el espesor del material, las revoluciones, avances, y la temperatura y se determinó la serie de aluminio y herramienta a utilizar.

Tras estas pruebas iniciales se comenzó con una campaña de ensayos sistemáticos **(G)** con el objetivo de obtener el comportamiento de la unión, y cuáles eran los parámetros óptimos que presentaban un mejor comportamiento de la unión o si era independiente del mecanizado del agujero.

Se fabricó un conjunto de probetas a las cuales se les hicieron una serie de ensayos de mecanizado, que fueron monitorizados y de los que se obtuvieron cuáles eran la velocidad de rotación del husillo y la velocidad de avance óptimas para unir acero y

aluminio mediante el Friction Drilling. Los valores óptimos fueron elegidos en función de tres criterios: Diámetro óptimo empleado en la norma DIN 13, hueco mínimo entre chapas y mayor espesor de copa. También de estos ensayos se obtuvieron las dimensiones geométricas de la copa generada en cada caso, ya que es de vital importancia en el posterior proceso de roscado.

Se llegó a un equilibrio entre parámetros para disminuir la separación entre los materiales y que la copa generada tuviera las características dimensionales adecuadas para ser roscada, obteniendo con ello una unión viable **(H)**.

A continuación, se procedió a realizar los taladros con sus correspondientes roscados por laminación **(I)** con los distintos parámetros de entrada seleccionados y se recogieron datos del par y la fuerza de avance mediante el sistema DDU Artis.

Tras finalizar el roscado de la unión viable se comenzará con una serie de ensayos experimentales **(J)** para conocer el comportamiento de la unión frente a ciertas sollicitaciones. Por ello, esta parte del proyecto constará de dos etapas:

Etapa 1. Estudio del proceso de corrosión de la unión. Se realizaron unos ensayos en cámara salina para poder analizar el comportamiento de la unión frente a los efectos de la corrosión. **(K)**

Etapa 2. Estudio del comportamiento de la unión sometido a fuerzas de cizalladura. Se realizaron una serie de ensayos de cizalladura para analizar el comportamiento mecánico de la unión. **(L)**

Con dichos resultados se redactará un informe en el que se recopilen los datos obtenidos en esta fase y las conclusiones a las que se ha llegado. Y con ello se obtuvo como resultado una unión viable y validada. **(M)**

Por último, se analizó mediante un ACV (Análisis de ciclo de vida) el impacto ambiental en cuanto a emisiones y contaminación, del método de Fricción Drilling para la realización de la unión propuesta frente al impacto producido por los métodos de taladrado convencionales utilizados hasta el momento. Con ello se presenta un método más limpio y saludable en cuanto al impacto ambiental, cuya conciencia está haciéndose cada vez más notoria en el sector industrial. **(N)**

Con todos los datos recopilados y las conclusiones obtenidas se pudo caracterizar la unión y además saber también si realmente se trata de una opción viable para sustituir a otros métodos de unión que históricamente se han utilizado. (O)

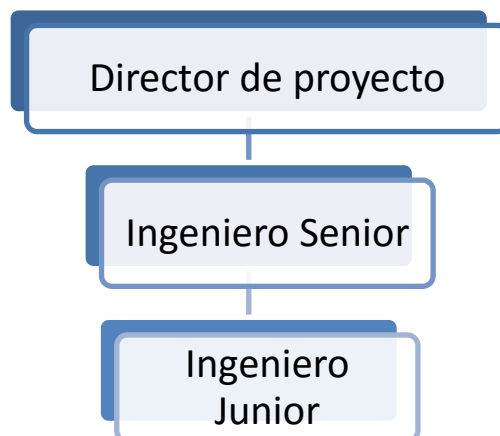
7.1 Estructura organizativa y de personal

Para la realización de este proyecto fue necesaria la participación de dos ingenieros, y un director de proyecto encargado de supervisar el correcto desarrollo del proyecto.

Director del proyecto: Encargado de realizar un seguimiento del trabajo y colaborar de manera parcial en él. Bajo cuya dirección se ha llevado a cabo toda la línea de investigación sobre el Friction Drilling realizada por la ETSI.

Ingeniero Senior: Ingeniero Industrial con la especialidad de Fabricación Mecánica, cuya función es asesorar al ingeniero junior aportando sus conocimientos y experiencia en el aula de máquina herramienta.

Ingeniero Junior: Estudiante de último año de Ingeniería Industrial con la especialidad de Fabricación Mecánica o Diseño Industrial. Será preferible que tenga experiencia en el manejo de programas CNC y de software como Matlab y Solid Edge. También será preferible, pero no necesario que tenga conocimientos básicos de química elemental. Deberá, en primer lugar, recibir una formación, para luego realizar los ensayos correspondientes y finalmente generar la documentación del proyecto.



7.2 Medios y técnicas básicas

La maquinaria, herramientas e instrumentación que se utilizó a lo largo de los ensayos tanto iniciales como sistemáticos fueron los siguientes:

7.2.1 Centro de mecanizado Kondia A6

La máquina herramienta empleada durante los ensayos es la Kondia ©, modelo A6. Se trata de un centro de mecanizado vertical de mesa móvil de tres ejes, que puede alcanzar velocidades de hasta 24000rpm.

Se utilizará para el taladrado y para el roscado por laminación y se maneja mediante control numérico.

- Gran rendimiento, precisión y alto grado de ergonomía.
- Carenado completo.
- Acceso frontal de gran amplitud para carga y descarga de piezas.
- Dos ventanas laterales para mantenimiento y visibilidad.



Figura 27. Máquina herramienta CNC: Kondia A6

7.2.2 Sierra de cinta semiautomática 370 SA 60º

Sierra hidráulica diseñada para cortar piezas de pequeño y mediano tamaño.



Figura 28. Sierra de cinta semiautomática 370 SA 60

7.2.3 Encapsuladora Remet IPA 40

Se trata de una empastilladora automática que funciona mediante presión neumática.



Figura 29. Remet IPA 40

7.2.4 Material

En cuanto a los materiales utilizados, se van a emplear dos variantes de aluminio y una de acero.

- Aluminio serie Al5754, Chapa de 2000x1000x1,5 mm.
- Aluminio serie Al 6082, Chapa de 2000x1000x1,5 mm.

Se realizará un pedido de chapas de ambas series de aluminio. Su dimensión será de 2000x1000 mm y 1,5 mm de espesor cada una.

- Acero al carbono AISI 1045, se trata de un acero muy versátil, 2 tubos de sección 30x30 mm y 2000 mm de longitud.

Se pedirán tubos huecos de acero de sección cuadrada 30x30 mm, 1,5 mm de espesor y 2000 mm de longitud.

7.2.5 Herramientas

La herramienta de taladrado es de la marca Formdrill© y está fabricada en carburo de tungsteno con matriz de cobalto.

El fabricante también suministra dichas puntas con la posibilidad de rompevirutas el cual se coloca entre el anillo y la zona cilíndrica de la herramienta (Figura 30) y se encarga de eliminar la rebaba superior que se forma en el proceso.

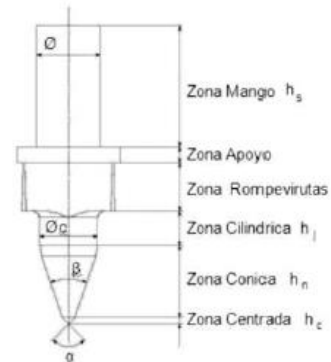


Figura 30. Geometría de la punta de FD

Mientras que para el roscado por laminación se utiliza un macho de acero rápido con revestimiento superficial duro de nitruro de titanio, también de la marca Formdrill©. La sección de la orilla del mango es cuadrada para optimizar la torsión necesaria para formar las roscas.

Cabe mencionar, que existe la posibilidad de recubrir la punta de taladrado para aumentar la resistencia al desgaste, el coeficiente de fricción y modificar la conductividad térmica de la misma. El recubrimiento empleado es de Metal Estalki TiAlCrN MEX6000.



Figura 31. Puntas de taladrado por fricción (izquierda) y macho para roscado por laminación (derecha)

Se van a utilizar puntas de taladrado de diámetro 7,3 mm y 9,2 mm que son las correspondientes a una métrica obtenida de M8 y M10, ya que son unas de las más habituales. Por lo tanto, los machos de laminación utilizados serán de M8 y M10.

En la tabla 3 se muestra la relación entre el diámetro de la herramienta de taladrado y la métrica que se obtiene, así como los parámetros óptimos.

Tabla 3. Relaciones entre los diámetros y las métricas

Thread size	Flowdrill					Flowtap			
	Ø [mm]	RPM [min ⁻¹]			Power [kW]	Cycle time [s]*	RPM [min ⁻¹]	Power [kW]	Torque [Nm]
		min.	opt.	max.					
M4	3.7	2200	2600	5500	0,7	2	1000	0,2	4
M5	4.5	2000	2500	4800	0,8	2	800	0,3	5
M6	5.4	1800	2400	3300	1,0	2	650	0,6	9
M8	7.3	1500	2200	3200	1,3	2	500	1,1	19
M10	9.2	1200	2000	2800	1,5	3	400	1,5	31
M12	10.9	1000	1800	2200	1,7	3	330	1,9	47

7.2.6 Lubricantes

La utilización de lubricantes mejora la vida útil de las herramientas y contribuye a su refrigeración. Es muy aconsejable su uso, ya que, el aluminio se adhiere fácilmente a la herramienta debido a su bajo punto de fusión.

Lubricantes que se van a utilizar:

- **Lubricante FDKS de Flowdrill©** : Pasta blanca de aplicación manual, para el taladrado por fricción.
- **Lubricante FTMZ de Flowdrill©** : Aceite con aditivos de alta presión, para el roscado por laminación.



Figura 32. Lubricantes

7.2.7 Sistema DDU ARTIS

Este sistema además de la indicación del momento de par actual, puede determinar la fuerza axial, sin contacto y en tiempo real.



Figura 33. Equipo DDU4 Artis

Partes que lo integran:

- **Porta-Herramientas:** En él se acopla el conjunto formado por rotor, estator y transductor.
- **Tarjeta adquisición:** Permite llevar a cabo adquisiciones de datos de velocidad crítica. La utilizada es marca Keithley con un rango de frecuencia de muestreo de 0-1000Hz. Hay que comprarla aparte, no viene incluida con el equipo.
- **Ordenador:** Recoge la señal mediante el programa Quick data proporcionado por el fabricante de la tarjeta de adquisición.

Matlab y Excel: Se procesará la señal con Matlab y se pasará a Excel para hallar el par medio y el par máximo.



Figura 34. Tarjeta adquisición de datos

7.2.8 Pirómetro

El pirómetro Impac© IGAR 12 LO de dos colores, es un pirómetro digital de alta precisión con fibra óptica para la medición de temperaturas sin contacto.

El rango de temperaturas que puede medir está entre 300°C y 1400°C, aproximadamente. Las temperaturas se recogen en un ordenador con software específico para este modelo de pirómetro.



Figura 35. Pirómetro Impac© IGAR 12 LO

7.2.9 Microscopio Leica Z6APO

El Leica© Z6 APO es un sistema de zoom totalmente apocromático con una excelente transmisión de la luz de alto contraste y alta resolución. Proporciona imágenes 2D de gran calidad.

El diseño modular permite una configuración optimizada para las aplicaciones individuales. La unión directa de una cámara digital se traduce en altos niveles de brillo. Tareas de inspección visual se hacen con la fijación de un tubo binocular de la línea estereoscópico.

La imagen se recoge a través del programa de ordenador proporcionado por el fabricante.



Figura 36. Microscopio Leica Z6PAO

7.2.10 Durómetro FM-800

Durómetro para ensayos de dureza Vickers, con procesador de cálculo automático y pantalla táctil.



Figura 37. Durómetro FM-800

7.2.11 Micrometro de interiores

De la marca Mitutoyo©. Se utilizará para medir los diámetros de entrada y de salida de la copa generada y para verificar que los agujeros taladrados no se encuentren fuera de tolerancias.



Figura 38. Micrómetro de interiores

7.2.12 Reloj comparador

De la marca Mahr©. Para alinear las probetas con los ejes del centro de taladrado.



Figura 39. Reloj comparador

7.2.13 Calibre

De la marca Mitutoyo©. Su función será la de comprobar que la longitud del agujero taladrado es el óptimo.



Figura 40. Calibre

7.3 Definición de los paquetes de trabajo, tareas e hitos

Tabla 4. Descripción de tareas e hitos

Código	Nombre	Duración
P.T.1	Estado de la técnica y aprendizaje del proceso	
T.1.1	Estado del arte	9 días
T.1.1.1	Uniones actuales entre acero y aluminio. Viabilidad	2 días
T.1.1.2	Friction drilling	5 días
T.1.1.3	Roscado por laminación	2 días
H.1	Pedido material	0 días
P.T.2	Ensayos de caracterización de agujero	
T.2.1	Pruebas iniciales	19 días
T.2.1.1	Adquisición del know-How necesario	4 días
T.2.1.2	Diseño y fabricación de utillaje	3 días
T.2.1.3	Realización de pruebas	11 días
H.2	Caracterización del proceso	0 días
T.2.2	Ensayos del Friction Drilling	33 días
T.2.2.1	Puesta a punto	3 días
T.2.2.2	Realización de ensayos	20 días
T.2.2.3	Medición parámetros geométricos	10 días
H.3	Selección parámetros óptimos	0 días
T.2.3	Roscado por laminación	6 días
P.T.3	Estudio del proceso de corrosión y aprendizaje del uso de la maquinaria	
T.3.1	Corrosión del acero y del aluminio	5 días
T.3.2	Adquisición del Know-How necesario para llevar a cabo el proyecto	6 días
P.T.4	Ensayos de corrosión	
T.4.1	Preparación probetas	4 días
T.4.2	Entrega de las probetas a INPROMAT	1 día
F.1.1	Fase INPROMAT1.	15 días
T.4.3	Recogida de las probetas a INPROMAT	1 día
T.4.4	Análisis de resultados	4 días
H.4	Obtención de resultados del comportamiento de corrosión	0 días
P.T.5	Ensayos de cizalladura	
T.5.1	Preparación de las probetas	4 días
T.5.2	Entrega de las probetas a INPROMAT	1 día
F.1.2	Fase INPROMAT2	7 días
T.5.3	Recogida de las probetas de INPROMAT	1 día
T.5.4	Análisis de los resultados	4 días
H.5	Obtención de resultados del comportamiento mecánico	0 días
P.T.6	Estudio del proceso de ACV y aprendizaje del uso de la herramienta informática Simapro	
T.6.1	Estudio de un ACV	5 días
T.6.2	Asimilación y aprendizaje del uso de la herramienta informática Simapro	6 días
P.T.7	Medición de la microdureza en los agujeros	
T.7.1	Medición de las microdurezas	8 días
P.T.8	Análisis global de los resultados	
T.8.1	Análisis global de resultados	10 días
H.6	Validación del proceso y conclusiones	

□

7.4 Descripción de etapas y parámetros a controlar

PT.1 Estado de la técnica y aprendizaje del proceso

T.1.1 Estado del arte.

Consiste en el estudio del estado de la técnica.

T.1.1.1 Uniones de acero y aluminio. Estudio de los actuales métodos de unión entre acero y aluminio.

T.1.1.2 Friction Drilling. Estudio del proceso de taladrado por fricción.

T.1.1.3 Roscado por laminación. Estudio del proceso de roscado por laminación.

H.1 Pedido de material.

Una vez establecidos los fundamentos principales, se procederá a realizar el pedido de herramientas necesarias para la realización del proyecto (herramientas para realizar los agujeros y machos de laminar) y el material para ensayar.

PT.2 Ensayos para la caracterización del agujero

T.2.1 Pruebas iniciales

Se aprenderá la forma de utilizar las máquinas necesarias para llevar a cabo la unión y se ensayará la unión en diferentes materiales, variando la velocidad de rotación del husillo y el avance de la herramienta.

T.2.1.1 Adquisición del Know-How necesario para llevar a cabo el proyecto.

Se aprenderá el manejo de la máquina a utilizar (Kondia A6) así como de los elementos necesarios para la monitorización del proceso y la obtención de resultados.

T.2.1.2 Diseño y fabricación del utillaje. Se fabricará el utillaje necesario para poder realizar el agujero y la rosca de forma correcta.

T.2.1.3 Realización de las pruebas: Obtención de agujeros iniciales en chapas. Se realizarán las pruebas iniciales variando el material a ensayar y las condiciones de entrada.

H.2 Caracterización del proceso

Se determinará la serie de aluminio a emplear en los ensayos y la geometría de la herramienta a utilizar. Quedará definida por lo tanto la metodología a seguir.

T.2.2 Ensayos del Friction Drilling

Se realizarán los ensayos necesarios para la caracterización de los parámetros óptimos del proceso de Friction Drilling, con los materiales previamente elegidos.

T.2.2.1 Puesta a punto. Se prepararán las probetas, el utillaje, los instrumentos y la maquinaria a utilizar.

T.2.2.2 Realización de los ensayos. Se obtendrán los agujeros con diferentes condiciones, junto con la monitorización del proceso (fuerza, par y temperatura).

T.2.2.3 Medición de los parámetros geométricos. Se medirán los diferentes parámetros geométricos que caracterizan el proceso (diámetro de entrada y salida, espesores de copa y longitud y hueco entre chapas).

H.3 Selección de parámetros óptimos

En función de los resultados obtenidos se procederá a la selección de los parámetros óptimos de mecanizado del agujero que presenten mejores características según los criterios previamente definidos.

T.2.3 Roscado por laminación

Se realizará el roscado por laminación en las copas generadas variando las condiciones de entrada; para cada uno de los parámetros óptimos obtenidos.

PT.3 Estudio del proceso de corrosión y aprendizaje del uso de la maquinaria

T.3.1 Corrosión del acero y aluminio.

Se estudiará el proceso de corrosión a grandes rasgos, enfocado al acero y aluminio.

T.3.2 Adquisición del Know-How necesario para llevar a cabo el proyecto.

Se aprenderá el manejo de la máquina a utilizar (Kondia A6), así como la monitorización del proceso.

PT.4 Ensayos de corrosión

T.4.1 Preparación de las probetas.

Se prepararán las probetas a ensayar, con las diferentes condiciones de mecanizado y distintos materiales.

T.4.2 Entrega de las probetas a INPROMAT.

Se entregarán las probetas realizadas a INPROMAT para la realización de los ensayos de corrosión empleando una cámara de niebla salina.

F.I.1 Fase INPROMAT 1.

La empresa INPROMAT ensayará las probetas a corrosión empleando una cámara de niebla salina y redactará un informe con las conclusiones a las que se haya llegado con estos ensayos.

T.4.3 Recogida de las probetas de INPROMAT.

Una vez las probetas hayan sido ensayadas se procederá a recogerlas junto con un informe en el que se detallarán los resultados obtenidos de las pruebas.

T.4.4 Análisis de los resultados.

Se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos de corrosión.

H.4 Obtención de resultados del comportamiento de corrosión

Definición de los resultados del comportamiento de la unión frente a la corrosión.

PT.5 Ensayos de cizalladura

T.5.1 Preparación de las probetas.

Se prepararán las probetas a ensayar, con las diferentes condiciones de mecanizado.

T.5.2 Entrega de las probetas a INPROMAT.

Se entregarán las probetas realizadas a INPROMAT para la realización de los ensayos de cizalladura.

F.I.2 Fase INPROMAT 2.

La empresa INPROMAT someterá las probetas a sollicitaciones de cizalladura y redactará un informe con las conclusiones a las que se haya llegado con estos ensayos.

T.5.3 Recogida de las probetas de INPROMAT.

Cuando las probetas hayan sido ensayadas se procederá a recogerlas junto con un informe en el que se detallarán los resultados obtenidos de las pruebas.

T.5.4 Análisis de los resultados.

Se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos de cizalladura.

H.5 Obtención de resultados del comportamiento mecánico

Definición de los resultados del comportamiento de la unión frente a cargas de cizalladura.

PT.6 Estudio del proceso de ACV

T.6.1 Estudio de un ACV.

Se estudiará el proceso de redacción de un análisis de ciclo de vida según las normas.

T.6.2 Asimilación y aprendizaje de uso de la herramienta informática Simapro.

Se aprenderá el manejo de la herramienta y base de datos de Simapro.

PT.7 Medición de la microdureza en los agujeros

Se prepararán una serie de probetas para medir la microdureza a lo largo del agujero generado mediante el taladrado por fricción.

PT.8 Análisis global de los resultados y conclusiones

T.8.1. Análisis de los resultados.

Se recogerán todos los datos y resultados obtenidos a lo largo de los ensayos de toda la investigación y se procesarán en un ordenador, ya sea con gráficas, tablas imágenes, etc. A partir de los resultados se extraerán las conclusiones correspondientes, tanto positivas como negativas.

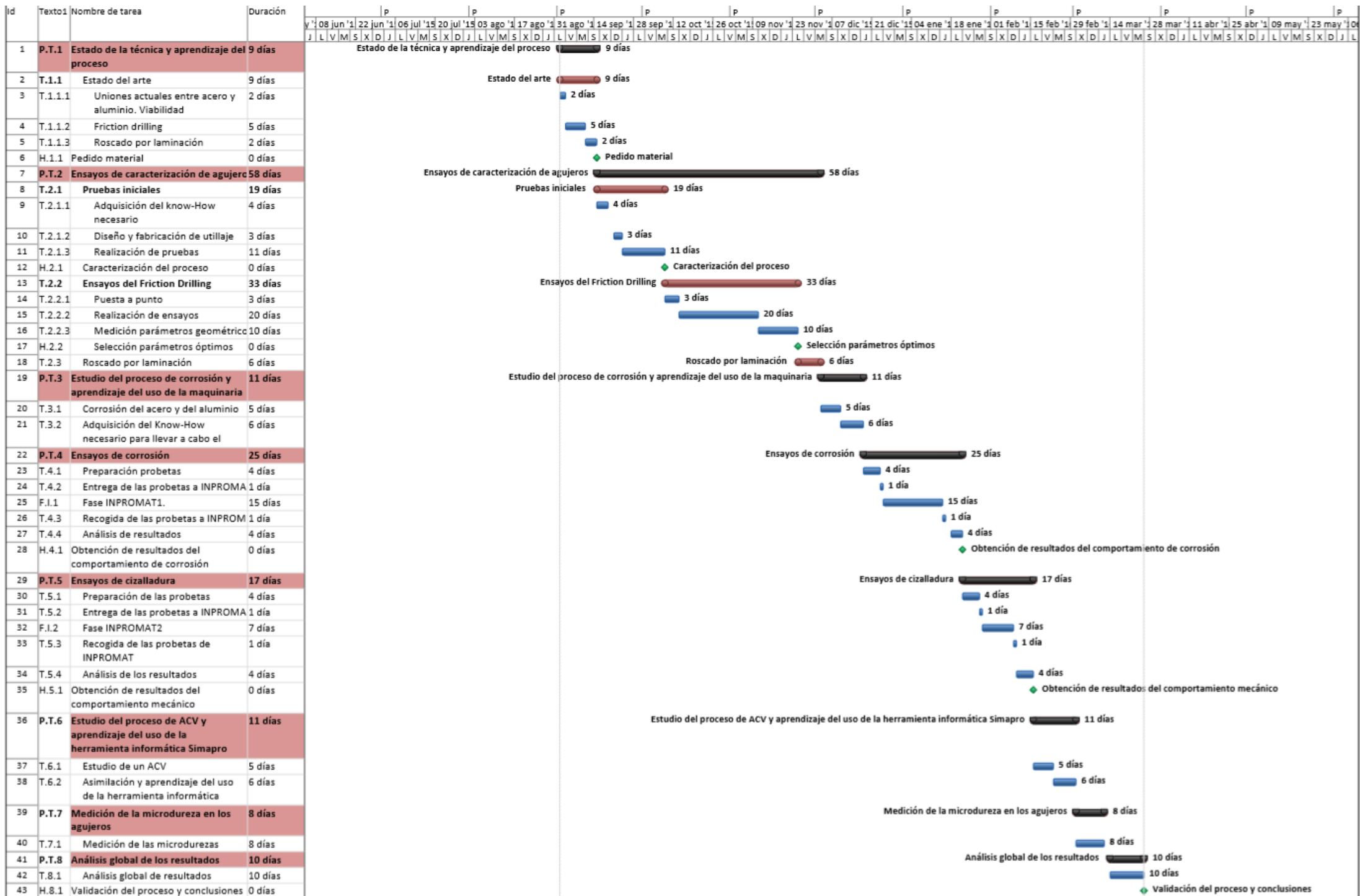
H.6 Validación del proceso y conclusiones

Demostración de la viabilidad de la unión de materiales disimilares mediante el proceso de taladrado por fricción y un posterior roscado por laminación.

7.5 Duración del proyecto y Diagrama de Gantt

A continuación, se muestra un Diagrama de Gantt del trabajo completo, en el cual se muestra la duración de cada una de las fases del proyecto. Para el desarrollo de la planificación se ha tenido en cuenta que se trabajan 5 días a la semana y no se consideran laborables los periodos correspondientes a vacaciones de navidad, verano y semana santa.

Por lo tanto, y como se puede apreciar en el Gantt la duración total del proyecto es de **149 días útiles.**



8. ENSAYOS DEL PROCESO COMBINADO

Dado el carácter experimental e híbrido del proceso, en este capítulo se presentan los resultados de las etapas y procesos, así como las pruebas de comportamiento de las juntas analizadas.

8.1 Pruebas iniciales para el estudio de la sensibilidad de los parámetros sobre materiales distintos y discusión.

Una vez recogida toda la información existente en el estado del arte, se procedió a centrar la investigación en un sector en concreto: la calderería fina, y más en concreto en la posibilidad de unir chapas procedentes de una familia de aceros y aleaciones de aluminios usados habitualmente y que presentan complicaciones a la hora de ser unidos mediante soldadura. Evidentemente cuando el acero se funde el aluminio se evapora, por lo que solamente se pueden emplear soldaduras de estado plástico (FSW).

En concreto se seleccionaron: dos series de aluminios, Al5754 y Al6082 y el acero AISI 1045, dado que este último es de tipo estructural general y muy habitual como estructura soporte. En cuanto a las puntas del proceso de Friction Drilling, se decidió usar las de diámetro 7,3 y 9,2 mm, y sus correspondientes machos de laminación, M8x1,25 y M10x1,5. La elección ha sido debida a que se trata de los diámetros más usados comúnmente en construcciones mecánicas.

- La mitad de las brocas de FD se pidieron con rompevirutas y la otra mitad sin rompevirutas.
- Una de cada tipo se envió a recubrir para realizar ensayos con las puntas recubiertas y comparar sus resultados con las no recubiertas.

En esta fase el objetivo principal era la observación general del proceso, llegando a una prueba de concepto sencilla, determinando los parámetros del proceso. Esta necesidad implicaba familiarizarse con el entorno de trabajo tanto a nivel de uso de instrumentos como ubicación dentro del taller de los recursos materiales necesarios. (Artis, pirómetros, etc..).

Preparación de probetas

La preparación de las probetas se realizó de forma cuidadosa:

- Acero al carbono AISI 1045: Se eligieron dos tubos de sección cuadrada 30x30mm y 1,5 mm de espesor. Tienen una longitud de 2000 mm, por lo que se cortaron y obtuvieron por cada tubo 8 probetas de 250 mm. Número total de probetas de acero fueron 16.
- Aluminio Al5754-H24 y Al6082: Se cortaron 8 probetas de cada tipo de aluminio en forma de chapa fina de 30mm de anchura.

Los cortes se realizaron con una cortadora metalográfica de precisión.

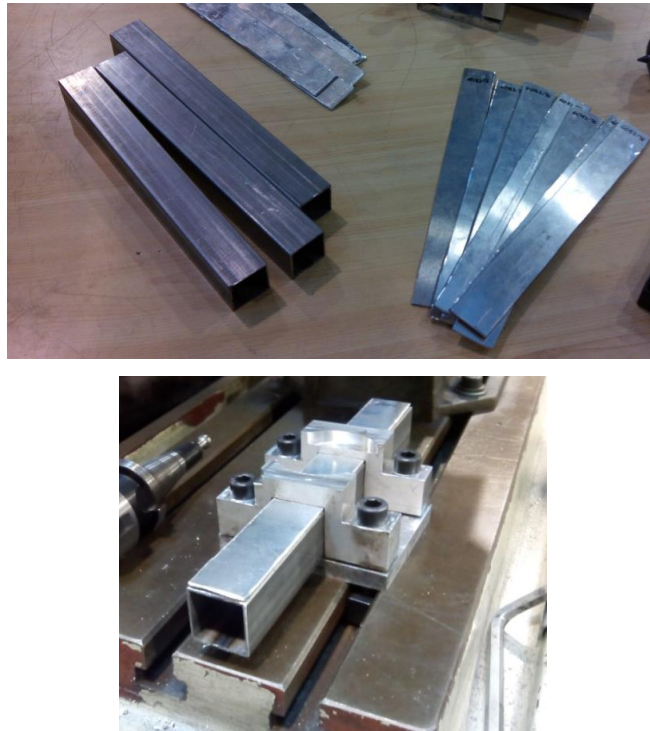


Figura 41. a) Probetas empleadas en los ensayos, b) utillaje para pruebas

Diseño de utillaje

Fue necesario el diseño y fabricación de un utillaje que permita la sujeción de las probetas durante los ensayos. El utillaje se fabricó en aluminio, y cada probeta se fijaba mediante cuatro tornillos, que a su vez facilitarían el deslizamiento por las guías de la mesa del centro de mecanizado (Figura X).

Dicho utillaje ha sido necesario ya que evita en gran parte que el material fluya entre las dos chapas, creando un hueco que puede ser poco beneficioso para la unión. Este hueco puede afectar negativamente a la calidad de la unión, ya que por dentro de él podría filtrarse una corriente de fluido que haga que aumente su velocidad de corrosión.

Ensayos previos

Se realizaron diversos agujeros taladrados en los dos tipos de aluminio y se emplearon las puntas de diferentes diámetros con y sin rompevirutas. También se probaron con diferentes revoluciones y avances, manteniendo constantes velocidades de giro y cambiando avances y viceversa. Los datos orientativos se sacarán de los fabricantes.

Observaciones destacables tras los agujeros previos:

- Apriete entre componentes: Aparición de rebabas de material en la intercara con la consecuente separación de los materiales.
- Adhesión de aluminio en la herramienta.
- Parámetros que afectan al proceso: Espesor del material (mm), Velocidad de giro (rpm), Fuerza de avance (mm/min), Temperatura (°C).

Con ello quedó definida la metodología y materiales a emplear en las próximas campañas de ensayos. Las decisiones tomadas fueron las siguientes:

- Se va a utilizar el aluminio Al 5754-H24, ya que es el aluminio de los dos ensayados que mejor comportamiento ha presentado a la hora de mecanizar. Además, los aluminios de la serie 5xxx tienen un comportamiento ante la corrosión en ambientes salinos.
- Se utilizará una herramienta de Friction Drilling que está preparada para el mecanizado de agujeros de métrica 8 (más adelante se explicará cómo se ha seleccionado la herramienta específica). Se ha seleccionado una herramienta cónica con rompevirutas y sin recubrimiento.

8.2 Pruebas sistemáticas de caracterización del proceso de Friction drilling con AISI 1045 y AI5754.

Una vez decidido el tipo de herramienta a utilizar y el tipo de aluminio, se procedió a la obtención de los parámetros óptimos de mecanizado de agujeros mediante el Friction Drilling para la unión de chapas de acero AISI 1045 y el aluminio AI 5754-H24.

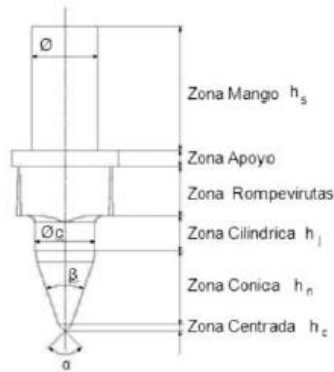
Para ello se planteó una campaña de ensayos y pruebas sistemáticas.

Se ha valorado la utilización de atmósferas protectoras (Argón, CO₂...) o el precalentamiento del material, cosas que favorecerían la calidad de la copa generada; pero se han desechado, ya que lo que busca esta tesis es llegar a definir un proceso en MRL 5, y por tanto ya se vislumbra que es clave la economía y la sencillez del método. Queda, por lo tanto, para una futura investigación, ver si la aplicación de este tipo de ambientes mejora en algo el mecanizado del agujero y si su coste justifica la mejora.

- Con estos ensayos sistemáticos se pretendían encontrar las velocidades de giro y de avance más rápidas sin llegar a excesivas temperaturas ni fuerzas y momentos elevados.
- Se buscaba llegar a un equilibrio entre ambos parámetros para disminuir la separación entre los materiales y que la copa generada tenga las características dimensionales adecuadas para ser roscada.

En cuanto a las puntas se utilizó la de diámetro 7,3 mm con rompevirutas y sin recubrimiento (Figura 42). Este diámetro se eligió según la norma DIN 13, que proporciona el diámetro óptimo para cada métrica. Es obvio que el diámetro que se consiga está directamente relacionado con la parte cilíndrica de la herramienta, ya que éste será el diámetro final del agujero.

La métrica de los agujeros que se hagan será la métrica 8. Las dimensiones de la herramienta a utilizar, por lo tanto, fueron las mostradas en la siguiente figura.



Herramienta: Ø 7,3 mm

- Zona Mango [h_s]: 15 mm
- Zona Cilíndrica [h_l]: 9,7 mm
- Zona Cónica [h_n]: 7,6 mm
- Zona Centrada [h_c]: 0,9 mm
- $\beta = 40^\circ$
- $\alpha = 90^\circ$
- Para M8 x 1,25

Figura 42. Características de la herramienta que se usará en los ensayos

Los agujeros realizados fueron en total 98, usando 14 probetas con 7 agujeros en cada una. Se fueron realizando una batería de pruebas sistemáticas variando los parámetros de máquina de velocidad de rotación de herramienta y velocidad de avance. Se han ido combinando hasta probar con un total de 7 velocidades de giro y 7 velocidades de avance cada una (Tabla 5). Esto suma 49 agujeros, pero cada pareja de parámetros se ha utilizado para hacer dos agujeros, para su comparación y posterior análisis.

Tabla 5. Condiciones del proceso de taladrado por fricción que se emplearán en los ensayos

PARAMETROS	
Velocidad de giro (rpm)	1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500
Velocidad de avance (mm/min)	150, 250, 300, 350, 400, 450, 500

Antes de comenzar con el taladrado, fue preciso la modificación del utillaje con el fin de solventar el problema de separación de materiales por la rebaba generada entre ellos. El nuevo utillaje es el mostrado en la figura 43, está fabricado en aluminio y a diferencia del anterior presenta un mayor área y refuerzo para aumentar la presión sobre los materiales. El nuevo útil dispondrá de 8 tornillos que facilitarán el cambio de las probetas sin necesidad de desmontarlo de la mesa del centro de mecanizado.



Figura 43. Utillaje empleado en los ensayos sistemáticos

8.2.1 Monitorización de los ensayos

Durante dichos ensayos se realizó la monitorización de temperatura, momentos y fuerzas se realiza al mismo tiempo que se realizaba el taladrado por fricción.

Medición de fuerzas de avance y momentos

Es importante la obtención de fuerzas de proceso-herramienta-material, debido a que permiten comprender la interacción del proceso de fricción y corte de la rebaba superior. Para la medida de la fuerza y par se utilizó el sistema DDU Artis.



Figura 44. DDU Artis para la medición del par y la fuerza

Una vez obtenidos los archivos que proporciona el sistema de medida DDU Artis, estos fueron procesados mediante Matlab y graficados. Para la obtención de los valores de par y momento reales hay que multiplicar la señal de voltaje por el factor de fondo de escala para obtener el par en (Nm) y la fuerza de avance en (N).

En este caso el factor de fondo de escala es 5 para el par y 200 para la fuerza de empuje. Cabe mencionar que, de las 98 piezas taladradas mediante fricción, para los siguientes resultados se usaron 49, puesto que, de aquellas que tenían parámetros idénticos se seleccionó la de mejor calidad.

Vamos a comenzar examinando las gráficas de par (Figura 45) y momento (Figura 46) respecto al tiempo de contacto, para unas condiciones particulares, por ejemplo 2000 rpm y 350 mm/min.

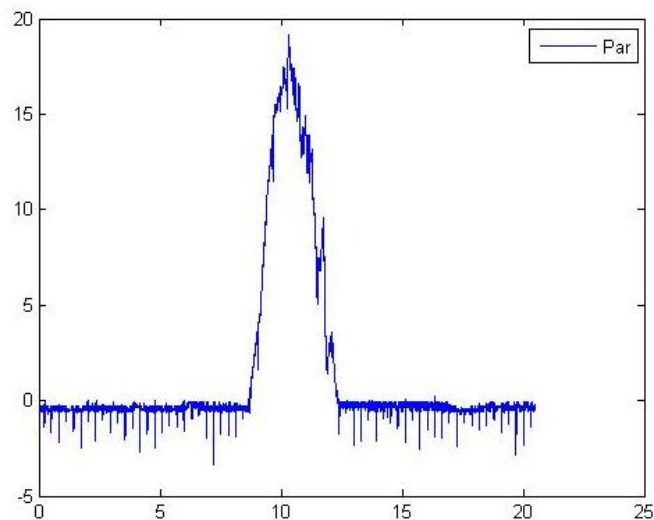


Figura 45. Avance del par (Nm) en función del tiempo del contacto para S2000_F350

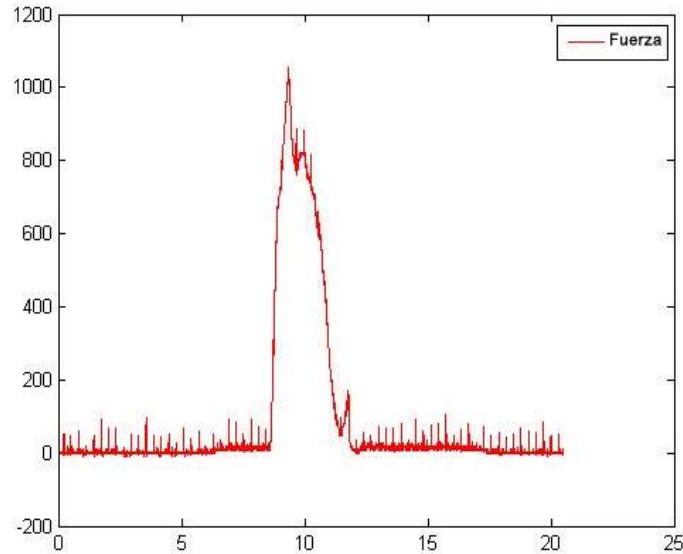


Figura 46. Avance de la fuerza (N) en función del tiempo del contacto para S2000_F350

Cuando la punta de la herramienta hace contacto contra la superficie de la pieza comienza el aumento de la fuerza de empuje hasta su máximo. Se produce un aumento de la temperatura y disminución de la resistencia a la deformación. A medida que se avanza, aumenta la superficie de contacto y la fricción origina un incremento del momento torsor. Al entrar la zona cilíndrica de la herramienta en contacto con la parte de la rebaba de mayor espesor, se incrementa levemente la fuerza axial y rápidamente el par. Ambos esfuerzos experimentan un aumento al final del proceso debido la rotura de la rebaba superior. Al final, el retroceso de la herramienta hace disminuir la fuerza de avance rápidamente hasta hacerse nula, aunque existe una ligera fricción que se refleja la gráfica del par.

A continuación, se van analizar los datos de los pares y fuerzas máximos para cada pieza (49 en total), ya que son los que nos interesan por ser los valores más extremos.

Para una velocidad de avance constante, nos fijamos en cualquiera de las curvas, al aumentar la velocidad de rotación la fuerza de empuje (Figura 47) y el par (Figura 48) disminuyen.

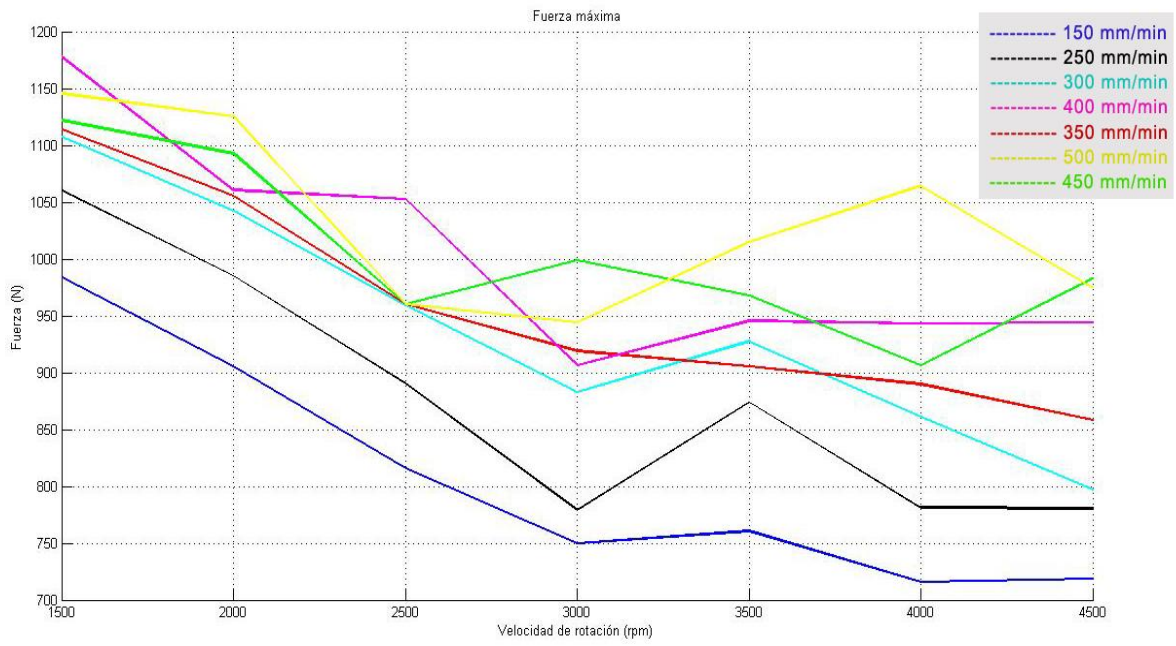


Figura 47. Fuerza axial máxima de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance

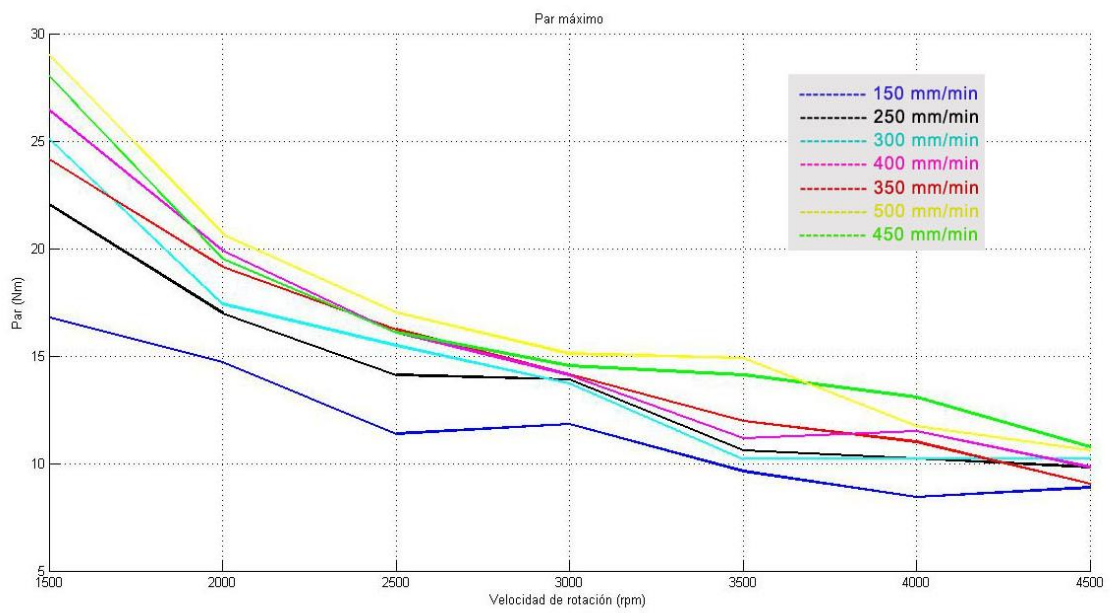


Figura 48. Momento torsor máximo de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance

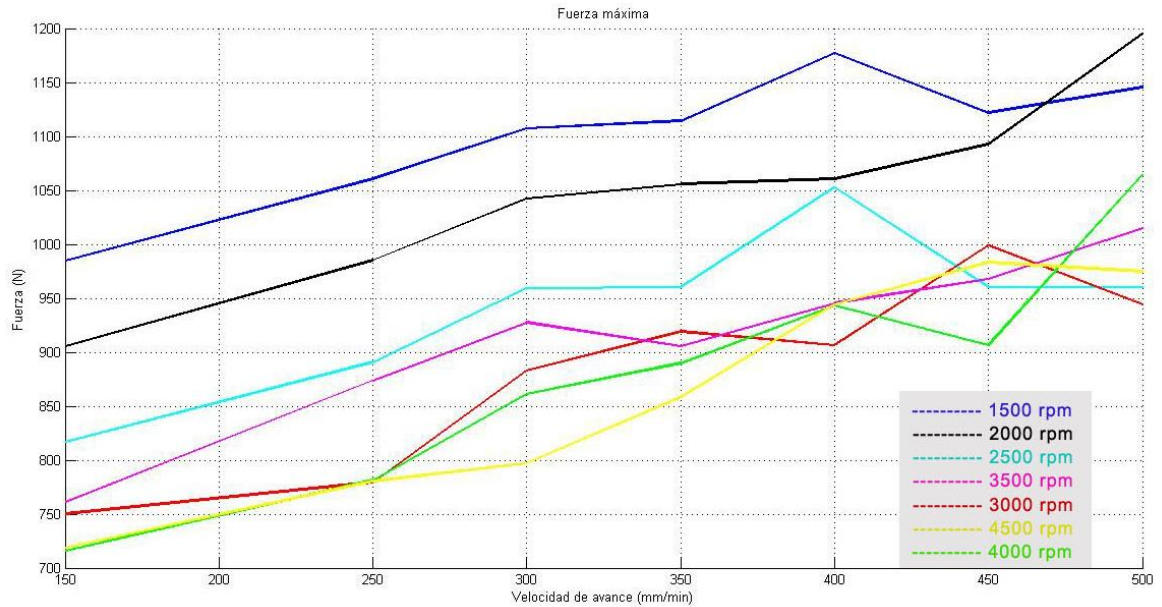


Figura 49. Fuerza axial máxima en función del avance y para cada una de las velocidades de giro

Para una velocidad de giro constante, observando cualquiera de las curvas, al aumentar el avance, el par aumenta (Figura 49) pero la fuerza de empuje aumenta bastante más (Figura 50). Esto ocurre al disminuir el tiempo de contacto entre pieza y herramienta, lo que reduce el calor para el ablandamiento del material.

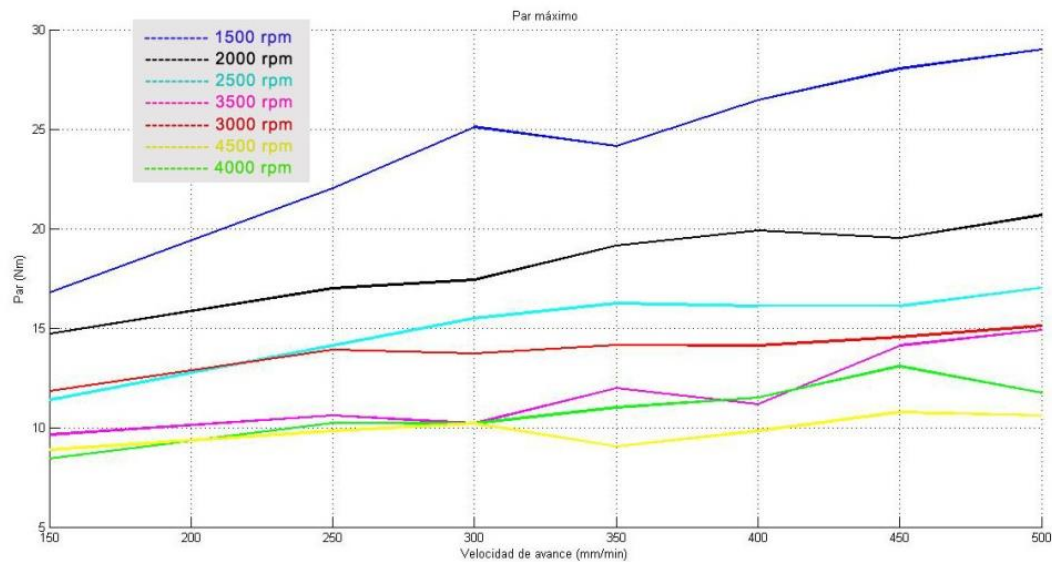


Figura 50. Momento torsor máximo en función del avance y para cada una de las velocidades de giro

De entre los valores máximos de momento torsor y fuerza axial, de todas las muestras:

- El mayor valor de fuerza es 1195,3 N y corresponde a S200_F500.
- El mayor valor de par es 38,76 Nm y corresponde a S4000_F400.
- El mínimo valor de fuerza es 718,8 N para S4500_F150.
- El mínimo valor de par es 8,42 Nm para S4000_F150.

Tabla 6. Fuerzas de avance máximas para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos

	Fuerza de avance máxima (N)			Fuerza de avance máxima (N)
S1500_F150	984,4		S3500_F150	760,7
S1500_F250	1060,5		S3500_F250	874
S1500_F300	1107,4		S3500_F300	927,7
S1500_F350	1114,3		S3500_F350	950,3
S1500_F400	1177,7		S3500_F400	954,3
S1500_F450	1122,1		S3500_F450	967,8
S1500_F500	1145,5		S3500_F500	1014,6
S2000_F150	905,3		S4000_F150	850,6
S2000_F250	985,4		S4000_F250	781,3
S2000_F300	1042		S4000_F300	861,3
S2000_F350	1055,7		S4000_F350	889,6
S2000_F400	1060,5		S4000_F400	943,4
S2000_F450	1092,8		S4000_F450	906,3
S2000_F500	1195,3		S4000_F500	1064,5
S2500_F150	816,4		S4500_F150	718,8
S2500_F250	890,6		S4500_F250	780,3
S2500_F300	959		S4500_F300	796,9
S2500_F350	960		S4500_F350	858,4
S2500_F400	1052,7		S4500_F400	944,3
S2500_F450	960		S4500_F450	983,4
S2500_F500	960		S4500_F500	974,6
S3000_F150	750			
S3000_F250	779,3			
S3000_F300	882,8			
S3000_F350	918,9			
S3000_F400	906,3			
S3000_F450	999			
S3000_F500	944,3			

Tabla 7. Pares máximos para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos

	Par (Nm)		Par (Nm)
S1500_F150	16,79	S3500_F150	9,64
S1500_F250	22,04	S3500_F250	10,59
S1500_F300	25,09	S3500_F300	10,2
S1500_F350	24,14	S3500_F350	11,96
S1500_F400	26,4	S3500_F400	11,15
S1500_F450	28,02	S3500_F450	14,11
S1500_F500	29	S3500_F500	14,89
S2000_F150	14,69	S4000_F150	8,42
S2000_F250	16,99	S4000_F250	10,22
S2000_F300	17,4	S4000_F300	10,2
S2000_F350	19,14	S4000_F350	32,03
S2000_F400	19,89	S4000_F400	38,76
S2000_F450	19,5	S4000_F450	13,08
S2000_F500	20,67	S4000_F500	11,74
S2500_F150	11,37	S4500_F150	8,88
S2500_F250	14,11	S4500_F250	9,81
S2500_F300	15,47	S4500_F300	10,2
S2500_F350	16,23	S4500_F350	9,03
S2500_F400	16,08	S4500_F400	9,81
S2500_F450	16,08	S4500_F450	10,76
S2500_F500	17,01	S4500_F500	10,59
S3000_F150	11,81		
S3000_F250	13,89		
S3000_F300	13,72		
S3000_F350	14,13		
S3000_F400	14,11		
S3000_F450	14,55		
S3000_F500	15,11		

Serán interesantes aquellas muestras que presenten un compromiso entre fuerza y par, ambos bajos. En la siguiente tabla se muestran algunas de las combinaciones de parámetros más favorables:

Tabla 8. Combinación de fuerzas axiales máximas y pares máximos más favorables

MUESTRA	Fuerza avance máx (N)	Par máx (Nm)
S3500_F150	760,7	9,64
S4500_F250	780,3	9,81
S4500_F350	858,4	9,03

Medición de la temperatura

Es un factor determinante en la formación del agujero. Cuando la temperatura alcanzada sea baja, la copa presentará mayor número de fracturas, desplazando el material en dirección radial del agujero. Por otro lado, cuando sea alta la forma de la rebaba será más cilíndrica.

La medición de temperatura se hizo con un pirómetro de dos colores modelo Impac© IGAR12LO. El pirómetro se colocó apuntando a la copa que es la zona que se pone al rojo y por lo tanto alcanza mayores temperaturas. Se obtuvieron así las temperaturas alcanzadas a lo largo del proceso en la copa.

Se ha comprobado que la temperatura a lo largo de los ensayos es dependiente de la velocidad de avance y de giro del husillo, ya que el espesor es constante. Los datos recogidos fueron procesados por Matlab y graficadas las temperaturas máximas para cada combinación de parámetros.

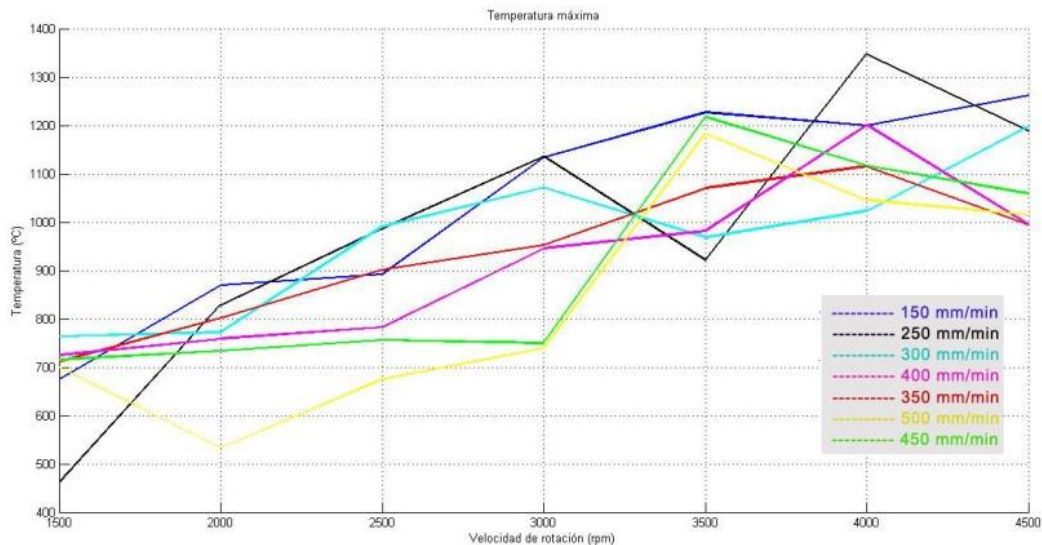


Figura 51. Temperaturas máximas en función de la rotación del husillo para distintos avances

Se observa que en general las temperaturas máximas para una misma velocidad de rotación son mayores para avances bajos, esto es debido a que el tiempo que permanecen la pieza y la herramienta en contacto es menor. En cuanto a la velocidad de rotación, cuanto mayor sea esta mayor es la temperatura máxima para un avance constante.

La mayor temperatura máxima alcanzada es de 1347,5 °C y se corresponde con una rotación de 4000 rpm y avance de 250 mm/min (Figura 51).



Figura 52. Probetas cortadas individualmente tras los ensayos de Friction Drilling

Medición de los parámetros geométricos y estudio de la calidad de las copas generadas

Debido a su gran importancia en el proceso de roscado por laminación, se midieron las dimensiones geométricas de las copas generadas, ya que su correcta generación va a determinar la correcta aplicación del posterior roscado por laminación.



Figura 53. Proceso para la medición de las características geométricas de los agujeros

Finalizados los agujeros, se midieron sus diámetros a la entrada (\varnothing IN) y a la salida de la copa (\varnothing OUT) con un micrómetro de interiores Mitutoyo®.

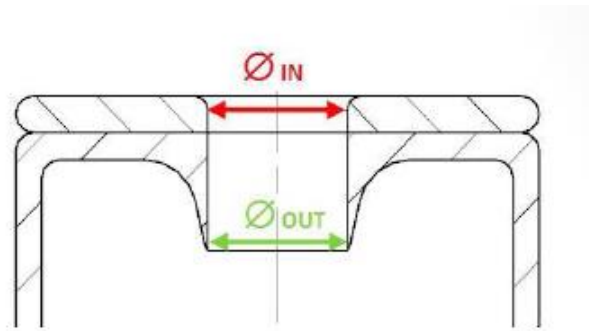


Figura 54. Diámetros

A continuación, cada agujero se cortó transversalmente por la mitad con una cortadora metalográfica y posteriormente fue pulido para eliminar restos del corte.

Para evaluar los efectos de los parámetros de trabajo sobre el espesor, la longitud de copa y el hueco de separación entre ambos materiales, se sacaron fotografías de alta calidad mediante el microscopio Leica © Z6APO, para posteriormente realizar las mediciones y observación correspondientes mediante el programa PCE-MM200.

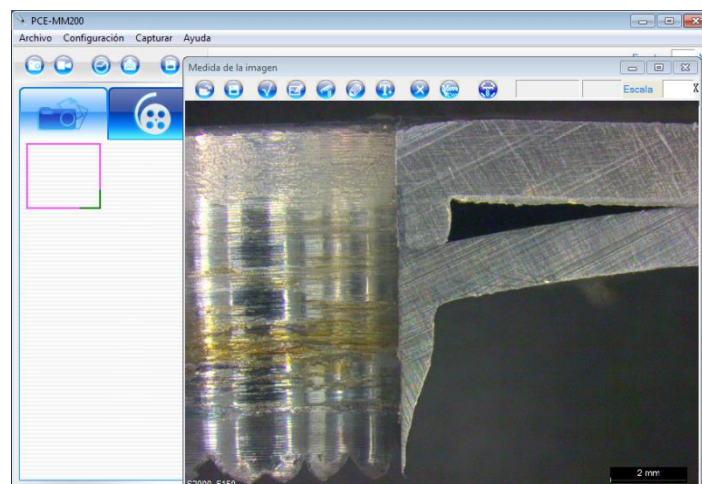


Figura 55. Programa PCE-MM200 para realizar las mediciones

Para caracterizar los espesores se tomaron medidas a distintas profundidades, cada 0,5 mm desde el comienzo de la formación de la copa. Y se midieron también las longitudes de copa generadas (Pc) y la longitud total del agujero (PT), a partir de las cuales se sacó el hueco en la intercara.

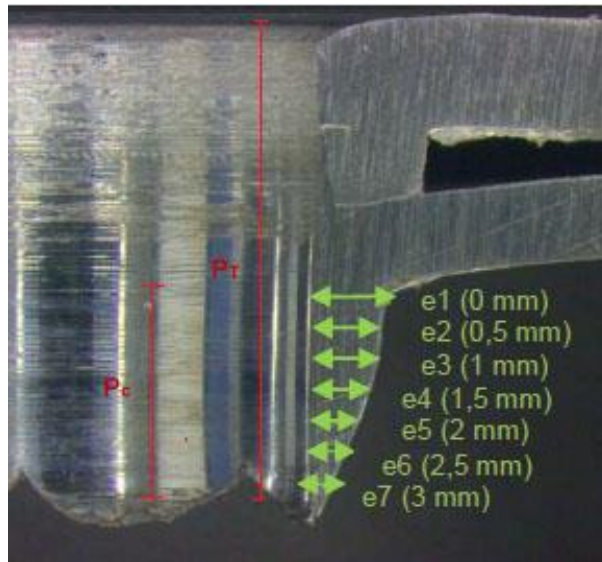


Figura 56. Espesores

Dímetros

En cuanto al diámetro del agujero se observa que la velocidad de rotación del husillo es un parámetro influyente. Cuanto mayor la velocidad de giro el diámetro del agujero aumenta, tanto a la entrada (Figura 57) como a la salida (Figura 58).

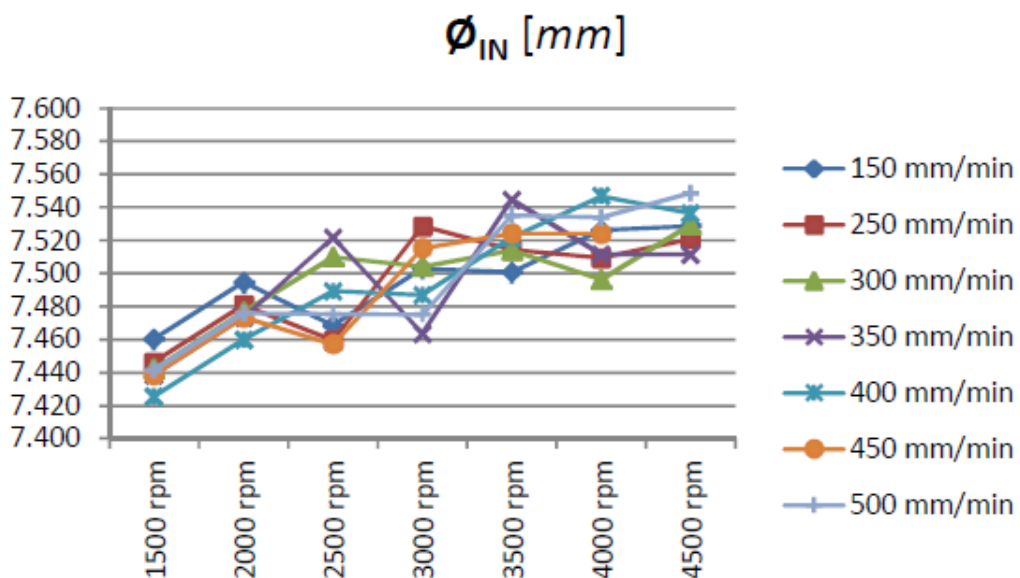


Figura 57. Diámetro a la entrada del agujero en función de la velocidad de giro y para distintos avances

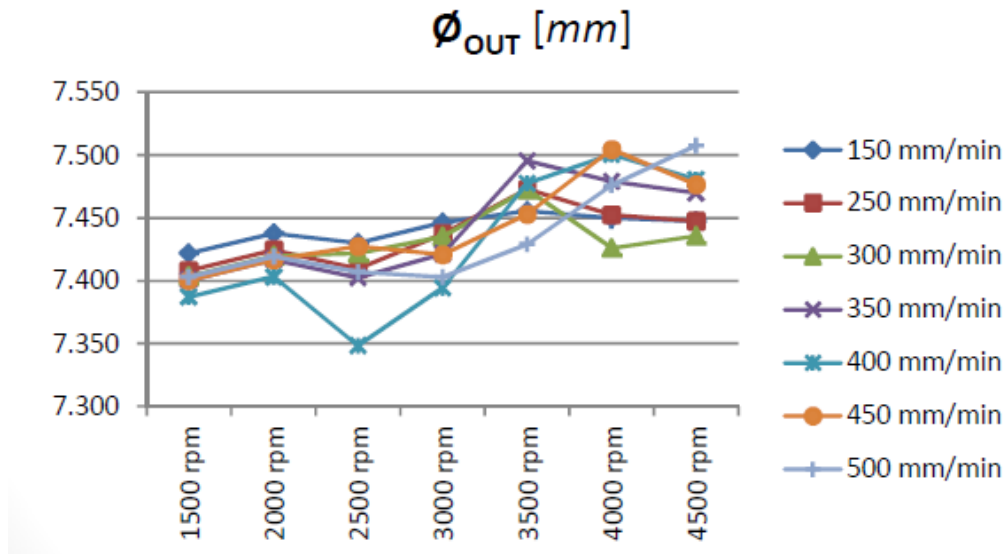


Figura 58. Diámetro a la salida en función de la velocidad de giro y para distintos avances

Se puede observar la poca diferencia entre los valores a la entrada y a la salida, lo que se traduce en una poca conicidad del agujero.

Longitudes

A continuación, se analizaron como variaban las profundidades y el hueco mínimo entre chapas (Figura 59).

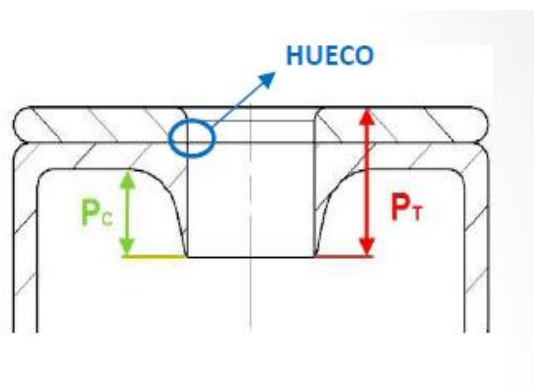


Figura 59. Longitud de copa, longitud total y hueco mínimo

Analizando los resultados se comprobó que los parámetros de entrada influyen las profundidades y por lo tanto el hueco mínimo.

En la figura 60 se observa que, al aumentar la velocidad de giro de la herramienta, aumenta la longitud de las copas generadas en el proceso, esto es debido al aumento de calor generado en el proceso. Por otro lado, al aumentar el avance disminuye la longitud de copa genera (Figura 61).

En conclusión, se consiguen mayores longitudes de copa con avances lentos y velocidades de giro altas.

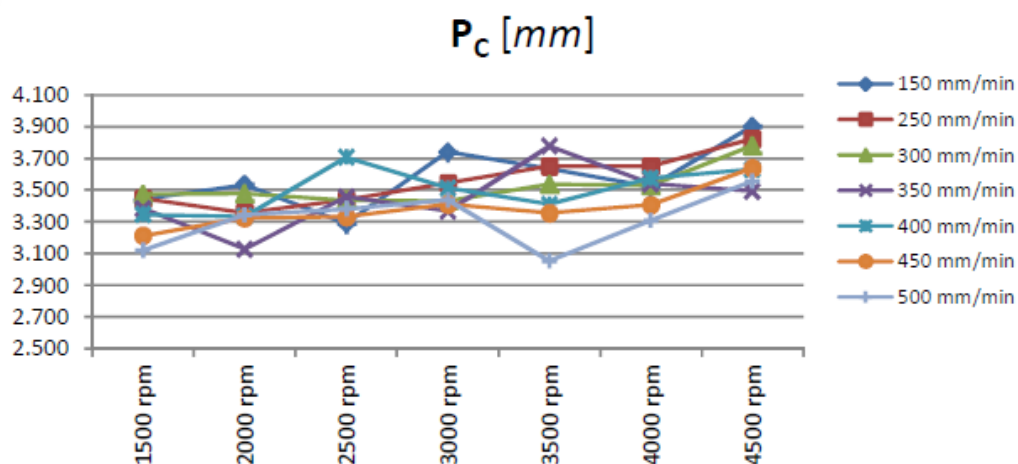


Figura 60. Longitud de copa en función de la velocidad de giro y para distintos avances

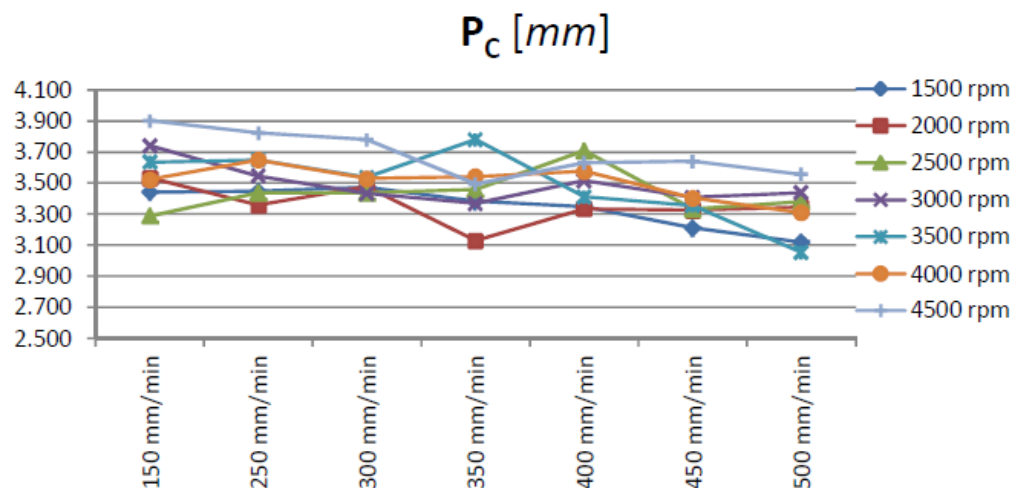


Figura 61. Longitud de copa en función de la velocidad de avance y para distintas revoluciones

Por otro lado, al aumentar las revoluciones del husillo, se produce una disminución de la longitud total (Figura 62). Esto se traduce en una disminución del hueco de separación

entre el acero y el aluminio, con mayores velocidades de giro y menores avances (Figura 63).

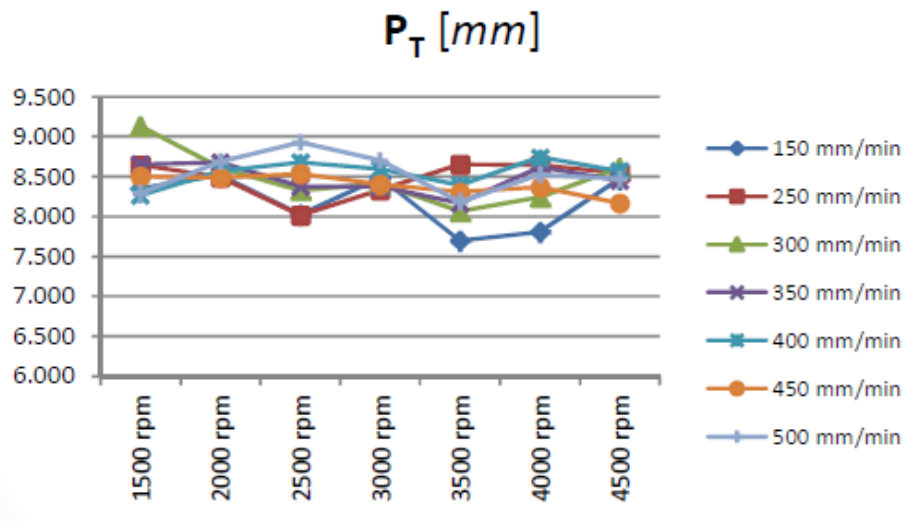


Figura 62. Longitud total en función de la velocidad de giro y para distintos avances

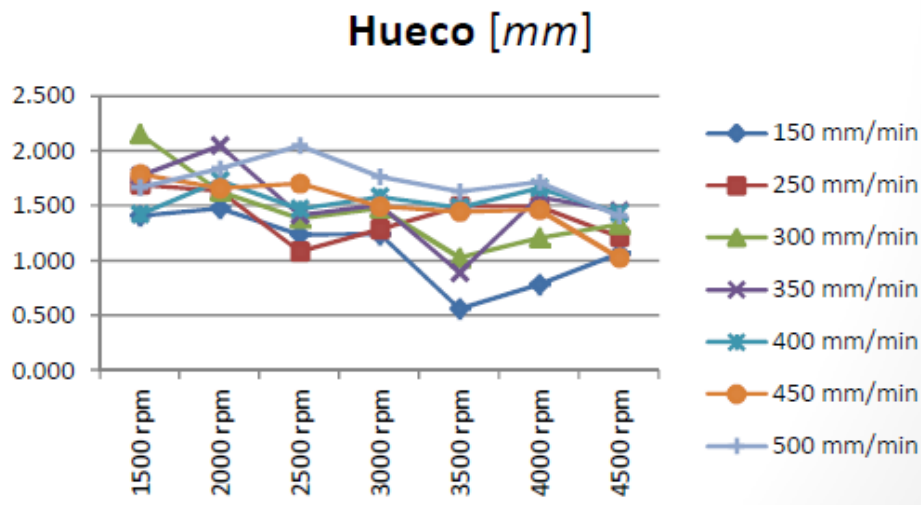


Figura 63. Hueco mínimo entre materiales en función de la velocidad de giro y para distintos avances

Espesores

En la figura 64 se observa que los espesores varían con las velocidades de giro, son mayores cuantas más revoluciones.

En cambio, teniendo en cuenta la velocidad de avance, a partir de e4 no afecta significativamente.

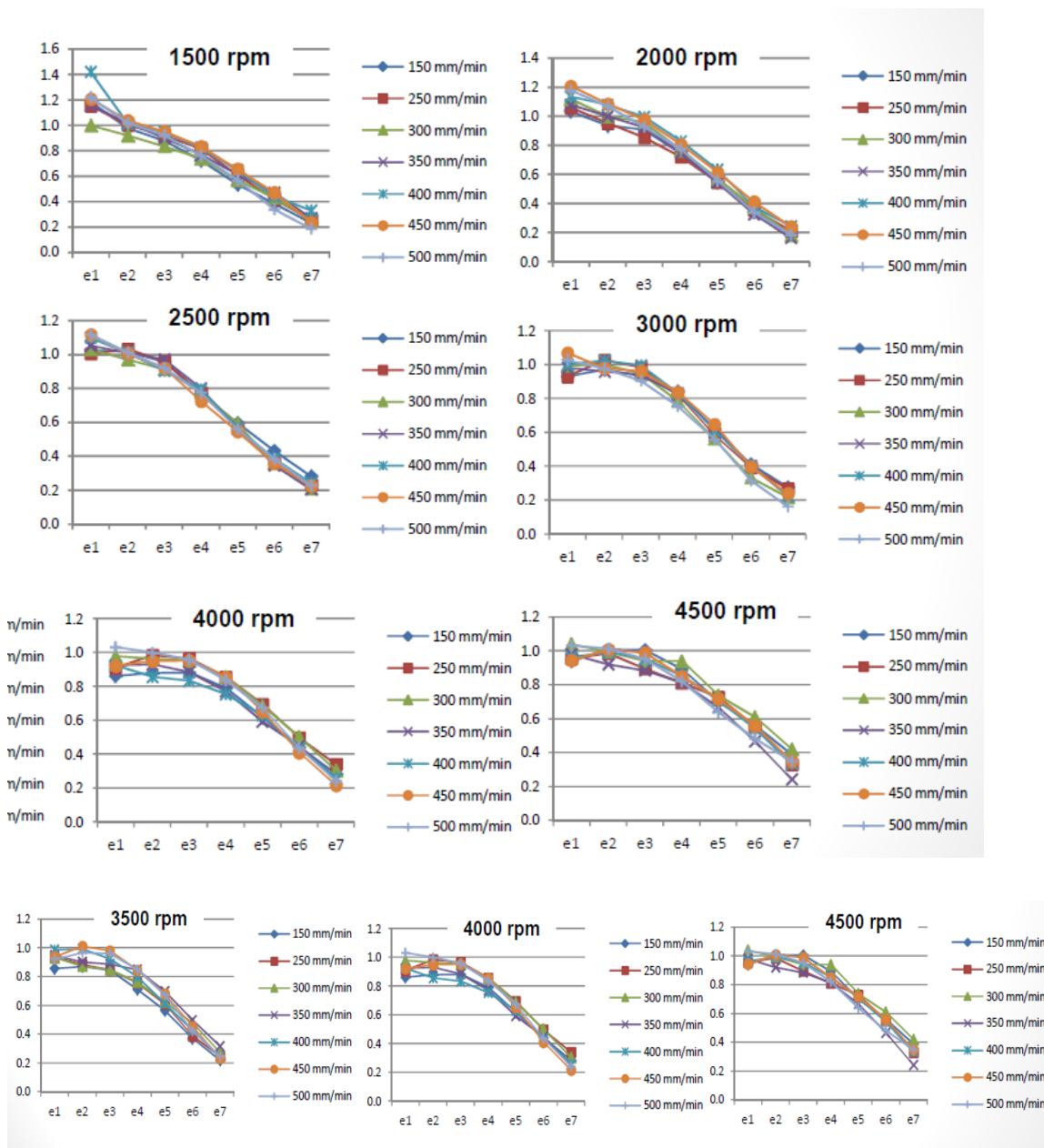


Figura 64. Variación de los espesores para distintas velocidades de giro

Determinación de los parámetros óptimos

Llegados a este punto, con la ayuda de los datos obtenidos, se pudo determinar cuáles eran los parámetros óptimos de taladrado de chapas de acero-aluminio mediante el Friction Drilling. Y dichos parámetros fueron los considerados para posteriormente hacer el roscado por laminación, ya que al roscado no le afectarán los parámetros de entrada

a la hora de su realización, únicamente dependerá del agujero previo que se haya realizado.

Las parejas de parámetros más aceptables fueron elegidas en función de distintos criterios:

1. Diámetro óptimo empleado en la norma DIN 13.

Condiciones óptimas para el agujero previo: Para que el diámetro previo quede entre 7,41 mm y 7,48 mm como establece la DIN 13, las condiciones óptimas serán hasta 2500 rpm y avance menor que 350 mm/min.

Tabla 9. Condiciones del fabricante en relación al diámetro del agujero

Rosado por laminación			
<i>DIN 13</i>	Max.	Min.	Óptimo
M8 x 1,25	7,48 mm	7,41	7,41 mm

2. Hueco mínimo entre chapas.

Entre 3500 rpm - 4500 rpm y avance menor de 300 mm/min.

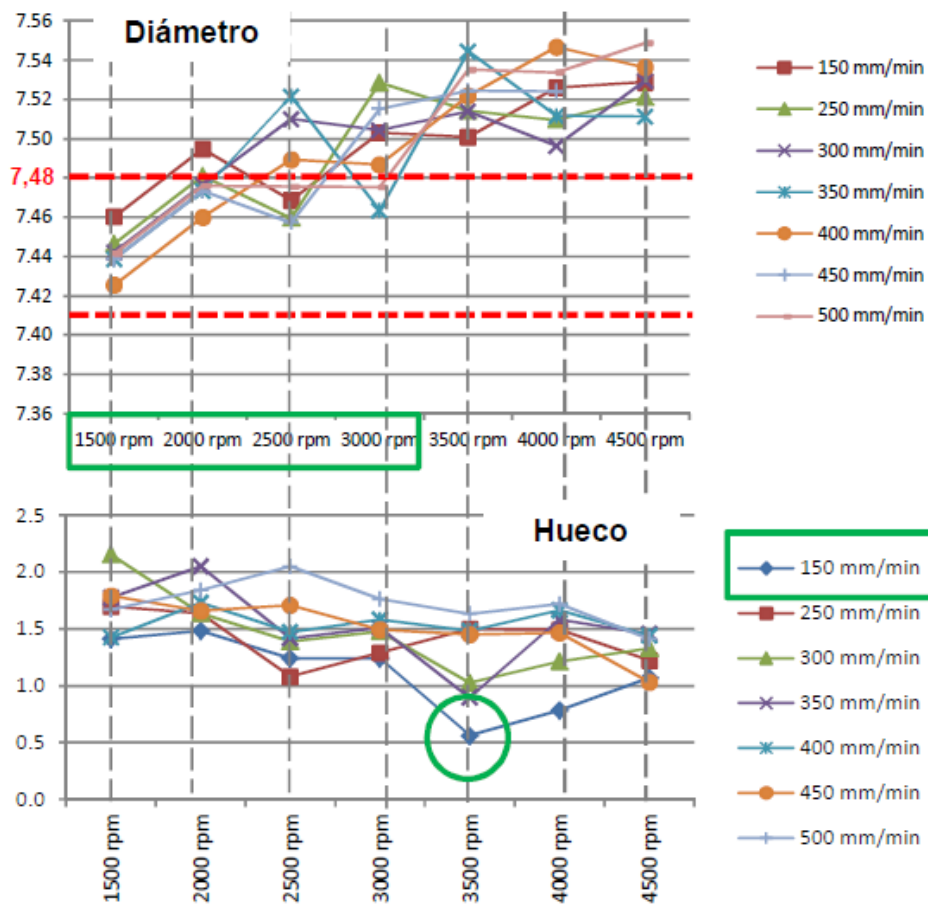


Figura 65. Relación entre hueco y diámetro con la velocidad de giro

3. Mayor espesor de copa.

Siguiendo estos criterios, y a la vista de los resultados, se obtuvo que los parámetros óptimos para cada uno de los criterios eran los siguientes

Tabla 10. Parámetros óptimos de mecanizado

Criterio	Velocidad de rotación de la herramienta (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)
Diámetro óptimo	2500	250
Hueco mínimo	3500	150
Mayor espesor de copa	3000	450

8.3 Roscado por laminación de la copa generada por Friction Drilling

A continuación, se procedió a realizar los taladrados con sus correspondientes roscados por laminación con los distintos parámetros de entrada seleccionados y se recogieron datos del par y la fuerza de avance mediante el sistema DDU Artis.

Los ensayos que se realizaron fueron: Dos teniendo en cuenta las condiciones del fabricante, cuatro según DIN 13 y tres atendiendo al hueco mímico

El roscado se realizó con la misma máquina herramienta de CNC, la Kondia A6. En cuanto a la herramienta utilizada fue un macho de laminación fabricado en acero rápido con revestimiento superficial de nitruro de titanio. Dado que los agujeros previos tendrán 7,3 mm, se usó un macho de roscar M8x1,25.

Los parámetros de mecanizado de la rosca vienen dados por el paso de la rosca y la velocidad de rotación que nos recomienda el fabricante de la herramienta. Con estos datos se pudo determinar la velocidad de avance del macho mediante la siguiente fórmula:

$$Paso = \frac{Velocidad\ de\ avance\ del\ macho}{Velocidad\ de\ rotación\ del\ macho}$$

Verificación del diámetro de los agujeros previos: La medición se realizó mediante un micrómetro de interiores que mide diámetros de 6-8 mm. El fin que se persigue es que los agujeros estén dentro de tolerancia para que todos los machos arranquen la misma cantidad de material.

Una vez se obtuvieron las probetas roscadas, se les colocó el tornillo, para comprobar el resultado final.

Monitorización fuerza y par

Al mismo tiempo que se realizaron los taladrados con sus correspondientes roscados se obtuvieron medidas con el DDU Artis.

Tras los resultados obtenidos se puede concluir diciendo que las roscas obtenidas mediante las condiciones establecidas por el fabricante son las que parecen más viables. Por otro lado, las condiciones de hueco mínimo generan mayor longitud de copa y por lo tanto mayor número de filos de la rosca formada.

8.4 Análisis experimental de los mecanismos de corrosión

8.4.1 Análisis teórico: corrosión galvánica

Observando la serie galvánica (Figura 17) se determinó que el aluminio en contacto con el acero actúa como ánodo, ya que está situado por debajo del acero en la serie galvánica, lo que implica que será el aluminio el metal que se oxide y aporte electrones, perdiendo parte de su masa y degradándose. En consecuencia, el acero actuará como cátodo, aceptando los electrones que le transfiere el ánodo. Para comprobar que esto se cumple se han realizado una serie de cálculos (Ver ANEXO III: Cálculos) con los que, efectivamente, se ha llegado a la conclusión de que el aluminio es el metal que se oxida (degrada) y el acero es el metal que se reduce.

Además, y como un extra, se ha podido conocer el potencial de la pila que se genera al poner en contacto el acero y el aluminio, que será:

- La reducción del acero a Fe^{2+} : $\Delta V^0 = 2,433$
- La reducción del acero a Fe^0 : $\Delta V^0 = 1,222$

Algo que puede afectar en gran medida al comportamiento frente a la corrosión de la unión de acero y aluminio es que, al aluminio, en estado natural, se le forma una capa de alúmina (Al_2O_3), que cuando cubre la superficie del aluminio (debido al abaja porosidad de aluminio y a la gran adhesión de la alúmina al aluminio base) lo pasiva, evitando que la oxidación profundice en el aluminio base. Además, actúa como protección catódica con el acero, aunque por poco tiempo, ya que la velocidad de formación de la capa de alúmina es muy elevada.

Es por eso que el aluminio se comporta como un material inerte, lo que impide que se forme la pila galvánica entre acero y aluminio.

Por lo tanto, si se ponen en contacto acero y aluminio, al principio se producirá una pila galvánica que provocará la oxidación superficial del aluminio, lo que hace que se cree una barrera protectora de alúmina, y una vez formada completamente la capa de alúmina, no se producirá ningún tipo de reacción electroquímica entre ambos metales.

No solo se ha estudiado este par galvánico, sino que se ha estudiado el papel que puede jugar un tornillo que se podría emplear en la unión, lo que podría provocar un trio galvánico.

Para realizar el análisis del trío galvánico se han estudiado todas las combinaciones posibles entre los tres metales en contacto. Esto es, aparte del ya estudiado acero del tubo y aluminio, habría que estudiar también el par acero del tornillo y aluminio; y por último el acero de tubo y el del tornillo. Para ello se ha estudiado de forma análoga al ya expuesto.

Debido a que el contenido en aleantes de los dos aceros se puede considerar despreciable, podemos afirmar que no se generará ninguna pila galvánica entre ambos.

El caso del contacto del acero del tornillo y el aluminio, podemos afirmar que se producirá un fenómeno similar a el contacto del acero del tubo y el aluminio. Al principio y durante un corto espacio de tiempo se creará una pila galvánica que producirá la oxidación del aluminio, lo que generará una capa de alúmina que hará que el aluminio se comporte como un material inerte, lo que hará desaparecer a la pila galvánica.

Se ha valorado la posibilidad de utilizar tanto tornillos galvanizados como perfil de acero inoxidable. Por lo tanto, en el Anexo III se han estudiado todas las posibles combinaciones de todos estos metales, deduciendo (de forma únicamente teórica) para cada dupla cual se oxidará y cual se reducirá, así como el potencial teórico de la pila generada al contacto de los dos metales

8.4.2 Análisis experimental

Para ver el efecto que puede tener un ambiente corrosivo en la unión entre el acero y aluminio realizaron unos ensayos en cámara salina.

Debido a que en la ETSI no es posible realizar los ensayos debido a que no se dispone de la maquinaria e instrumentación necesaria, se subcontrató a la empresa IMPROMAT. Se enviaron las probetas preparadas y tras los ensayos IMPROMAT generó un informe en el que se detallan las conclusiones a las que se ha llegado.

Se prepararon unas probetas que cumplieran con las condiciones de aplicación de la norma UNE EN ISO 9227, la cual da pautas para la correcta realización de estos ensayos. Según esta norma las muestras se inspeccionan a las 48h, 144h, 240h, 288h y a las 360h

Se prepararon diversas probetas cada una con unas determinadas condiciones con el fin de estudiar diversos casos y comprobar que condiciones proporcionan mejores resultados frente a la corrosión.

Tabla 11. Tabla de condiciones de mecanizado para las pruebas de corrosión

Nº	Condiciones	Perfil	Chapa	Tornillo
1	Tornillo - tuerca	AISI 1045	Al 5754	Acero pavonado
2	DIN 13	AISI 1045	Al 5754	Acero pavonado
3	Mayor espesor de copa	AISI 1045	Al 5754	Acero pavonado
4	Fabricante	AISI 1045	Al 5754	Acero pavonado
5	Hueco mínimo	AISI 1045	Al 5754	Acero pavonado
6	Hueco mínimo	AISI 1045	Al 5754	Acero galvanizado
7	Hueco mínimo	AISI 1045	Al 6082	Acero pavonado
8	Hueco mínimo	AISI 1045	F111	Acero pavonado
9	Hueco mínimo	AISI 304	Al 5754	Acero pavonado
10	Hueco mínimo	AISI 304	Al 6082	Acero pavonado

Por cada condición se van a enviar dos probetas, para permitir a la empresa sacar las probetas de la cámara cuando consideren necesario y poder comparar la evolución de la corrosión cuando se saque la segunda tanda.



Figura 66. Probeta para ensayo de corrosión antes de ensayar

Al realizar los ensayos se comprobó que el acero se corroía muy rápido y transcurridas 48 h las probetas presentaban un aspecto nefasto.



Figura 67. Estado de las probetas al transcurrir 48 horas

Estos ensayos no han proporcionado información sobre si había diferencias entre los diferentes tipos de mecanizado del agujero; pero sí que se ha podido sacar algunas conclusiones.

- La corrosión afecta igual a las probetas mecanizadas mediante el taladrado por fricción y a las mecanizadas mediante el tornillo tuerca convencional. No se observan diferencias apreciables.
- Como es obvio, las probetas de acero inoxidable estaban en buenas condiciones, casi sin ningún rastro de uso.
- Los tornillos galvanizados han resistido mejor la corrosión que los que no tenían tratamiento.
- El material que se oxida de forma rápida es el acero. Esto es porque el aluminio queda recubierto por la ya mencionada capa de alúmina que lo protege.

A la vista de estos pésimos resultados, se decidió hacer otra tanda de ensayos, pero esta vez utilizando acero inoxidable para el perfil y acero galvanizado para los tornillos, que son los materiales que mejor resultado han dado, para que se pueda apreciar si hay diferencias entre los distintos tipos de mecanizado del agujero.

Por lo tanto, la siguiente tanda de ensayos se realizó bajo las siguientes condiciones:

Tabla 12. Condiciones de mecanizado de las probetas para ensayo de cizalladura

Nº	Condiciones	Perfil	Chapa	Tornillo
1	Diámetro óptimo	AISI 304	Al 5754	Acero galvanizado
2	Diámetro óptimo	AISI 304	Al 5754	Sin tornillo
3	Hueco mínimo	AISI 304	Al 5754	Acero galvanizado
4	Mayor espesor de copa	AISI 304	Al 5754	Acero galvanizado

Se decidió incluir unas probetas sin tornillo para ver cómo esto puede afectar al comportamiento de la unión frente a ambientes corrosivos.

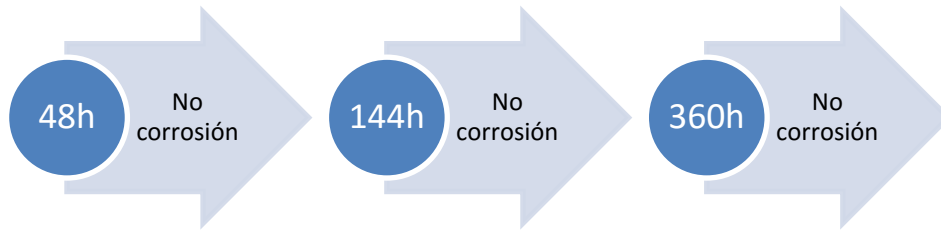
Las probetas ensayadas presentan entre ellas un comportamiento parecido frente a la corrosión:



Figura 68. Probetas de acero inoxidable ensayadas (360 horas)

- Perfiles de acero inoxidable:

Hasta 360 h, no presentan signos de corrosión en ninguna de las probetas, salvo en el cordón de soldadura en la parte interior del perfil.



- Chapas de aluminio:

Se aprecia que las probetas mecanizadas con los criterios de hueco mínimo presentan un menor grado de corrosión. Esto puede ser debido a que, al haber menos hueco entre chapa y perfil, comparado con los otros métodos de mecanizado, hay menor circulación de fluido, y, por lo tanto, la corrosión le afecta en menor grado.



Los tornillos presentan corrosión férrica, proveniente de la copa. Puede que al realizar el taladrado o roscado se haya contaminado la zona con acero al carbono. Esta contaminación se corroe y mancha la copa y los tornillos. Una vez



Se realizó una inspección metalográfica de las chapas de aluminio con corrosión. La máxima profundidad de picadura que se ha observado es de 0,3 mm, y se puede encontrar en la superficie interior de la chapa. Esto es debido a que se queda sal retenida entre la chapa y el perfil, lo que acelera el proceso de corrosión.



Figura 69. Diversos casos de picadura que se han producido

Al desmontar la unión chapa-perfil, se observó que las probetas mecanizadas con los criterios de mayor espesor de copa son las más fáciles de separar, después las de diámetro óptimo, y por último las mecanizadas con los criterios de hueco mínimo, que son las más difíciles de separar, llegando incluso a doblar la chapa.

Una vez desmontadas todas las probetas, se observó que tanto el taladro del perfil, como el taladro de la chapa presentan una rebaba generada en el proceso de “Friction Drilling” (Figura 70, izquierda). Sin embargo, en las probetas de mayor espesor de copa no se observa esta rebaba presentando una superficie completamente lisa (Figura 70, derecha).



Figura 70. Comparativa de la rebaba producida en el proceso, para condiciones de diámetro óptimo (izquierda) y para mayor espesor de copa (derecha)

Tras todo lo observado se llegó a las siguientes conclusiones:

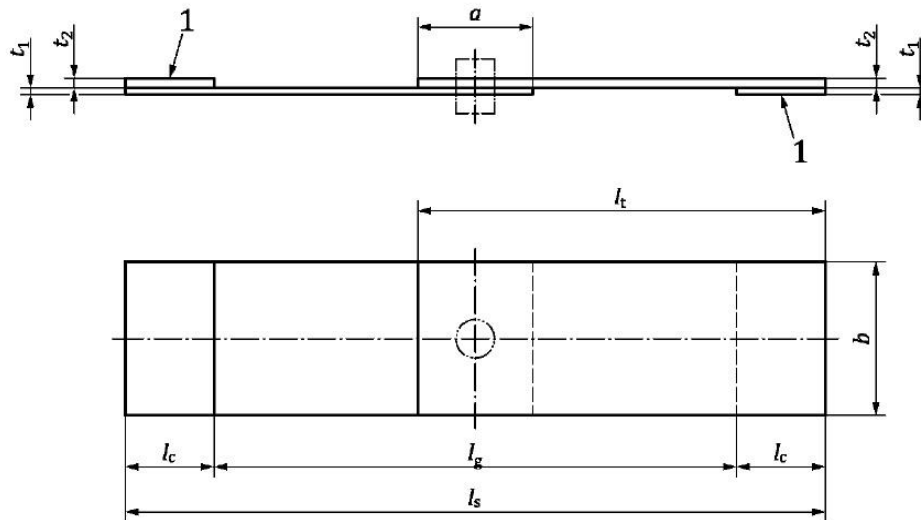
- Se observó un comportamiento parecido a corrosión entre las diferentes probetas, siendo a las 144h cuando todas las chapas de aluminio presentaban corrosión.

- Los perfiles y los tornillos de acero inoxidable no presentaban corrosión. Se observó coloración roja en los tornillos, procedente de la unión entre el perfil y la chapa).
- No se observaron diferencias entre las probetas mecanizadas en condiciones de diámetro óptimo, con y sin tornillos.
- Entre las 3 condiciones (diámetro óptimo, hueco mínimo y mayor espesor de copa), se observó un menor grado de corrosión en las chapas de las probetas con condiciones de hueco mínimo.
- Las probetas de mayor espesor de copa no generaban rebaba en el perfil durante el proceso de “friction drilling”, lo que provoca que la unión sea menos resistente.
- En todas las probetas se observó que el proceso de “friction drilling” genera una separación entre el perfil y la chapa. Esto permite la acumulación de humedad y sal durante el ensayo, que acelera el proceso de corrosión.

8.5 Análisis experimental del comportamiento de la unión frente a corrosión

Se prepararon una serie de probetas para analizar el comportamiento de la unión frente a fuerzas de cizalladura y fueron enviadas también a IMPROMAT para la realización de los ensayos. Posteriormente, la empresa proporcionó un informe donde indicaba el modo de fallo que había tenido la probeta, ya fuera fallo de resistencia de material, rotura de tornillo, etc.

Para ello, se siguieron las pautas descritas en la norma UNE-EN 15048-2, la cual describe los pasos a dar para la correcta caracterización de los ensayos. Para la realización de los ensayos se va utilizó una máquina de tracción convencional.



Leyenda

a Solape

b Anchura del cupón

l_c Longitud del área de anclaje

l_s Longitud total de la probeta

l_g Longitud de la probeta entre anclajes

l_t Longitud del cupón

t_1, t_2 Espesor de la placa

1 Cuñas

2 Junta mecánica

Figura 71. Dimensiones de probeta de cizalladura según norma UNE-EN 15048-2

Se entregaron a IMPROMAT 3 probetas de cada una de las condiciones siguientes:

Tabla 13. Condiciones de mecanizado de las probetas del ensayo de cizalladura

Material de las chapas	Condiciones de mecanizado
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Huevo mínimo
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Diámetro óptimo
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Mayor espesor de copa
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Unión atornillada

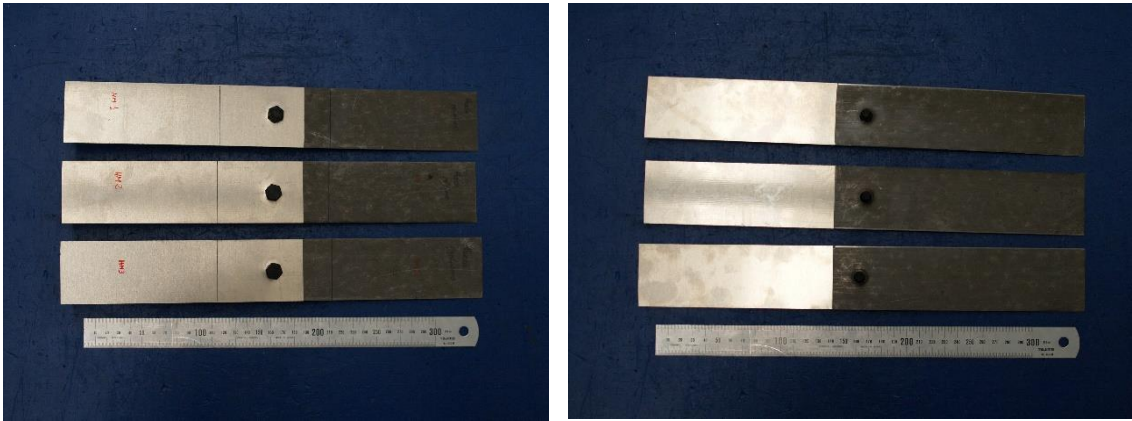


Figura 72. Probetas para el ensayo de cizalladura

Se suministró también un grupo de probetas unidas mediante una unión atornillada convencional con el objetivo, de comparar las diferentes condiciones de mecanizado del taladrado por fricción entre ellas y también comparar con la resistencia a la cizalladura de una unión convencional.

Una vez finalizados los ensayos, se observó que la mayoría de las probetas habían fallado de la misma manera, por cortadura de la chapa de aluminio por el borde. Además, todas ellas alcanzaban una carga máxima similar.

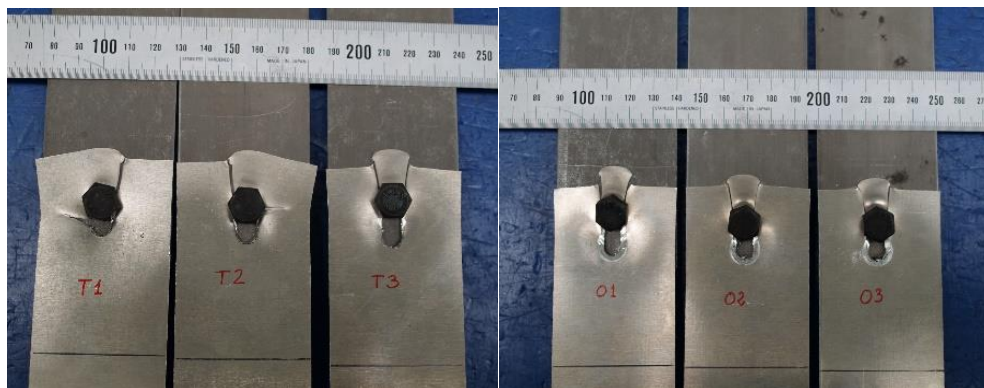


Figura 73. Probetas ensayadas

Tabla 14. Cargas máximas para cada probeta

Condición	Referencia	Carga máxima(KN)
Hueco mínimo	HM1	6,449
	HM2	8,163
	HM3	7,77
Diámetro óptimo	O1	7,442
	O2	7,547
	O3	6,714
Mayor espesor chapa	ME1	8,067
	ME2	7,713
	ME3	7,926
Unión atornillada	Tuerca 1	7,761
	Tuerca 2	8,609
	Tuerca 3	8,546

Es por esto que se concluyó diciendo que la resistencia a la cizalladura está limitada por la resistencia mecánica de la chapa de aluminio y es independiente de las condiciones de mecanizado del agujero. Además, en cuanto a resistencia a la cizalladura se refiere, la unión que se realizó mediante tornillo-tuerca y la realizada mediante el Friction Drilling mostraron un comportamiento similar.

8.6 Análisis de las microdurezas a lo largo de la copa

Para una mejor caracterización de la unión se decidió medir la microdureza de la unión a lo largo de la copa. Para ello se eligieron tres probetas con las condiciones de hueco mínimo, mayor espesor de chapa y diámetro óptimo.

A continuación, se han cortaron transversalmente y se encapsularon con la ayuda de una encapsuladora Remet IPA 40. Después se pulió la superficie seccionada de las probetas para poder realizar correctamente el análisis de las microdurezas.

Para ello se ha empleó un durómetro FM-800, que permitía realizar unos ensayos Vickers de dureza. Se fue recorriendo la copa de los agujeros generados, realizando los ensayos de dureza a lo largo de toda su longitud (ver Figura X).

El número de mediciones realizadas dependió de la longitud de la copa. Partiendo desde el diámetro de salida del agujero, se realizaron medidas cada 0,5 mm, tratando de encontrar en algunos de ellos la zona de unión entre acero y aluminio para ver si existían cambios en la dureza.

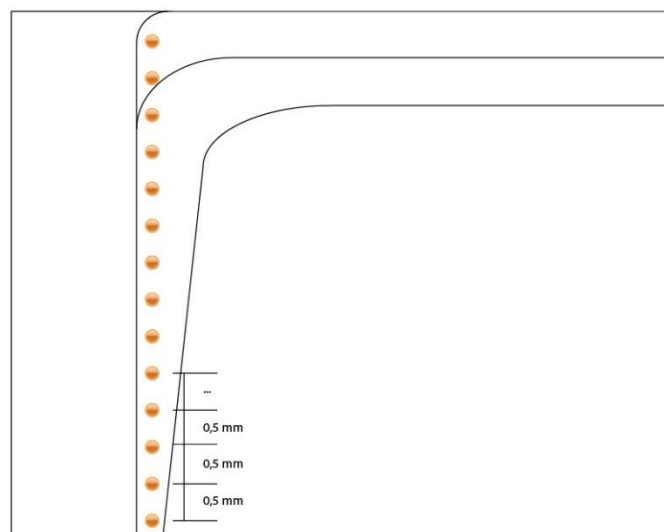


Figura 74. Mediciones de dureza a lo largo de la copa

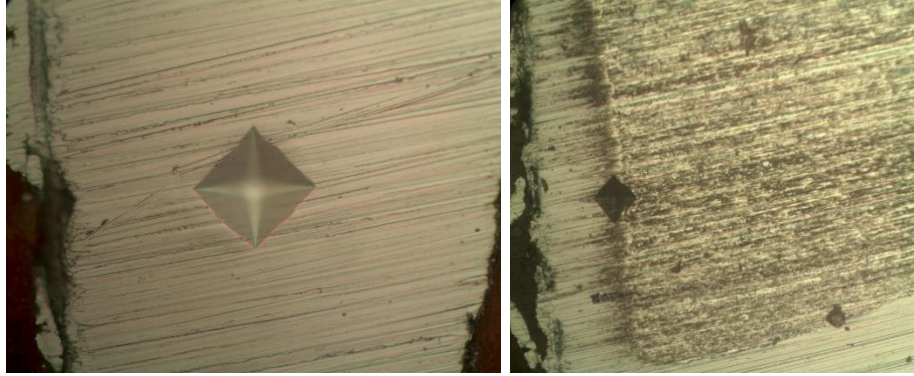


Figura 75. Indentación en acero. Indentación en intercara acero-aluminio

Los resultados de las mediciones se han recogido en el XXXX: Análisis de la microdureza.

Tras los resultados se pudo concluir que cuando el material es el material base (ya sea la chapa o el perfil) la dureza no varió, respecto a la dureza del material sin mecanizar.

Pero en la zona de unión del material se observó una mezcla de los dos materiales, y al medir la dureza en esa intercara se obtuvo una dureza intermedia entre las durezas de los dos materiales unidos. Mediante observación, se dedujo que las zonas en las que había más acero que aluminio en la unión, la dureza medida era mayor, llegando a superar incluso la dureza del acero base; y que, al contrario, si había menos acero que aluminio, la dureza medida en la intercara era menor, pero aun así mayor que la del aluminio base.

Por lo tanto, se pudo concluir que la dureza en la unión dependía del material que este uniendo y, si son diferentes, del tipo de materiales que se está uniendo y la cantidad de cada material.

8.7 Proceso de ACV. Balance del impacto ambiental.

Por último, se realizó la comparación y valoración de dos análisis de ciclos de vida correspondientes a dos procesos de mecanizado diferentes: la tecnología Friction Drilling frente al taladrado convencional.

Para medir el impacto ambiental de dichos procesos mencionados a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida) se utilizó el Analisis de Ciclo de Vida (ACV). Se recopilaron y analizaron las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales

potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos.

Debido a que el análisis de ciclo de vida puede ser aplicado a cualquier producto o proceso, abarcando desde su nacimiento hasta su muerte, se definieron unos límites que expusieron con el máximo detalle posible la influencia y repercusión de los procesos de producción, distribución, uso y fin de vida de los elementos que forman parte de este proyecto.

A continuación, se muestran dos figuras que representan los sistemas correspondientes a cada uno de los procesos y los límites que se definieron.

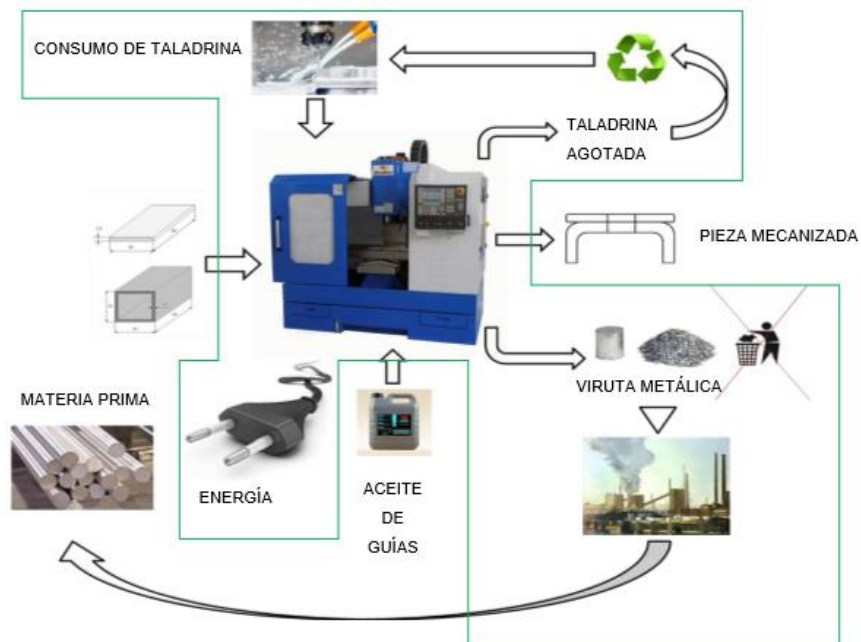


Figura 76. Proceso de taladrado convencional de tubo de acero AISI 1045 junto a chapa de aluminio Al5754

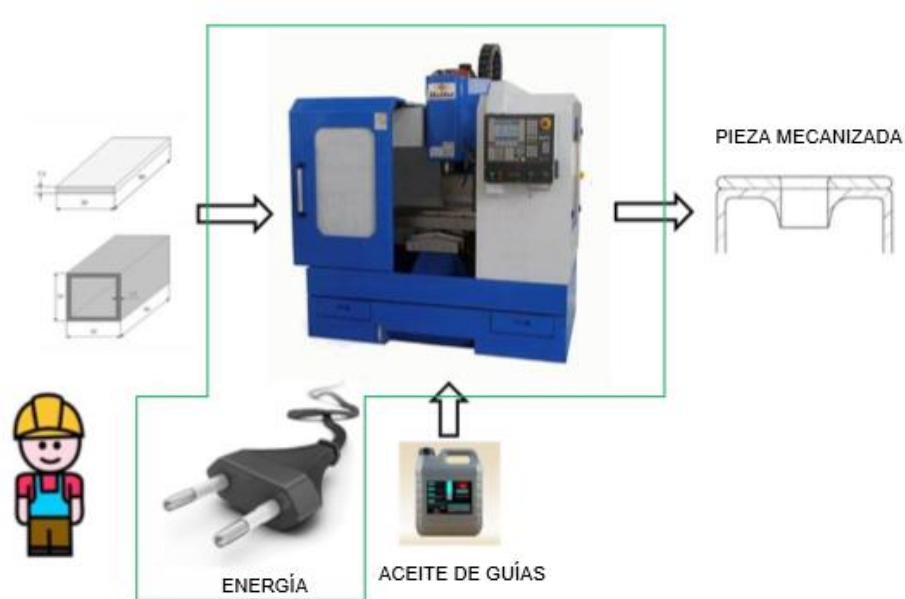


Figura 77. Proceso de Friction Drilling de tubo de acero AISI 1045 junto a chapa de aluminio AI5754

Los resultados se obtuvieron a partir de datos reales de consumo y de desgaste de brocas, así como tiempos de mecanizado y velocidades de corte de máquinas del taller mecánico de la Escuela de Ingenieros (ETSIB) de Bilbao por lo que se reprodujeron y asemejaron con suficiente exactitud a la que se podría llevar a cabo dentro de cualquier empresa del sector. Otra fuente que cobra gran importancia en este proyecto es la utilización de la base de datos Ecolnvent proporcionada por el programa SimaPro, el cual calculó los parámetros, así como las principales categorías de impacto en el medio ambiente mediante distintas metodologías de análisis.

La manera y forma en la que se recopilaban estas entradas/salidas se conoce como Inventario de ciclo de vida (ICV), y es la fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas/salidas de un sistema durante su ciclo de vida.

8.7.1 Evaluación del impacto ambiental

Se realizó una comparación directa entre ambos procesos con datos reales de consumo de energía, producción, consumo de taladrina y generación de viruta.

En la tabla 15 se muestran las diferencias más representativas entre los dos procesos en cuestión:

Tabla 15. Comparación del taladrado y Friction Drilling

	Friction Drilling	Taladrado convencional
Consumo de energía	✓	✓
Fabricación de broca	✓	✓
Proceso de mecanizado	✓	✓
Aceite de guías	✓	✓
Consumo de taladrina	X	✓
Reciclaje de taladrina	X	✓
Generación de viruta	X	✓

Como puede observarse, las diferencias más notables entre ambos procesos son el consumo y reciclaje de taladrina, la generación de viruta y el consumo de energía que dependerá del tiempo de mecanizado medio por pieza en cada uno de los procesos.

La fabricación de la broca no se considera ya que se han utilizado brocas del mismo material para ambos procesos; acero rápido. Además, el impacto ambiental de los procesos de mecanizado en sí (la liberación de partículas y gases a la atmósfera), así como el consumo de aceite de las guías se han considerado similares a ambos y por ello no se entró a realizar este estudio en concreto.

Se parte de la base de que se llevarán a cabo el mecanizado de 1000 agujeros de diámetro 7,35 mm.

Consumo de energía:

Hay que mencionar que el taladrado conlleva un proceso previo de pretaladrado y uno posterior de desbarbado, mientras que el taladrado por fricción no precisa de ninguna operación adicional. Por lo tanto, el tiempo de mecanizado en el FD será menor como se refleja en el siguiente cuadro.

Se ha propuesto una velocidad de avance de 400 mm/min junto a una velocidad del husillo de 2500 rpm para el diámetro deseado.

En el análisis de inventario se obtuvo el impacto que tenía la producción y consumo de 1KWh en función de la procedencia de la energía en el País Vasco. Por lo tanto, a partir de dichos datos se calculó el impacto medioambiental propio del consumo total.

TALADRADO

- Tiempo de taladrado = 0,45 sg
- Tiempo de mecanizado medio (con pretaladrado y desbarbado) = 5,4 sg por agujero.
- Se supone que los 1000 agujeros se llevarán a cabo en una cadena de producción continua por lo que se ha estimado un tiempo entre taladrado y taladrado de 0,5 segundos.

Tiempo de operación total = 1 hora y 40 minutos (1,65 horas aproximadamente).

Sabiendo la potencia del centro de mecanizado, se calcula un consumo de energía de 13,035 KW.

A partir de los datos de inventario el impacto ambiental total del consumo del taladrado es el siguiente:

Tabla 16. Categorías de impacto para el consumo de energía en el taladrado

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	6,058
Acidification	H+ moles eq	2,531
Carcinogenics	kg benzen eq	0,014
Non carcinogenics	kg toluen eq	46,219
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,0133
Eutrophication	kg N eq	0,0018
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	4,46532E-07
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	10,26
Smog	kg Nox eq	0,0185

FRICION DRILLING

- Tiempo de mecanizado medio = 0,45 sg por agujero
- Proponemos de nuevo un tiempo de 0,5 segundos entre agujero y agujero en la cadena de producción

Tiempo de operación total = 16 minutos (0,26 horas aproximadamente).

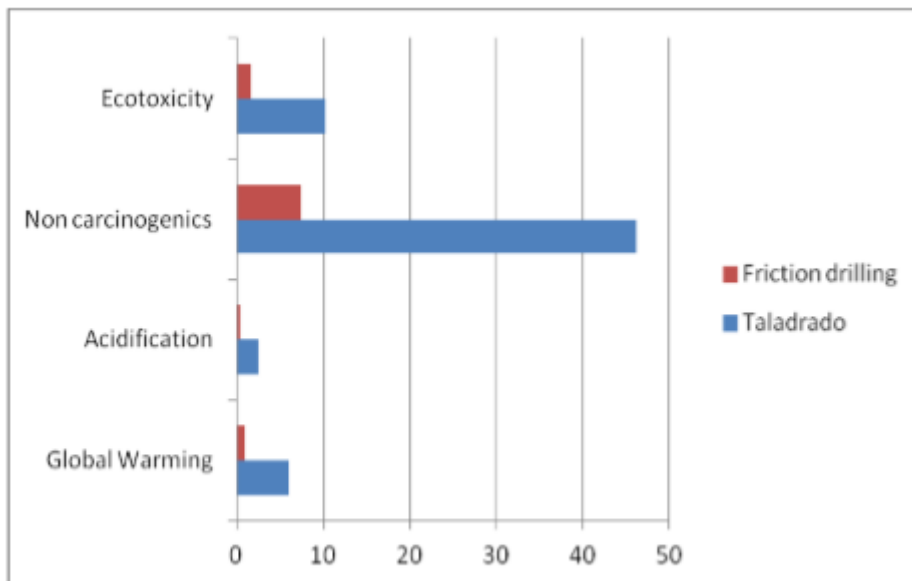
Sabiendo la potencia de la máquina obtenemos de nuevo el consumo de energía requerido: 2,08 KW.

A partir de los datos de inventario el impacto ambiental total del consumo del taladrado por fricción es el siguiente:

Tabla 17. Categorías de impacto para el consumo de energía en el Friction drilling

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	0,9668
Acidification	H+ moles eq	0,4039
Carcinogenics	kg benzen eq	0,0022
Non carcinogenics	kg toluen eq	7,3753
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,00212
Eutrophication	kg N eq	0,000289
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	7,1253E-08
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	1,6372
Smog	kg Nox eq	0,002953

A continuación, se muestra una comparación de los valores que presentan cada uno de los parámetros medioambientales para cada proceso:



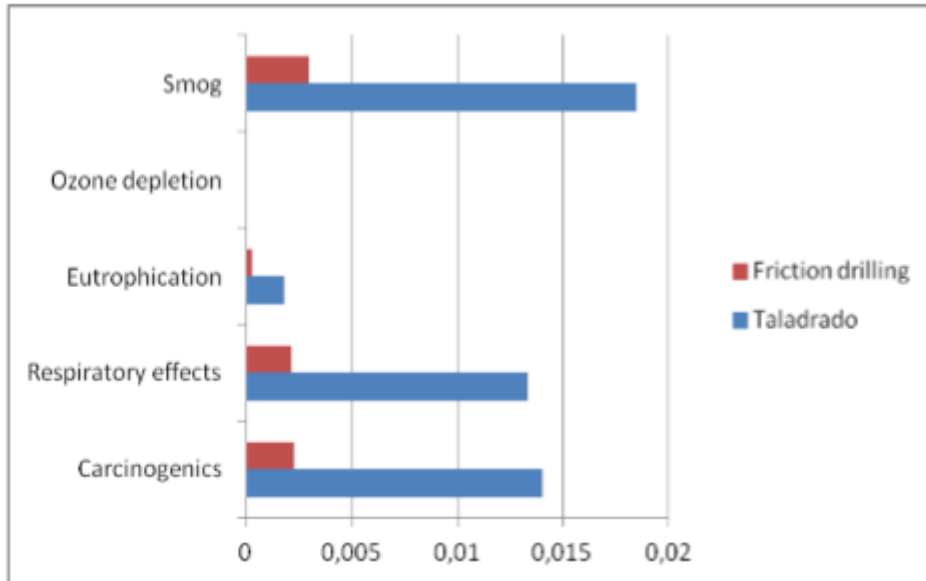


Figura 78. Parámetros medioambientales para cada proceso

El taladrado adquiere una repercusión energéticamente hablando mayor que el de friction drilling en el medio ambiente ya que es necesario un mayor consumo de energía para llevarlo a cabo.

Uno de los principales impactos ambientales en el sector energía, es la incidencia de los contaminantes producidos por la combustión de combustibles.

En mayor o menor grado, la extracción, producción, transporte y consumo de energía produce alteraciones medioambientales, afectando también la vida y desarrollo del ser humano.

En este aspecto, se puede catalogar el friction drilling como un proceso de mecanizado más limpio que el de taladrado convencional

Fabricación de taladrina

Es una entrada inherente únicamente al proceso de taladrado. La taladrina es un producto compuesto por agua y aceites que se utiliza como lubricante y refrigerante en la industria del mecanizado por arranque de viruta.

En su composición se encuentran aditivos azufrados, parafinas, clorados y también aceites sintéticos. Los efectos de la contaminación atmosférica que provienen de la fabricación de este tipo de componentes que conforman las taladrinas recaen directa o indirectamente sobre los seres humanos, animales, cosechas, ciudades, bosques y ecosistemas acuáticos.

El caudal de premezcla en la Kondia A6 es de 7 l/min. Se partirá de la base de que la taladrina únicamente será aplicada durante el tiempo que dura cada proceso de agujereado, quedando el flujo parado en los intervalos del movimiento de la cadena de producción. Así, se obtiene un tiempo neto de flujo de taladrina de 1 hora y 30 minutos.

Se consumirán, por tanto, 630 litros de premezcla aproximadamente. Además, según publicó Byrne en su informe de 2003, existe una pérdida del 30% de aceite corte debido a filtraciones, evaporaciones, derrames y salpicaduras. Por lo tanto, la salida total de taladrina del proceso de mecanizado será de 441 litros. Se propone que el 5% corresponde a taladrina concentrada, por lo que serían necesarios 22,05 litros de dicha sustancia.

En el análisis de inventario se calculó el impacto que tiene la producción de 1m³ de taladrina. Sabiendo ya que el consumo es de 22,05 litros (0,02205 m³), el impacto ambiental producido por dicha entrada es la siguiente:

Tabla 18. Categorías de impacto totales para la fabricación de 22,05 litros de taladrina

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	7,613181652
Acidification	H+ moles eq	17,54358688
Carcinogenics	kg benzen eq	0,001734385
Non carcinogenics	kg toluen eq	13,12980882
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,018729008
Eutrophication	kg N eq	0,00255822
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	5,02886E-06
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	0,5369193
Smog	kg Nox eq	0,038247698

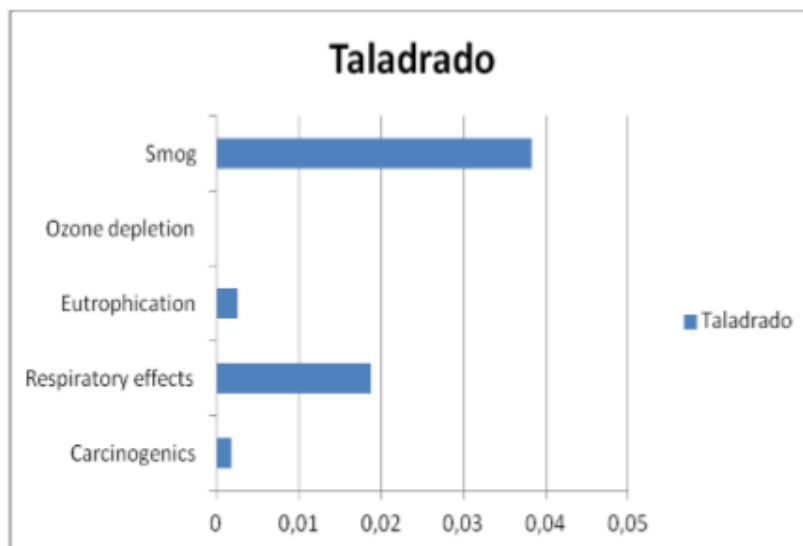
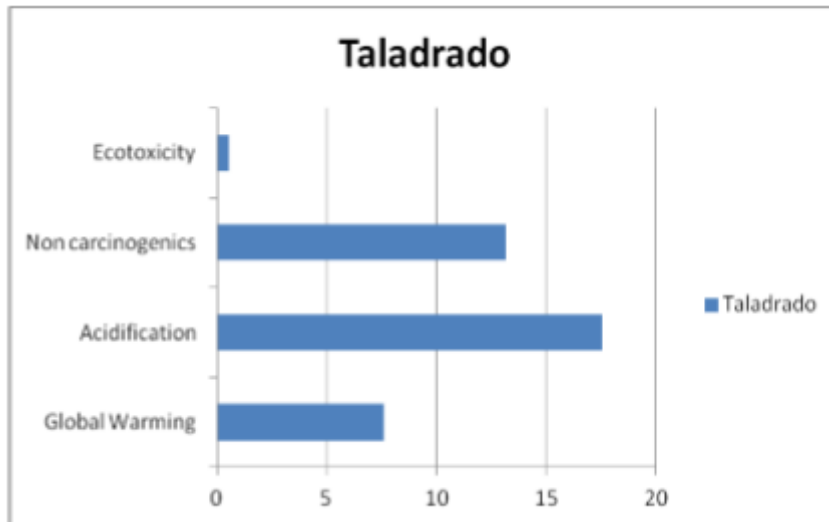


Figura 79. Valores correspondientes a la fabricación de taladrina

Tratamiento de virutas

La viruta es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que se extrae al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación, en este caso sobre metales.

En el proceso de friction drilling no se desprende viruta ni se elimina material, por lo que se reducen ciertos costos económicos y medioambientales en el tratamiento de reciclado y reutilización de dicha materia prima.

Por lo tanto, se realizó el cálculo del volumen de viruta producido por el taladrado. Sabiendo que se efectuaron 1000 agujeros de diámetro 7,35 mm



Figura 80. Volumen viruta generada en un agujero

Se obtuvieron 62781 mm³ de viruta de Aluminio 5754, lo que equivale a un peso de 0,1694 kg.

A su vez, se obtuvieron también 62781 mm³ de viruta de Acero AISI 1045, equivalente a 0,4941 kg.

El tratamiento de una masa tan pequeña de viruta es insignificante. Y en la realidad no se tratan cantidades tan pequeñas de viruta ya que no resulta productivo. En este caso lo que se quiso es reflejar el impacto que, aunque pequeño, tiene el tratamiento de los residuos metálicos

Las bases que se tuvieron en cuenta para el cálculo del impacto ambiental del tratamiento de reciclado de viruta fueron principalmente tres. El impacto que tiene la construcción de una planta de reciclado de materiales metálicos, el impacto del consumo de las máquinas que componen el proceso de secado y el impacto de la construcción de una fundición junto con su respectivo consumo de energía.

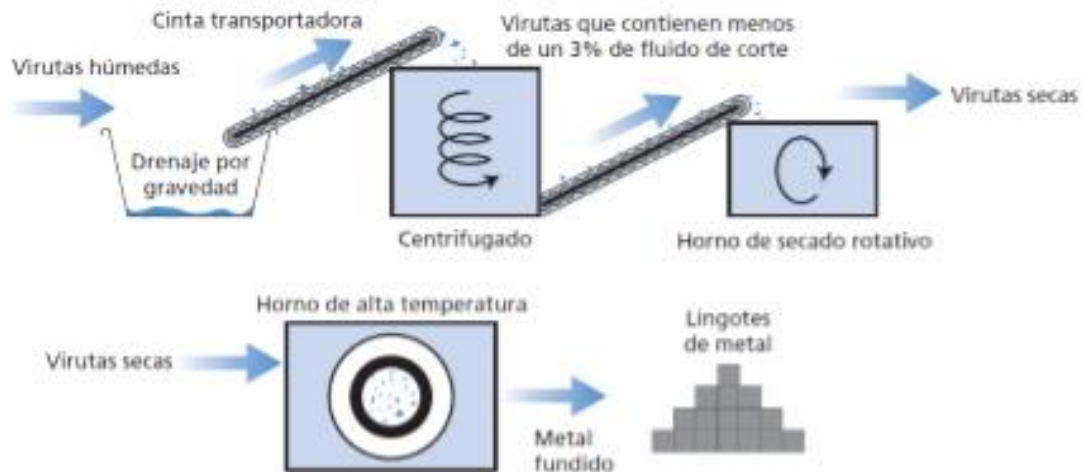


Figura 81. Sistema de reciclado de viruta

Tras el análisis de inventario para el impacto del consumo y producción de energía y de la construcción se obtuvieron las siguientes categorías de impacto para una planta de reciclado y para la fundición.

Tabla 19. Categorías de impacto de la construcción de una planta de reciclado

Categorías de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	0,000371336
Acidification	H+ moles eq	0,000196941
Carcinogenics	kg benzen eq	1,61796E-07
Non carcinogenics	kg toluen eq	0,002778389
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	1,75722E-07
Eutrophication	kg N eq	1,96278E-07
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	4,90031E-10
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	4,58865E-05
Smog	kg Nox eq	4,27036E-06

Tabla 20. Categorías de impacto de consumo de energía en fundición

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	0,4009
Acidification	H+ moles eq	0,167
Carcinogenics	kg benzen eq	0,0009
Non carcinogenics	kg toluen eq	3,058
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,0008
Eutrophication	kg N eq	0,0001
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,9546E-08
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	0,678
Smog	kg Nox eq	0,0012

Tabla 21. Categorías de impacto de construcción de una fundición

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	1,944055
Acidification	H+ moles eq	0,250803
Carcinogenics	kg benzen eq	0,001904245
Non carcinogenics	kg toluen eq	46,64405
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,001293825
Eutrophication	kg N eq	0,000201041
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	6,11E-08
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	1,57913
Smog	kg Nox eq	0,00310518

Haciendo la suma de todos los impactos medioambientales que afectan al reciclado de viruta se obtiene el impacto total:

Tabla 22. Categorías de impacto totales para el tratamiento de viruta en taladrado

Categoría de impacto	Unidad	Planta de reciclado	Fundición	Consumo fundición	Total
Global Warming	kg CO2 eq	0,000371336	1,944055	0,40090849	2,345
Acidification	H+ moles eq	0,000196941	0,250803	0,16749649	0,418
Carcinogenics	kg benzen eq	1,61796E-07	0,001904245	0,00092794	0,0028
Non carcinogenics	kg toluen eq	0,002778389	46,64405	3,05828148	49,705
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	1,75722E-07	0,001293825	0,00088064	0,00217
Eutrophication	kg N eq	1,96278E-07	0,000201041	0,0001199	0,00032
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	4,90031E-10	6,11E-08	2,9546E-08	9,11445E-08
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	4,58865E-05	1,57913	0,6789138	2,258
Smog	kg Nox eq	4,27036E-06	0,00310518	0,00122481	0,0043

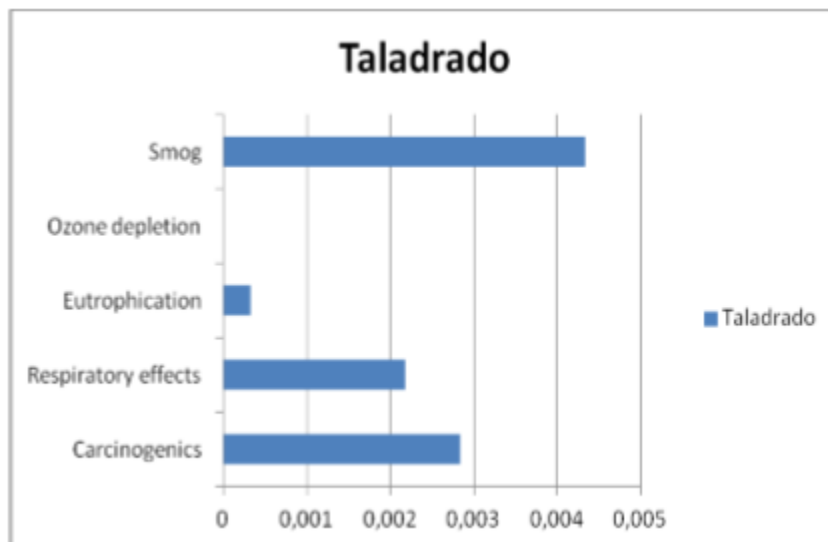
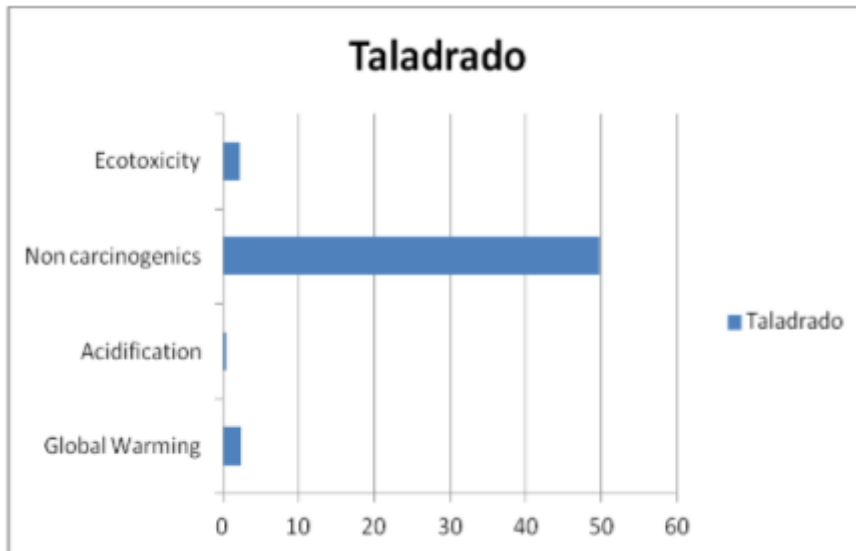


Figura 82. Valores correspondientes al tratamiento de virutas

Tratamiento de taladrina

Con el paso del tiempo, las propiedades de las taladrinas van desapareciendo, a la vez que aparecen una serie de contaminantes, que reducen aún más sus propiedades y rendimientos. Esta pérdida de propiedades obliga al usuario a desechar las taladrinas (taladrinas agotadas) cuando el resultado final del mecanizado no es óptimo.

De nuevo se hace evidente que es un proceso ligado al taladrado.

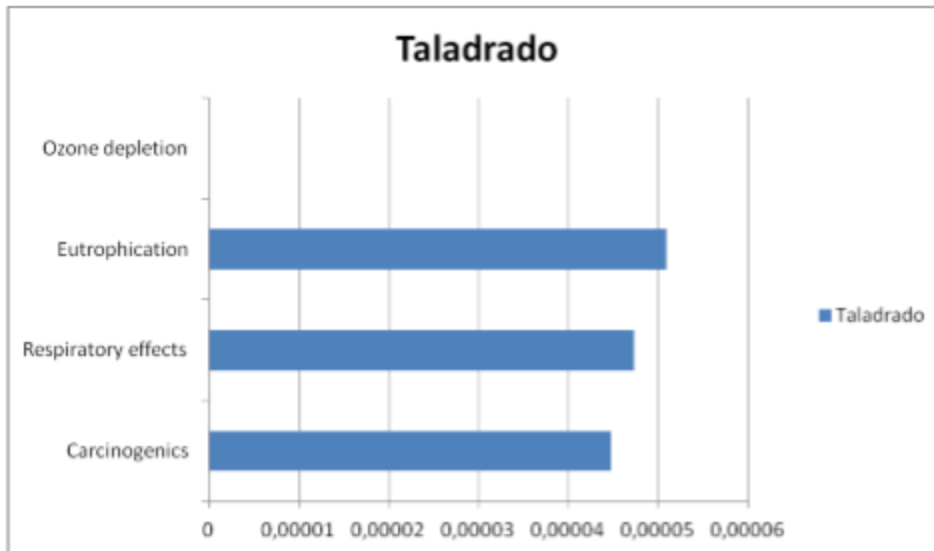
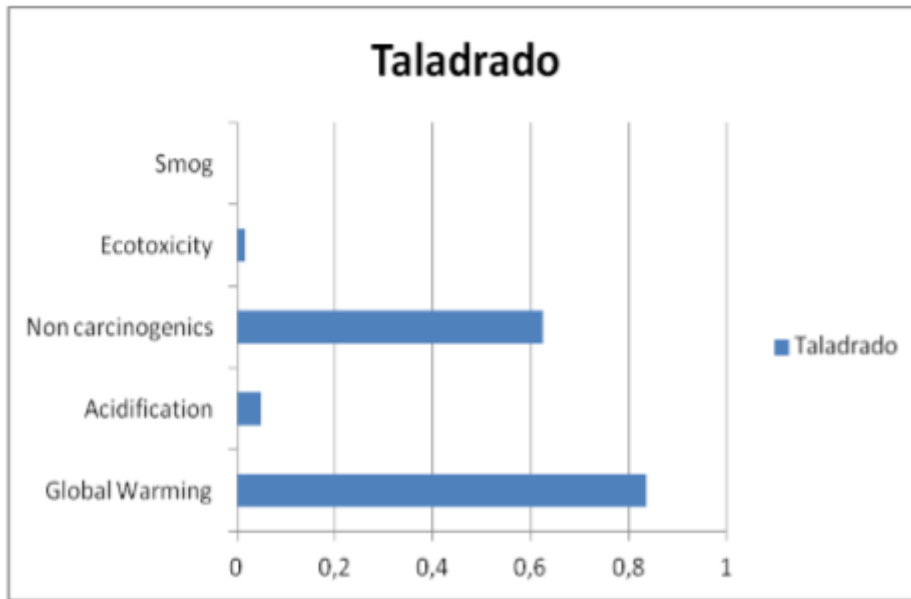
Según el Plan de Gestión de Residuos Especiales, el consumo de taladrina concentrada supera las 2.200 toneladas anuales en la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), que, tras su utilización, dan lugar a un total de 31.500 toneladas de residuos de taladrinas agotadas. Nada más que el 42% de estos residuos se tratan de modo adecuado en la empresa misma o entregándose a un gestor autorizado. El porcentaje restante se vierte directamente a los colectores de saneamiento o a cauces de los ríos.

Para la vida útil del proceso de taladrado (1 hora y 40 minutos), la taladrina no llegará, a niveles de contaminación para el medio ambiente por lo que no debería ser tratada. A pesar de ello, para reflejar el impacto medioambiental que provoca la utilización de la taladrina en el proceso de taladrado, se ha considerado que, de los 441 litros de mezcla salientes, un 0,076% ha quedado contaminada (suponiendo que la taladrina se agota en 3 meses). Por lo tanto, la cantidad de taladrina a tratar resulta de 0,3368 litros.

A partir del análisis de inventario para el impacto ambiental calculado para el tratamiento de 1 m³ de taladrina agotada, se obtuvo:

Tabla 23. Categorías de impacto para el tratamiento de 0,3368 litros de taladrina agotada

Categoría de impacto	Unidad	Total
Global Warming	kg CO2 eq	0,837099362
Acidification	H+ moles eq	0,048262444
Carcinogenics	kg benzen eq	4,47519E-05
Non carcinogenics	kg toluen eq	0,623410252
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	4,72665E-05
Eutrophication	kg N eq	5,0908E-05
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	5,311E-08
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	0,015740808
Smog	kg Nox eq	0,001173122



gura 83. Valores correspondientes al tratamiento de taladrina

8.7.2 Interpretación del ACV

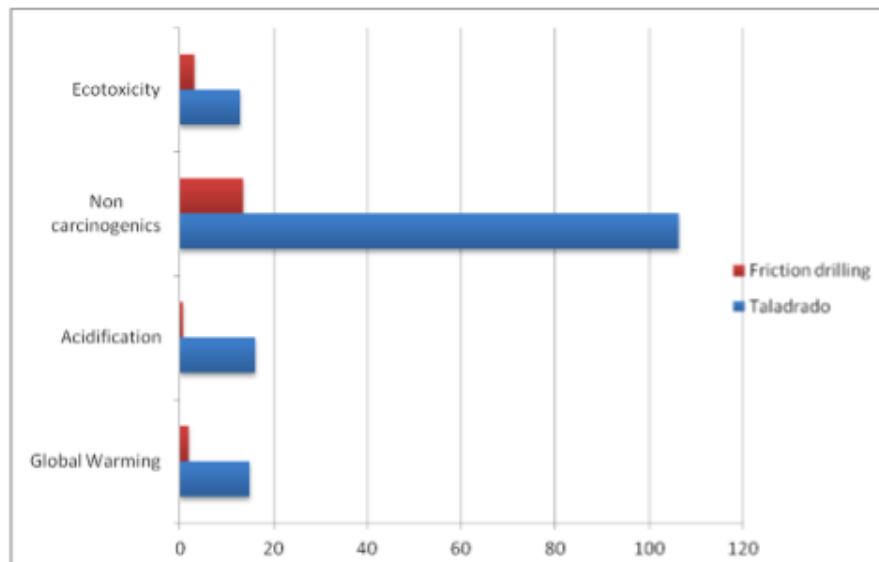
La Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema.

La metodología usada a lo largo del ACV ha sido la norteamericana TRACI, desarrollada en 1995 y que evaluará 9 de las 12 categorías de impacto que constituyen el método.

La recopilación y suma de cada una de las categorías de impacto que se han obtenido en cada entrada/salida para cada proceso queda así:

Tabla 24. Categorías de impacto totales

Categoría de impacto	Unidad	Total Taladrado	Total friction drilling
Global Warming	kg CO2 eq	14,89509936	1,762
Acidification	H+ moles eq	16,02926244	0,736
Carcinogenics	kg benzen eq	0,018124752	0,004
Non carcinogenics	kg toluen eq	106,3004103	13,445
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,029417267	0,0038
Eutrophication	kg N eq	0,004070908	0,00052
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	4,32652E-06	1,30E-07
Ecotoxicity	kg 2,4-D eq	12,93174081	2,984
Smog	kg Nox eq	0,051973122	0,0053



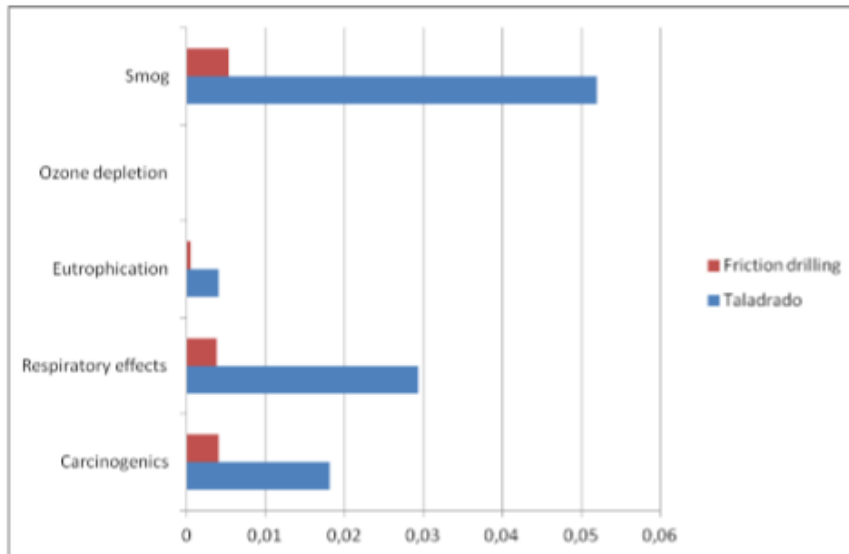


Figura 84. Valores totales

- Global Warming.

Calentamiento del planeta o efecto invernadero producido por la cantidad de gases acumulados en la atmósfera tales como los dióxidos de carbono y óxidos de nitrógeno, los cuales forman una capa que produce un fenómeno de inversión térmica que provoca un aumento de la temperatura global del planeta.

- Acidification.

La acidificación es la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.

- Carcinogenics.

Un carcinógeno o cancerígeno es un agente físico, químico o biológico potencialmente capaz de producir cáncer al exponerse a tejidos vivos

- Non carcinogenics.

En esta categoría se incluyen los agentes o mezclas para los que existen pruebas que sugieren la ausencia de carcinogenicidad en humanos y en animales de experimentación.

- Respiratory effects.

El material particulado respirable presente en la atmósfera de nuestras ciudades en forma sólida o líquida representa un importante riesgo medioambiental para la salud.

- Eutrophication.

Es el crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.

- Ozone depletion.

Aumento de la concentración de cloro y de bromo en la estratosfera debido tanto a las emisiones antropogénicas de compuestos químicos, entre los que destacan los compuestos clorofluorocarbonados (CFC).

- Ecotoxicity.

Estudio del efecto de compuestos químicos tóxicos sobre los seres vivos, especialmente en cuanto a poblaciones, comunidades y ecosistemas

- Smog

Forma de contaminación originada a partir de la combinación del aire con contaminantes durante un largo período de altas presiones (anticiclón), que provoca el estancamiento del aire y, por lo tanto, la permanencia de ellos en la troposfera y a veces, en la estratosfera, debido a su mayor densidad. Existen dos tipos de smog: industrial y fotoquímico.

9. ASPECTOS ECONÓMICOS

9.1 Presupuesto

A continuación, se muestra el presupuesto de ejecución del proyecto. Se van a desglosar las diversas partidas del presupuesto, explicando cómo se ha calculado cada una de ellas y finalmente se presentará un resumen con el coste final del proyecto.

Horas internas:

Se detallan las horas internas dedicadas por cada uno de los integrantes del equipo del proyecto para la ejecución del mismo.

En la ejecución del proyecto intervienen un ingeniero senior, un ingeniero junior y un jefe de proyecto. Las horas invertidas por cada uno de los integrantes variaran en función de su cargo.

Para el cálculo de esta partida del presupuesto, se multiplican las horas dedicadas por cada miembro del equipo de proyecto por la tasa horaria correspondiente, de forma que el cálculo del coste de las horas internas sea el presentado a continuación:

Tabla 25. Horas internas

HORAS INTERNAS			
CONCEPTO	HORAS	COSTE HORARIO	TOTAL
Ingeniero Junior	350 horas	15,00 €/h	5.250 €
Ingeniero Senior	210 horas	20,00 €/h	4.200 €
Director del proyecto	40 horas	40,00 €/h	1.600 €
		TOTAL HORAS INTERNAS	11.050 €

Amortizaciones:

Las maquinas utilizadas en el trabajo se encuentran disponibles en el aula de máquina herramienta y no ha sido necesario realizar la compra de ninguna de ellas. Se va a considerar que dicha maquinaria ya ha sido amortizada, pues en caso contrario habría que tener en cuenta el valor residual en los cálculos.

Se trata de los activos fijos que se han utilizado para la realización del proyecto y que pierden valor a lo largo del tiempo.

Para determinar la amortización que se ha hecho de cada activo fijo, se multiplicará las horas que se ha utilizado cada uno por la tasa horaria correspondiente. En la siguiente tabla se muestra la partida de amortización:

Tabla 26. Amortizaciones

AMORTIZACIONES					
CONCEPTO	PRECIO ADQUISICIÓN	VIDA ÚTIL (años)	VIDA ÚTIL (horas)	USO	TOTAL
Maquinaria					
CNC de tres ejes (Kondia © A6)	60.000 €	10 años	17000 h	130 h	458,82 €
Sierra 370 SA 60	8.150 €	10 años	17000 h	25 h	11,99 €
Ordenador	2.000 €	5 años	8500 h	220 h	51,76 €
Instrumentos de medicion					
DDU4 Artis					
Porta-herramientas	8.000 €	5 años	8500 h	40 h	37,65 €
Tarjeta adquisición	6.000 €	5 años	8500 h	40 h	28,24 €
Pirómetro	12.000 €	5 años	8500	65 h	91,76 €
Remet IPA 40	1.200 €	10 años	17000	15 h	1,06 €
Durometro FM-800	7.200 €	10 años	17000	35 h	14,82 €
Microscopio, Leica© Z6APO	30.000 €	10 años	17000	35 h	61,76 €
Reloj comparador, Mitutoyo©	150 €	5 años	8500	3 h	0,05 €
Micrómetro, Mahr©	600 €	5 años	8500	5 h	0,35 €
Calibre,Mahr©	120 €	5 años	8500	3 h	0,04 €
Licencias					
Microsoft Office	79 €	1 años	8760	100 h	0,90 €
Matlab	79 €	1 años	8760	75 h	0,68 €
SimaPro Educational	110 €	1 años	8760	48 h	0,60 €
TOTAL AMORTIZACIONES					760,50 €

Gastos o fungibles:

Se incluyen los materiales fungibles que han sido necesarios en el proyecto y cuyo distribuidor será Kodiser.

Dentro de los gastos está el material a utilizar en las probetas, las resinas de encapsulado, así como las herramientas que se van a tener que comprar para la realización del proyecto. También se tienen en cuenta las licencias de software a utilizar, el material de oficina...

Tabla 27. Gastos

GASTOS

Material fungible para pruebas			
CONCEPTO	COSTE	UNIDADES	TOTAL
Perfil Acero AISI 1045	50,00 €	6 ud	300,00 €
Perfil Acero AISI 304	50,00 €	1 ud	50,00 €
Chapa Acero AISI 1045	2,00 €	20 ud	40,00 €
Chapa Aluminio Al5754	2,00 €	20 ud	40,00 €
Aluminio Al 5754- H24	40,00 €	1 ud	40,00 €
Aluminio Al 6082- T651	40,00 €	1 ud	40,00 €
Tornillo Acero	0,04 €	70 ud	2,80 €
Tornillo Acero Galvanizado	0,05 €	30 ud	1,50 €
Tuerca Acero	0,04 €	16 ud	0,64 €
Resina de encapsulado	135,00 €	1 ud	135,00 €
		TOTAL MATERIAL	649,94 €

Herramientas			
CONCEPTO	COSTE	UNIDADES	TOTAL
Puntas Ø7,3mm sin rompevirutas	99 €/ud	2 ud	198,00 €
Puntas Ø7,3mm con rompevirutas	167 €/ud	2 ud	334,00 €
Puntas Ø9,2mm sin rompevirutas	121 €/ud	2 ud	242,00 €
Puntas Ø9,2mm con rompevirutas	182 €/ud	2 ud	364,00 €
Macho de roscar M10	35 €/ud	1 ud	35,00 €
Machos de roscar M8	29 €/ud	1 ud	29,00 €
TOTAL HERRAMIENTAS			1.202,00 €

Lubricantes			
CONCEPTO	COSTE	UNIDADES	TOTAL
Lubricante Flowdrill© FDKSO	37 €/ud	1 ud	37,00 €
Lubricante Flowdrill© FTGRA	66 €/ud	1 ud	66,00 €
TOTAL LUBRICANTES			103,00 €

Otros	
CONCEPTO	COSTE
Material de oficina	100 €
TOTAL OTROS	100 €

TOTAL GASTOS	2.054,94 €
---------------------	-------------------

Subcontrataciones

En la siguiente partida se recogen las subcontrataciones que se van a hacer para la realización del proyecto.

Se ha decidido que para la realización de los ensayos de corrosión se van a subcontratar los servicios de la empresa INPROMAT, que tiene una cámara salina en la que poder realizar este tipo de ensayos. También se ha decidido que los ensayos de cizalladura los llevará a cabo esta misma empresa.

De esta forma la partida de subcontrataciones quedará de la siguiente manera:

Tabla 28. Subcontrataciones

SUBCONTRATACIONES

Empresa INPROMAT			
CONCEPTO	TARIFA	HORAS/UNIDADES	TOTAL
Camara de niebla salina	1,50 €/h	500 horas	750,00 €
Ensayos de cizalladura	10 €/ud	12 ud	120,00 €
		TOTAL	870,00 €

Imprevistos

Con el fin de tener en cuenta posibles desviaciones en alguna de las partidas calculadas anteriormente se incluye en el presupuesto una partida de imprevistos. Esta partida de imprevistos será de un 10% sobre el subtotal de la suma de las partidas de horas internas, amortizaciones y gastos.

Por último, se expone el presupuesto final:

El **presupuesto**, el cual indica los gastos que ha supuesto este proyecto los cuales ascienden a Veintiumil ochenta y tres con ochenta y tres euros (iva incluido).

Tabla 29. Resumen presupuesto final

PRESUPUESTO FINAL	
Horas internas	11.050,00 €
Amortizaciones	760,50 €
Gastos	2.054,94 €
Subcontrataciones	870,00 €
COSTES DIRECTOS	14.735,44 €
Costes indirectos (7,5%)	1.105,16 €
SUBTOTAL	15.840,59 €
Imprevistos (10%)	1.584,06 €
TOTAL (IVA no incl.)	17.424,65 €
TOTAL (IVA incl.)	21.083,83 €

10. CONCLUSIONES

Una vez finalizados todos los ensayos, analizados los intendentos y fundamentos, y la realización del análisis de resultados, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. La generación de uniones mecánicas sin tuerca, mediante un proceso combinado de friction drilling (FD) y roscado por laminación, de combinaciones de acero y aleaciones de aluminio parece viable, dado que se consiguen especímenes de posible uso en aplicaciones diversas.
2. El proceso combinado exige un cuidadoso uso de parámetro del proceso de FD, atendiendo a velocidad de giro, avance y espesores en los perfiles/láminas de unión.
3. Los parámetros óptimos de mecanizado mediante el proceso del Friction Drilling para la unión del acero AISI 1045 y Al 5754 que se obtuvieron mediante los ensayos son:
 - a. Para cumplir el criterio de diámetro óptimo según la norma DIN13, los parámetros de mecanizado serían: $F=250\text{mm/min}$ y $S=2500\text{rpm}$.
 - b. Para cumplir el criterio hueco mínimo entre chapas, los parámetros de mecanizado serían: $F=150\text{mm/min}$ y $S=3500\text{rpm}$.
 - c. Para cumplir el criterio de mayor espesor de la copa generada, los parámetros de mecanizado serían: $F=450\text{mm/min}$ y $S=3000\text{rpm}$.
4. Para una misma velocidad de avance, según se aumenta la velocidad de rotación de la herramienta, mayor es la temperatura en la zona de unión.
5. Para una velocidad de rotación de la herramienta constante, un aumento de la velocidad de avance implica un aumento del par máximo que se debería emplear. Esto se debió a que, al reducirse el tiempo de contacto de la herramienta con el material, la temperatura que alcanza es menor, lo que hace que el material fluya peor, lo que supone un aumento del esfuerzo.

6. Para una misma velocidad de rotación de la herramienta, un aumento de la velocidad de avance apenas supone un pequeño aumento de la temperatura máxima alcanzada.
7. La máxima temperatura se alcanzó para 4000 rpm y 250 mm/min y su valor fue de 1347,5 °C, por debajo del punto de fusión del acero.
8. Para una misma velocidad de avance, un aumento de la velocidad de rotación supone un aumento del rozamiento de la herramienta con el material, lo que hace que el material se reblandezca. Esto implica que la fuerza necesaria para realizar el agujero sea menor.
9. El estudio de los espesores a distintas profundidades de la rebaba inferior mostró que aumentaban con la velocidad de giro y que a partir de e4 los avances no afectaban significativamente en el espesor.
10. En cuanto a los diámetros se observó que aumentaban con mayores velocidades de giro de la herramienta y que presentaban poca conicidad.
11. La mayor longitud de copa se obtuvo a bajas velocidades de avance y a altas velocidades de rotación de la herramienta. Estas mismas condiciones proporcionaron menor hueco de separación entre el acero y el aluminio.
12. En relación al roscado por laminación, la calidad de la rosca depende únicamente del agujero previo, no de los parámetros de entrada para realizar el roscado. En cuanto a rendimiento de la operación, está claro que cuantas más revoluciones menos vida de la herramienta, pero en si la rosca no queda mejor o peor.
13. En cuanto al comportamiento de la unión frente a ambientes corrosivos, se llegó a las siguientes conclusiones:
 - a. Se observó un comportamiento parecido a corrosión entre las diferentes probetas, siendo a las 144h cuando todas las chapas de aluminio presentaban corrosión.
 - b. Los perfiles y los tornillos de acero inoxidable no presentaron corrosión. Se observó coloración roja en los tornillos, procedente de la copa (unión entre el perfil y la chapa).

- c. No se observaron diferencias entre las probetas mecanizadas en condiciones de diámetro óptimo, con y sin tornillos.
 - d. Entre las 3 condiciones (diámetro óptimo, hueco mínimo y mayor espesor de copa), se observó un menor grado de corrosión en las chapas de las probetas con condiciones de hueco mínimo.
 - e. Las probetas de mayor espesor de copa no generaron rebaba en el perfil durante el proceso de "friction drilling", lo que provocó que la unión fuera menos resistente.
 - f. En todas las probetas se observó que el proceso de "friction drilling" generaba una separación entre el perfil y la chapa. Esto permitía la acumulación de humedad y sal durante el ensayo, que aceleraba el proceso de corrosión.
14. En cuanto al comportamiento de la unión frente cargas de cizalladura, se llegó a la conclusión de que la resistencia a la cizalladura estaba limitada por la resistencia mecánica de la chapa de aluminio y era independiente de las condiciones de mecanizado del agujero. Además, se pudo concluir que la unión realizada mediante tornillo-tuerca y la realizada mediante el Friction Drilling tenían un comportamiento similar.
15. Los ensayos mostraron que la dureza en la unión depende del material que este uniendo y, si son diferentes, del tipo de materiales que se está uniendo y la cantidad de cada material.
16. El impacto energético y medioambiental que supone el proceso de taladrado es similar al de friction drilling por tratarse de mecanizados piezas de pequeño espesor.
17. El centrifugado de la viruta se convierte en un proceso de gran interés para evitar pérdidas de material a lo largo de los procesos de fabricación, obteniéndose así una eficiencia óptima en el aprovechamiento del material.
18. El taladrado es uno de los procesos de fabricación más frecuentes. A pesar de ello, se puede considerar como un proceso que genera un impacto ambiental importante. El empleo de taladrinas y su consecuente contaminación a lo largo

del tiempo supone llevar a cabo complejas maniobras de reciclado en las que el factor económico para su tratado también toma gran relevancia. Es por ello que, cada vez más, se apueste por procesos de mecanizado nuevos y más limpios como el friction drilling.

19. El friction drilling es un proceso que reduce considerablemente el impacto ambiental. El simple hecho de no generar viruta supone una gran ventaja en el camino hacia la reducción de desechos metálicos. Además, la ausencia de fluidos de corte lo convierte aún más en un proceso de fabricación emergente. Cabe decir que, en ocasiones es necesario el empleo de resinas o parafinas en dicho proceso para operar bajo ciertas garantías de acabado incluso de seguridad.

En definitiva, los ensayos realizados plantean que la combinación FD + roscado puede ser una solución viable de cara a aplicaciones de calderería fina, y por tanto puede continuarse con fases de ensayos más orientadas a definir la forma óptima de aplicar la tecnología en demostradores, en otro nivel superior de MRL (manufacturing readiness level).

11. LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

Pueden definirse las siguientes líneas de investigación en relación al proyecto que se ha expuesto:

1. Puede resultar de gran interés comparar y cuantificar la diferencia en cuanto a vida de trabajo y desgaste de la herramienta el uso de recubrimientos, como por ejemplo de TiAlCrN MEX6000, para estudiar si mejora la problemática de la adhesión del material a la herramienta.
2. Necesario explorar opciones alternativas como un pretaladrado, con el fin de reducir la separación que se produce entre los materiales. Una opción sería dotar a la herramienta de un sistema que realice un agujero previo de menor diámetro. También sería conveniente el estudio de la utilización de un útil menos rudimentario y más tecnológico que solucione este problema mencionado.
3. A la vista de que en ocasiones a la hora de insertar el tornillo aparece una holgura que no conviene para nada en la unión, se propone modificar la herramienta de friction drilling, reduciendo el diámetro de la parte cilíndrica para comprobar si esta holgura desaparece.
4. Se propone el uso de algún tipo de atmósfera protectora (argón, CO2...) que pueda mejorar la calidad de la unión. También sería interesante comprobar si el precalentamiento de las probetas favorece la unión.
5. Realizar una estructura compleja donde la soldadura fuese sustituida en parte por la técnica planteada.

12. REFERENCIAS

[1] Reseña Histórica de impacto ambiental 2014, **Ing. Tiber Joel Cano Camayo**

[2]http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/factories-of-the-future_en.html.

[3] Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook. Prepared by the **OSD Manufacturing Technology Program** In collaboration with The Joint Service/Industry MRL Working Group

[4] **HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 General Annexes**

[5] **DUARTE FILHO, O. C.** Estudo Microestrutural e de Capacidade de Carga na Furação por Escoamento com Condições de Trabalho Variáveis em Processo. Florianópolis: UFSC, 1998.

[6] **LOPES, J. C. O.** Beitrag zur Theorie des Thermofliesslochformens. Kassel:UGK - IPL, 1999. Tese (Doutorado), Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999.

[7] **FLOWDRILL.** Flowdrill® Friction Drilling: A Process For The New Millennia. Disponível em: <<http://www.flowdrill.com>

[8] **LOPES, J. C. O.** Furação por Escoamento e Rosqueamento por Conformação. Florianópolis: UFSC, 1994.

[9] **ZECHA CARBIDE TOOL MANUFACTURERS.** Centerdrill – flow punch forming process. Alemanha. CATÁLOGO

[10] **DA SILVA, D. C.** Ferramentas Cerâmicas na Furação por Escoamento. 1996. Projeto de Dissertação de Mestrado – CPGEM, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[11] **KERKHOFS, M.; STAPPEN, M.; D'OLIESLAEGER, M. et al.** The performance of (Ti,Al)N – coated flowdrills. Elsevier Science S.A. Surface and Coatings Technology, 68/69, 1994, p. 741 - 746.

[12] **LOPES, J. C. O.** Beitrag zur Theorie des Thermofliesslochformens. Kassel: UGK - IPL, 1999. Tese (Doutorado), Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999

[13] **HEILER, R.** Fliesslochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen. Kassel: UghK - IPL, 1999.

[14] **KRETSCHMER, G.** Fliesslochformen von Blechdurchzügen. Siegen, Alemanha: Universität Gh Siegen, 1980.

[15] **KRETSCHMER, G.** Fliesslochformen - Das Verfahren. In: Seminar - Fliesslochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. Anais

[16] **BATISTA, E. M.; SCHAEFFER, L.** Evolução microestrutural do aço 16MnCr5 em trabalho a morno e a quente. In: Seminário Nacional de Forjamento, XVII, 1997.

[17] **S. M. LEE, H. MING CHO, F. YUAN HUANG, B. HWA YAN,** Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools, *Int. J. of Machine Tools & Manuf.*, Vol. 49, pp. 81-88, 2009.

[18] Proceso de FSW por **JEFFREY DEFALCO Y RUSSELL STEEL**, otoño 2009; *Welding Journal*

[19] **HEILER, R.** Fliesslochformen und Gewindefurchen auf CNC-Werkzeugmaschinen. In: Seminar - Fliesslochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha.

[20] **WEINGAERTNER, W. L.; TIKAL, F.; LOPES, J. C. O. et al.** Flowdrill system:

high resistance threads in thin metal sheets. *The International Journal for Manufacturing Science & Production*, v. 1, n. 1, p. 41 – 50, 1997.

[21] **WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al.** Uma comparação entre o rosqueamento convencional e o rosqueamento por conformação. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte. Anais

[22] Análisis del ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. **IHOBE 2009.**

[23] Trama y Troiano, 2002

ANEXO I: PLIEGO DE CONDICIONES.NORMATIVA APLICABLE

I.1 Pliego de condiciones

I.1.1 Introducción

El presente documento presenta el Pliego de condiciones del Proyecto “Combinación de taladrado por fricción y roscado por macho: camino de uniones sin tuerca en aleaciones metálicas disimilares”. El documento se redacta de acuerdo con la norma UNE 157001, que establece los criterios generales para la realización de proyectos.

De acuerdo a esta normativa, el principal objetivo del documento es establecer las condiciones técnicas, económicas, administrativas y legales para que el objeto del proyecto pueda materializarse en las condiciones especificadas, evitando posibles interpretaciones diferentes de las deseadas.

- **Entidad Contratante.** Empresa que contrata el proyecto previamente definido. En este caso, será la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao.
- **Entidad Contratada.** Empresa (centro de investigación) contratada para el desarrollo de dicho proyecto. En este caso, será el grupo de trabajo seleccionado para llevar a cabo el proyecto.
- **Director de proyecto.** Persona que se encarga de la supervisión de la marcha del proyecto, puede pertenecer bien a la entidad contratante o bien a la contratada.

I.1.2 Descripción del proyecto

El objetivo es conseguir una unión fiable y resistente de la unión de dos materiales disimilares mediante el proceso de Friction Drilling y un posterior roscado por laminación, así como demostrar la reducción del impacto ambiental que presenta esta nueva tecnología frente al taladrado convencional.

Se ha decidido que las pruebas se harán con acero y aluminio, ya que son multitud las aplicaciones que puede tener esta dupla en concreto. El acero actuaría como parte resistente de la pieza y el aluminio sería la piel que cubre la estructura.

El proyecto constará de tres fases, las cuales se describen a continuación.

Primera fase:

En esta parte del proyecto se estudiarán los valores óptimos de mecanizado del taladrado por fricción y el roscado por laminación en acero y aluminio.

Inicialmente se estudiará el estado del arte y el funcionamiento de las uniones atornilladas. Tras esto se comenzará con una serie de ensayos con, al menos, dos tipos de aluminio con diferentes propiedades mecánicas para comprobar la influencia de las mismas en la generación de la copa. Para el correcto amarre de las probetas se fabricará un utillaje para que las condiciones sean las mejores posibles.

A continuación, se podrá pasar a ensayar el proceso de taladrado en stacks de dos chapas para acero-aluminio. Para ello, se fabricarán un conjunto de probetas a las cuales se hará una serie de ensayos de mecanizado, de los que se obtendrá cuáles son la velocidad de rotación del husillo (S) y la velocidad de avance (F) óptimas para unir acero y aluminio mediante el Friction Drilling.

Los valores óptimos que se obtendrán serán elegidos en función de tres criterios: Diámetro óptimo empleado en la norma DIN 13, hueco mínimo entre chapas y mayor espesor de copa.

También de estos ensayos se obtendrán las dimensiones geométricas de la copa generada en cada caso, ya que es de vital importancia en el posterior proceso de roscado. Para ello, se cortarán los agujeros de las probetas de forma transversal de manera que se pueda observar mejor la copa generada.

Con toda la información obtenida se redactará un informe en el que se recopilen los datos obtenidos hasta el momento y las conclusiones a las que se ha llegado.

Segunda fase:

Tras concluir la primera fase del proyecto se pasará a la siguiente fase. Esta parte del proyecto consistirá en conocer el comportamiento de la unión frente a ciertas sollicitaciones. Por ello, esta segunda parte del proyecto constará a su vez de otras dos partes:

1. Estudio del proceso de corrosión de la unión.
2. Estudio del comportamiento de la unión sometido a fuerzas de cizalladura.

En un principio se analizará el proceso de corrosión de la unión de forma teórica y posteriormente se prepararán una serie de probetas, con diferentes condiciones, y se mandarán a la empresa INPROMAT para realizar unos ensayos de corrosión. Las condiciones de mecanizado de las probetas que se ensayarán serán las de los valores óptimos obtenidos en la anterior parte del proyecto, junto con una probeta en la que se le practicará una unión tornillo-tuerca para poder comparar ambos comportamientos en ambientes salinos.

A la vez que se realizan estos ensayos, se prepararán también una serie de probetas para que se pueda ensayar el comportamiento de la unión frente a cargas de cizalladura. En este caso, se fabricarán una serie de probetas, las cuales estarán preparadas para poderlas acoplar a la máquina de ensayos, con los diferentes parámetros óptimos obtenidos en la primera parte del proyecto. Al igual que en los ensayos de corrosión, se preparará una probeta con una unión tornillo-tuerca para su comparación. De este modo, y una vez hechos los experimentos, se procederá a analizar los resultados obtenidos y se podrá decidir cuáles son los parámetros que mejor se comportan frente a este tipo de sollicitaciones.

Con dichos resultados se redactará un informe en el que se recopilen los datos obtenidos en esta fase y las conclusiones a las que se ha llegado.

Tercera fase:

Se comparará el impacto ambiental que produce el taladrado por fricción frente al del taladrado convencional utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta. Para dicho análisis se hará uso de la herramienta informática SimaPro.

Por último, se realizará un informe en los que se recopile la información obtenida a lo largo de todo el proyecto, detallando las conclusiones a las que se ha llegado y sugiriendo una serie de futuras líneas de investigación que puedan continuar los estudios realizados en el presente proyecto.

Finalmente, se verá si las conclusiones a las que se ha llegado son suficientes y lo bastante sólidas para poder solicitar una patente.

I.1.3 Obligaciones de la entidad contratante

La contratación de este proyecto por parte de una entidad dada, implica una serie de requisitos por parte de la entidad contratante:

- La institución contratante se compromete a facilitar al equipo investigador el acceso libre al taller y laboratorios pertinentes para realizar y evaluar los ensayos planificados.
- Se compromete a dar permiso al equipo investigador para utilizar los equipos industriales y metrológicos necesarios para llevar a cabo la investigación en el caso de que éstos fueran necesarios.
- Se dará permiso al equipo investigador de utilizar la información obtenida para presentarla como resultado de investigación.

I.1.4 Obligaciones de la entidad contratada

De igual manera, el equipo de trabajo de la entidad contratada se compromete a la presentación de una serie de informes que recogerán la siguiente documentación:

- Memoria descriptiva que incluye las actividades realizadas y la metodología empleada.
- Presentación de los resultados obtenidos.
- Presupuesto del proyecto.
- Líneas futuras.
- Anexos que se consideren de interés.

Dichos informes se presentarán en las fechas establecidas para los hitos especificados en la realización del proyecto, para que así la entidad contratante se mantenga informada en todo momento de la marcha del proyecto.

Se establecen 6 hitos en la realización del proyecto:

- H.1 Pedido de material.

Se procede a pedir las herramientas necesarias para la realización del proyecto (herramientas para realizar los agujeros y machos de laminar) y el material para ensayar.

➤ H.2 Caracterización del proceso

Se decidirá el tipo de aluminio a emplear en los ensayos y la geometría de la herramienta a utilizar.

➤ H.3 Selección de parámetros óptimos

A la vista de los resultados obtenidos se procederá a la selección de los parámetros óptimos de mecanizado del agujero según los criterios previamente definidos.

➤ H.4 Obtención de resultados del comportamiento de corrosión

Definición de los resultados del comportamiento de la unión frente a la corrosión.

➤ H.5 Obtención de resultados del comportamiento mecánico

Definición de los resultados del comportamiento de la unión frente a cargas de cizalladura.

➤ H.6 Validación del proceso y conclusiones

Demostración de la viabilidad de la unión de materiales disimilares mediante el proceso de taladrado por fricción y un posterior roscado por laminación.

Tras la finalización, la empresa contratada se compromete a la realización de una memoria completa del proyecto donde se incluirán los siguientes documentos:

- Memoria: En este documento se describe de forma exhaustiva la problemática asociada, estudiando los antecedentes, planteando una solución y estableciendo una planificación para la ejecución del proyecto. Se establecen en el documento de una forma clara y ordenada, los objetivos, las alternativas estudiadas, ventajas e inconvenientes de las mismas, y las razones de la solución escogida. Este documento va a servir como guía de implementación y explicación del proyecto. Por ello la Memoria ha de tratar de ser claramente comprensible, no sólo por profesionales especialistas sino por terceros, en particular por el cliente.
- Planos: En este documento se incluirán todos los planos que haya sido necesario generar para la realización del proyecto. Para este caso en concreto, se van a incluir los planos de los utillajes que se han tenido que diseñar para el correcto amarre de las probetas a la hora de mecanizarlas.
- Pliego de Condiciones: Es un documento de carácter vinculante. Este documento indica la forma de ejecutar el proyecto, teniendo en cuenta los condicionantes técnicos, económicos, laborales, y administrativos.

- Presupuesto: Es uno de los documentos básicos del proyecto, en el que se establecen todos los gastos asociados al desarrollo del mismo. De esta manera se establece el coste final del Proyecto, para poder determinar la dotación económica necesaria para su implementación. El presupuesto trata de ajustarse lo mejor posible al coste final, como forma de tener en cuenta las posibles discrepancias entre lo presupuestado y el coste real se ha destinado una cantidad a posibles imprevistos que puedan surgir durante su ejecución.
- Además de anexos que incluyan información de interés.

En caso de que no se obtengan resultados válidos, la entidad contratada estará obligada a razonar dichos resultados y además a dar diferentes alternativas para el futuro desarrollo del proyecto.

I.1.5 Recursos técnicos necesarios para la entidad contratada

La empresa contratada ha de poseer los medios necesarios para la realización tanto de la experimentación, como de los análisis pertinentes durante todo el proyecto.

En el caso de carecer de los medios necesarios para la realización de una parte o la totalidad del proyecto, la entidad contratada deberá buscar alternativas viables tanto desde un punto de vista técnico como económico.

En caso de que no sea posible encontrar soluciones viables, la entidad contratada deberá notificarlo a la entidad contratante con antelación a la realización del proyecto, quedando bajo decisión de ésta la realización del proyecto.

Realización de ensayos

La realización de los ensayos requiere de:

- Kondia A6, centro de mecanizado de 3 ejes.
- Herramental necesario, tanto para la realización de las probetas como para la fabricación de los útiles necesarios para el correcto amarre de las probetas.
- Sierra de cinta.
- Material necesario para la realización de las probetas.
- Accesorios necesarios para la correcta realización de las probetas. Ya sean martillos, tuercas, tornillos, topes, etc.

Encapsulado de muestras

El encapsulado de muestras necesita:

- Sierra de cortar radial rotativa.
- Discos abrasivos de alúmina.
- Máquina de encapsulado de muestras.
- Resina fenólica.
- Pulidora rotativa.
- Lijas de desbaste y acabado para fundición.
- Paños para spray de diamante de 9 μ m y 3 μ m.
- Spray de diamante de 9 μ m y 3 μ m.
- Nital.
- Alcohol.

Medición de muestras

Para la medición y evaluación de las muestras se requiere:

- Equipo informático con los siguientes requerimientos: o Procesador Intel core i7 4810-MQ 6 MB 4C/8T 2.8/3.8 GHz o 16 GB de memoria RAM, Memoria SODIMM DDR3 8GB, dos módulos o Tarjeta gráfica Nvidia Quadro K1100-Serie 800 o Monitor de 15,6" LED-MATE o Disco duro MSATA 256 GB. 6 Gb/s, 19nm o Disco duro 750Gb 7200 rpm o 2 puertos USB 2.0 o Lector CD/DVD o Periféricos E/S (teclado y ratón) o Sistema operativo MS Windows 7 Home Premium 64bit o Microsoft Office 2010
- Microdurómetro FM 800
- Sistema de captación de esfuerzos DDU4 Artis (y el software necesario para la recogida de datos)
- Pirómetro Impac IGAR 12 LO (y el software necesario para la recogida de datos).
- Microscopio Leica Z6 APO (y el software necesario para la recogida de datos).
- Útiles de medida a pie de máquina: micrómetros de interiores, reloj comparador y calibre.

I.1.6 Plazo de ejecución

Se establecerán los plazos de ejecución del proyecto de mutuo acuerdo entre la entidad contratante y la entidad contratada.

Se establece a priori un período de **115** días desde la adjudicación del proyecto hasta la entrega del informe con los resultados y conclusiones obtenidos del análisis de las mismas. En este tiempo también se diseñan los ensayos y se evalúan los parámetros necesarios para obtener los resultados deseados.

Podrá acordarse la modificación del plazo de ejecución y su prórroga por mutuo acuerdo de las partes, con al menos 15 días de antelación a su conclusión, sin que la duración total del contrato, incluidas las prórrogas, pueda exceder de 12 meses, ni éstas puedan ser concertadas aislada o conjuntamente por un plazo superior al fijado conjuntamente.

Se designará una persona por parte de la entidad contratante que supervisará los materiales necesarios para la realización de los análisis y confirmará el cumplimiento de los condicionamientos técnicos previamente indicados.

Del mismo modo, la persona designada por la entidad contratante será la encargada de servir de enlace entre ésta y la entidad contratada, para tratar de solucionar los problemas que puedan surgir a lo largo del tiempo de duración del proyecto.

A su vez la entidad contratada designará un director de proyecto encargado de coordinar los distintos aspectos de la experimentación y los análisis al igual que las relaciones con la entidad contratante

I.1.7 Personal asignado

Para la realización de este proyecto será necesaria la participación de dos ingenieros, y un director de proyecto encargado de supervisar el correcto desarrollo del proyecto.

Director del proyecto: Encargado de realizar un seguimiento del trabajo y colaborar de manera parcial en él. Bajo cuya dirección se ha llevado a cabo toda la línea de investigación sobre el Friction Drilling realizada por la ETSI.

Ingeniero Senior: Ingeniero Industrial con la especialidad de Fabricación Mecánica, cuya función es asesorar al ingeniero junior aportando sus conocimientos y experiencia en el aula de máquina herramienta.

Ingeniero Junior: Estudiante de último año de Ingeniería Industrial con la especialidad de Fabricación Mecánica o Diseño Industrial. Será preferible que tenga experiencia en el manejo de programas CNC y de software como Matlab y Solid Edge. También será preferible, pero no necesario que tenga conocimientos básicos de química elemental. Deberá, en primer lugar, recibir una formación, para luego realizar los ensayos correspondientes y finalmente generar la documentación del proyecto.

I.1.8 Condiciones de calidad

Para asegurar que el Proyecto se realice de una forma satisfactoria para todas las partes implicadas, se han de introducir criterios de calidad en el desarrollo y ejecución del mismo. Estos criterios de calidad se basan en una mejora continua, en la que los implicados tratan de optimizar cada proceso en los que están involucrados. En este apartado del pliego de condiciones, se busca dar unas nociones básicas sobre los programas de calidad seguidos.

La idea de mejora continua, que puede resultar un tanto abstracta, se ha de materializar mediante un conjunto de actividades planificadas y sistemáticas que buscan satisfacer los requisitos del proyecto. Estos programas de aseguramiento de la calidad se llevan a la práctica a través de cumplimientos de estándares internacionales, como es el caso de la ISO 9001. El certificado ISO 9001 genera confianza en la capacidad de los procesos, en la calidad de los productos y proporciona las bases para la mejora continua de una organización. Es por ello que resulta aconsejable la posesión del certificado ISO 9001 por la parte contratada con una antigüedad de al menos un año y convenientemente renovada a fecha vigente.

Como parte del programa de calidad se establecen en este documento las siguientes directivas:

- Comunicación entre las partes en el establecimiento de los objetivos del Proyecto.
- Implementación de un sistema fluido que permita conocer en todo momento el estado del proyecto por parte de todas las partes implicadas.
- Establecimiento de criterios de evaluación de los resultados.

Una vez establecido el plan de calidad correspondiente, se ha de aprobar por todas las partes implicadas en el proyecto. En reunión, la parte contratada ha de exponer lo realizado en lo referente al proyecto hasta la fecha y la parte contratante ha de poder aceptar, rechazar o exigir correcciones respecto del trabajo desarrollado. De esta manera se trata de introducir en la comunicación entre las partes la idea de continua mejora, base de la gestión de calidad, cuyo objetivo final consiste en la satisfacción del cliente.

I.1.9 Condiciones legales

En este apartado se recogen las condiciones que hacen referencia a los aspectos legales del Proyecto.

El primer aspecto legal a tratar es el referente a la propiedad intelectual del presente Proyecto de investigación. Los resultados obtenidos durante la realización del proyecto son propiedad exclusiva de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Los derechos de propiedad estarán operando y exclusivos los próximos cincuenta años.

El siguiente aspecto legal a tratar hace referencia a la difusión de resultados. Cualquier publicación, presentación u otro tipo de divulgación de resultados ha de realizarse bajo la aprobación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. En cualquier publicación, se ha de hacer referencia a todas las partes implicadas en el proyecto, que han de figurar como coautores en cualquier publicación asociada al proyecto.

I.2 Normativa aplicable

Actualmente no existe ninguna reglamentación que señale las pautas a seguir en la unión de acero y aluminio. Es por eso que, en este campo, no se ha podido seguir una norma concreta, pero lo que sí se ha hecho es tomar como pautas algunas de las normas sobre uniones mecánicas y se han tomado como guía y consulta durante el desarrollo del proyecto. Esas normas son las siguientes:

- Boletín General del Estado (BOE) del 23 de Junio de 2011
 - Artículo 29: Medios de unión.

- Artículo 55: Uniones y elementos estructurales: Generalidades.
- Artículo 56: Uniones y elementos estructurales: Determinación de esfuerzos en las uniones y reparto entre los medios de unión.
- Artículo 57: Uniones y elementos estructurales: Clasificación de las uniones sometidas a momento flector.
- Artículo 58: Uniones y elementos estructurales: Uniones atornilladas.
- Artículo 60: Uniones y elementos estructurales: Uniones entre elementos sometidos a esfuerzo axial.
- Artículo 63: Uniones y elementos estructurales: Uniones híbridas con tornillo y soldadura.
- UNE EN 15048-1: Uniones atornilladas estructurales sin precarga: Parte 1: Requisitos generales.
- UNE EN 15048-2: Uniones atornilladas estructurales sin precarga: Parte 2: Ensayo de aptitud.

Para los ensayos a realizar se tomarán como pauta las siguientes normas:

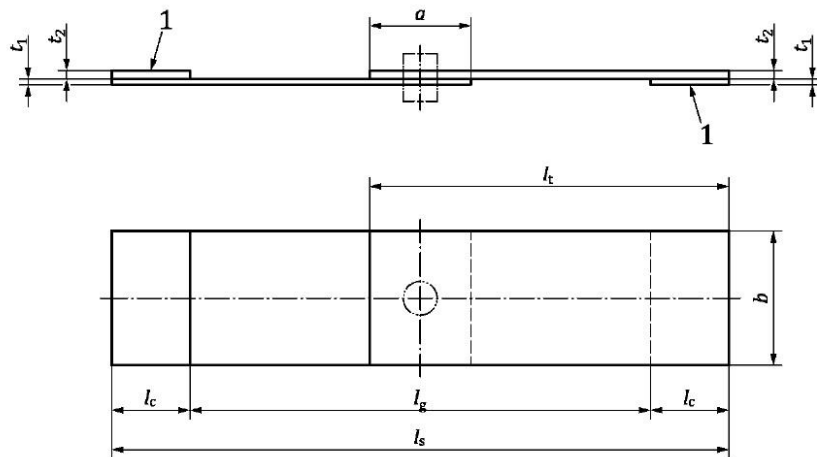
- UNE EN ISO 7384: Ensayos de corrosión en atmósfera artificial: Prescripciones generales.
- UNE EN ISO 9227: Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales: Ensayos de niebla salina.
- UNE EN ISO 12996: Uniones mecánicas: Ensayos destructivos de uniones: Medidas de las probetas y procedimiento del ensayo de resistencia a la cizalladura por tracción de uniones simples.

Se revisará en cumplimiento de estas últimas normas en lo que a la fabricación de las probetas se refiere y en cuanto a los resultados, ya que estos ensayos se realizarán mediante una empresa subcontratada.

UNE EN ISO 12996

La correcta aplicación de esta norma significará en un alto grado la correcta realización de los ensayos de cizalladura, por lo tanto, se seguirá lo más fielmente posible, siempre y cuando esté dentro de nuestras posibilidades.

Las dimensiones y forma de la probeta vendrán descritas por la norma, y son las siguientes:



Leyenda

a	Solape	l_5	Longitud total de la probeta	t_1, t_2	Espesor de la placa
b	Anchura del cupón	l_6	Longitud de la probeta entre anclajes	1	Cuñas
l_c	Longitud del área de anclaje	l_t	Longitud del cupón	2	Junta mecánica

Para la evaluación medioambiental a realizar se tomarán como pauta las siguientes normas:

- ISO/TR 14047:2003. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO/TS 14048:2002. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO 14044. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.

ANEXO II: PLANOS Y ESQUEMAS

II.1 Descripción de las necesidades

A lo largo del proyecto ha surgido la necesidad de diseñar y fabricar una serie de utillajes para el correcto amarre de las probetas en el centro de mecanizado Kondia A6, por lo que ha sido necesario generar los planos de dichos útiles.

Se han fabricado dos utillajes:

- Utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de mecanizado y corrosión.
- Utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de cizalladura.

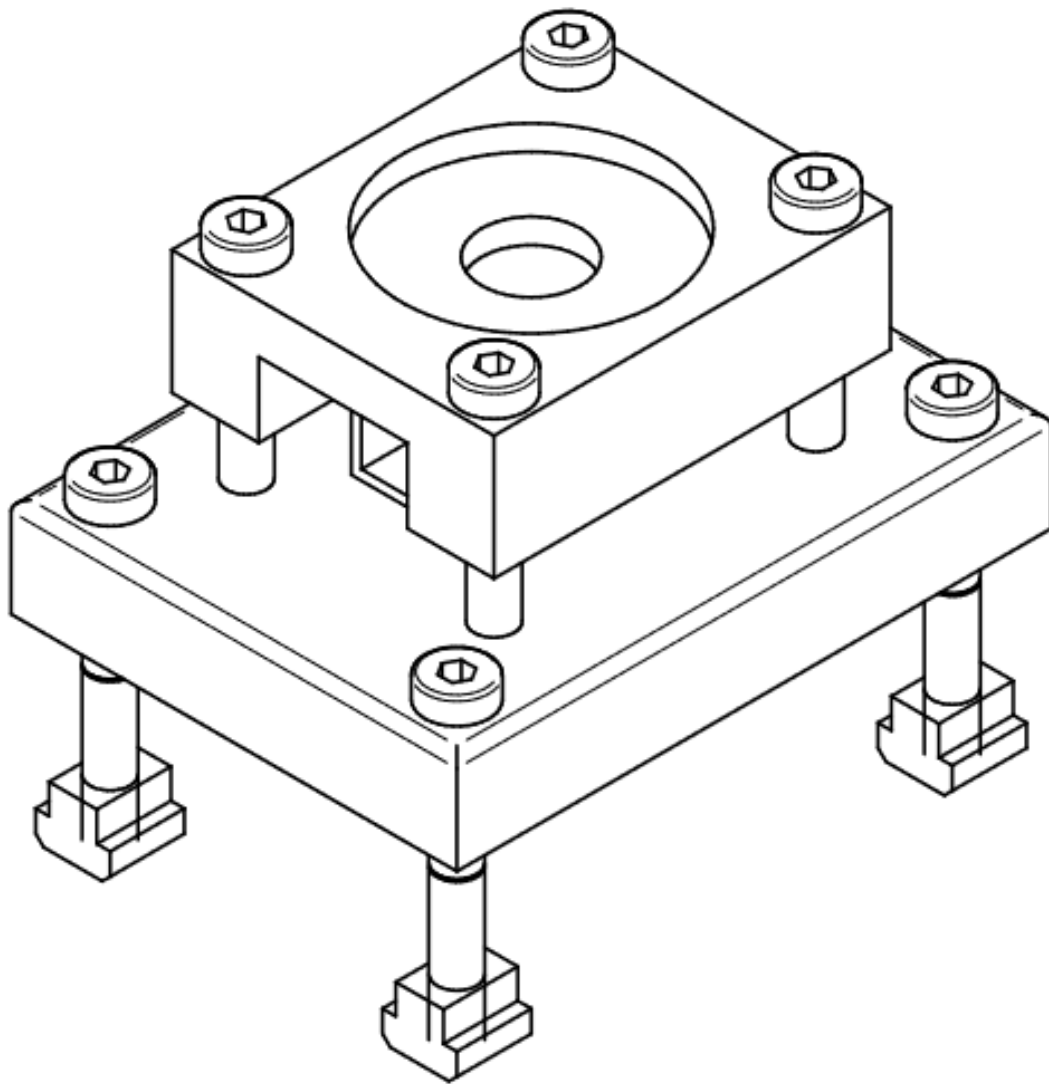
II.2. Utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de mecanizado y corrosión




A continuación, se presentan los planos necesarios para la fabricación del utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de mecanizado y corrosión.

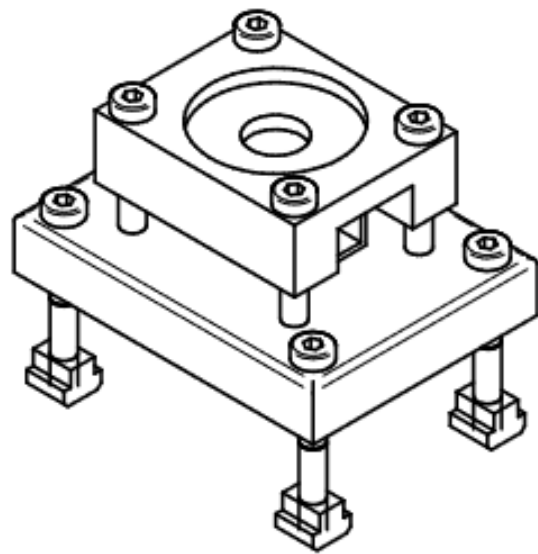
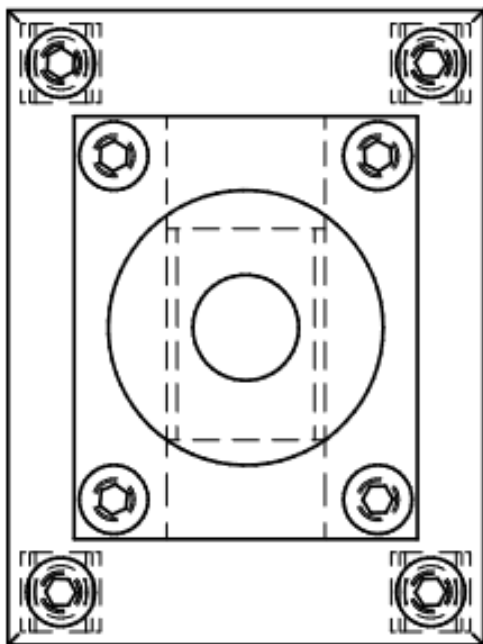
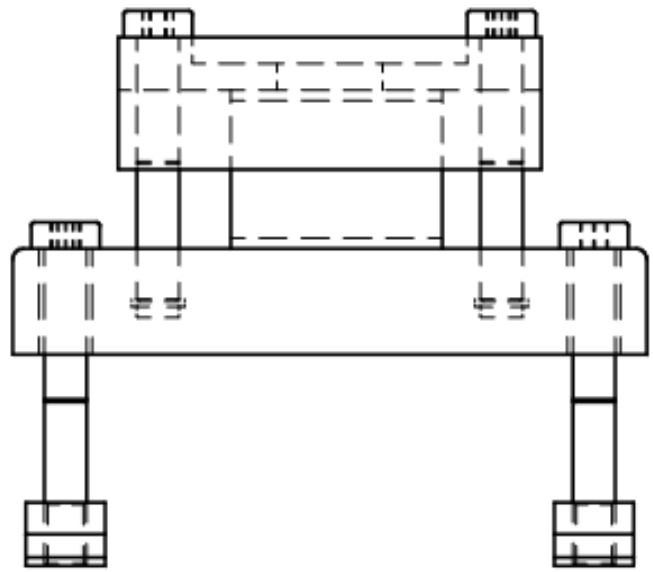
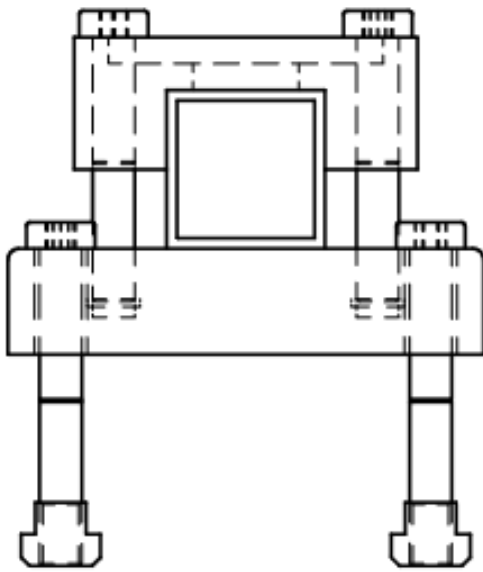
Para la fabricación de los mismos se ha tenido en cuenta que el utillaje cumpla los siguientes objetivos:


- El amarre ha de ser tal que se minimice la deformación del material al entrar en contacto con la herramienta.
- El utillaje no debe interferir con el movimiento que ha de hacer la máquina a la hora de mecanizar las probetas.
- Ha de ser ligero.
- Ha de ser fácil de utilizar.

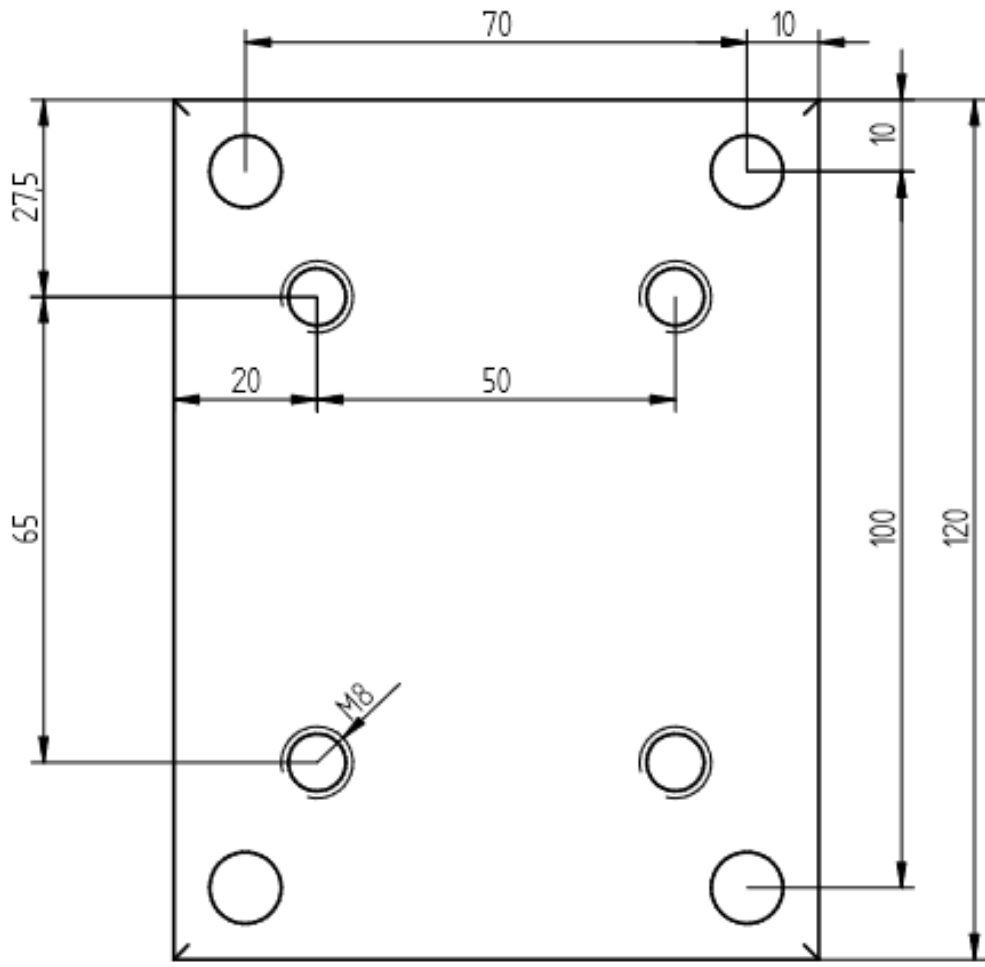
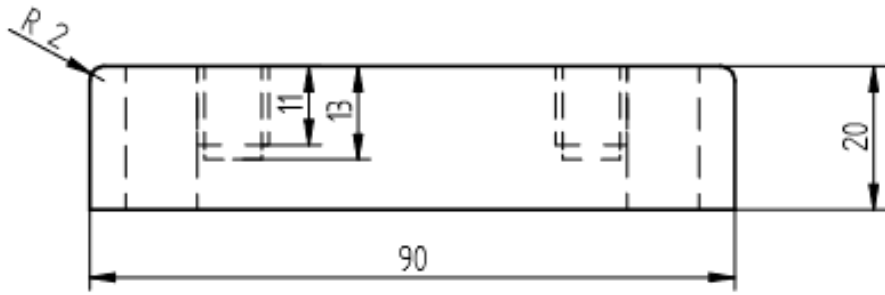
Para la fabricación de éste utillaje se ha optado por utilizar aluminio Al5080 por varias razones. Es un material ligero, lo cual facilitará el manejo del útil, es fácil de mecanizar y aguanta muy bien en ambientes de taller.





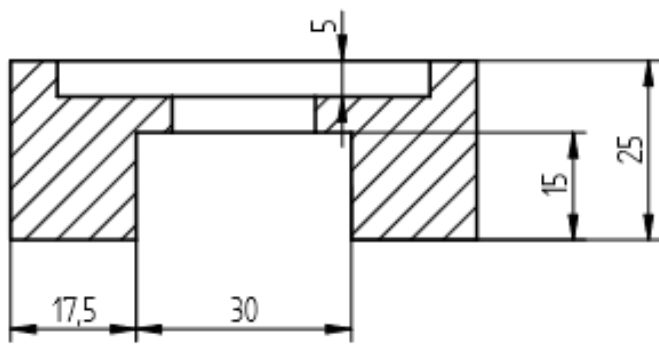
	Nombre	Fecha	Fir	 Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utillaje para ensayos: Ensamblaje		Plano número: 1	
				



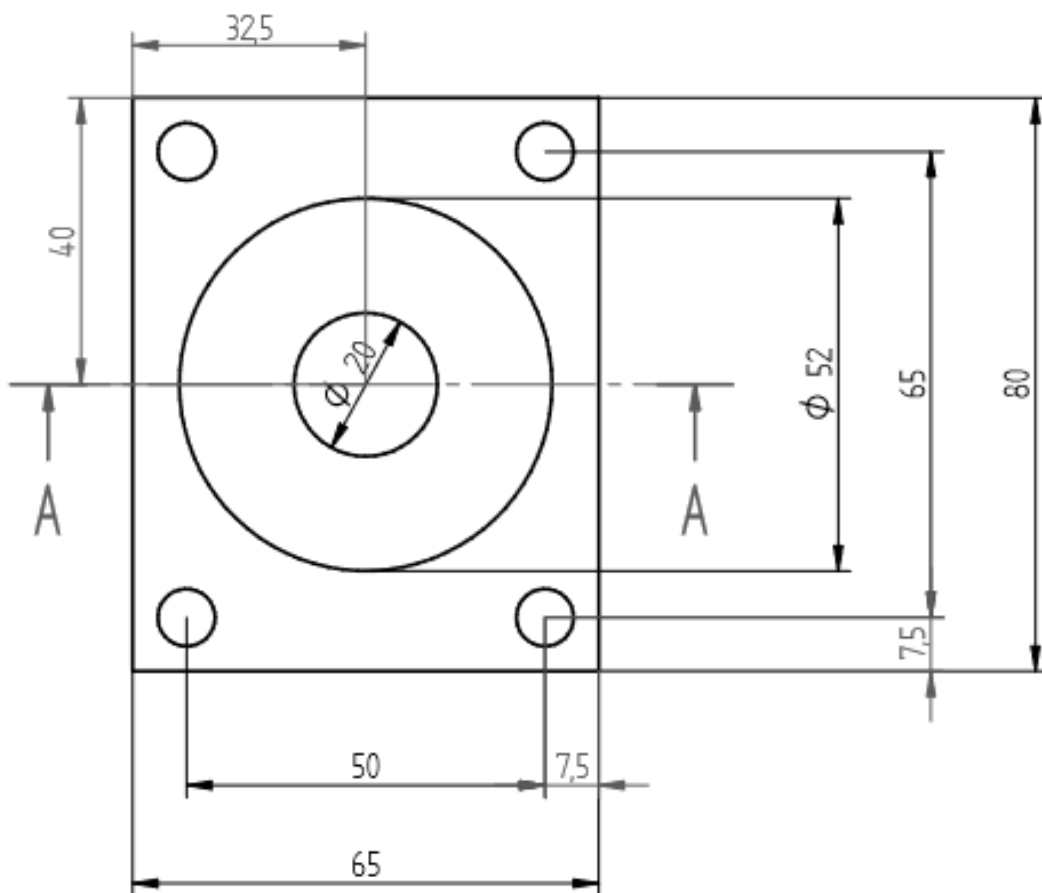
	Nombre	Fecha	Firma	 Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
3:4	Ustillaje para ensayos: Ensamblaje			Plano número: 2




	Nombre	Fecha	Firma	
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utillaje para anclajes: Útil inferior			Plano número: 3
	SOLID EDGE ACADEMIC COPY			



CORTE A-A



	Nombre	Fecha	Firma	 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utillaje para ensayos: Útil superior			Plano número: 4

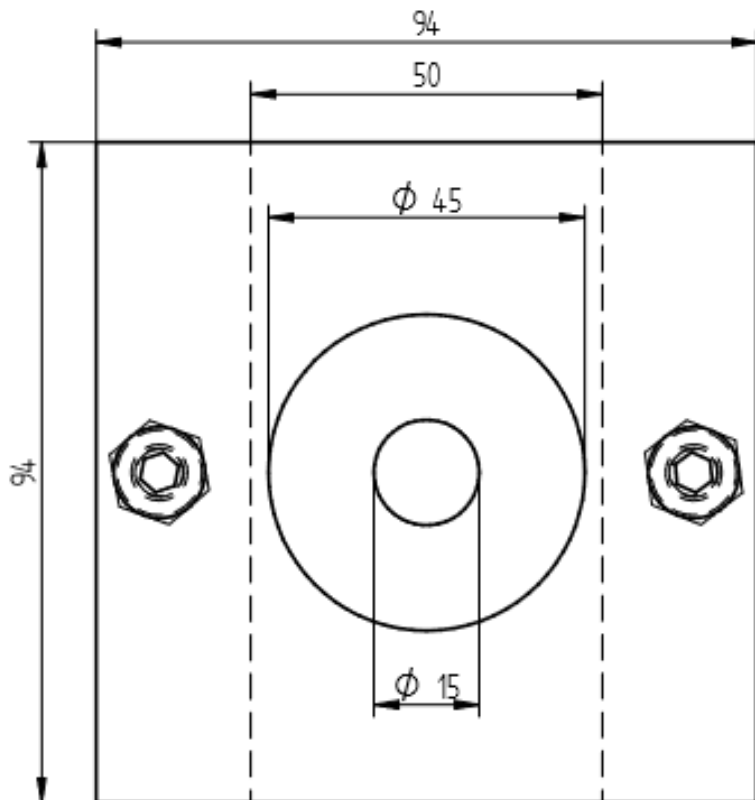
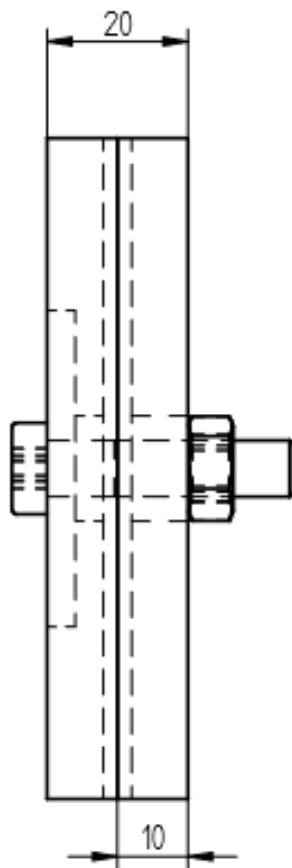
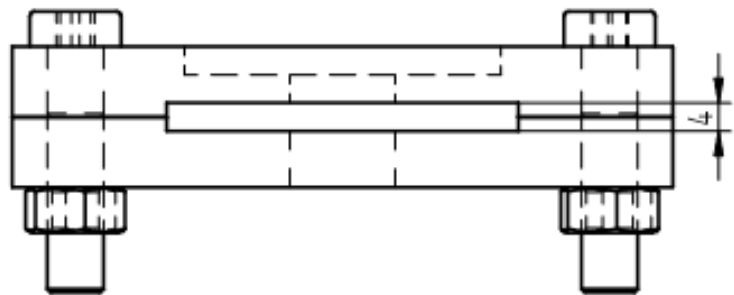
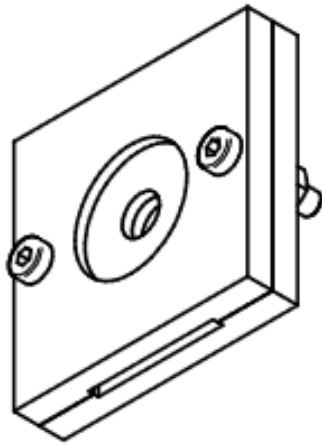
II.3 Utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de cizalladura


A continuación, se presentan los planos necesarios para la fabricación del utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de cizalladura.

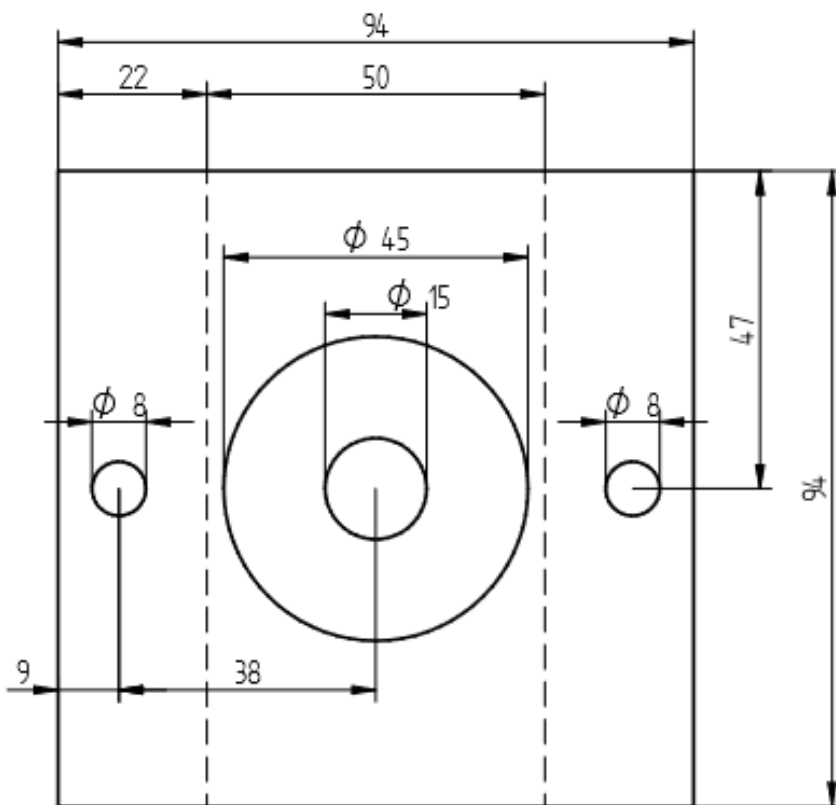
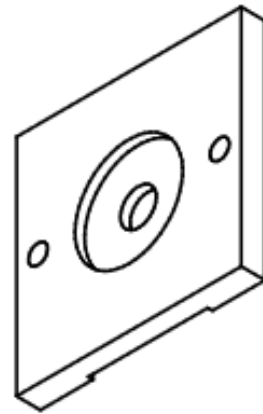
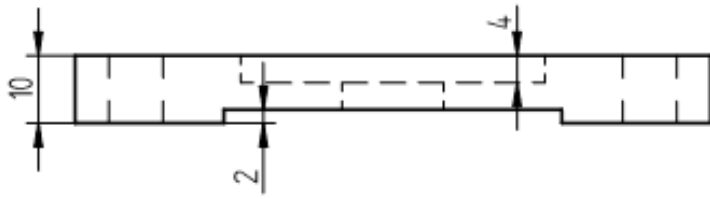
Los objetivos que ha de cumplir este utillaje han de ser los mismos que el utillaje de amarre para la fabricación de las probetas para los ensayos de mecanizado y corrosión, los cuales son los siguientes:

- El amarre ha de ser tal que se minimice la deformación del material al entrar en contacto con la herramienta.
- El utillaje no debe interferir con el movimiento que ha de hacer la máquina a la hora de mecanizar las probetas.
- Ha de ser ligero.
- Ha de ser fácil de utilizar.

Del mismo modo que para el anterior utillaje, para la fabricación de este utillaje se ha optado por utilizar aluminio Al5080. Es un material ligero, lo cual facilitará el manejo del útil, es fácil de mecanizar y aguanta muy bien en ambientes de taller.

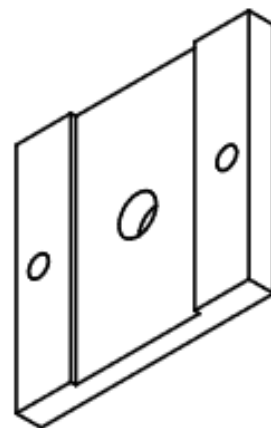
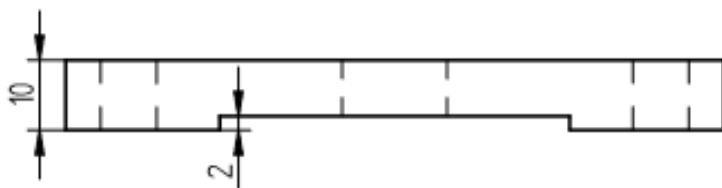
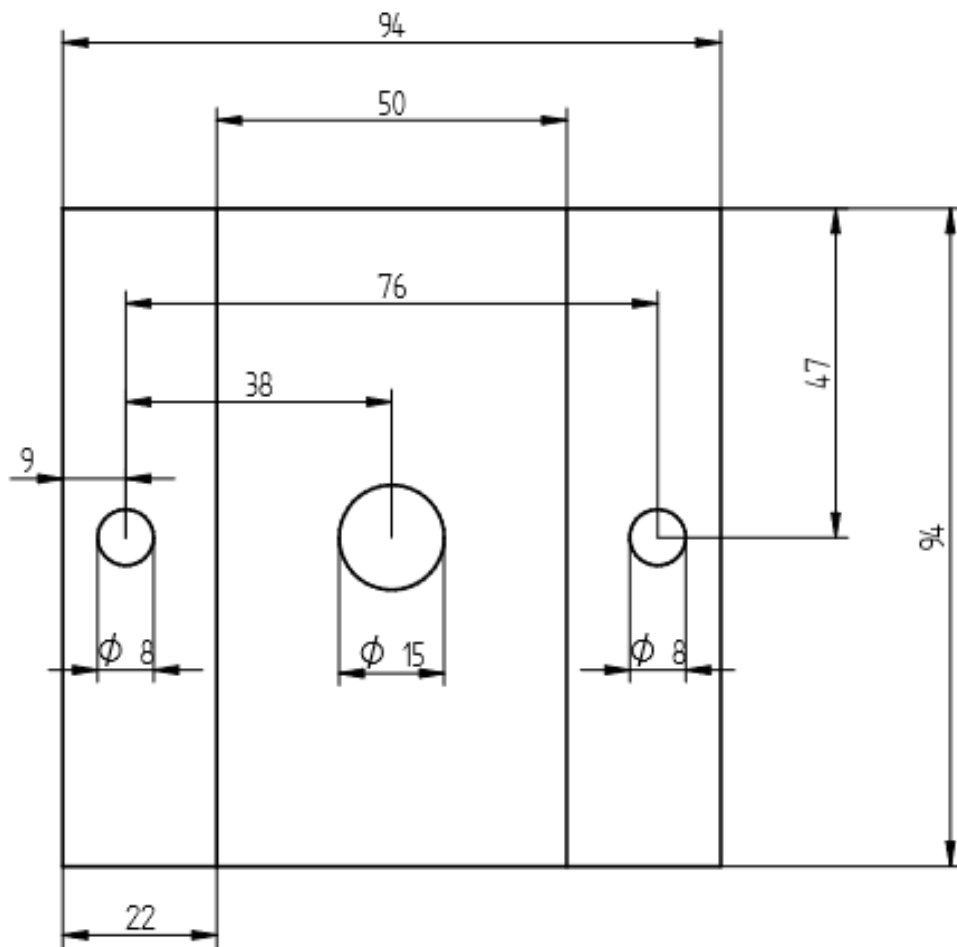


	Nombre	Fecha	Firma	 Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utlillaje de taladrado de chapas: Ensamblaje			Plano número: 5



	Nombre	Fecha	Firma	 Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utillaje superior para taladrado de chapa			Plano número: 7

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



	Nombre	Fecha	Firma	 Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Dibujado	E.Garcia			
1:1	Utillaje inferior para taladrado de chapa			Plano número: 6

Al realizar una unión mediante el friction drilling de acero y aluminio y después insertar en esa unión un tornillo de acero, lo que se obtiene es una pila. Por lo que en la unión existirá corrosión electroquímica, y por lo tanto corrosión galvánica (entre otras, como ya se ha explicado anteriormente).

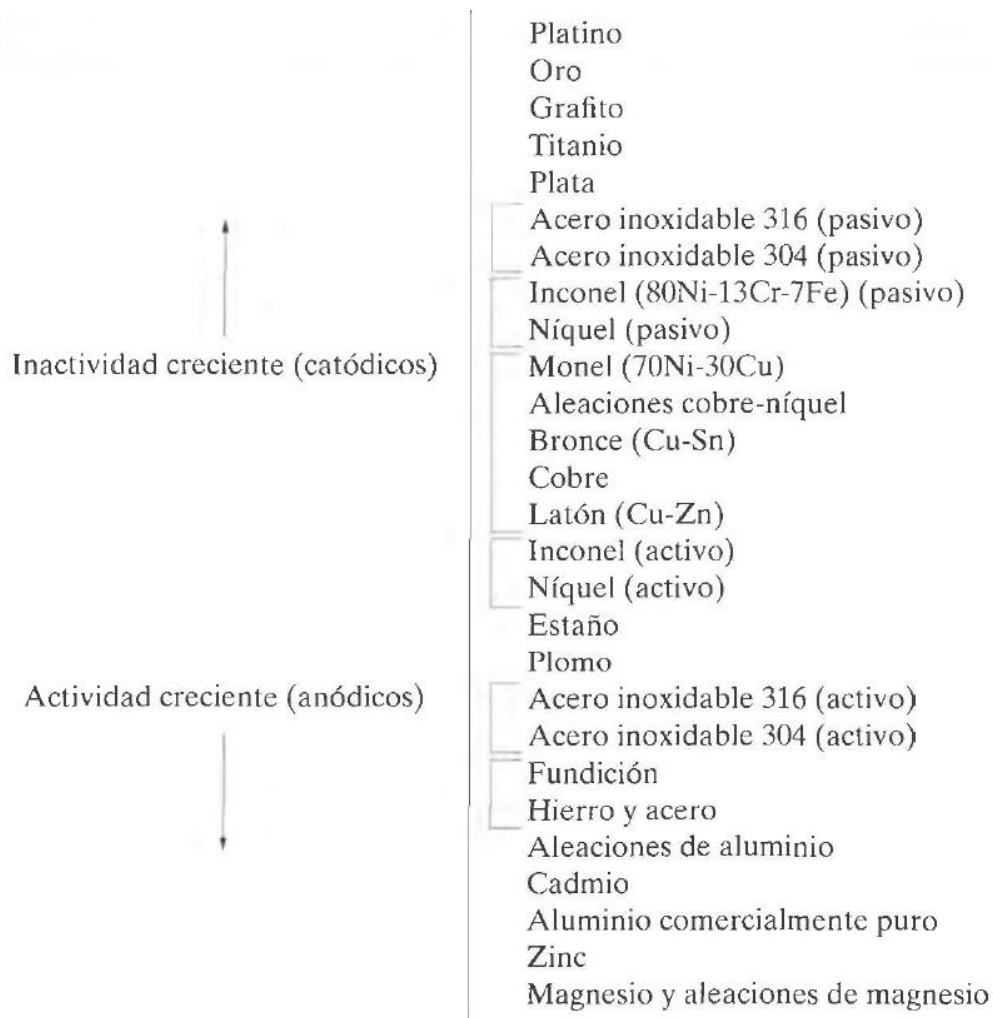


Figura X85. Serie galvánica

Como se ha dicho en otros apartados, al observar la serie galvánica (Figura X) deducimos que, para una unión de acero en contacto con aluminio, el aluminio se comporta como ánodo, ya que se encuentra por encima del acero en la serie galvánica; lo que implica que éste será el metal que se oxide y aporte electrones, lo que se traduce en una pérdida de masa y su degradación. Por lo tanto, el acero actuará como cátodo, captando los electrones que pierde el aluminio.

Para comprobar si esta afirmación es correcta o no, se van a realizar unos cálculos teóricos con el fin de predecir qué es lo que realmente va a pasar.

Cada reacción de oxidación y reducción tiene asociado un cierto potencial, por lo tanto, el potencial asociado a una pila cualquiera será la siguiente:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0$$

Siendo ΔV^0 el potencial total de la pila; ΔV_2^0 el potencial de electrodo estándar de la reacción de reducción; y ΔV_1^0 el potencial de electrodo estándar de la reacción de oxidación. A continuación, se muestra la serie fem estándar, la cual nos muestra las reacciones de reducción y el potencial de electrodo estándar para cada metal.

	Reacciones del electrodo	Potencial de electrodo estándar V° (V)
↑ Inactividad creciente (catódicos)	$\text{Au}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Au}$	+1,420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pt}$	~+1,2
	$\text{Ag}^+ + e^- \longrightarrow \text{Ag}$	+0,800
	$\text{Fe}^{3+} + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \longrightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0,401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}$	+0,340
	$2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$	0
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}$	-0,126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}$	-0,136
↓ Actividad creciente (anódicos)	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Ni}$	-0,250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Co}$	-0,277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}$	-0,403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}$	-0,440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}$	-0,744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}$	-0,763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \longrightarrow \text{Al}$	-1,662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}$	-2,363
	$\text{Na}^+ + e^- \longrightarrow \text{Na}$	-2,714
	$\text{K}^+ + e^- \longrightarrow \text{K}$	-2,294

Serie fem estándar

Vamos a analizar la posibilidad tanto de que se oxide el aluminio y se reduzca el acero, como de que se oxide el acero y se reduzca el aluminio. También se tendrá en cuenta que el hierro del acero (Fe^{3+}) puede reducir tanto a Fe^{2+} como a Fe^0 .

En la siguiente tabla se recogen todas las reacciones posibles, tanto de oxidación como de reducción, y su potencial de electrodo estándar.

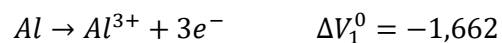
Material		Tipo de reacción	Reacción	Potencial de electrodo estándar
ACERO		Reducción a Fe^{2+}	$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$	+0,771
		Oxidación de Fe^{2+}	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$	
		Reducción a Fe^0	$Fe^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Fe^0$	-0,440
		Oxidación de Fe^0	$Fe^0 \rightarrow Fe^{3+} + 3e^{-}$	
ALUMINIO		Reducción	$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al$	-0,1,662
		Oxidación	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	

Reacciones y potencial de electrodo estándar acero y aluminio

Entonces, procedemos a estudiar las posibilidades:

- Oxidación del aluminio y reducción del acero.

Reacción de oxidación del aluminio:



- Reducción del hierro del acero a Fe^{2+}



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = 0,771 - (-1,662) = 2,433 > 0$$

Por lo que deducimos que la reacción se producirá de forma espontánea, siempre y cuando la energía libre de reacción sea menor que cero. La energía libre de reacción se define de la siguiente manera:

$$AG_{reacción}^0 = -nF\Delta V^0$$

Siendo n el número de moles, F la constante de Faraday (F=96500 C/mol de e^-), y ΔV^0 el potencial total de la pila. De esta forma, se deduce que la reacción se producirá espontáneamente, ya que para que $AG_{reacción}^0$ sea menor que cero, ΔV^0 ha de ser mayor que cero, como es el caso.

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

b. Reducción del hierro del acero a Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,440 - (-1,662) = 1,222 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

2. Oxidación del acero y reducción del aluminio.

Reacción de reducción del aluminio:



a. Oxidación del hierro del acero de Fe^{2+}

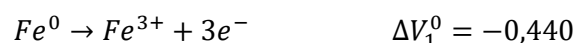


Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -1,662 - (0,771) = -2,433 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

b. Oxidación del hierro del acero de Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -1,662 - (-0,440) = -1,222 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

III.2 Cálculos teóricos del análisis del proceso de corrosión en la unión de acero inoxidable y aluminio

El acero inoxidable es un material tremendamente interesante, ya que posee una gran capacidad de resistir la corrosión.

El acero inoxidable es un acero que contiene varios metales aleantes, como el cromo, que poseen gran afinidad con el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro. Esta capa es, básicamente, óxido de cromo que además, si no hay escasez de oxígeno, se regenera de forma automática.

Esta capa, junto con la capa de alúmina que se genera en el aluminio hace que el material sea prácticamente inerte, y aunque se forme un par galvánico, si hay oxígeno suficiente, estas capas se autorregeneran, por lo que se deduce que esta dupla de materiales tendrá una alta resistencia a la corrosión.

Por lo tanto, vamos a estudiar las reacciones que puede llegar a tener el cromo con el aluminio, en cuanto a par galvánico.

Material	Tipo de reacción	Reacción	Potencial de electrodo estándar
Cromo	Reducción a Cr^{3+}	$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	-0,744
	Oxidación de Cr^{3+}	$Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$	

Reacciones y potencial de electrodo estándar cromo

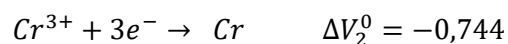
De forma análoga a los cálculos ya realizados:

1. Oxidación del aluminio y reducción del cromo.

Reacción de oxidación del aluminio:



Reducción del hierro del cromo:



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del cromo a Cr^{3+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,744 - (-1,662) = 0,918 > 0$$

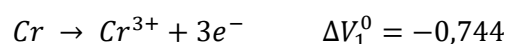
Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

2. Reducción del aluminio y oxidación del cromo.

Reacción de reducción del aluminio:



Oxidación del cromo:



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del cromo de Cr^{3+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -1,662 - (-0,744) = -0,918 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

A la vista de los resultados, y desde un punto de vista meramente teórico, deducimos que será el cromo el que se reducirá, comportándose de forma catódica; y el aluminio se oxidará, y hará las veces de ánodo.

III.3 Cálculos teóricos del análisis del proceso de corrosión en la unión de acero galvanizado y aluminio

Se va a contemplar la utilización de acero galvanizado como material del tornillo. Al recubrir el tornillo con zinc (a este proceso se le denomina galvanizado), se consigue que éste obtenga una cierta resistencia a la corrosión.

Al igual que para el apartado anterior, se van a estudiar las posibilidades que se van a poder dar, en presencia del zinc.

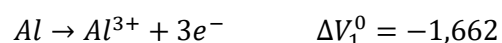
Material	Tipo de reacción	Reacción	Potencial de electrodo estándar
Zinc	Reducción a Zn^{2+}	$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn$	-0,763
	Oxidación de Zn^{2+}	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$	

Reacciones y potencial de electrodo estándar zinc

De forma análoga a los cálculos ya realizados:

- Oxidación del aluminio y reducción del zinc.

Reacción de oxidación del aluminio:



Reducción del zinc:



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del zinc será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,763 - (-1,662) = 0,899 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

- Reducción del aluminio y oxidación del zinc.

Reacción de reducción del aluminio:



Oxidación del zinc



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del zinc será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -1,662 - (-0,763) = -0,899 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

A la vista de los resultados, y desde un punto de vista meramente teórico, deducimos que será el zinc el que se reducirá, comportándose de forma catódica; y el aluminio se oxidará, y hará las veces de ánodo.

III.4 Cálculos teóricos del análisis del proceso de corrosión en la unión de acero y acero galvanizado

A continuación, se va a analizar de forma teórica el comportamiento de la dupla acero del perfil u el acero galvanizado del tornillo.

1. Oxidación del zinc y reducción del acero.

Reacción de oxidación del zinc:



- a. Reducción del hierro del acero a Fe^{2+}



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = 0,771 - (-0,763) = 1,534 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

- b. Reducción del hierro del acero a Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,440 - (-0,763) = 0,323 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

2. Oxidación del acero y reducción del zinc.

Reacción de reducción del zinc:



a. Oxidación del hierro del acero de Fe^{2+}



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,763 - (0,771) = -1,534 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

b. Oxidación del hierro del acero de Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,763 - (-0,440) = -0,323 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

III.5 Cálculos teóricos del análisis del proceso de corrosión en la unión de acero y acero inoxidable

A continuación, se va a analizar de forma teórica el comportamiento de la dupla acero inoxidable del perfil y el acero del tornillo.

1. Oxidación del cromo y reducción del acero.

Reacción de oxidación del cromo:



a. Reducción del hierro del acero a Fe^{2+}



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = 0,771 - (-0,744) = 1,515 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

b. Reducción del hierro del acero a Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del acero a Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,440 - (-0,744) = 0,304 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

2. Oxidación del acero y reducción del cromo.

Reacción de reducción del cromo:



a. Oxidación del hierro del acero de Fe^{2+}



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^{2+} será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,744 - (0,771) = -1,515 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

b. Oxidación del hierro del acero de Fe^0



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación del acero de Fe^0 será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,744 - (-0,440) = -0,304 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

III.6 Cálculos teóricos del análisis del proceso de corrosión en la unión de acero galvanizado y acero inoxidable

A continuación, se va a analizar de forma teórica el comportamiento de la dupla acero inoxidable del perfil y el acero galvanizado del tornillo.

1. Oxidación del zinc y reducción del cromo.

Reacción de oxidación del zinc:



Reducción del cromo:



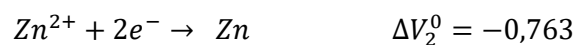
Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la reducción del cromo será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,744 - (-0,763) = 0,019 > 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 mayor que cero, el proceso será termodinámicamente posible.

2. Reducción del zinc y oxidación del cromo.

Reacción de reducción del zinc:



Oxidación del cromo:



Por lo tanto, en este caso, el potencial total para la oxidación cromo será:

$$\Delta V^0 = \Delta V_2^0 - \Delta V_1^0 = -0,763 - (-0,744) = -0,019 < 0$$

Por lo tanto, al ser ΔV^0 menor que cero, el proceso no será termodinámicamente posible.

A la vista de los resultados, y desde un punto de vista meramente teórico, deducimos que será el cromo el que se reducirá, comportándose de forma catódica; y el zinc se oxidará, y hará las veces de ánodo.