

Tesis Doctoral

UN PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE UNIONES MECÁNICAS DE MATERIALES DISIMILARES MEDIANTE COMBINACIÓN DE TALADRADO POR FRICCIÓN Y ROSCADO POR LAMINACIÓN

Presentada por
D. José M^a Pérez Pérez

en el
Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la
Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea

Para la obtención del título de
Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por
Dr. D. Gorka Urbikain Pelayo
Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle Marcaide

Año 2017

Tesis Doctoral

**UN PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE UNIONES
MECÁNICAS DE MATERIALES DISIMILARES
MEDIANTE COMBINACIÓN DE TALADRADO POR
FRICCIÓN Y ROSCADO POR LAMINACIÓN**

Presentada por
D. José María Pérez Pérez

en el
Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la
**Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea**

Para la obtención del título de
Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por
**Dr. D. Gorka Urbikain Pelayo
Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle**

Año 2017

A mi familia, de corazón

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado durante la realización de esta tesis doctoral.

En primer lugar quisiera agradecer el gran trabajo realizado por el Grupo de fabricación de la UPV/EHU, especialmente de Gorka Urbikain, que me permitió trabajar en el ámbito del proyecto MANUNET JFAST, con las empresas participantes aportando ideas, así como a los estudiantes que fueron participando en los tres años de este proyecto en varias fases y experimentos, y especialmente a Estefanía García, Aritz Andueza, Gorka Olmos y Roberto, y a aquellos que sin llegar a conocer por haber estado con anterioridad allí, me ayudaron con sus trabajos previos en este campo, como es el caso de Deividi Nardi. Todos ellos seguro tienen un futuro brillante que parte de lo aprendido en esta escuela centenaria, la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Realmente se hace difícil trabajar en la distancia, pero también es una forma innovadora de expandir el conocimiento, trabajar en aspectos colaborativos, generar grupos y crear nuevos gérmenes de investigación, y también permite desde un grupo grande enriquecerse haciendo partícipes a más ingenieros de los métodos y trabajos de investigación. Este modo de trabajar no podría ser posible sin el esfuerzo y la generosidad de los participantes de un grupo cohesionado como es el de la Escuela de Bilbao. En mis viajes, allí siempre hubo calor humano, ideas, y ganas de colaborar, a ello se sumaron las posibilidades de teletrabajo que hoy brinda internet.

De forma especial quiero agradecer también la labor de mi director de tesis Luis Norberto López de Lacalle, por su paciencia, apoyo continuo, y muy especialmente agradecerle el continuo ánimo que me ha transmitido a lo largo de la realización de esta tesis.

La propia UPV/EHU me ha mostrado su lado más abierto, brindándome la posibilidad de hacer allí el doctorado. Para mí que soy de Toledo, no deja de ser un hecho relevante, por otro lado no puedo tampoco olvidarme de colaboradores del CDTI donde siempre somos bien recibidos, como AFM/INVEMA, Tecnalia, IK4, otros centros, así como muchas empresas vascas. En mis desplazamientos por motivos de trabajo también he encontrado lazos personales, que en el terreno laboral también ayudan mucho. Estos viajes me permitieron a veces acercarme a la Escuela para tratar temas de la tesis. Al final detrás de todo están las personas, y son las personas las que se implican en tirar de la cuerda; muy apropiado el modelo vasco de la sokatira, todos a una en la misma dirección.

Cuando lo importante es abrir lazos, colaborar, y resulta crítica la actuación del CDTI en el entorno económico industrial donde tiene su campo de actividad, mi visión de la I+D+i se ha enriquecido, dado que he estado también al otro lado del campo de juego, y vistas las dificultades inherentes a la generación de nuevos conocimientos para su aplicación industrial, soy consciente aún más del gran papel que juega el CDTI en nuestro país. Como ciudadanos lo debemos agradecer, y como trabajador del mismo, en mayor medida.

Para finalizar, me gustaría mostrar mi más profundo agradecimiento a mi familia, que siempre ha estado ahí y en especial a mi mujer África. No hacen falta más palabras, porque lo importante está en el corazón.

Muchas gracias.

José M^a Pérez

Índice General

Capítulo I. Introducción	1
1. Motivación de la tesis	3
2. Objetivos generales	10
3. Organización de la memoria	15
Capítulo II. Estado del Arte	17
1. Descripción general de métodos de unión en la industria	19
2. Identificación de las alternativas de uniones	20
3. Aspectos de comportamiento de las uniones	30
4. Criterios de selección de uniones	39
5. Unión de chapas por procesos de fricción	42
5.1. Fundamentos y aplicaciones	40
5.2. Proceso: taladrado por fricción	44
5.3. Roscado por laminación	54
6. Consideraciones generales de unión de aleaciones disimilares	20
Capítulo III. Análisis del Proceso Combinado de Taladrado y Roscado por Fricción	63
1. Estudio de la sensibilidad de los parámetros de los procesos	67
2. Corrosión de la junta	91
2.1. Análisis teórico: corrosión galvánica	91

Índice General

2.2. Análisis experimental	93
3. Comportamiento mecánico de la unión	100
4. Resultado metalográfico de las pruebas	104
5. Inspección por RX de las juntas	106
6. Análisis del ciclo de vida del proceso global	107
6.1. Objetivo y alcance del ACV	104
6.2. Análisis de inventario	115
6.3. Evaluación del impacto ambiental	118
6.4. Interpretación del ACV	122
Capítulo IV. Conclusiones Tecnológicas	127
Capítulo V. Contribuciones y Líneas Futuras	135
1. Contribuciones de la tesis	137
2. Líneas Futuras	138
BIBLIOGRAFÍA	141

Índice de Figuras

Fig. I.1. Taladrado por Fricción y roscado por laminación (fuente Friction Drilling©)

Fig. I.2. La escala MRL en fabricación

Fig. I.3. Materiales en carrocerías de automóviles

Fig. II.1. Uniones mecánicas atornilladas.

Fig. II.2. Uniones remachadas

Fig. II.3. Soldadura robotizada, a la derecha detalle de soldadura en una pieza de una turbina aeronáutica

Fig. II.4. Ejemplo de soldaduras por FSW. Una parte se ha bruñido para mejorar las características del cordón de unión

Fig. II.5. Variación de durezas en el nugget, y mejora con bruñido, tras pruebas en la UPV/EHU. Derecha: Nugget, o zona de unión

Fig. II.6. Cargas transversales (a) y axiales (b).

Fig. II.7. Modos de fallo en una unión atornillada.

Fig. II.8. Curva de resistencia a la fatiga (S-N) para ensayos con cargas de amplitud constante.

Fig. II.9. Serie fem estándar.

Fig. II.10. Serie galvánica.

Fig. II.11. Esquema de ciclo de vida de un producto.

Fig. II.12. Secuencia del proceso de Taladrado por Fricción con roscado por laminación.

Fig. II.13. Centro de mecanizado con control numérico y roscadora manual.

Fig. II.14. Sistema de pruebas de Friction Drilling.

Fig. II.15. Geometría de la herramienta, derecha imagen de variaciones.

Fig. II.16. Broca estándar, plana, REM y especial.

Índice de Figuras

Fig. II.17. Evolución del momento y del esfuerzo en el Taladrado por Fricción.

Fig. II.18. Fuentes de calor en función de la zona de la herramienta.

Fig. II.19. Dimensiones principales del agujero.

Fig. II.20. Calidades tipo 1 y tipo 2.

Fig. II.21. Roscado por Laminación frente al Roscado por arranque de viruta.

Fig. II.22. Roscado por Laminación frente al Roscado por Arranque de viruta: aspecto de los filetes generados.

Fig. II.23. Machos probados en 2015 en la UPV/EHU.

Fig. II.24. (a) Mecanismo de formación de roscado con lóbulo de laminación y (b) microestructura de una rosca producida por corte y otra por laminación.

Fig. II.25. Combinación de FD y roscado, pero no en materiales disimilares.

Fig. III.1. Flujograma de la metodología desarrollada.

Fig. III.2. a) Probetas empleadas en los ensayos, b) utillaje para pruebas.

Fig. III.3. Características de la herramienta que se usará en los ensayos.

Fig. III.4. Utillaje empleado en los ensayos sistemáticos y detalle de la medición de temperaturas.

Fig. III.5. Sistema de medida DDU Artis para la medición del par y la fuerza.

Fig. III.6. Avance del par (Nm) en función del tiempo del contacto para S2000_F350.

Fig. III.7. Avance de la fuerza (N) en función del tiempo del contacto para S2000_F350.

Fig. III.8. Fuerza axial máxima de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance.

Fig. III.9. Momento torsor máximo de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance.

Fig. III.10. Momento torsor máximo en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.

Fig. III.11. Fuerza axial máxima en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.

Fig. III.12. Temperaturas máximas en función de la rotación del husillo para distintos avances.

Fig. III.13. Probetas cortadas individualmente tras los ensayos de Friction Drilling.

Fig. III.14. Proceso para la medición de las características geométricas de los agujeros.

Fig. III.15. Diámetros del agujero.

Fig. III.16. Programa PCE-MM200 para realizar las mediciones.

Fig. III.17. Espesores de una copa de acero.

Fig. III.18. Diámetro a la entrada del agujero en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Fig. III.19. Diámetro a la salida en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Fig. III.20. Longitud de copa, longitud total y hueco mínimo.

Fig. III.21. Longitud de copa en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Fig. III.22. Longitud de copa en función de la velocidad de avance y para distintas revoluciones.

Fig. III.23. Longitud total en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Fig. III.24. Hueco mínimo entre materiales en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Fig. III.25. Variación de los espesores para distintas velocidades de giro.

Fig. III.26. Relación entre hueco y diámetro con la velocidad de giro.

Fig. III.27. Componentes en el soporte al inicio y tras 48 h de exposición a nieblas salinas.

Fig. III.28. Probeta para ensayo de corrosión antes de ensayar.

Fig. III.29. Estado de las probetas al transcurrir 48 horas.

Fig. III.30. Probetas de acero inoxidable ensayadas (360 horas).

Fig. III.31. Secuencia de extracción y análisis de los especímenes en el tiempo.

Índice de Figuras

Fig. III.32. Secuencia de extracción y análisis de los especímenes en el tiempo.

Fig.II.33. Diversos casos de picadura aparecidos.

Fig. III.34. Comparativa de la rebaba producida en el proceso, para condiciones de diámetro óptimo (izquierda) y para mayor espesor de copa (derecha).

Fig. III.35. Dimensiones de probeta de cizalladura según norma UNE-EN 15048-2.

Fig. III.36. Probetas para el ensayo de cizalladura.

Fig. III.37. a. Áreas de ensayo para mediciones de dureza (tubo y placa); b. Mediciones de dureza Vickers para diferentes pares de materiales (Condición MG – mínimo espacio).

Figura III.38. Micro-durezas para los tres criterios.

Fig. III.39. Inspección por RX digital, del corte sagital de la junta.

Fig. III.40. Resultado de la inspección 3D digital RX. La hoja de aluminio no se muestra debido a su diferente penetración de la radiación RX.

Fig. III.41. Esquema del proceso y límites del sistema para taladrado convencional.

Fig. III.42. Esquema del proceso y límites del sistema para taladrado mediante friction drilling.

Fig. III.43. Valores totales correspondientes a ambos procesos (I).

Fig. III.44. Valores totales correspondientes a ambos procesos (II).

Índice de Tablas

Tabla II.1. Aplicaciones del Friction drilling ya en el mercado.

Tabla III.1. Condiciones del proceso de taladrado por fricción que se emplearán en los ensayos.

Tabla III.2. Fuerzas de avance máximos para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos.

Tabla III.3. Pares máximos para cada muestra. Azules valores bajos y verdes valores altos.

Tabla III.4. Combinación de fuerzas axiales máximas y pares máximos más favorables.

Tabla III.5. Condiciones del fabricante en relación al diámetro del agujero.

Tabla III.6. Parámetros óptimos de mecanizado.

Tabla III.7. Tabla de casos analizados.

Tabla III.8. Resultados: superficie corroída en % (sobre la superficie total).

Tabla III.9. Condiciones de los componentes ensayados.

Tabla III.10. Condiciones de mecanizado de las probetas del ensayo de cizalladura.

Tabla III.11. Resultados de los ensayos de cizalladura.

Tabla III.12. Resultado final de los ensayos y gráficos carga/desplazamiento.

Tabla III.13. Mix energético utilizado en el País Vasco.

Tabla III.14. Impacto ambiental derivado de la generación de 1kW de energía.

Tabla III.15. Entradas/salidas para la producción de 1m³ de taladrina.

Tabla III.16. Impacto ambiental derivado de la generación de 1m³ de taladrina.

Tabla III.17 Entradas/Salidas para el tratamiento de 1m³ de taladrina.

Tabla III.18. Impacto ambiental derivado del tratamiento de 1m³ de taladrina.

Tabla III.19. Impacto generado por el consumo de energía en el taladrado.

Índice

Tabla III.20. Impacto generado por el consumo de energía en el friction drilling.

Tabla III.21. Impacto ambiental generado por el uso de taladrina.

Tabla III.22. Impacto derivado del secado de la viruta.

Tabla III.23 Impacto ambiental total generado por ambos procesos.

Tabla V.1. Aspectos a considerar y soluciones para avanzar el MRL hasta el nivel 5.

Listas de símbolos y acrónimos

Letras Mayúsculas

E	[GPa]	Módulo de elasticidad
F_f	[N]	Fuerza de avance
F_{fz}	[N]	Fuerza de avance mínima
F_{ffinal}	[N]	Fuerza de avance final del agujero
$F_{fmáx}$	[N]	Fuerza de avance máxima
G	[MPa]	Módulo de cizallamiento
M_t	[N.m]	Momento torsión
$M_{tmáx}$	[N.m]	Momento torsión máximo
Q	[kN]	Carga aplicada
T	[°C]	Temperatura
T_f	[°C]	Temperatura de fusión absoluta

Letras Minúsculas

d_i	[mm]	Diámetro del agujero de la rebaba
e	[mm]	Espesor de la pared de la rebaba
f	[%]	Fracción volumétrica das partículas
l	[mm]	Longitud total de la rebaba
h_s	[mm]	Longitud de la zona del mango de la herramienta
h_i	[mm]	Longitud de la zona cilíndrica de la herramienta
h_n	[mm]	Longitud de la zona cónica de la herramienta
h_c	[mm]	Longitud de la zona de centrado de la herramienta
z	[mm]	Longitud de recorrido de la herramienta
n	[rpm]	Velocidad de rotación
r	[mm]	Radio
s	[mm]	Espesor de la chapa

Índice

s_i	[mm]	<i>Espacio interlaminar</i>
v_c	[m/min]	<i>Velocidad de corte (velocidad tangencial)</i>
v_f	[mm/min]	<i>Velocidad de avance (lineal)</i>

Letras griegas

β	[grados]	<i>Ángulo de punta de la herramienta</i>
α	[grados]	<i>Ángulo de cono de la herramienta</i>
δ	%	<i>Profundidad de ruptura da rebaba</i>
σ	[MPa]	<i>Tensión de tracción</i>
σ_e	[MPa]	<i>Tensión equivalente</i>
σ_i	[MPa]	<i>Tensión de fricción</i>
y_σ	[MPa]	<i>Limite de fluencia</i>
σ_u	[MPa]	<i>Tensión real máxima</i>

Capítulo 1. Introducción y contexto

Capítulo I. Introducción y contexto

1. Motivación

En este documento se presenta el resultado del trabajo realizado sobre el proceso de Taladrado por Fricción y Roscado por Laminación en combinación, para la consecución de uniones de materiales disimilares, realizado en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU. Con él se pretende complementar el conocimiento actual del proceso a través de su estudio experimental y su posterior caracterización, y de esta forma avanzar en la mejora de su robustez orientado hacia su posible aplicación industrial.

La aparición de países de bajos costes de producción está obligando a una apuesta decidida de las empresas de este país por la calidad, tanto en productos como en procesos, así como a una exigencia de aumento de productividad en la mayoría de sectores para hacer frente de este modo a la competencia de países de economías emergentes como Brasil, Rusia, India, México, China, y Corea (países BRIMCK-Término acuñado por Goldman Sachs) cuyos costes de producción resultan difícilmente igualables. Este hecho afecta a muchos sectores, incluidos aquellos que trabajan con chapa metálica como calderería, construcción marina, estructuras, etc.

Dicho aumento de la productividad implica necesariamente una apuesta por la Innovación mediante la implantación de nuevas tecnologías de fabricación, y es en este punto donde cobra importancia vital la inversión en proyectos de I+D+i. Sin embargo, con frecuencia esto conlleva un riesgo importante para las empresas ya que supone normalmente un tiempo largo de desarrollo, con importantes retos tecnológicos de por medio, y sin garantía alguna de resultados. Aun así, cuando un proyecto de investigación y/o desarrollo tecnológico finaliza con éxito, con frecuencia los resultados que ofrece a la empresa aportan un valor añadido relevante al proceso/producto y un elemento diferencial frente a la competencia.

La diversificación es un aspecto importante de la innovación, y algunas empresas deben buscar procesos novedosos que empleen tecnologías de una forma original, como ocurre en esta tesis.

Capítulo I. Introducción

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

En un mundo de recursos limitados y sobreabundancia de residuos la búsqueda de nuevos sistemas productivos más eficientes 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 la sostenibilidad: es el concepto de *Economía Circular* [ACICAE, 2013]. Cabe mencionar en este sentido que la industria también está haciendo grandes esfuerzos en potenciar la vida útil de sus productos, y las uniones mecánicas que puedan roscarse/desenroscarse puede ser un interesante punto de evolución.

Calderería fina

Muchos son los campos de los procesos productivos, pero sin duda el de calderería fina tiene presencia en todos los países industrializados, y en España en particular. Unir materiales es una constante, siendo la soldadura el principal elemento del negocio. En la actualidad uno de los principales problemas en Ingeniería de Fabricación es la unión de chapas, tubos o perfiles metálicos de pared delgada de una manera simple, eficiente y económicamente rentable.

Para lograr este fin, se plantean las actividades recogidas en el presente trabajo, que supone un incremento del conocimiento con respecto al estado de la técnica, y que ha permitido la optimización de la experimentación y de los procesos de unión, especialmente en el caso de materiales disimilares.

Como es sabido, aluminio y acero son dos materiales muy distintos ya que presentan puntos de fusión muy alejados, lo cual dificulta su unión mediante procesos convencionales, es por ello que resulta de interés la investigación de técnicas como el Taladrado por Fricción, más conocido como *Friction Drilling*, junto con el Roscado por Laminación, conocido como *Form Tapping*, cuyos resultados se exponen en esta tesis.

Sin embargo, los estudios sobre la unión de materiales metálicos mediante las técnicas anteriormente mencionadas son escasos, lo cual justifica esta

investigación en busca de parámetros óptimos, con el fin asegurar la propuesta de un método más rápido, eficiente, económico y con menor impacto ambiental.

Se plantea una indagación experimental sobre el proceso de Taladrado por Fricción, y posterior Roscado por Laminación, en uniones de chapas de acero y aluminio, caracterizadas por la ausencia de tuercas y de arranque de material, y en las que la unión por soldadura presenta problemas, ya que cuando el acero se funde el aluminio va camino de vaporizarse.

La base de este proceso es el calor producido por la fricción al entrar en contacto la herramienta rotativa con el material, lo que provoca la plastificación, la fluencia y la deformación de éste. De este modo, se genera una copa cónica, que será posteriormente roscada mediante un proceso de laminación, un conformado plástico normalmente sin arranque de material salvo que se desee eliminar el material de la copa.

La investigación se va a centrar especialmente en la unión de chapas de dos materiales con propiedades distintas como son el acero y el aluminio, de unas familias de aceros y aleaciones de aluminio empleados de forma habitual en la industria (AISI 1045 y Al5754), muy utilizados en calderería fina y también en automoción, donde se ha detectado una oportunidad de mejorar los procesos utilizados hasta el momento.

También en el sector eléctrico se abriría una aplicación potencial, en las uniones de acero y cobre, donde el acero actuaría como elemento estructural y el cobre como elemento conductor de electricidad.

Razones de selección del tema de trabajo doctoral

La fabricación avanzada se ha colocado en el centro de las estrategias europeas y estatales con la intención de promover la digitalización de la industria europea para mejorar su competitividad y posicionamiento mundial.

A través de Horizon 2020 programa europeo 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: la fabricación será más limpia y

Capítulo I. Introducción

respetuosa con el medio ambiente, más sostenible socialmente y más avanzada desde un punto de vista tecnológico.

Otra iniciativa en este sentido es el clúster Eureka SMART de fabricación avanzada, con financiación para proyectos del CDTI, impulsado personalmente por el autor de esta tesis, el nuevo programa de I+D sobre fabricación avanzada de Eureka, ofrecerá a los principales sectores industriales la oportunidad de incluir sus propias prioridades de investigación y de desarrollo de procesos, productos y servicios avanzados para hacer frente a los futuros desafíos y así aprovechar la cuarta revolución industrial que tendrá un profundo impacto en el porvenir de la fabricación.

Por último otro caso relevante es la iniciativa ERA-NET MANUNET, constituida con el objetivo de fomentar la competitividad de la industria manufacturera europea mediante la cofinanciación de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico realizados por empresas (preferentemente PYMES), centros de investigación y universidades. El presente proyecto concretamente se llevó a cabo en parte gracias a la financiación obtenida a través del proyecto MANUNET con acrónimo J-FAST y que lleva por título "A rapid joint by alternative processes".

Este programa ERANET está abierto a todos los campos de la investigación en fabricación, y se estructura en las siguientes áreas temáticas:

- Ingeniería basada en el conocimiento, tecnologías de la información y las comunicaciones para la fabricación.
- Tecnologías de fabricación para aplicaciones medioambientales y energéticas.
- Tecnologías de fabricación adaptativa.
- Nuevos materiales para la fabricación.
- Nuevos métodos, componentes y sistemas para la fabricación.
- Otras tecnologías/productos relacionadas con la fabricación.

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

fabricación objeto de varios proyectos, dedicados a soldadura en estado sólido, adhesivos, o nuevas ideas como las ofrecidas en esta tesis.

Es importante señalar que la inversión en este tipo de proyectos de investigación con frecuencia supone un alto riesgo para muchas empresas, por lo que pese a las ayudas públicas son reticentes a la hora de destinar fondos a investigar estas cuestiones. Por ello, estos proyectos han de asumirse inicialmente en las universidades, especialmente en lo referido a investigación básica, ya que ayudan a la consecución de conocimientos que luego pueden ser transferidos a las empresas para implantar nuevas tecnologías a un precio mucho menor y con un riesgo mínimo, ya que es la Universidad la que asume fundamentalmente el riesgo tecnológico.

En este caso el proyecto se ha realizado en las instalaciones de la Universidad del País Vasco, concretamente en el Departamento de Ingeniería Mecánica. Este hecho responde al fuerte vínculo profesional existente entre el autor de la tesis y la industria vasca (muy especialmente el sector de máquina-herramienta), tras años de colaboración y apoyo al desarrollo de la misma a través de los proyectos de I+D+i del CDTI. El vínculo ha permitido visitas frecuentes, reuniones de trabajo y una forma de trabajar en cierta forma innovadora. Asimismo, ha sido decisivo en trabajar en esta línea el hecho de no existir conflicto de intereses con la financiación del trabajo por el CDTI.

Por otra parte, la relación de los responsables del Grupo de fabricación de la Escuela de Bilbao con empresas interesadas en las líneas propuestas facilitará la transferencia de los resultados al ámbito empresarial. Este esfuerzo además puede verse favorecido desde instancias y organismos como CDTI. La actividad del autor de esta tesis en este organismo facilitó una visión de la innovación muy compatible con este centro, principal entidad financiadora de la I+D+i empresarial a nivel nacional, dado que el enfoque de la tesis a la realidad industrial es evidente.

El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) es una Entidad Pública Empresarial del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad que promueve la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación de las empresas españolas. Desde el año 1977, canaliza las solicitudes de financiación y

Capítulo I. Introducción

apoyo a los proyectos de I+D+i de las empresas españolas en los ámbitos nacional e internacional para contribuir a la mejora de su nivel tecnológico mediante:

- El acompañamiento a las empresas en su estrategia de I+D+i, asesorando y orientando sus ideas de proyectos.
- La evaluación técnico-económica y financiación de proyectos de I+D desarrollados por empresas.
- La gestión y promoción de la participación española en programas internacionales de cooperación tecnológica.
- La promoción de la transferencia internacional de tecnología empresarial y de los servicios de apoyo a la innovación tecnológica.
- y el apoyo a la creación y consolidación de empresas de base tecnológica.

La misión del CDTI es conseguir que el tejido empresarial español genere y transforme el conocimiento científico-técnico en crecimiento sostenible y globalmente competitivo mediante:

- Orientación y asesoramiento experto, evaluación y apoyo financiero a empresas y emprendedores innovadores.
- Gestión, promoción y defensa de los intereses nacionales en los programas y foros nacionales e internacionales de I+D+i.
- Impulso de cambios legales y socioeconómicos favorables a la innovación tecnológica.

Por último la urgencia de actuación para la mejora ambiental es cada día más evidente y necesaria. En el actual contexto global de los procesos de producción y consumo, la mejora de la ecoeficiencia de los procesos, productos y servicios es uno de los campos imprescindibles de actuación, es una necesidad social y también una oportunidad empresarial.

Corresponde a las administraciones como es el caso del CDTI promover el impulso de las medidas de ecodiseño o diseño para el Medio Ambiente, para de este modo salvaguardar los aspectos medioambientales en la I+D+i orientada a nuevos productos y procesos.

Para su desarrollo y para lograr un avance real en el difícil camino de la sostenibilidad evitando aparentes mejoras, la mejor herramienta es la metodología de Ecodiseño, que según la Directiva 2005/32/CE se define como “Integración de los aspectos medioambientales en el diseño del producto con el fin de mejorar su comportamiento medioambiental a lo largo de todo su ciclo de vida”.

Sólo el análisis completo del ciclo de vida, permite una visión completa de los aspectos ambientales del producto o proceso, y una visión más precisa de las verdaderas ventajas y desventajas ambientales del producto/proceso. Así, el Ecodiseño puede ser considerado la herramienta que permite integrar la variable medioambiental al diseñar un producto o proceso, con una visión bastante más precisa que las precedentes de los aspectos e impactos ambientales de cualquier producto o proceso.

En definitiva, el contexto de trabajo del autor de la tesis, sus relaciones profesionales, intereses propios y los valores y objetivos generales del organismo donde realiza su actividad han sido muy importantes para poder realizar el presente trabajo. También el contemplar el I+D desde el lado del ejecutor me ha permitido conocer las dificultades que entraña lo que a menudo es una sección en una memoria.

2. Objetivos de este trabajo de tesis

Los objetivos de esta tesis se derivan del contexto que ha sido presentado en la motivación. Como idea principal, se desarrollará una metodología de proceso de Taladrado por Fricción, y posterior Roscado por Laminación, en uniones de chapas de acero y aluminio, para lo cual se van a realizar una serie de ensayos sistemáticos que serán monitorizados y a partir de los cuales podrán obtenerse parámetros óptimos para ambos procesos. Es decir, es un trabajo en la línea de uniones de materiales disimilares.

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 y soldadura.

En el *Friction Drilling*, se utilizará una herramienta cónica de metal duro en contacto con el material, provocando su reblandecimiento por el giro y la fricción de la punta, y facilitando la generación de agujeros que se podrán roscar posteriormente gracias a la copa generada, sin cortar el material ni generar viruta, únicamente por deformación del material.

El taladrado por fricción es un proceso 'no convencional' de generación de agujeros en chapas. Una de las características de este proceso es que la herramienta rotativa carece de filos de corte, estando su geometría definida básicamente por dos secciones distintas: una superficie cónica y otra cilíndrica. El proceso emplea el calor generado por la fricción entre la parte cónica de la herramienta y la pieza, lo que provoca un ablandamiento del material permitiendo penetrar en él y generando a su vez una rebaba en la salida del agujero. La parte cilíndrica es la encargada de definir el diámetro final del agujero.

El proceso presenta muchas ventajas frente a procesos tradicionales, pues en un proceso de taladrado tradicional se hace necesario el empleo de refrigeración con el fin de reducir la fricción y el calor generado, justo lo contrario de lo que pretende esta técnica. Por lo tanto al no aplicar refrigeración se convierte en un proceso limpio. Además, la rebaba generada es susceptible de ser roscada, lo que

permite sustituir el empleo de tuercas soldadas. No hay casi viruta o elementos de desecho.

Esta aplicación cobra gran interés cuando se trata de hacer agujeros roscados en piezas tubulares o con geometrías complejas que no permitan un fácil acceso. La mayor parte del material de la pieza en contacto con la herramienta pasa a formar parte de la rebaba generada en la parte inferior de la pieza y otra pequeña parte del material genera rebaba en la parte superior. Existen dos opciones cuando se trata de la rebaba superior, una posibilidad es que sea aplastada por el anillo de la herramienta y ese material permanezca en la pieza, lo que implica que es un proceso sin generación de viruta. La otra posibilidad es que ese material sea eliminado de la pieza; para ello la herramienta está dotada de un rompevirutas entre el anillo y la zona cilíndrica encargada de definir el diámetro del agujero. Pero como la cantidad de material eliminado es escasa sigue siendo un proceso limpio sin generación de viruta. Por otra parte la vida útil de la herramienta es prolongada, ya que carece de filos de corte que se desgasten.

Por lo que respecta al roscado por laminación, podría tratarse de una auténtica alternativa en lo referente a la reducción del tiempo de mecanización y de los costes. De este modo podrían fabricarse roscas en la copa de material deformado en frío sin formación de virutas, lo cual aumenta la seguridad del proceso durante la producción. El roscado por laminación ha sido trabajo previo del grupo de la UPV/EHU, en el que la participación ha sido a nivel de elegir una buena combinación de parámetros.

Se va a analizar también la calidad de la unión atendiendo a su comportamiento mecánico y a su comportamiento en ambientes corrosivos. También, se realizará una comparación de su impacto ambiental frente al del taladrado convencional utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta.

Como objetivo final, se pretende obtener un proceso de unión de materiales disimilares sin tuerca ni arranque de material, ofreciendo una mayor calidad y una alternativa menos contaminante que los procesos utilizados hasta el momento.

En este trabajo, se intenta enfocar con rigor científico, un problema de interés industrial en el ámbito de la ingeniería de los procesos de fabricación, conjugando

Capítulo I. Introducción

los resultados científicos con los resultados de explotación industrial. El interés empresarial en la optimización de procesos está hoy en día fuera de toda duda, dada la necesidad perentoria de mejora de éstos sin perjuicio del coste, de los tiempos de proceso y de la sostenibilidad de los mismos.

Como resultado de todo ello, se detallan los objetivos de partida de este trabajo:

- Desarrollar un conocimiento profundo sobre los fundamentos del Taladrado por Fricción y Roscado por Laminación abarcando distintos ámbitos de conocimiento, como los parámetros de proceso y sensibilidad de mismos, los recubrimientos y geometría de la punta, metalografía de la unión, corrosión y ciclo de vida. Se estudiará cómo afecta la elección de los parámetros a la calidad del agujero roscado, para ello se realizarán varias series de ensayos experimentales.
- Se identificarán posibles problemas y se propondrán soluciones que se ajusten al resultado buscado. Entre las posibles problemáticas apuntar la posible adhesión del aluminio a la herramienta, y separación de las chapas a unir debido a la aparición de una rebaba en el espacio entre chapas, y por último la corrosión galvánica debida al contacto entre dos tipos de metales distintos.
- Definición de condiciones de proceso mejoradas y parámetros óptimos para el proceso de Taladrado por Fricción y Roscado por Laminación en uniones aluminio-acero. 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 entre chapas.
- Desarrollar una metodología optimizada de proceso para el Taladrado por Fricción y Roscado por Laminación en uniones aluminio-acero. Hasta la fecha los estudios se han centrado en materiales similares [Engbert et al., 2011], como aluminio.
- Validación de las nuevas condiciones de proceso mediante ensayos con monitorización de parámetros, para aleaciones de aluminio y aceros empleados habitualmente en la industria (AISI 1045 y Al 5754).

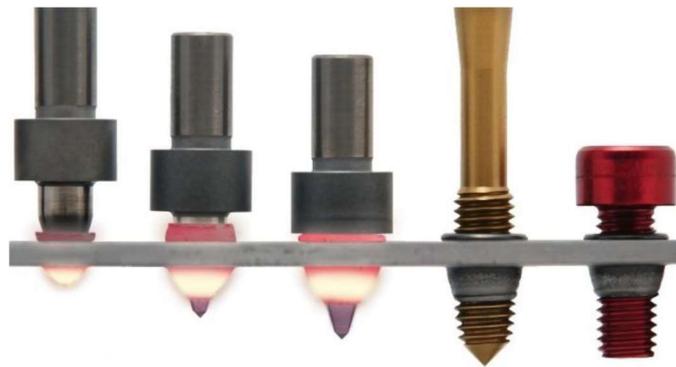


Fig. I.1. Taladrado por Fricción y roscado por laminación (fuente Friction Drilling©).

Respecto al grado de alcance de los objetivos de esta tesis, podría situarse en un MRL 2-4, es decir, hacer una prueba de un método original y validar la prueba de concepto, analizando su viabilidad. En la escala de madurez de tecnología (MRL) 1 implica una buena idea y 9 es un paso antes de la industrialización. La escala se muestra en la Fig. I.2, en donde se puede ver el denominado Valle de la Muerte, en los niveles 6-7. Esta tesis no trata de llegar a resolver todos los aspectos de cada nivel, sino abrir una línea de trabajo viable.

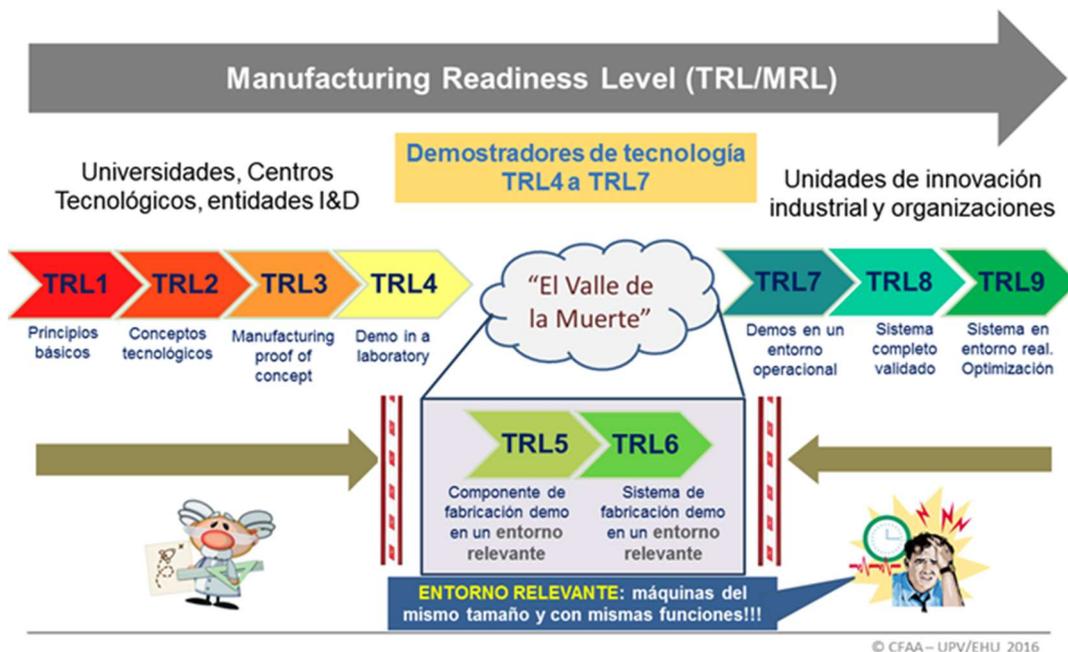


Fig. I.2 La escala MRL en fabricación.

Evidentemente desde un nivel 2 a un nivel 9 los riesgos de que una tecnología no supere pruebas de viabilidad son muchos. Pero una tesis doctoral puede

Capítulo I. Introducción

admitirlos, estando ubicada en los niveles 3-4, donde se debe poder vislumbrar una viabilidad para futuros proyectos de desarrollo.

A modo de disculpa, se quedarán en este trabajo líneas abiertas, muchas de ellas de valor en el entorno nacional, como la unión de aceros de varias composiciones o con aluminio en carrocería (Fig. 1.3).

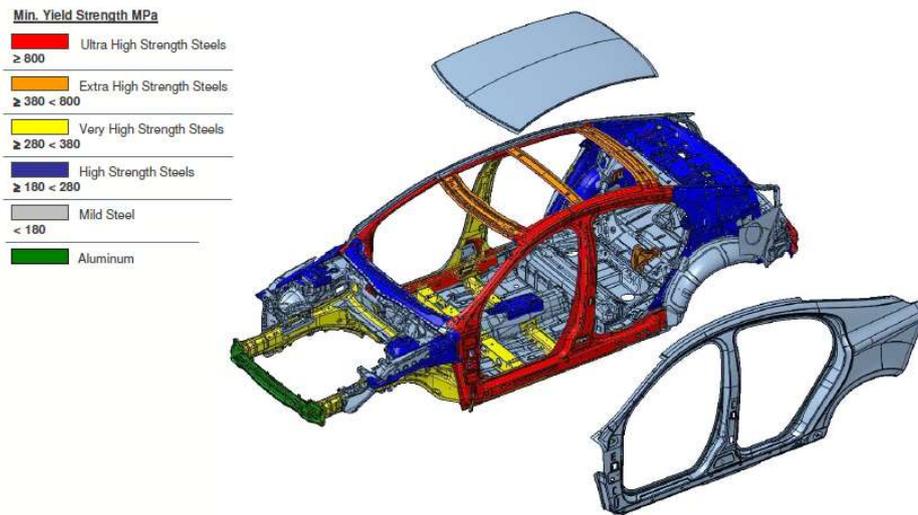


Fig. 1.3. Materiales en carrocerías de automóviles.

La automoción constituye el segundo mercado del acero después de la construcción y obra pública, que representa del 55 al 70% del peso del automóvil. Hoy en día, los aceros avanzados de alta resistencia permiten una producción a menor coste de vehículos más ligeros, principalmente debido a las ventajas que presenta con respecto a otras aleaciones ligeras. El acero tiene una buena embutibilidad en elementos de carrocería, presenta una buena soldabilidad en comparación con el aluminio y es fácilmente reciclable. En los últimos años en el sector automovilístico se están dando importantes cambios en cuanto a las exigencias a los nuevos modelos: más seguridad en las pruebas de impacto pero con un menor peso para conseguir una reducción del consumo y en consecuencia menor contaminación. El proceso presentado en esta tesis podría ser aplicable a distintos sectores como el automovilístico, calderería, sector eléctrico, etc.

Pero siempre que se comienza una etapa del viaje, sigue adelante el camino.

3. Organización de la memoria

El trabajo presentado ha sido organizado en una serie de capítulos que se describen a continuación. Esta memoria se organiza en cinco capítulos.

En el capítulo I, se abordan los antecedentes y el contexto donde se realiza este trabajo de investigación, indicando cuales son las tendencias generales y condiciones que explican el porqué de que esta tesis doctoral se haya realizado. También se detallan, los objetivos perseguidos con la realización de la misma.

En el capítulo II, se analiza el estado del arte de las distintas tecnologías de unión, y de las disciplinas tecnológicas involucradas en las técnicas de Taladrado por Fricción y Roscado por Laminación, así como los trabajos relacionados con ambas tecnologías.

El capítulo III, se presentan los resultados de los experimentos realizados de aproximación, y pruebas sistemáticas de caracterización de los procesos involucrados, siempre pensando en avanzar sobre pasos que consoliden las diferentes etapas del proceso global, es decir, taladrado por fricción, roscado por laminación, análisis mecánico y de corrosión galvánica básicos, análisis metalográfico y de inspección por rayos X (RX), análisis de ciclo de vida (ACV) y estudio del posible impacto ambiental, así como de otros considerandos.

En el capítulo IV, se definen las principales conclusiones de la investigación, en cuanto a parámetros, datos, y condiciones óptimas de operación. En este capítulo se plantea el análisis de los resultados obtenidos así como las principales conclusiones a nivel científico-tecnológico de la tesis.

En el capítulo V, se da cuenta de las principales aportaciones y contribuciones realizadas en esta investigación con respecto al estado del arte sobre el proceso de unión en cuestión, así como líneas abiertas para su continuación a futuro para poder avanzar en el MRL.

Por último, se recopila la bibliografía utilizada a lo largo de estos años de trabajo, dado que siempre el estado inicial de este trabajo de investigación ha sido el esfuerzo previo de otros investigadores y grupos.

Capítulo 2. Estado del Arte

Capítulo II. Estado del Arte

A fecha de 2017, la unión de materiales disimilares resulta un reto y una necesidad en varios campos de la técnica, con múltiples acercamientos, posibilidades y por tanto, con un esfuerzo de desarrollo hasta ahora intenso. Desde la época más antigua en la Historia del Hombre, donde se unía una piedra afilada de forma rudimentaria a un mango de madera, hasta las modernas uniones entre largueros de metal y paneles de composites de las aeronaves, el camino ha sido largo.

El mundo que el hombre ha construido se conforma claramente de uniones de diferentes materiales. Por tanto sería pretencioso dar el estado del arte global y exhaustivo de esta necesidad de la industria y la vida del ser humano. Pero sí merece la pena describir al menos someramente aquellos aspectos del estado del arte directamente relacionados con este trabajo de tesis.

1. Descripción general de métodos en la industria. Fundamentos y tecnologías

En la actualidad, la necesidad de realización de uniones entre componentes de acero y aluminio está muy extendida entre los diversos sectores industriales (tales como calderería, automoción, náutico, mobiliario, etc.). Esto se debe a que el aluminio es un material que presenta grandes ventajas en combinación con el acero. El acero puede muy bien constituir el esqueleto o estructura, mientras el aluminio puede suponer la piel o cobertura de un sistema estructural.

Sin embargo, no todos los métodos de unión son adecuados, pues las propiedades del aluminio (bajo punto de fusión, dúctil y maleable) suponen ciertas dificultades y restricciones para esta unión entre materiales disimilares.

Además, existe una necesidad urgente de aumentar la productividad debido a un incremento de la competitividad entre las empresas, lo que hace que no sólo se busque que la unión sea de calidad, sino que se realice en el menor tiempo de proceso posible.

Por último, también hay un gran aumento en la concienciación de la sociedad en lo que respecta al impacto ambiental que pudiera 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 para la ejecución de estas uniones.

2. Identificación de las alternativas de uniones

A continuación, se describen los métodos convencionales más utilizados hasta el momento a la hora de realizar uniones entre diferentes materiales, desde las uniones mecánicas a las soldaduras:

Uniones atornilladas

Son las uniones más comunes que existen a día de hoy en todos los campos de la ingeniería [Barnes y Pashby, 2000]. Una de sus ventajas es que podría llegar a desmontarse, y ser removible. Hay 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 conformarán 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 sea limitado para el operario o máquina que deba atornillarlo, resultando demasiado complejo, e incluso a veces imposible.

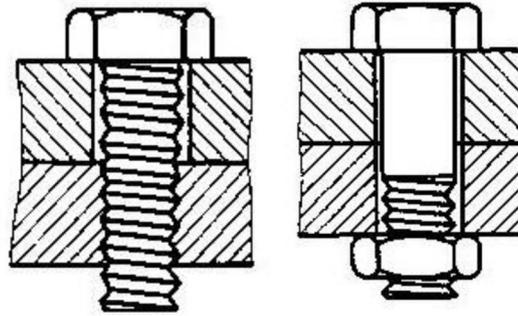


Fig. II.1. Uniones mecánicas atornilladas.

Como ventajas de esta unión, se pueden citar:

- Se pueden desmontar fácilmente, en muchos de los casos.
- Los costes 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 si se realiza bien los procesos de atornillamiento.
- Pueden combinarse para generar patrones de unión que en su conjunto realicen funciones complejas y aguanten cargas combinadas y complejas.

Y como inconvenientes, pueden citarse los siguientes:

- Los tornillos de pequeño diámetro se pueden romper si se aprietan con demasiado par de apriete.
- 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, dado que conviven varios elementos metálicos, chapas, tornillos, arandelas, tuercas.

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 y aeronáutica.

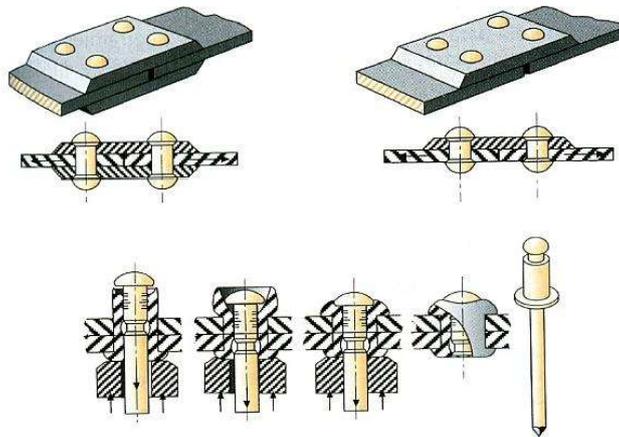


Figura II.2. Uniones remachadas (fuente, IMH Elgoibar).

Ventajas de esta unión son:

- El proceso de remachado es más barato que otros de misma naturaleza.
- 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, de hecho es una línea de desarrollo actual de la fabricación de aeroestructuras.
- 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.

Y los 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.

Entre los ejemplos más clásicos, la torre Eiffel, construida en dos meses y medio. De los 2.500.000 remaches que hay en la torre, solo 1.050.846 se colocaron en obra. El resto fueron añadidos posteriormente. El Airbus 380 lleva más de un millón de remaches.

Soldadura

La soldadura es un proceso para la unión de piezas metálicas de igual o distinta naturaleza mediante una unión íntima entre ellos a nivel molecular en la zona de la unión, en la mayoría de los casos con aportación de calor, con o sin aplicación de presión, y con o sin empleo de material de aportación, pudiendo tener éste 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.

Capítulo II. Estado del arte

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 detallan a continuación:

Soldadura heterogénea: Se efectúa entre materiales de distinta naturaleza con o sin metal de aportación; o entre metales iguales, pero con distinto material de aportación. Dentro de esta categoría se distinguen:

- 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.

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 posibilidades:
 - 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: Proceso 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 las necesidades planteadas.
 - 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).

Como ventajas se pueden citar:

- El tiempo de preparación es menor que para uniones atornilladas.
- Las uniones prácticamente no se deforman y son estancan.
- 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.

Capítulo II. Estado del arte

- Se pueden unir todo tipo de materiales, de la misma o de distinta naturaleza, eligiendo bien el tipo de soldadura.

Como inconvenientes:

- Puede dañarse por altas temperaturas.
- Los operarios deben tener una alta cualificación.
- Alto coste de la mano de obra.
- Alto consumo de energía.
- La unión es permanente, lo cual en muchos casos no es conveniente.
- Los defectos de calidad son difíciles de detectar. En muchas ocasiones se requieren tecnologías de inspección no destructivas como los líquidos penetrantes, rayos X o ultrasonidos.

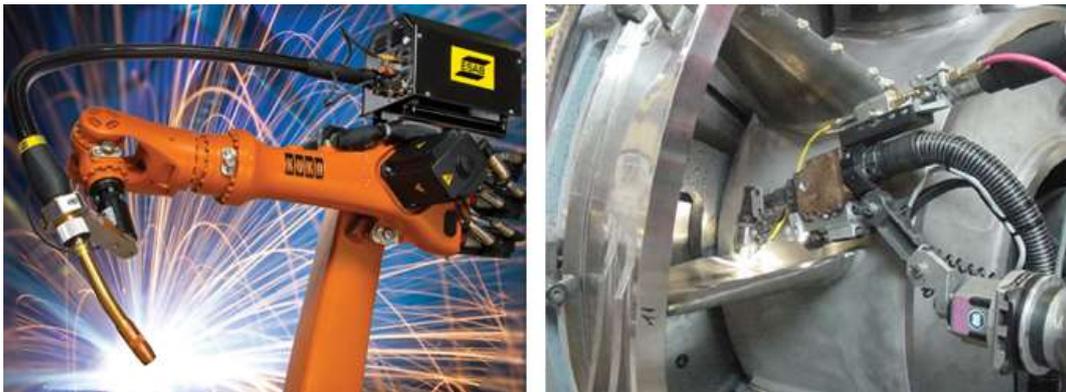


Fig. II.3. Soldadura robotizada, a la derecha detalle de soldadura en una pieza de una turbina aeronáutica.

La soldadura es un proceso de muy baja repetibilidad, se suele decir “se fabrican todas iguales pero salen todas diferentes”. Este es un problema en series de producción.

FSW (Friction Stir Welding)

La FSW (Soldadura por Fricción-Batimiento) es un proceso de soldadura en estado sólido en el que una herramienta no consumible rota a lo largo de la interfaz existente entre los 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 [Quiao, 2016]. (Fig.II.4). El símil habitual es la mezcla de dos pinturas muy espesas a lo largo de una línea por batimiento, y puede emplearse en materiales disimilares con ciertas características compatibles [Shanjeevi et al., 2016].

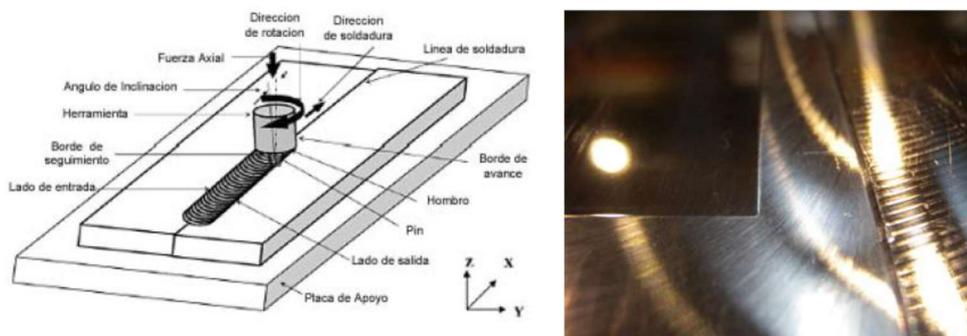


Fig. II.4. Ejemplo de soldaduras por FSW. Una parte se ha bruñido para mejorar las características del cordón de unión.

La junta posee una composición característica, zona denominada *nugget* (Fig. II.5), que se ha buscado mejorar en características por distintas técnicas, por ejemplo, bruñido con bola.

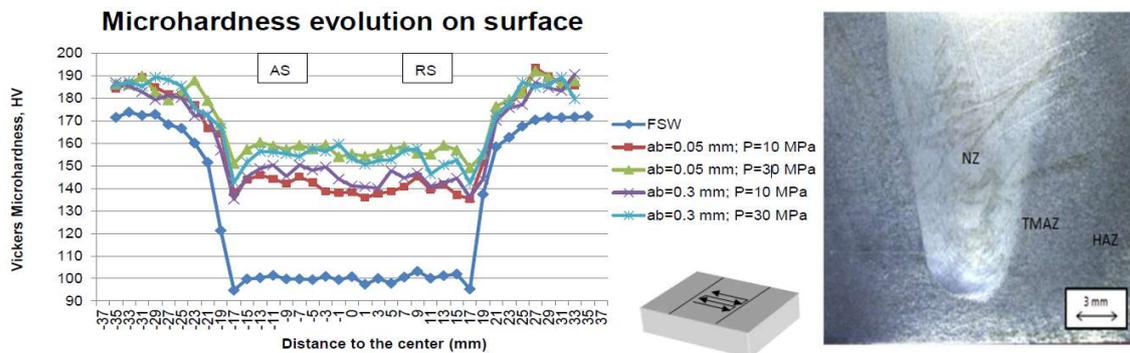


Fig. II.5. Variación de durezas en el nugget, y mejora con bruñido, tras pruebas en la UPV/EHU. Derecha: Nugget o zona de unión.

Capítulo II. Estado del arte

Las juntas de FSW pueden mejorar aplicando varias tecnologías, como el bruñido, pulido o tratamientos térmicos, como muestra la Fig. II.5, en este caso en un estudio realizado en la UPV/EHU sobre aleaciones Al-Li.

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 [Liu et al., 2014].

Como ventajas, citar:

- Buenas propiedades mecánicas de la zona afectada.
- Fácilmente automatizable. De hecho existen ya máquinas diseñadas para este fin, o se pueden utilizar máquinas herramientas convencionales tipo fresadora.
- 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, de naturaleza metálica, de diferente punto de fusión.

Y como inconvenientes:

- Alto coste de la maquinaria.
- Operarios altamente cualificados.
- 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. Este tema es similar a las soldaduras térmicas.

Soldadura 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:

- 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.
- 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.

Como ventajas, citar:

- 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 e incluso espesores diferentes.
- Alta calidad de la unión.
- Muy rápida y fácilmente automatizable.

Como inconvenientes, citar:

- 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.

3. Aspectos de comportamiento de las uniones

Una unión mecánica o por soldadura es una interrupción en el material, por lo que su resistencia siempre es menor que la pieza equivalente sin uniones, denominada monolítica.

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 [Kim y Cho, 2014], a una combinación de ambas o a flexión (Fig. II.6).

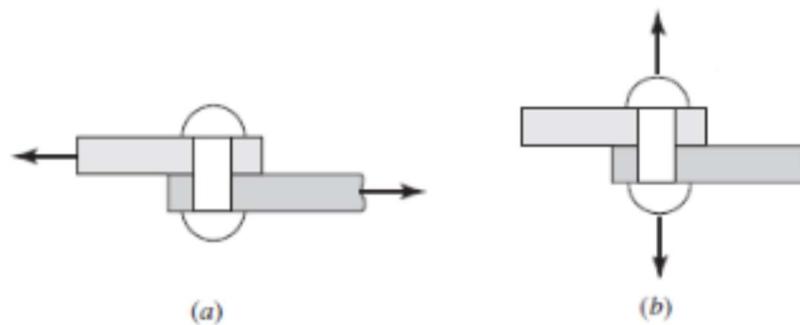


Fig. II.6. Cargas transversales (a) y axiales (b).

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

- Fallo 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.

- Fallo por cortadura, este esfuerzo se produce cuando, en el vástago, las chapas unidas tratan de deslizar 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.

A continuación en la Fig. II.7 se representan gráficamente.

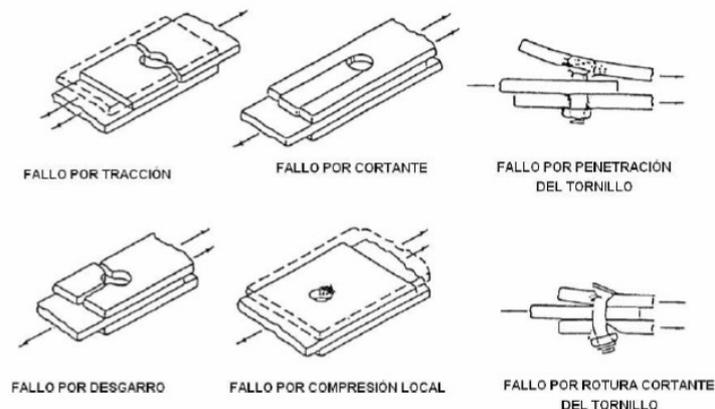


Fig. II.7. Modos de fallo en una unión atornillada.

Este aspecto se estudiará en este trabajo y se presenta en el capítulo 3.

Comportamiento a fatiga

La fatiga es el mecanismo mediante el cual aparecen y se incrementan las fisuras 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 (Fig. II.8).

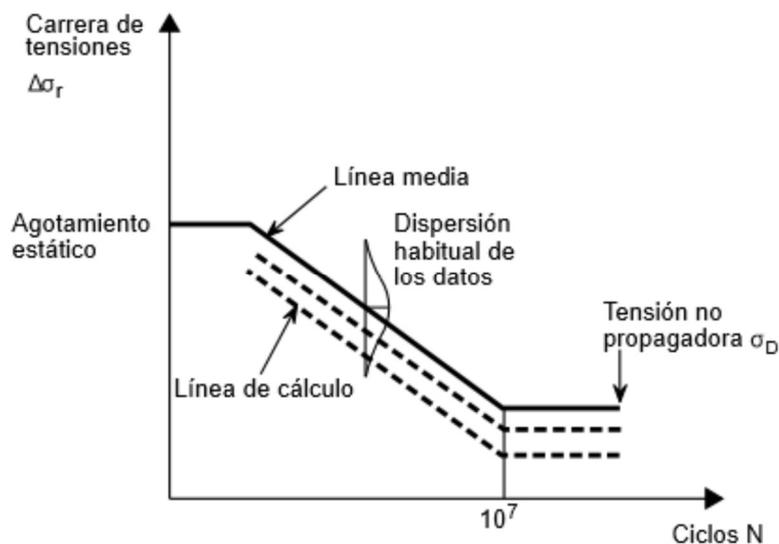


Fig. II.8. Curva de resistencia a la fatiga (S-N) para ensayos con cargas de amplitud constante.

Las presencias de discontinuidades geométricas ocasionan concentraciones de tensiones que aumentan localmente e influyen sobre la resistencia a la fatiga [Sun et al., 2007]. 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. El fallo de la propia rosca también debe ser objeto de consideración [Wittke et al., 2015].

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. El comportamiento a la fatiga puede mejorar si se aplican tratamientos mecánicos que aseguren la compresión y tensiones residuales de compresión [Akkurt, 2011] [Avilés et al., 2013].

Corrosión galvánica

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

Esta interacción tiene un carácter complejo, pero asociada a la naturaleza metálica de muchos componentes. En el caso particular de los metales, la prevención y el mantenimiento de los elementos afectados supone aproximadamente un 5% del Producto Interior Bruto, dato que justifica la atención que se presta a este fenómeno nocivo en esta tesis. Los problemas de degradación por corrosión son críticos en muchos sistemas estructurales.

Capítulo II. Estado del arte

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 preocupante es la corrosión galvánica [Calabrese et al., 2015], 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:

- A: 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.

- B: 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.

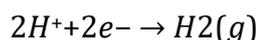
Existen varias posibilidades de reducción, se pueden reducir los iones de hidrógeno o de oxígeno, o se puede dar la reducción de los iones metálicos que estén presentes en la disolución. Así existen dos tipos:

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.

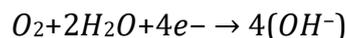
- i. Sin oxígeno disuelto: Los iones H^{+} se reducen y de la reacción resulta gas de hidrógeno.



- 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:



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. Por este motivo muchos experimentos tratan de reproducir este ambiente salado.

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 (ver Fig II.9) que determina el grado de nobleza de los metales según el potencial del electrodo. Por criterio consuetudinario, 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 Fig. II.9. 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 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

Fig. II.9. Serie fem estándar.

Esta tabla mostrada en la figura 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 (Fig. II.10). 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.

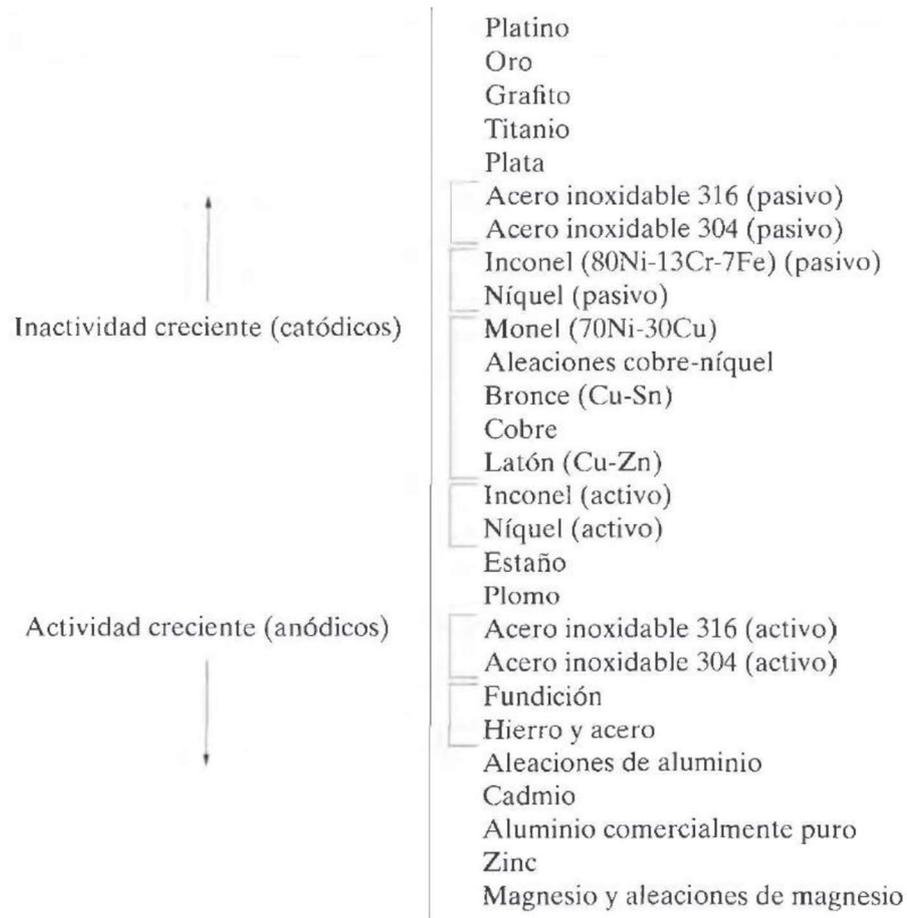


Fig. II.10. Serie galvánica.

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 (Fig. II.11):

Capítulo II. Estado del arte

extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho).



Fig. II.11. 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.

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. 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.

Un aspecto destacable en la tecnología actual es eliminar los fluidos de corte, taladrina, responsables de más de 100 enfermedades y de gran impacto en el medio ambiente.

4. Criterios de selección de uniones

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

PRODUCTIVIDAD: En muchos casos el criterio más importante será 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

Capítulo II. Estado del arte

número de uniones que podamos hacer por jornada y, por lo tanto, mayor será el beneficio que se obtenga.

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

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

POSIBILIDAD DE AUTOMATIZAR: 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.

SOSTENIBILIDAD: Otro criterio a tener en cuenta será el del impacto medioambiental que tenga el proceso de realización de 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 muy en cuenta las empresas.

En general la realización de uniones es muy dependiente de la aplicación, así no tiene nada que ver la construcción naval, en astillero, la aeronáutica, o las estructuras civiles, o el mobiliario de oficina, por dar ejemplos. Cada aplicación obliga a soluciones totalmente distintas.

Y dentro de este mundo, en muchos casos las uniones se podrán realizar sobre chapas o placas no especialmente gruesas, donde el clásico acercamiento es el atornillamiento. Este nicho de aplicación suele denominarse calderería fina, y es donde esta tesis podría entenderse. Se trata de aportar otra posibilidad viable, no de eliminar otras formas de unión.

4.1 Criterios y solución elegida en esta tesis

Visto lo anterior, de entre todos los métodos expuestos, el taladrado por fricción es el que mejor responde a las necesidades expuestas, ya que es uno de los métodos de unión que se pueden ejecutar más rápidamente, al existir 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 en una sola operación, si bien es cierto que también podría realizarse en dos etapas, primero Taladrado por Fricción y a continuación Roscado por Laminación.

Es un método que permite 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 la misma máquina) 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.

Como resumen de este apartado, la posibilidad de emplear métodos de taladrado por fricción y roscado por laminación se sitúa dentro de las opciones viables de tecnología de unión.

5. Unión de chapas por procesos de taladrado de fricción

En este apartado se procede a la revisión de los procesos e investigaciones actuales en Taladrado por Fricción (*Friction Drilling*). El *Friction Drilling* es un método no convencional de generación de agujeros en piezas metálicas de pequeño espesor, como tubos y chapas. 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 ya en 1923 por el francés Jean Claude de Valière, se encuentra todavía en desarrollo.

5.1. Fundamentos y aplicaciones

Durante el proceso la herramienta presiona contra la 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 [Miller et al., 2006]. El material de pieza de trabajo fluye en la dirección axial y radial [Head et al., 1984], y luego formará una copa (Fig. II.12) 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.

Este proceso resulta de gran utilidad en operaciones orientadas a la generación de agujeros roscados en piezas de poco espesor, tubulares o de geometrías que tengan difícil acceso a lugares en los que se deba mecanizar un agujero.

El Taladrado por Fricción resulta una opción más económica, frente a otros medios convencionales como puede ser un proceso de taladrado con arranque de viruta. Mediante el proceso de Friction Drilling no se genera viruta ni se elimina material [Lee et al., 2009], por lo que se reducen costes, y además, al mecanizar una rosca por laminación en la copa generada, se prescinde del uso de tuercas, lo que también reduce, no solo costes, sino también peso en el conjunto que se esté fabricando, lo que resulta de gran interés en el sector automovilístico.

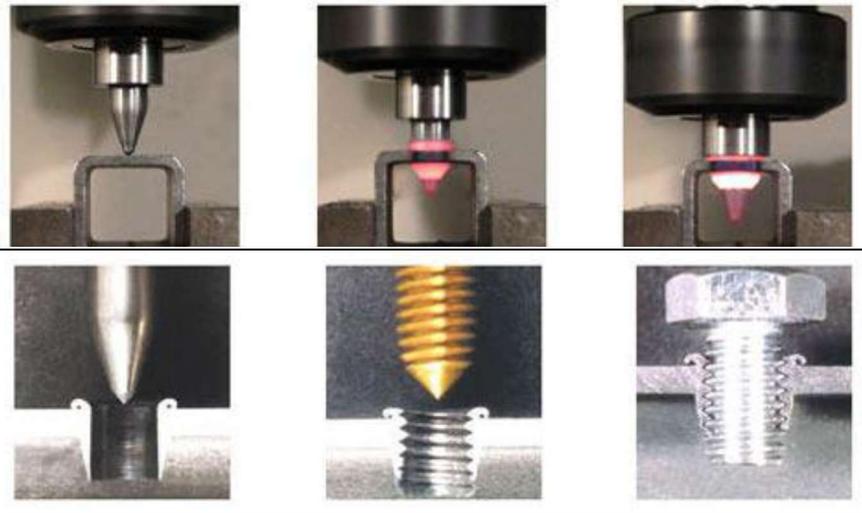
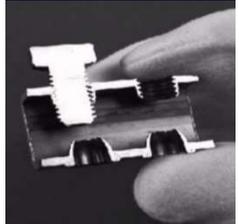


Fig. II.12. Secuencia del proceso de Taladrado por Fricción con roscado por laminación.

Actualmente, el Taladrado por Fricción se está utilizando en multitud de aplicaciones, en sectores como el de automoción, de fabricación de electrodomésticos, mobiliario, equipamientos industriales, y construcción. De hecho existen marcas comerciales de puntas de metal duro para realizar el proceso, como Form drill®, Center drill®, entre otros.

Este proceso, debido a sus características, se ha introducido en varias aplicaciones en el área industrial como: Automoción, Bicicletas, Muebles o Equipos para gimnasia. En las siguientes imágenes se muestran algunas de estas aplicaciones. No obstante en casi todos los casos las uniones serán de aceros con aceros, o aleaciones similares.

Tabla II.1 Aplicaciones del Friction drilling ya en el mercado.

<p>Sistemas de suspensión de vehículos</p> 	<p>Frenos, parte metálica</p> 
<p>Mobiliario</p> 	<p>Estructuras</p> 
<p>Tuberías</p> 	<p>Sistemas estructurales</p> 

5.2. Características del proceso

El sistema de taladrado por fricción no es complejo, y se detalla en esta sección, de forma que se entiendan sus elementos básicos.

Equipo

El Taladrado por Fricción se puede realizar tanto en máquinas-herramienta convencionales como en máquinas de control numérico, siendo esta última opción con la que se optimizan los resultados obtenidos debido a su repetibilidad. Además, la integración del proceso de Friction Drilling en una máquina-herramienta convencional permite que se pueda realizar en la misma también el Roscado por Laminación, lo que evita errores de centrado a la hora de mecanizar la rosca en el agujero previamente realizado. También supone una ventaja en el coste

de adquisición de maquinaria, mantenimiento y mano de obra de operación (un solo operario sería suficiente en vez de dos), así como ahorro de espacio en planta.

Sin embargo los taladros y roscadoras manuales también podrían utilizarse, para serie cortas. Evidentemente en este acercamiento la repetibilidad es baja, y por otra parte el espesor de la chapa debe ser muy reducido dado que la fuerza axial la realiza el operario.



Fig. II.13. Centro de mecanizado con control numérico y roscadora manual.

En investigación, como es el caso de esta tesis, se utilizarán sistemas muy instrumentados, como los indicados en la Fig. II.14. Con todas las variantes, en casi todos los trabajos de investigación se utilizan sistemas similares.

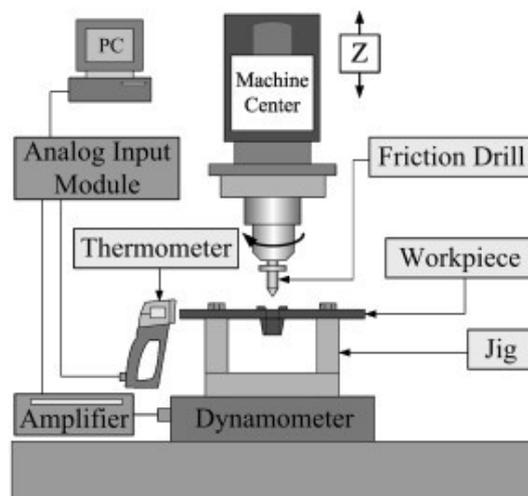


Fig. II.14. Sistema de pruebas de Friction Drilling.

Herramienta

La herramienta utilizada para el mecanizado de agujeros mediante el Friction Drilling tiene una base cilíndrica con geometría cónica en la punta. Con variaciones, todas las puntas siguen esta geometría de forma general.



Fig. II.15. Geometría de la herramienta, derecha imagen de variaciones.

Una broca de Taladrado por Fricción térmica es una herramienta de carburo de tungsteno sinterizado con cobalto (metal duro) maciza provista de un contorno poligonal. El metal duro suele ser de calidad media, tamaño de grano entre 1-3 micrómetros.

Esta punta utilizada con una velocidad de rotación y una fuerza axial altas contra materiales metálicos de pared fina, genera un calor por la fricción extremo que permite plastificar el material de forma localizada en la zona del taladro. La broca atraviesa el material, en pocos segundos, produciendo sin pérdida ninguna de material una copa, buje o casquillo formado por el material de partida. La longitud de este casquillo puede ser entre 3 y 5 veces el espesor original del material. El espesor máximo del material a mecanizar es proporcional al diámetro del agujero producido por la broca de Taladrado por Fricción térmica. El diámetro final del agujero queda definido por la zona cilíndrica de la herramienta.

Existen en el mercado numerosos diámetros y longitudes, para adaptarse a los diferentes casos de aplicación. También existen herramientas que portan de un

rompevirutas que permite eliminar la copa o collar formado al penetrar la herramienta en la superficie superior de la pieza, lo cual puede resultar de interés en aplicaciones donde, por ejemplo, se requieran ciertos resultados estéticos.

Tipos de herramientas

- a. ***Estándar*** Las brocas de Taladrado por Fricción térmica del tipo estándar producen, debido a su reborde liso, una especie de collar en la pieza con el material que fluye en contra del sentido de avance. Este tipo de brocas de Taladrado por Fricción térmica están disponibles en versión corta o larga. La elección de una versión u otra se rige por el espesor del material a trabajar.



Fig. II.16. Broca estándar, plana, REM y especial.

- b. ***Planas*** Las brocas de taladrado por fluencia del tipo PLANA presentan “alas cortantes” que eliminan por desprendimiento de viruta el material que ha fluido en contra del sentido de avance. De este modo se obtiene una superficie plana de la pieza de trabajo.
- c. ***Brocas REM*** La parte cónica de la broca de taladrado por fluencia presenta una o varias aristas cortantes que terminan en la punta de la broca. Este tipo se puede utilizar en superficies galvanizadas o revestidas. Su uso está limitado a aceros de baja aleación y a metales no ferrosos de un espesor máximo de 1,5 mm.
- d. ***Brocas especiales*** Son herramientas de fabricación especial según especificación del cliente para aplicaciones específicas. Algunos ejemplos de productos a medida pueden ser:

Capítulo II. Estado del arte

1. *Super long*: Esta versión se usa la mayoría de veces cuando el espesor del material a taladrar supera el máximo posible para las brocas de Taladrado por Fricción estándar.
2. *Super Short*: Con este tipo de herramienta es posible mecanizar componentes de dimensiones inferiores a la longitud total del mandril de trabajo.
3. *Chaflán/Radio*: La broca puede incorporar un bisel/radio especial para justificar su cierre o avellanado requerido en forma especial.

Cinemática del proceso

El proceso de taladrado por fricción está caracterizado por la fuerza de avance F_f , el momento torsor M_t y la temperatura de contacto T_c . Estos valores dependerán principalmente de las variables de entrada de la herramienta, las características del material y geometría de la pieza [Miller et al., 2005]. 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.

Al comienzo del proceso son necesarias una fuerza axial y una velocidad de rotación relativamente elevadas, con el fin de generar entre la broca de Taladrado por Fricción térmica y la pieza de trabajo el calor de fricción necesario. El material desplazado en primer lugar fluye al comienzo, en contra del sentido de avance, hacia arriba. A medida que aumenta la profundidad de penetración se genera el pasaje propiamente dicho en el sentido de avance. Como regla empírica, puede establecerse que la relación entre el material que fluye hacia arriba y el que lo hace hacia abajo varía entre aprox. 1/3 y 2/3, pero también puede ser menor (por ejemplo, 1/4 a 3/4) en función del diámetro del taladrado y del espesor del material.

En la obtención de la rosca, el macho de roscar se introduce a presión mediante giro a la izquierda/derecha en el cilindro Taladrado por Fricción térmica. El material se deforma plásticamente (conformado en frío) y forma así el diámetro del núcleo dejando la rosca deseada.

Si mantenemos constante el espesor y la velocidad de rotación, al aumentar la fuerza de avance disminuirá el tiempo disponible para que el material adquiera plasticidad [Miller et al., 2007]. En consecuencia, la fuerza de avance aumentará. Sin embargo, cuando se incrementa la velocidad de rotación, manteniendo el avance constante, el valor de las fuerzas de avance y el momento de torsión disminuyen.

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. Por el contrario, cuanto mayor sea el espesor de la pieza a taladrar, mayor será la fuerza de avance, ya que será mayor el volumen de material a desplazar por la herramienta. También afecta el área de contacto cuanto mayor sea esta, mayor será la fuerza de fricción generada y, por lo tanto, mayor será el momento de torsión.

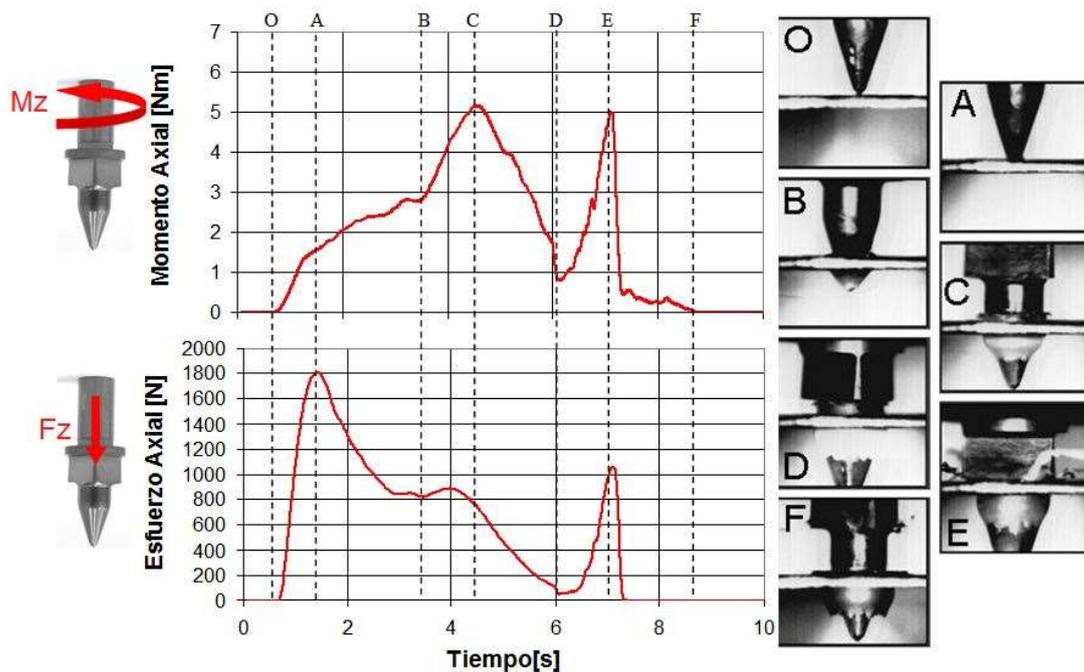


Fig. II.17. Evolución del momento y del esfuerzo en el Taladrado por Fricción [Urbikain, 2016]

Capítulo II. Estado del arte

Tal como se ha comentado, la cinemática del proceso de Taladrado por Fricción se refiere al de las variables de entrada. Ambos esfuerzos son variables y se muestran en la Fig. 2.15 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 base.

Según Weingaertner [Weingaertner, et al., 1996-1997] para cada etapa diferente del proceso las fuentes predominantes de calor varían (Fig. II.18).

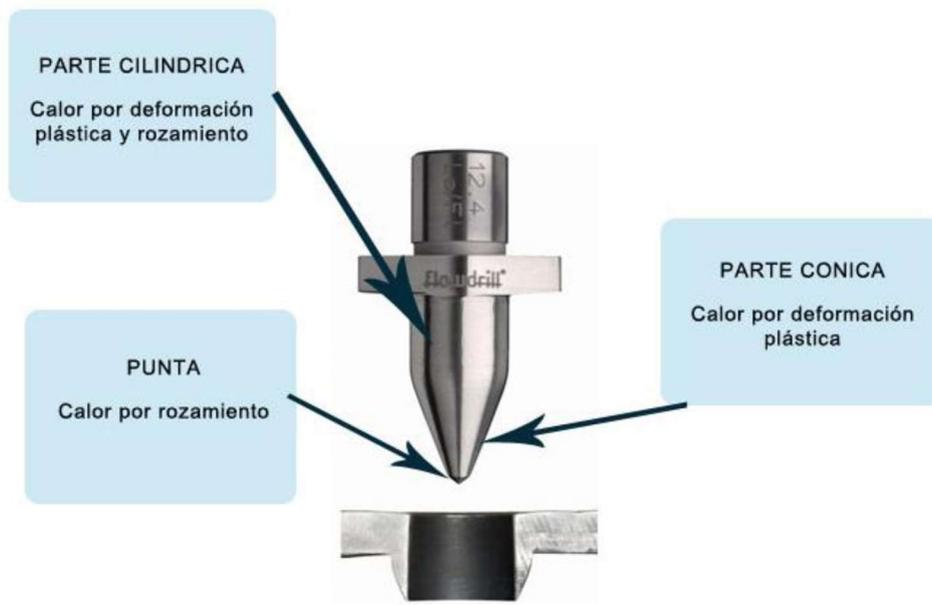


Fig. II.18. Fuentes de calor en función de la zona de la herramienta.

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 termocámaras [Qu y Blau, 2008]. 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. 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 [Kretschmer, 1981], se encontró que la temperatura máxima varía entre 490°C y 890°C, dependiendo de las condiciones de trabajo. 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.

Tiempo del proceso

La determinación del tiempo total de realización del agujero es un factor de gran importancia tecnológica y relevancia económica. 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%. Aún más, el uso de velocidades y avances variables puede llevar a una reducción del 55% del tiempo de proceso con respecto a 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 Fig. II.19.

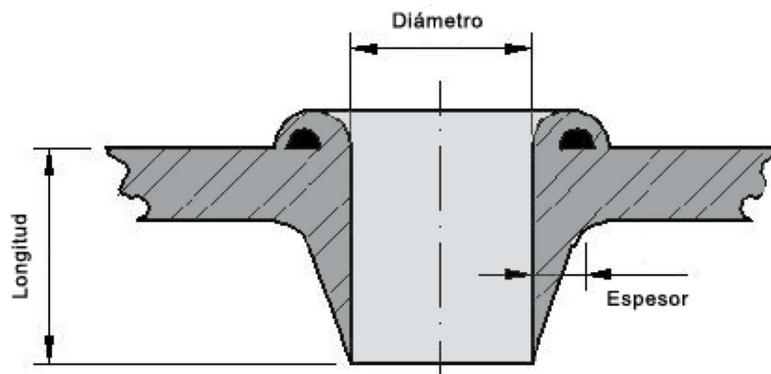


Fig. II.19. Dimensiones principales del agujero.

Cuando se utilizan velocidades constantes de avance, la longitud del agujero no se ve afectada de manera significativa. 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 donde 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 (Fig. II.20) son susceptibles al roscado según la norma DIN 267, ensayo que determina la carga de resistencia máxima media de tracción.

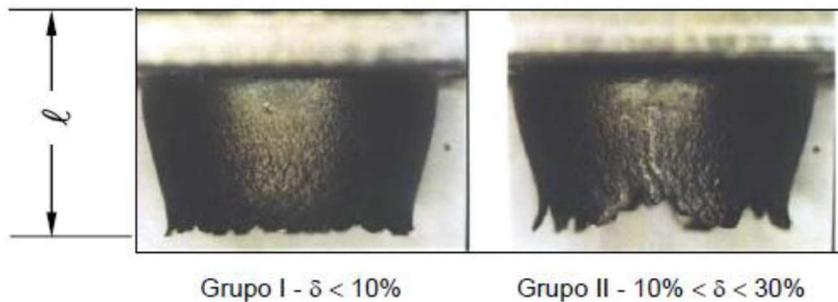


Fig. II.20. Calidades tipo 1 y tipo 2.

Transformaciones microestructurales

Durante el proceso de Taladrado por Fricción, el material base de la pieza a mecanizar sufre diferentes tasas de deformación y temperatura. Debido a esto, la zona afectada puede sufrir una serie de cambios microestructurales. Debido a la presencia de estos gradientes, en la misma copa vamos a tener diferentes zonas de calentamiento y diferentes zonas de durezas, en parte causado por las transformaciones termomecánicas y en parte causado por la acritud.

La deformación plástica en caliente consiste en llevar el material a temperaturas elevadas con el fin de obtener importantes deformaciones. Esto conllevará un cambio en el tamaño de grano y la microestructura del material base. Conocer estos cambios es de vital importancia para conocer y predecir el comportamiento del material una vez conformado.

En apartados posteriores se hablará de los materiales a utilizar durante el proyecto y los cambios microestructurales que se pueden dar en los mismos.

5.3. Roscado por laminación

Históricamente, el roscado por arranque de viruta ha sido el más utilizado de todos los diferentes métodos de roscado que existen, básicamente con macho de corte [Elósegui y López de Lacalle, 2010] o de laminación. Pero en los últimos años el roscado por laminación ha ido alcanzando cada vez más protagonismo. Esto es debido a las múltiples ventajas que este método ofrece frente al roscado por arranque de viruta. Algunas de esas ventajas son la reducción de tiempos de mecanizado, reducción de costes de aplicación, aumento de la seguridad del proceso de producción [Fromentin et al., 2005], mejor calidad final y, algo que está cobrando cada vez más importancia, es un método más limpio.

Al poderse realizar el roscado en la misma máquina que se realiza el Taladrado por Fricción se reduce en tiempo de mecanizado del agujero, así como los costes que conllevan tener varias máquinas para diferentes procesos, cosa que se trata de evitar.

La aplicación más frecuente del taladrado por fricción térmica es la producción de agujeros iniciales para roscas obtenidas por conformado en tubos y chapas de pared fina. La especial geometría de los machos de roscar formadores (no cortadores) produce la fluencia por desplazamiento del material. La rosca se genera por rolado, obteniéndose un perfil de rosca compactado y altamente resistente a las fuerzas de tracción axial.

Es un proceso más seguro porque, a diferencia del roscado tradicional por corte, 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.

Se puede probar que la calidad de las roscas [Ivanov y Kirov., 1997] generadas por el Roscado por Laminación es bastante mayor que la generada por arranque de viruta. Esto se traduce en un incremento de la resistencia de la rosca de entre un 20 y un 50%, ya que, en vez de cortar las fibras de material, se deforma estructura granular del material [Fromentin et al., 2010]. Además, con el roscado por

laminación, se produce el efecto de laminación en frío, lo que mejora el comportamiento a fatiga del material. Este efecto se denomina acritud. Además, al formar la rosca el material se comprime, quedando tensiones internas de compresión, lo que mejora la resistencia de la rosca.

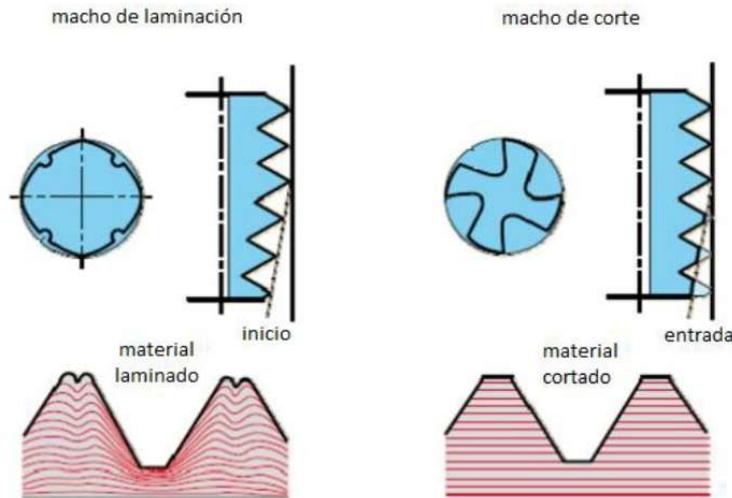
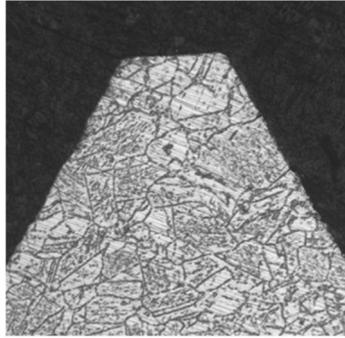
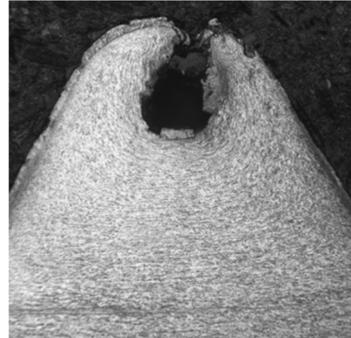


Fig. II.21. Roscado por Laminación frente al Roscado por Arranque de viruta.

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 valle o 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.



Material tras roscado de corte



Estructura de un acero dúctil tras roscado de laminación

Fig. II.22. Roscado por Laminación frente al Roscado por Arranque de viruta: aspecto de los filetes generados.

Durante 2014 se trabajó a fondo en este campo., derivándose el trabajo relativo al rendimiento de machos en aceros forjados en frío para automoción, originándose la publicación, *Wear of Form Taps in Threading of Steel Cold Forged Parts, ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*, [Landeta et al., 2015], donde se ubicó una ventana de parámetros adecuados para este proceso.

Este proceso permite una gran versatilidad en lo que a mecanizar distintos materiales se refiere. Es capaz de mecanizar aceros, aceros inoxidable, aleados, aluminio (y sus aleaciones), cobre (y sus aleaciones). Esto lo convierte en el proceso ideal para mecanizar la copa generada por el proceso de *friction drilling*.

Los machos de laminar se caracterizan porque su sección no es circular, sino que es poligonal, usualmente en forma de pentágono, aunque puede ser de más aristas. Los filetes inferiores tienen un diámetro y una profundidad inferior a los superiores, para que el inicio del mecanizado no sea brusco. El material utilizado para fabricarlos es acero rápido. Además, van recubiertos, usualmente de nitruro de titanio (TiN) aunque también los hay recubiertos con otros tipos de recubrimiento como el nitruro de titanio-aluminio (TiAlN), para mejorar las propiedades del macho (dureza). Conviene lubricarlos a la hora de realizar el mecanizado, para mejorar su comportamiento y evitar la degradación prematura de la herramienta [Fromentin et al., 2010].

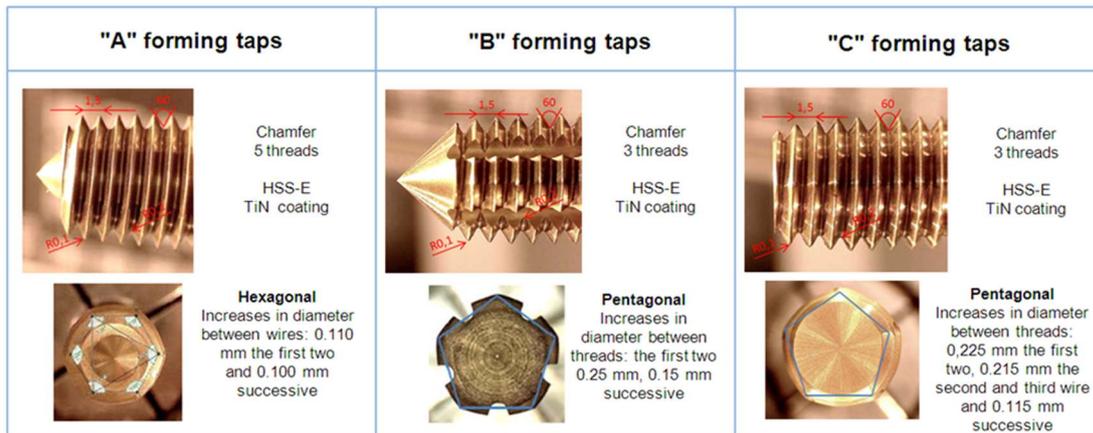


Fig. II.23. Machos probados en 2015 en la UPV/EHU.

Los parámetros que delimitan el proceso son el paso de rosca y la profundidad máxima de roscado. El paso de rosca está limitado por el tipo de material a roscar y sus propiedades (el límite superior de paso de rosca es de unos 3,5 mm). 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.

A pesar de que se pueda utilizar para multitud de materiales, también presenta unas ciertas limitaciones. Debido a que es preciso que el material se pueda deformar en frío, debe cumplir un mínimo de ductilidad (un 5% de resistencia mínima a la ruptura) y no superar una resistencia de aproximadamente unos 1400 N/mm².

En esta tesis no se ha estudiado de forma sistemática el roscado de laminación, sino que se han aceptado estas conclusiones de forma genérica.

6. Consideraciones generales de unión de disimilares

Actualmente, varios sectores industriales demandan nuevas aproximaciones para unir metales de diferente composición [Bansal et al., 2016], o de puntos de fusión muy diferentes, esta diferencia que hace imposible el proceso de soldadura, como es el caso del acero con aluminio.

Capítulo II. Estado del arte

En este caso, la soldadura es imposible con las técnicas tradicionales de soldadura térmica, porque cuando el acero está fundido, las aleaciones de aluminio ya están vaporizándose. Sin embargo, la unión de materiales diferentes es una necesidad porque en algunos casos, las estructuras necesitan una resistencia a altas temperaturas en una zona y una buena resistencia a la corrosión en otra, o tenacidad o resistencia al desgaste se requiere en un punto, mientras que se requiere alta resistencia en otra zona. La unión de un metal rígido y de alta resistencia como el acero con una aleación ligera es una buena solución para aplicaciones en las que el esqueleto estructural podría ser hecho de acero, mientras que las pieles y placas de cerramiento podrían ser de aluminio del grupo 5xxx.

Esta tecnología, usualmente conocida como unión de materiales disimilares (DMJ), se ha asociado con aleaciones metálicas, incluyendo aceros de bajo y medio contenido en carbono y aceros de baja aleación, acero inoxidable, níquel, cobre y aleaciones de aluminio y otros materiales no metálicos. En la década de 1990, hubo trabajos de investigación relacionados con aleaciones de titanio, materiales cerámicos, polímeros y materiales compuestos.

Además, actualmente, en aplicaciones para automoción, la unión de metales y plásticos es realmente un tema candente de investigación [Grujicic et al., 2015] que conduce a diferentes técnicas de fricción o calentamiento aplicadas a diferentes pares de materiales [Jia et al., 2015]: soldadura por fricción en FS50 en Al5083 y soldadura por láser de Al5082 y acero [Kang y Kim, 2015] y diferentes aleaciones de titanio; y otras técnicas como soldadura por ultrasonidos de las uniones de Cu-Al [Huiwen et al., 2015], arco de soldadura para uniones metálicas disimilares Al-Fe, y energía de microondas [Singh et al., 2016] para soldar materiales disimilares.

En el caso de la unión de dos aleaciones metálicas, hay que tener en cuenta varios factores, entre ellos:

- Diferencias en las temperaturas de fusión, que puede llegar a centenares de grados. Se habla de unos 1600°C en aceros a unos 600-800 en aleaciones ligeras.

- Expansión-contracción térmica, desajuste durante el proceso unión y en fase de servicio.
- Limitaciones y restricciones a las tensiones generadas en la unión.¹¹
- Formación de compuestos intermetálicos quebradizos durante la unión, lo que puede conducir a articulaciones muy frágiles.
- Efecto de la velocidad de calentamiento-enfriamiento sobre la microestructura de la unión, que podría afectar la resistencia y precisión de la unión final.
- Problemas de corrosión galvánica.

En particular, la fabricación de agujeros es una tecnología básica en el sector del automóvil y la aeronáutica. Por ejemplo, los fabricantes de vehículos usan tornillos taladradores (FDS©, de la empresa sueca EJOT) además de soldadura de metal inerte (MIG) o remachado de punzón para juntas de chapa de alta resistencia. En el caso de las turbinas de aeronaves, el riesgo y el coste son máximos en las operaciones de realización de agujeros debido a los grandes tiempos de mecanizado acumulados.

Teniendo en cuenta estos requisitos para DMJ, ahora se están considerando las técnicas de fricción porque producen un flujo de metal sin fundir, siendo la base de varias técnicas como la soldadura por fricción (FW, rotacional y lineal), FSW, taladrado por fricción (FD) y roscado por laminación (FT). También se utilizaron técnicas de simulación y aproximaciones numéricas para ayudar a establecer el efecto de varios procesos de taladrado y parámetros de material sobre el resultado de unión atornillada mediante taladrado por fricción, útil para analizar el ensayo de choque del vehículo en su conjunto o incluso en simulaciones fabricación de componentes del vehículo.

El proceso de la roscado por laminación tiene varias ventajas con respecto al taladrado tradicional. En primer lugar, no es necesario enfriamiento. En el proceso de taladrado tradicional, los fluidos refrigerantes son necesarios para reducir la fricción y el calor y para mejorar la evacuación de virutas, justo lo contrario de lo que pretende FD. En segundo lugar, a diferencia de los procesos tradicionales de eliminación de virutas, el mecanismo principal es la fricción, y no se espera ninguna viruta. Por lo tanto, a menudo se define como un proceso "limpio" o

"verde". En el caso de juntas atornilladas, si el agujero necesita ser roscado, la necesidad tuerca también puede evitarse en algunos casos. Esta aplicación es de gran interés cuando se trata de hacer agujeros roscados en tubos o geometrías que no permiten la accesibilidad desde el lado de salida, tales como el caso de los electrodomésticos.

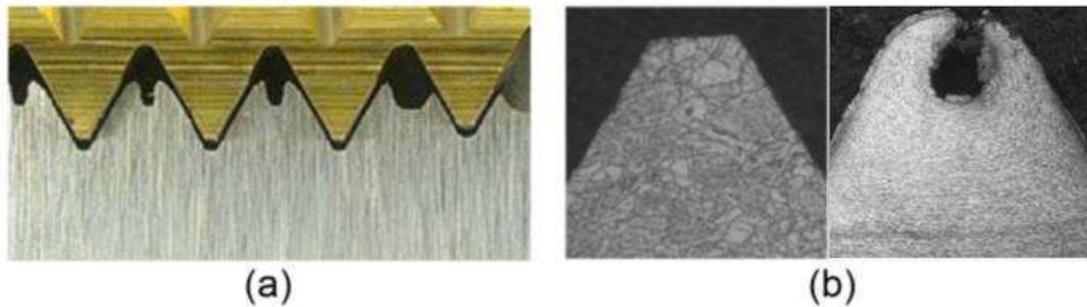


Fig. II.24. (a) Mecanismo de formación de roscado con lóbulo de laminación y (b) microestructura de una rosca producida por corte y otra por laminación.

La mayor parte del material de la pieza de trabajo en contacto con la herramienta de rotación se convierte en la copa generada (véase Fig. II.24) con sólo una pequeña rebaba en el lado de entrada de la herramienta en la pieza. Hay dos opciones cuando se trata de esta rebaba superior. Una posibilidad es que se aplaste entre el anillo de la herramienta y la pieza, lo que implica que el proceso es absolutamente desechable. La otra posibilidad es que el material se retire de la pieza de trabajo por un rompedor de virutas situado alrededor del vástago de la herramienta. Incluso en este último caso, la cantidad de material eliminado es pequeña y se extrae fuera de la pieza de trabajo, y sigue siendo un proceso limpio.

La adherencia del material de trabajo a la herramienta causa condiciones de deslizamiento que tienden a aumentar el trabajo de fricción realizado. La calidad superficial de los agujeros está comprometida por tales condiciones y puede ser un factor en la reducción de la vida de las juntas por fatiga. Ku et al. [Ku et al., 2011] demostraron que el macho de roscar (ángulo) y la velocidad de rotación del husillo eran los parámetros de mecanizado más significativos para la rugosidad interior del agujero.

FD se ha aplicado a diferentes materiales. El efecto del parámetro de herramienta, de la geometría de la herramienta y de los materiales se estudió también en [Ozler y Dogru, 2013] para AISI 1010, mostrando que la temperatura de la zona del agujero aumentó con la combinación de velocidades de taladrado cada vez mayores y velocidades de avance decrecientes.

En el caso de materiales plásticos, el efecto de la geometría de la herramienta de corte fue investigado por Abrao et al. [Abrao et al., 2008] lo que sugiere que la relación entre la fuerza de empuje y la delaminación no es trivial. La posibilidad de hacer un pre-agujero se ofrece en Demir y Ozek [Demir y Ozek, 2014] según la conductividad térmica de las aleaciones de aluminio y una superaleación basada en níquel por FD en [Lee et al., 2007] donde los resultados muestran que una mayor velocidad de rotación y velocidad de avance más rápida permiten lograr una mejor redondez y rugosidad.

Una vez que el agujero está abierto y la copa formada, se extrae la herramienta FD y se realiza el proceso FT. El proceso de roscado está extendido ampliamente en muchas aplicaciones mecánicas, ya que es esencial en el procedimiento para producir uniones atornilladas, la forma más extendida de ensamblaje de componentes mecánicos. Se pueden usar dos métodos para crear el filete de rosca interior, ya sea laminando o cortando. Por lo tanto, en el caso de la laminación, el filete de rosca se genera debido a la deformación de la materia prima en un modo de trabajo en frío, mientras que en el caso de corte, el filete de rosca se obtiene por arranque de viruta como es común en otros procesos de mecanizado.

Este trabajo propone el uso de machos de laminar, conocidos también en la industria como machos de deformación. La deformación en frío en el roscado es interesante debido a varios aspectos, como son los siguientes:

- Es un proceso limpio (sin viruta) ya que los filetes de rosca no se cortan sino se conforman.
- Se producen filetes más fuertes, gracias a las líneas de nivel de iso-tensión que son paralelas al perfil del filete.

Capítulo II. Estado del arte

- Buena calibración del filete: durante el enhebrado, varios lóbulos laminadores de la herramienta actúan sucesivamente y se reduce la posibilidad de producir filetes sobredimensionados.
- Vida de la herramienta mejorada: los machos de laminar pueden durar de 3 a 10 veces más que los machos de corte actuales.

Las ventajas anteriores hacen esta técnica recomendable en muchas aplicaciones, especialmente en operaciones automáticas donde se requieren altos índices de productividad, como es el caso de las aplicaciones automotrices.

Además, su vida útil mejorada hace que sea particularmente interesante para operaciones automatizadas (aproximadamente 10.000 filetes de rosca sin supervisión).

Sin embargo, la tensión permitida para el cálculo de la junta de tornillo cuando se realizan roscas machos de corte es inferior al caso cuando las roscas son hechas por FT. En el caso del macho de roscar, no hay ventaja del endurecimiento por deformación de la superficie del filete interior del agujero. Con los filetes de rosca generados por FT, el material de la pieza de trabajo muestra mayor resistencia debido al efecto de endurecimiento por deformación derivado de la acción de deformación en frío de los machos de laminar. Además, se evitan errores de ángulo de flanco en el caso de macho de deformación porque el material fluye a lo largo del perfil del macho sin ninguna holgura.

Sin embargo, la imperfección en el diámetro menor típico de los filetes de rosca laminados (picos de filete), las llamadas garras o cresta partida, no tiene influencia directa sobre la resistencia del filete de rosca o del tornillo.

Un trabajo destacable es el de [Engbert et al., 2011], que si bien combina ambos procesos, no trata la problemática de los materiales disimilares. En la Fig. II.25 se muestran algunos de sus resultados sobre aluminio.

FT (Form Tapping) es factible en metales ferrosos y no ferrosos si la dureza y la resistencia a la tracción no están por encima de 200HBN y 800MPa, respectivamente. Fortalece el material sobre los flancos del filete, en particular en el área de la raíz de la rosca, y el efecto de endurecimiento tiene una influencia

positiva sobre la resistencia total de los tornillos y las uniones roscadas bajo tensiones dinámicas.

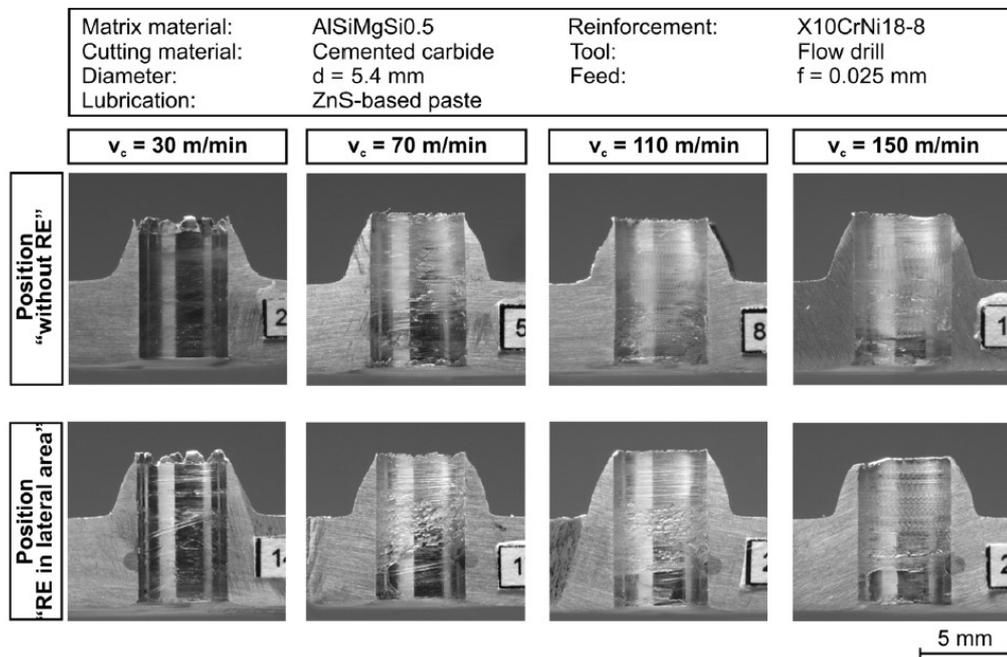


Fig. II.25. Combinación de FD y roscado, pero no en materiales disimilares [Engbert et al., 2011].

Ya sea en los procesos de laminado y bruñido [Avilés, 2013] o en el roscado por fricción, el comportamiento de fatiga se ve afectado directamente por el endurecimiento por deformación. En [Esmaeili et al., 2014] y [Olinda et al., 2012], los autores mostraron que los filetes de rosca de fricción conducen a propiedades mecánicas, de perfil y microestructurales mucho mejores. En un trabajo posterior, los filetes laminados mostraron los mejores resultados y los filetes de rosca cortados las peores propiedades mecánicas que se correlacionaron con las cualidades de relacionadas con la producción y los cambios en la microestructura.

En este trabajo, se presenta una combinación de dos procesos de deformación, FD y FT, para el ensamblaje de piezas metálicas planas disimilares mediante tornillos. Este enfoque simplifica la necesidad de utilizar tuercas y arandelas e incluso el propio perno (para ciertas aplicaciones), convirtiéndose en una junta de cierre sin tuerca. Los procesos fueron estudiados y optimizados midiendo tanto las magnitudes clave del proceso como los especímenes resultantes en las parejas

Capítulo II. Estado del arte

Al5754-AISI 1045 y Al5754-304L en acero inoxidable. Estas parejas fueron probadas en comparación con las juntas convencionales realizadas por perforación tradicional para lograr una unión atornillada con tuerca.

Como resultado, la combinación conduce a uniones con propiedades similares a las producidas por los procesos de corte convencionales pero con un impacto de coste reducido.

Capítulo III. Análisis del Proceso Combinado de Taladrado y Roscado por Fricción

Capítulo III. Análisis del Proceso Combinado de Taladrado y Roscado por Fricción

En este capítulo, se presenta el método desarrollado en esta tesis, que busca avanzar en el conocimiento del proceso estudiando la viabilidad del acercamiento combinado: taladrado por fricción y roscado por laminación.

A modo de resumen, y para observar la metodología seguida, se presenta el flujograma, extensible a otras combinaciones de materiales.

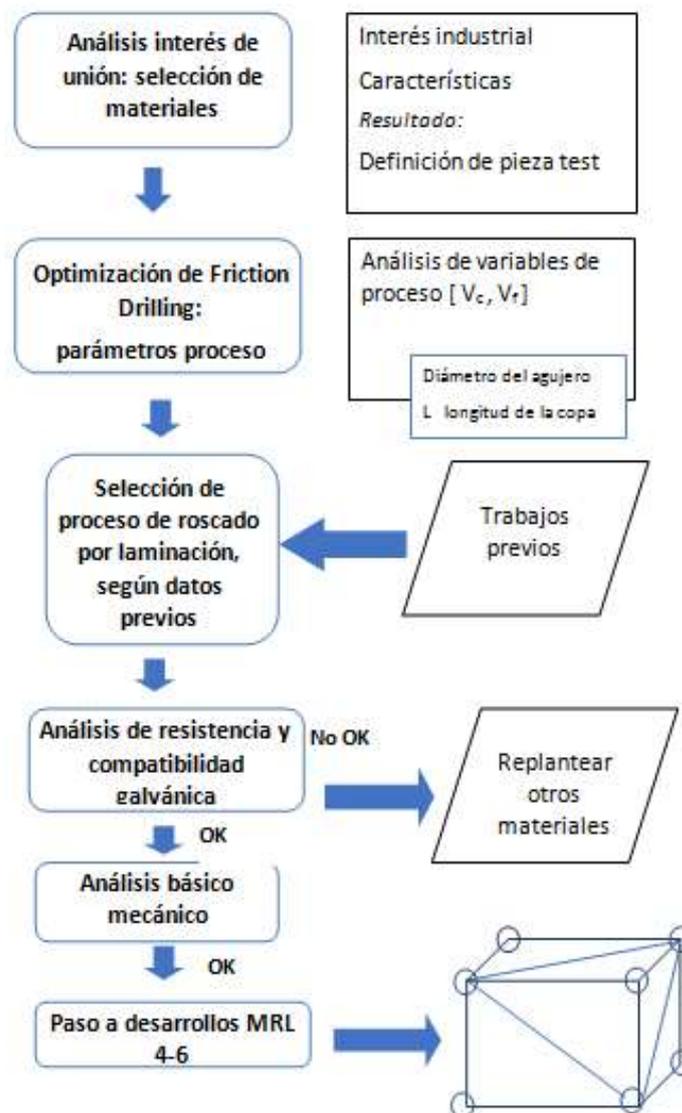


Fig. III.1. Flujograma de la metodología desarrollada.

Este método se ha seguido para un caso concreto, que se define a continuación:

- A- Definir el tipo de unión a realizar, es decir, el par de elementos a unir en la unión.
- B- Optimizar el proceso de fricción drilling, optimizando la velocidad de giro y de avance, en función de tiempos y calidades del agujero y su copa.
- C- Definir el proceso de roscado, definiendo la métrica, según trabajos previos.
- D- Estudiar las características resistentes y galvánicas de la junta, al menos en pruebas que demuestren viabilidad.
- E- A futuro se debiera construir una estructura de prueba y probarla en banco de ensayos, que implicaría un desarrollo de MRL 4-6, la estructura básica pudiera ser un cubo arriostrado en sus caras.

1. Estudio de la sensibilidad de los parámetros de los procesos en los distintos materiales

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

Así, una vez recogida toda la información existente en el estado del arte, en este trabajo 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 podrían emplearse soldaduras en estado plástico (FSW), o de otro tipo como las desarrolladas en esta tesis.

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 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 implicados en el 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.).

A-Preparación de probetas y utillaje

La preparación de las probetas se realizó de forma cuidadosa, en los dos elementos disimilares a unir:

- Acero al carbono AISI 1045: Se eligieron dos tubos de sección cuadrada 30x30 mm y 1,5 mm de espesor. Tienen una longitud de 2000mm, por lo que se cortaron y obtuvieron por cada tubo 8 probetas de 250 mm. Número total de probetas de acero fueron 16, cada una de ellas con posibilidad de varias pruebas.
- Aluminio Al5754-H24 y Al6082: Se cortaron 8 probetas de cada tipo de aluminio en forma de chapa fina de 30 mm de anchura.

Los cortes se realizaron con una cortadora metalográfica de precisión.



Fig. III.2. a) Probetas empleadas en los ensayos, b) utillaje para pruebas.

Fue necesario el diseño y fabricación de un utillaje para permitir 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 (Fig. III.2).

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.

B-Ensayos previos. Prueba de concepto

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. Puede entenderse que estas primeras pruebas fueron la prueba de concepto, y se ubicaría en torno a un TRL 2.

Observaciones destacables tras los agujeros previos fueron:

- Apriete entre componentes: es muy determinante en la aparición o no de rebabas de material en la intercara con la consecuente separación de los materiales.

- Adhesión de aluminio en la herramienta, dado que es un material que funde fácilmente y con tendencia a plastificar.
- 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 utilizó el aluminio *Al 5754-H24*, ya que es el aluminio de las dos aleaciones ensayadas la que mejor comportamiento ha presentado a la hora de mecanizar. Además, los aluminios de la serie 5xxx tienen un buen comportamiento ante la corrosión en ambientes salinos. La *Al6082* no tuvo grandes diferencias, pero se desechó por el criterio anterior.
- Se utiliza 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.

C- Estudio del Friction Drilling de AISI 1045 con Al5754

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 Al 5754-H24. Para ello se planteó una campaña de ensayos y pruebas sistemáticas. Con suficiente repetibilidad.

Se valoró la utilización de atmósferas protectoras (Argón o 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. Este acercamiento ya se vio interesante en un trabajo previo del grupo respecto al friction drilling orientado a aceros de alta resistencia.

Capítulo III. Método propuesto

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 de fricción, se utilizó la de diámetro 7,3 mm con rompevirutas y sin recubrimiento (Fig. III.3). 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 elegida fue M8. Las dimensiones de la herramienta a utilizar, por lo tanto, fueron las mostradas en la siguiente figura.

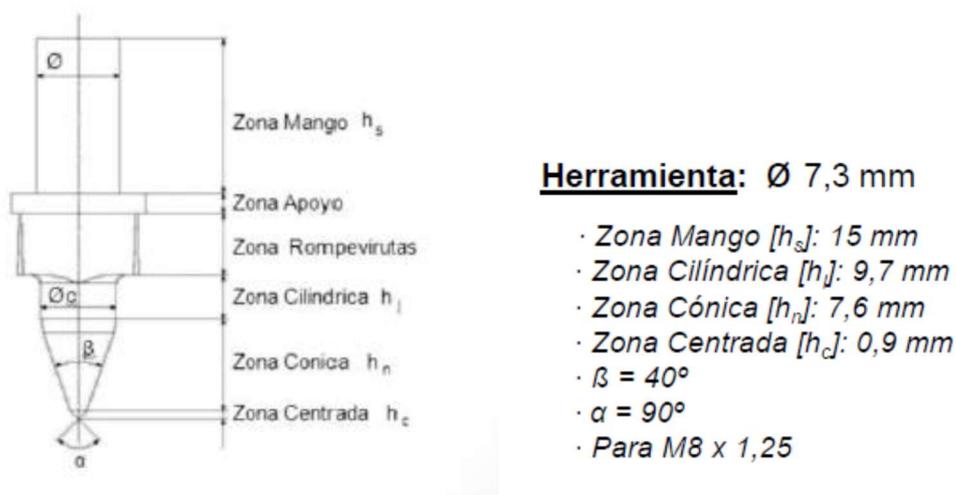


Fig. III.3. Características de la herramienta que se usará en los ensayos.

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 II.1). Esto suma 49 agujeros, pero cada pareja de parámetros se ha utilizado para hacer dos agujeros, para su comparación

y posterior análisis. En algunos casos se repitieron pruebas para asegurar la calidad de los resultados.

Tabla III.1. Condiciones del proceso de taladrado por fricción que se emplearán en los ensayos.

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

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.



Fig. III.4. Utillaje empleado en los ensayos sistemáticos y detalle de la medición de temperaturas.

D- Monitorización del proceso

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

Medición de fuerzas de avance y momentos

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



Fig. III.5. Sistema de medida 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.

A continuación se muestran las gráficas de par (Fig. III.6) y momento (Fig. III.7) respecto al tiempo de contacto, para unas condiciones particulares, por ejemplo 2000 rpm y 350 mm/min.

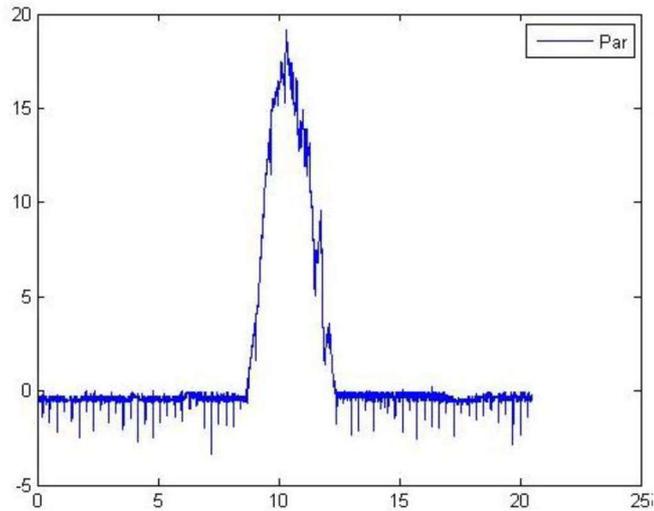


Fig. III.6. Avance del par (Nm) en función del tiempo del contacto para S2000_F350.

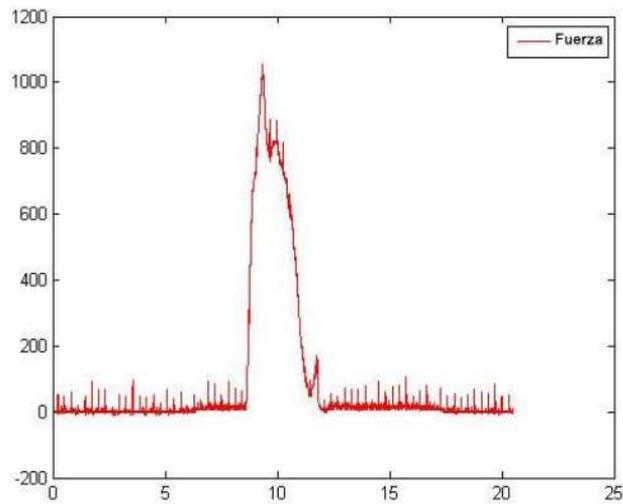


Fig. III.7. Avance de la fuerza (N) en función del tiempo del contacto para S2000_F350.

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 a la rotura de la rebaba superior. Al final, el retroceso de la

Capítulo III. Método propuesto

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 (Fig. III.8) y el par (Fig. III.9) disminuyen.

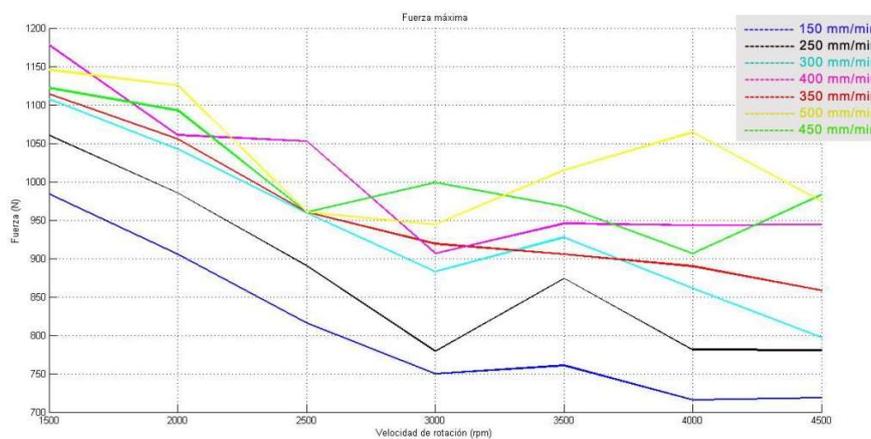


Fig. III.8. Fuerza axial máxima de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance.

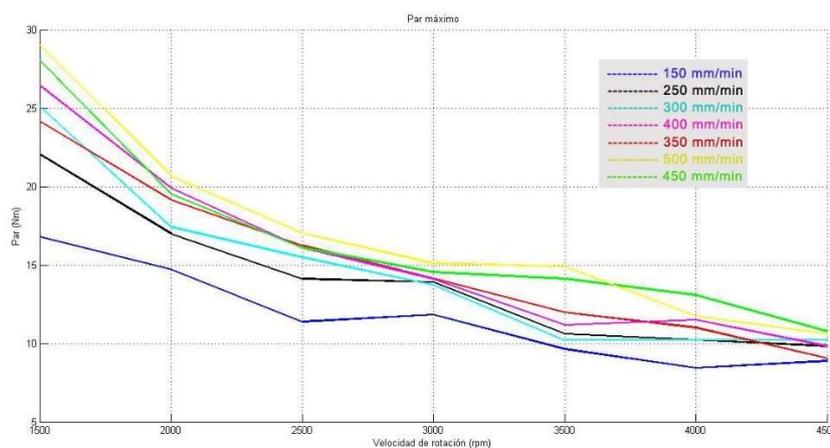


Fig. III.9. Momento torsor máximo de la velocidad de giro y para cada una de las velocidades de avance.

Para una velocidad de giro constante, observando cualquiera de las curvas, al aumentar el avance, el par aumenta (Fig. III.10) pero la fuerza de empuje aumenta bastante más (Fig. III.11). Esto ocurre al disminuir el tiempo de contacto entre pieza y herramienta, lo que reduce el calor para el ablandamiento del material.

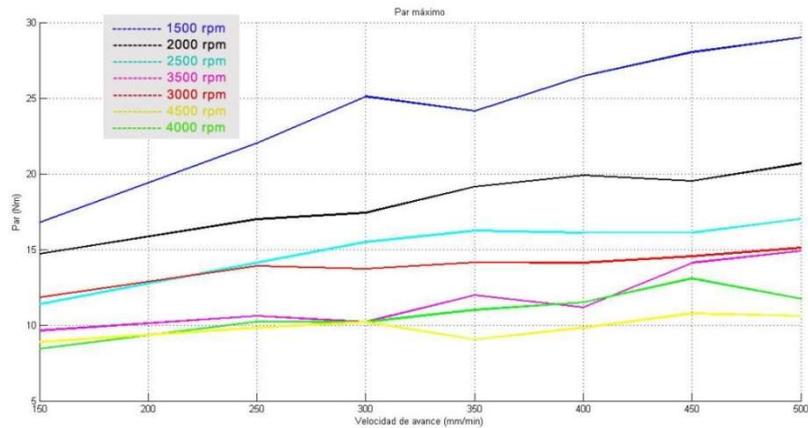


Fig. III.10. Momento torsor máximo en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.

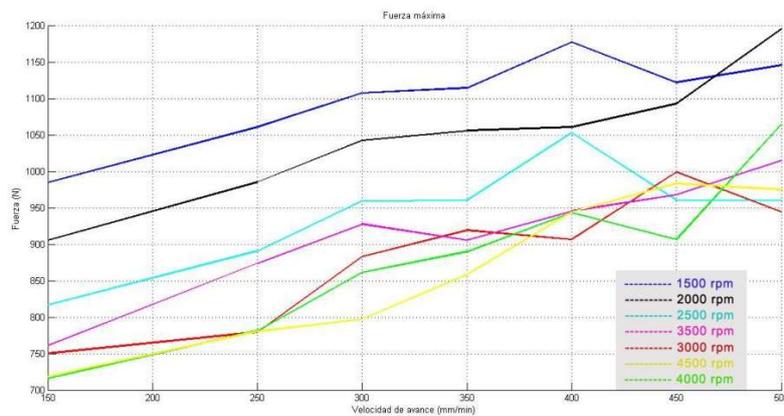


Fig. III.11. Fuerza axial máxima en función del avance y para cada una de las velocidades de giro.

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

Capítulo III. Método propuesto

- 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.

Los valores globales obtenidos se muestran en las tablas a continuación. Como se observa, son datos numerosos, que pueden abrir una vía de data mining o aprendizaje a futuro.

Tabla III.2. 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 III.3. 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

Capítulo III. Método propuesto

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 III.4. 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

La temperatura a que se llega en ambos materiales 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 comprobó 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.

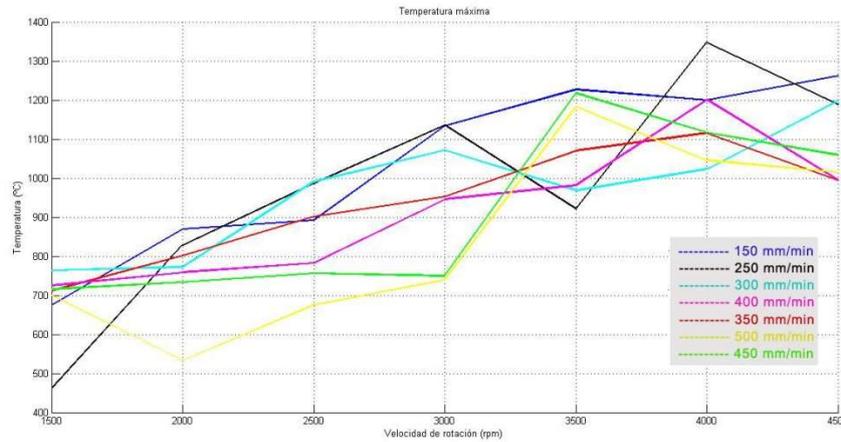


Fig. III.12. Temperaturas máximas en función de la rotación del husillo para distintos avances.

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 (Fig. III.12).



Fig. III.13. Probetas cortadas individualmente tras los ensayos de Friction Drilling.

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

Debido a su gran importancia en el posterior 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.



Fig. III.14. Proceso para la medición de las características geométricas de los agujeros.

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

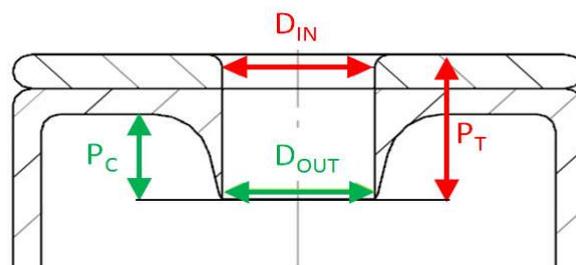


Fig. III.15. Diámetros del agujero.

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.

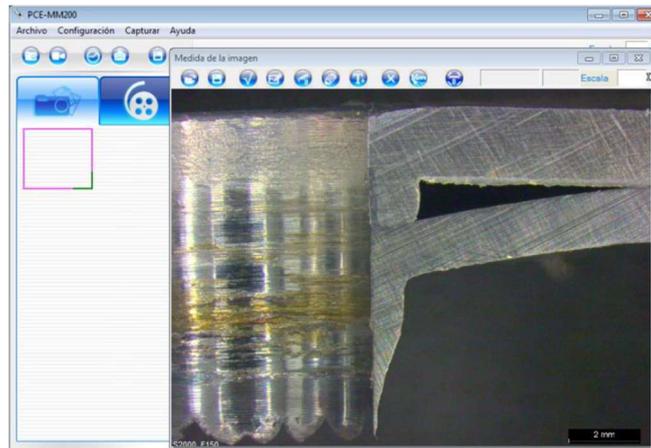


Fig. III.16. Programa PCE-MM200 para realizar las mediciones.

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 (P_c) y la longitud total del agujero (P_T), a partir de las cuales se sacó el hueco en la intercara.

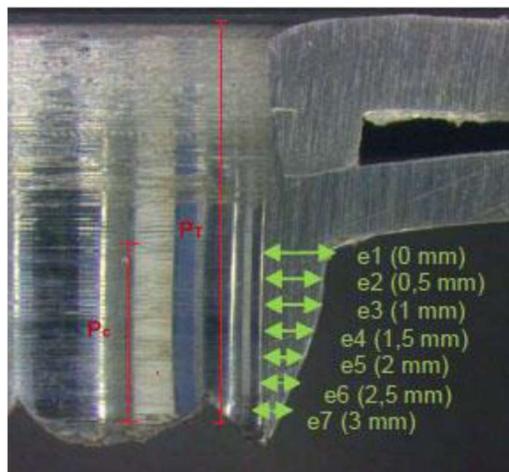


Fig. III.17. Espesores e una copa de acero

Capítulo III. Método propuesto

Diámetros

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 (Fig. III.18) como a la salida (Fig. III.19).

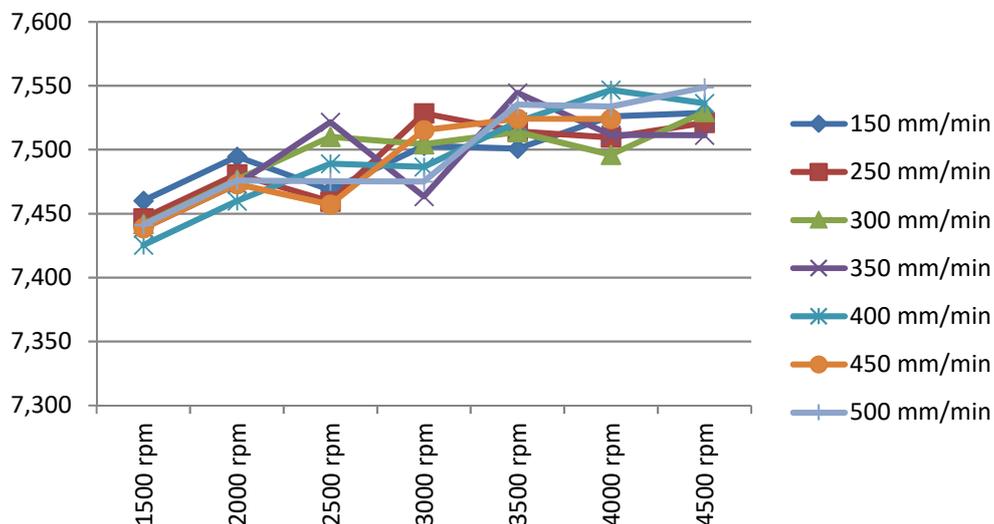


Fig. III.18. Diámetro a la entrada del agujero en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

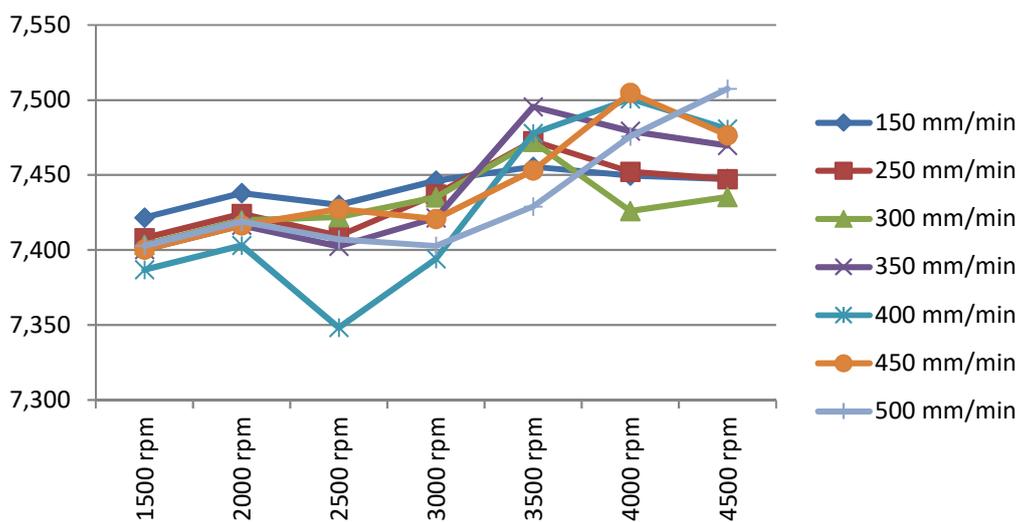


Fig. III.19. Diámetro a la salida en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

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

Longitudes

A continuación, se analizaron como variaban las profundidades y el hueco mínimo entre chapas (Fig. III.20).

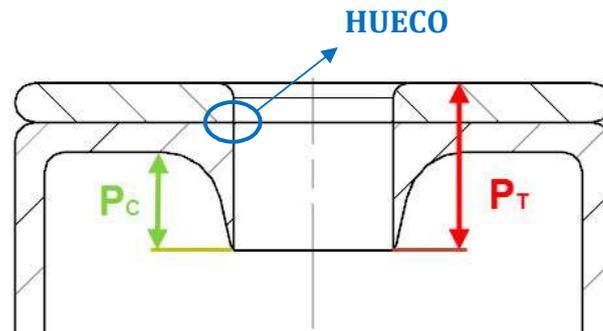


Fig. III.20. Longitud de copa, longitud total y hueco mínimo.

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

En la Fig. III.21 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 generada (Fig. III.22).

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

Capítulo III. Método propuesto

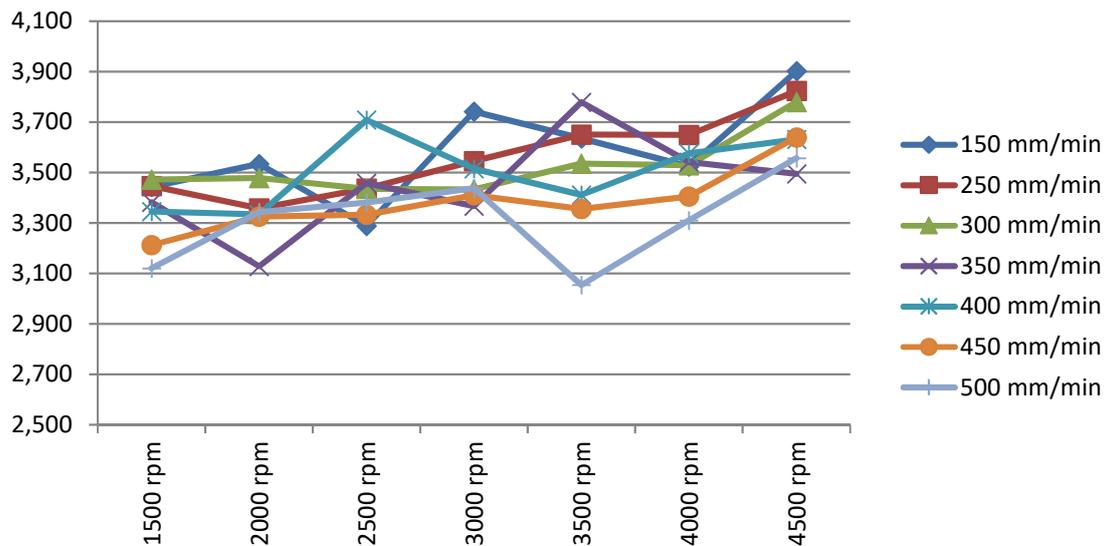


Fig. III.21. Longitud de copa en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

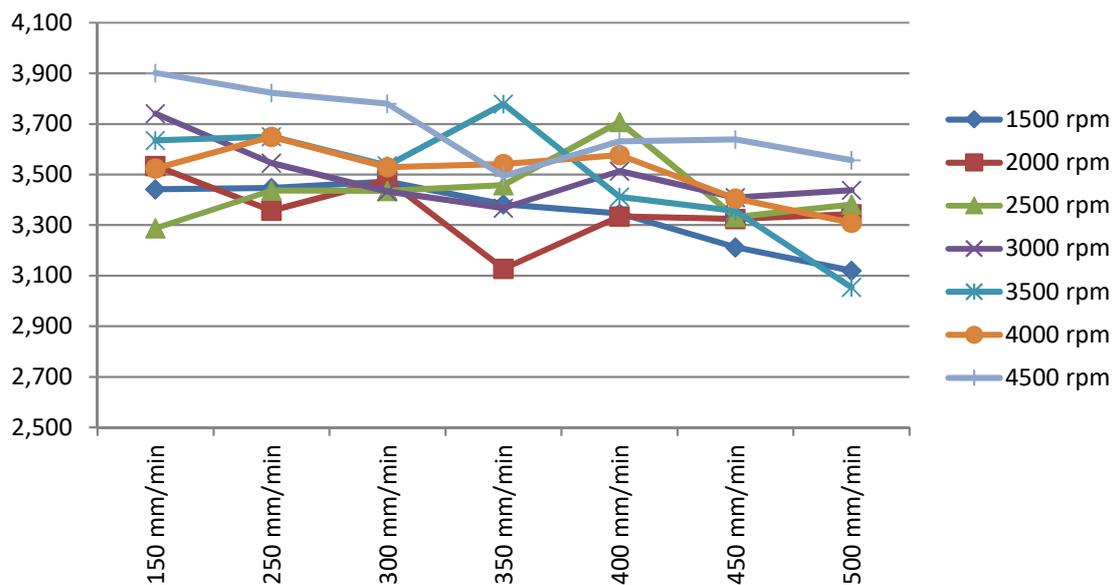


Fig. III.22. Longitud de copa en función de la velocidad de avance y para distintas revoluciones.

Por otro lado, al aumentar las revoluciones del husillo, se produce una disminución de la longitud total (Fig. III.23). Esto se traduce en una disminución del hueco de separación entre el acero y el aluminio, con mayores velocidades de giro y menores avances (Fig. III.24).

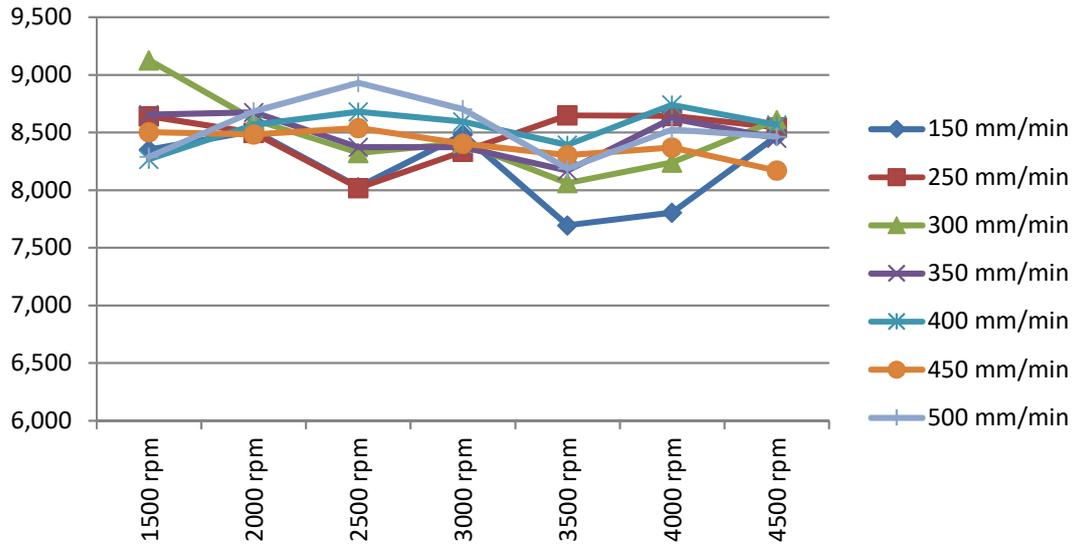


Fig. III.23. Longitud total Pt en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

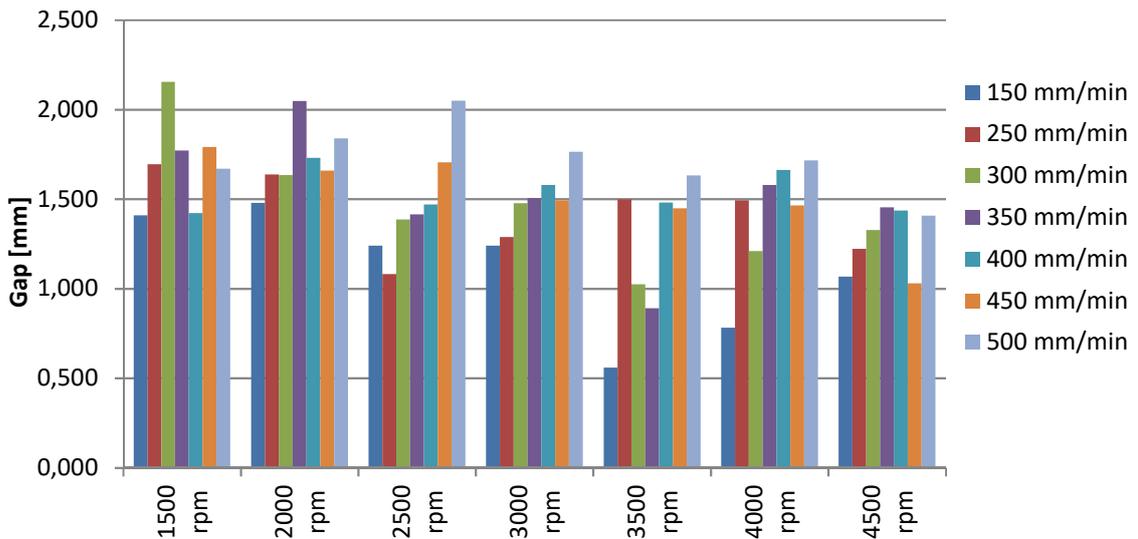


Fig. III.24. Huevo mínimo entre materiales en función de la velocidad de giro y para distintos avances.

Espesores

En la Fig. III.25 se observa que los espesores varían con las velocidades de giro, son mayores cuantas más revoluciones.

Capítulo III. Método propuesto

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

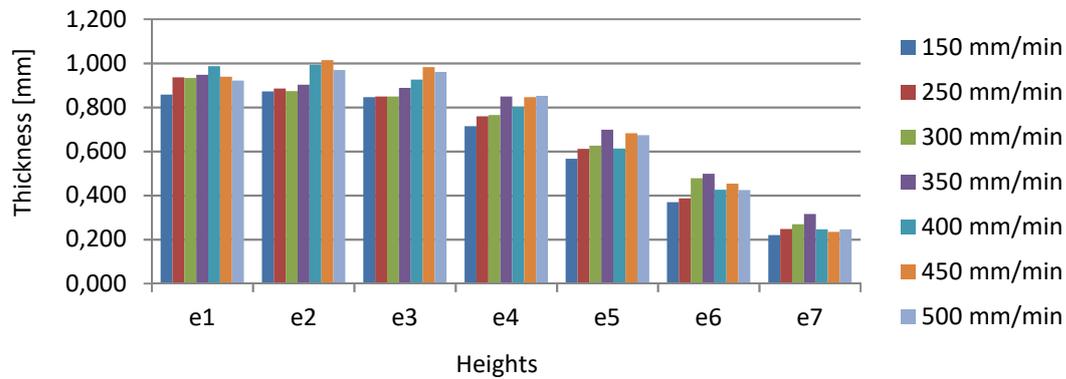


Fig. III.25. Variación de los espesores para distintas velocidades de giro.

F-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:

CRITERIO 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 III.5. Condiciones del fabricante en relación al diámetro del agujero.

Roscado por laminación			
DIN 13	Max	Min	óptimo
M8x1,25	7,48 mm	7,41	7,41

CRITERIO 2. Hueco mínimo entre chapas.

Se consigue entre 3500 rpm - 4500 rpm y avance menor de 300 mm/min.

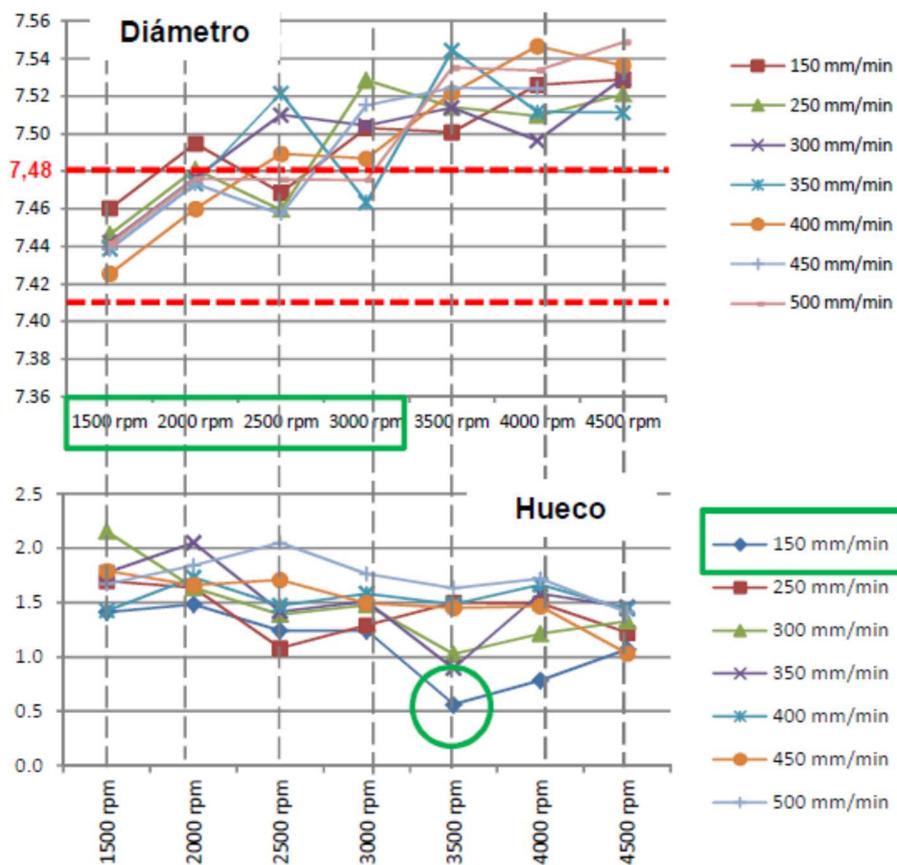


Fig. III.26. Relación entre hueco y diámetro con la velocidad de giro.

CRITERIO 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 III.6. 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

G-Roscado por laminación de la copa generada

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 recomiende el fabricante de la herramienta. Con estos datos se pudo determinar la velocidad de avance del macho mediante la siguiente fórmula:

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

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.

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.

2. Corrosión

La unión de metales y aleaciones disimilares trae otro problema que debe estudiarse, por lo menos en niveles donde pueda determinarse que existe forma viable de realizar las uniones. El problema es la compatibilidad galvánica, y su efecto no deseado, la corrosión.

2.1. Análisis teórico: corrosión galvánica

Observando la serie galvánica 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 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, 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 a la baja porosidad de aluminio y a la gran adhesión de la alúmina al aluminio base) lo

Capítulo III. Método propuesto

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 también el papel que podría jugar el tornillo a incorporar en la unión, lo que podría provocar la aparición de un trío 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.

2.2. Análisis experimental

Para ver el efecto que puede tener un ambiente corrosivo en la unión entre el acero y aluminio diseñaron y realizaron una serie de ensayos en una cámara de niebla salina.

Debido a que en la ETSIB no fue posible realizar estos ensayos, al no disponer de los equipos e instrumentación necesarios, se subcontrató a la empresa InPROMAT. Se enviaron las probetas preparadas y tras los ensayos InPROMAT 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.

Cuando se ponen a trabajar materiales diferentes en una atmósfera seca (o más general, en medios no electrolíticos) no ocurre nada. Sin embargo, si el mismo equipo entra en contacto con electrolitos (soluciones de sales, ácidos o álcalis), se producirá la corrosión del metal menos noble (un metal con menos potencial de electrodo). Este tipo de corrosión se denomina corrosión metálica galvánica o disimilar, influenciada por factores medioambientales, electroquímicos, metalúrgicos o geométricos. Éstos se pueden resumir en tres factores principales: la diferencia de los potenciales del electrodo de varios metales y aleaciones, la proporción entre áreas del ánodo y del cátodo, y la conductividad eléctrica de los medios. Cuanto mayor sea la diferencia entre los potenciales de los electrodos entre metales disimilar, más severa será la corrosión galvánica.

La prueba de sal (o niebla salina) es un método de test de corrosión estandarizado y común, aplicado a varias uniones disimilares siguiendo las directrices de ISO 9227 para Ensayos de corrosión en atmósferas salinas artificiales, 2006. (Tipo de sal: 5% NaCl / 95% Agua destilada, Tª en la cabina: 35°C, Velocidad de recuperación del vapor salino: 1,2 ml/h, pH de la niebla salina recuperada (25°C): 6.7, Densidad de la sal salina recuperada = 1,031 g/cm³). Es importante que las piezas se coloquen en un cierto ángulo para facilitar el ataque salino sobre la

Capítulo III. Método propuesto

superficie. De hecho, el propósito de esta prueba era entender el comportamiento de las juntas en atmósferas severas. En este caso, se analizaron dos especímenes para cada caso.



Fig. III.27. Componentes en el soporte al inicio y tras 48 h de exposición a nieblas salinas.

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 III.7. Tabla de casos analizados.

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 enviaron dos probetas, para permitir a la empresa sacar las probetas de la cámara de acuerdo a los periodos es y poder comparar la evolución de la corrosión cuando se saque la segunda tanda.



Fig. III.28. Probeta para ensayo de corrosión antes de ensayar.

Al realizar los ensayos se comprobó que el acero se corroía muy rápido y transcurridas 48h las probetas presentaban un aspecto nefasto. Primero, los especímenes se limpiaron con un cepillo para eliminar productos de sal y corrosión. A continuación, se observó la presencia de óxido superficial sobre los diversos elementos de la muestra (tubo, placa y tornillos). Los resultados del ensayo de corrosión para los periodos $t_1 = 24h$ y $t_2 = 48h$ se presentan en la Tabla III.8 que muestra el porcentaje de toda la superficie de los elementos que tienen corrosión de hierro (rojiza). El óxido blanco, para el aluminio o el acero galvanizado, se indica con "w".

Tabla III.8. Resultados: superficie corroída en % (sobre la superficie total).

Referencia (2 ejemplos/referencia)	Condición	$t_1 = 24 h$			$t_2 = 48 h$		
		Tubo (%)	Placa (%)	Tornillo (%)	Tubo (%)	Placa (%)	Tornillo (%)
Caso A + tornillo galvanizado	MG	30	10w	15w	40	10w	5-10w
Caso A + tornillo acero	MG	40	10w	30	40	15w	30
Caso A + tornillo acero	OD	30	5w	20	40	5w	20
Caso A + tornillo acero	MCT	25	10w	20	30	15w	20
Caso A + tornillo acero + nut	BJ	30	10w	30	30	15w	30
Caso B + tornillo acero	MG	0	5w	20	0	5w	20

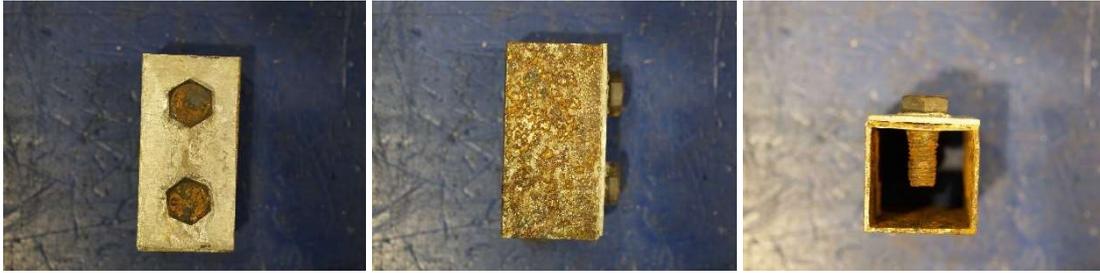


Fig. III.29. Estado de las probetas al transcurrir 48 horas.

Estos ensayos no han proporcionado información sobre las diferencias entre los diferentes tipos de mecanizado para el agujero; pero sí han permitido extraer algunas conclusiones importantes:

1. 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.
2. Como es obvio, las probetas de acero inoxidable estaban en buenas condiciones, casi sin ningún rastro de uso.
3. Los tornillos galvanizados han resistido mejor la corrosión que los que no tenían tratamiento.
4. 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 los resultados no adecuados, 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 este motivo la siguiente tanda de ensayos se realizó bajo las siguientes condiciones:

Tabla III.9. Condiciones de los componentes ensayados.

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

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

Las probetas ensayadas presentaron entre ellas un comportamiento similar frente a la corrosión:



Fig. III.30. Probetas de acero inoxidable ensayadas (360 horas).

- Perfiles de acero inoxidable:

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

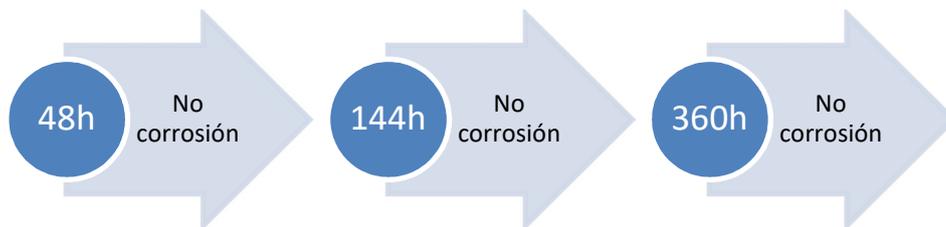


Figura III.31. Secuencia de extracción y análisis de los especímenes en el tiempo.

- 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

Capítulo III. Método propuesto

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.

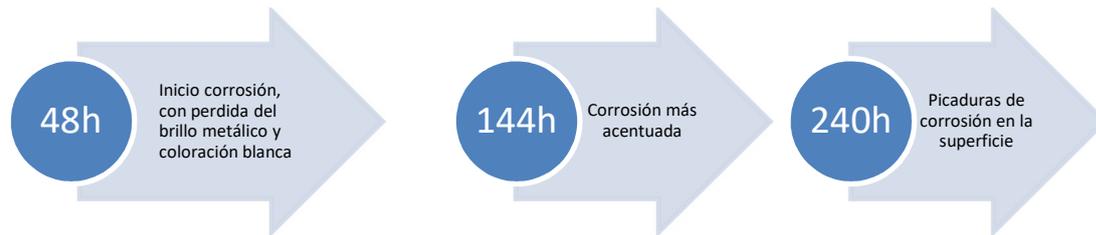


Figura III.32. Secuencia de extracción y análisis de los especímenes en el tiempo.

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 limpio el tornillo desaparece la coloración rojiza.

Se realizó una inspección metalográfica de las chapas de aluminio con corrosión. La máxima profundidad de picadura que se observada fue de 0,3 mm, se encuentra 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 III.33. Diversos casos de picadura aparecidos.

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 ultimo 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 observa que tanto el taladro del perfil, como el taladro de la chapa presentan una rebaba generada en el proceso de “friction drilling” (Fig. III.46, izquierda). Sin embargo, en las probetas de mayor espesor de copa no se observa esta rebaba presentando una superficie completamente lisa (Fig. III.46, derecha).

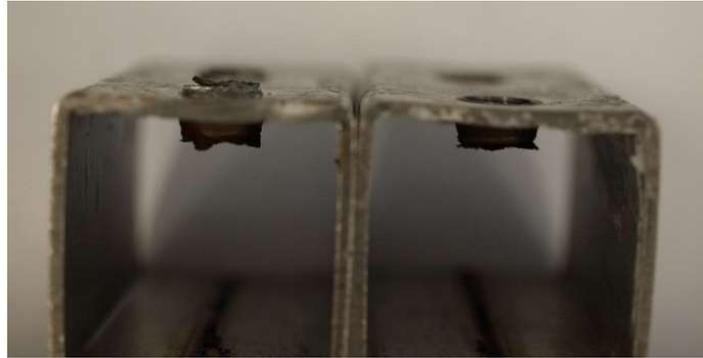


Fig. III.34. Comparativa de la rebaba producida en el proceso, para condiciones de diámetro óptimo (izquierda) y para mayor espesor de copa (derecha).

Tras todo lo observado pueden establecerse las siguientes conclusiones:

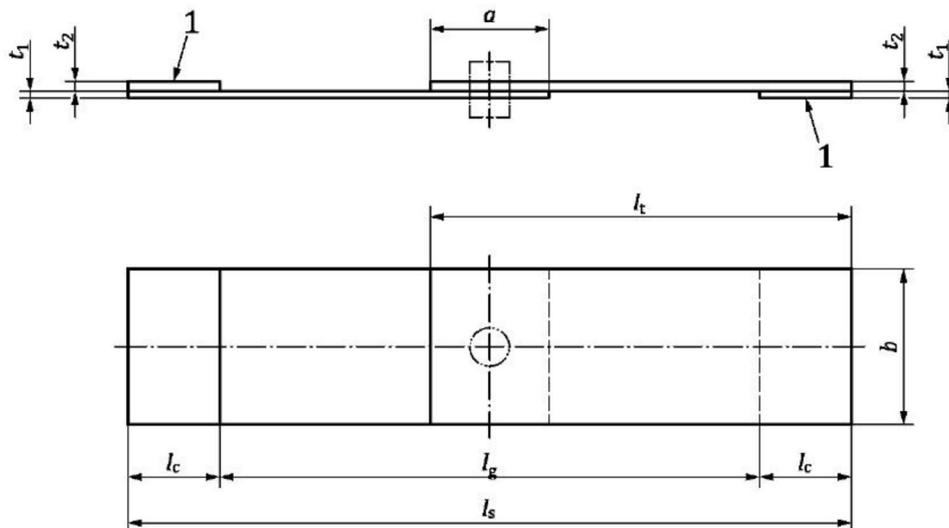
1. Se observa un comportamiento parecido a corrosión entre las diferentes probetas, siendo a las 144h cuando todas las chapas de aluminio presentan corrosión.
2. Los perfiles y los tornillos de acero inoxidable no presentan corrosión. Se observa coloración roja en los tornillos, procedente de la unión entre el perfil y la chapa).
3. No se observan diferencias entre las probetas mecanizadas en condiciones de diámetro óptimo, con y sin tornillos.
4. Entre las 3 condiciones (diámetro óptimo, hueco mínimo y mayor espesor de copa), se observa un menor grado de corrosión en las chapas de las probetas con condiciones de hueco mínimo.
5. Las probetas de mayor espesor de copa no generan rebaba en el perfil durante el proceso de *friction drilling*, lo que provoca que la unión sea menos resistente.

6. En todas las probetas se observa que el proceso de taladrado por fricción 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.

3. Comportamiento mecánico de la unión

Se prepararon una serie de probetas para analizar el comportamiento de la unión frente a fuerzas de cizalladura para la realización de los ensayos y análisis de los modos de fallo que habían tenido las probetas (fallos de resistencia de material de las chapas, colapso de interfase o rotura de tornillo).

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 ensayo de tracción convencional.



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

Fig. III.35. Dimensiones de probeta de cizalladura según norma UNE-EN 15048-2.

Se ensayaron tres probetas de cada una de las condiciones siguientes, diámetro óptimo (OM), espesor máximo de la copa (MCT), mínimo gap (MG) y unión atornillada (BJ):

Tabla III.10. Condiciones de mecanizado de las probetas del ensayo de cizalladura.

Material de las chapas	Condiciones de mecanizado
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Diámetro óptimo
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Espesor máximo de copa
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Hueco mínimo
Acero AISI1045 + Aluminio 5754	Unión atornillada

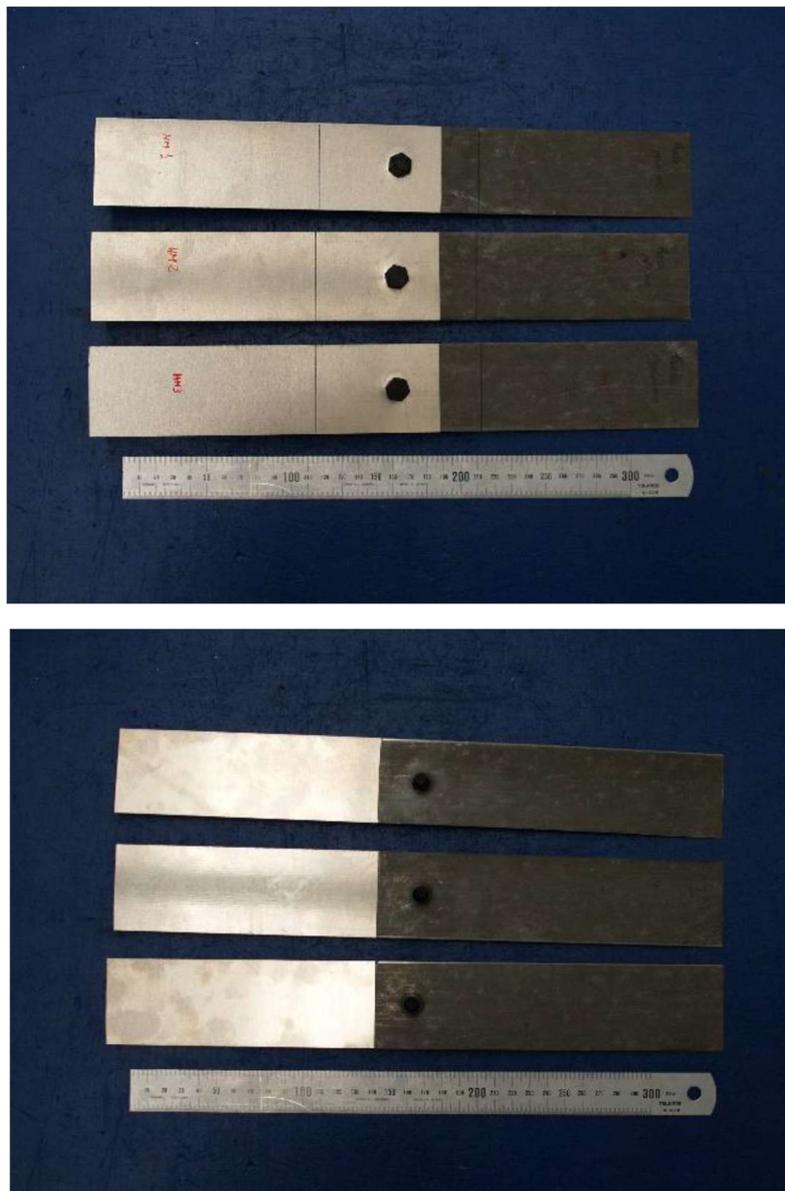


Fig. III.36. Probetas para el ensayo de cizalladura.

Capítulo III. Método propuesto

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.

Para caracterizar mecánicamente las uniones, se realizaron ensayos de cizalladura en especímenes del caso A con dos objetivos: en primer lugar, comparar la resistencia última para los tres criterios; en segundo lugar, estudiar los modos de fallo de las piezas mecanizadas. Ya sea por el proceso de taladrado por fricción (OD, MCT y MG) o por taladrado convencional (BJ), el montaje de la junta se completó con tornillos de acero.

Las pruebas de cizalladura se realizaron con tres ejemplos ensayados por criterio en una máquina de ensayos universal, tirando de las dos hojas desde las mordazas coaxiales opuestas de manera que el tornillo sufría una tensión de cizalladura pura. Como resultado, se obtiene el tipo de fallo y se registra la fuerza máxima. A priori, los posibles mecanismos podrían ser: 1) fallo de la unión entre materiales (en la interfase); 2) fallo del material más blando (aluminio); 3) rotura del tornillo.

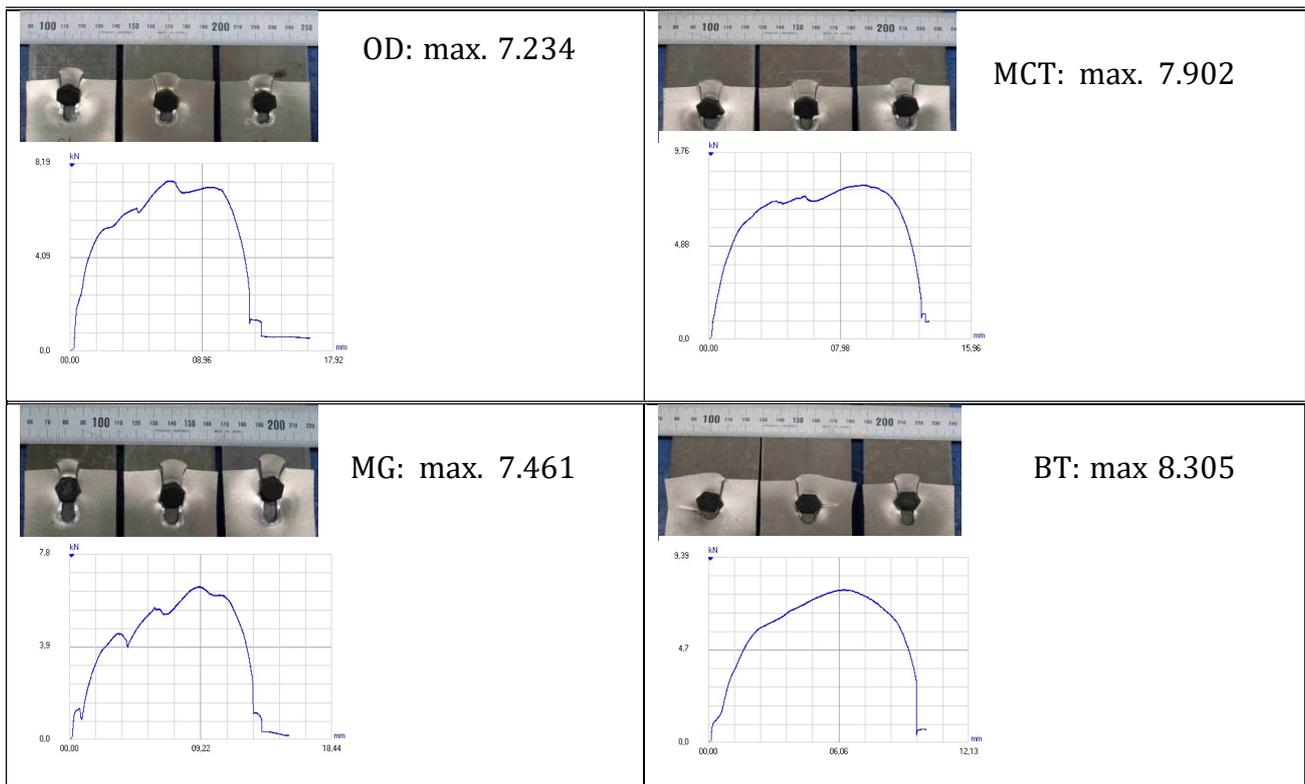
La Tabla III.12 muestra las cargas máximas (promedio a partir de 3 muestras) y el modo de fallo correspondiente para cada uno de los tipos. La clasificación del modo de fallo se selecciona de acuerdo con los criterios recogidos en *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-01)*.

En todos los casos, la resistencia mecánica de cizalladura fue limitada por la resistencia mecánica del aluminio. Sin embargo, la condición de máximo espesor de copa (MCT) parece ser la mejor opción, es decir, la más próxima a la condición de BJ (unión atornillada). La Tabla III.13 muestra los estados finales de las juntas después del fallo junto con los gráficos de carga/desplazamiento correspondientes. Sólo se trazan los gráficos asociados al caso A porque se extraen gráficos y consecuencias similares para el caso B.

Tabla III.11. Resultados de los ensayos de cizalladura.

Referencia	Max. carga (kN)[media]	Rango de desviaciones (kN)	Modo de fallo
OD	7.234	+ 0.28 / - 0.24	Mode D (corte del borde de la hoja)
MCT	7.902	+ 0.34 / - 0.28	Mode D (corte del borde de la hoja)
MG	7.461	+ 0.30 / - 0.33	Mode D (corte del borde de la hoja)
BJ	8.305	+ 0.21 / - 0.20	Mode C (Desgarro de la hoja) o D corte de la hoja (borde)

Tabla III.12. Resultado final de los ensayos y gráficos carga/desplazamiento.



Resultados obtenidos a partir del proyecto MANUNET J-FAST, "A rapid joint by alternative processes".

4. Resultado metalográfico

Para una mejor caracterización de la unión se decidió medir la microdureza de la unión a lo largo de la copa.

El estudio de dureza consistió en dos etapas: en primer lugar, se analizó la diferencia de dureza entre las zonas deformada y no deformada para las tres parejas de materiales. En segundo lugar, se cuantificó la diferencia de dureza a lo largo del eje z del orificio para el par AISI 1045-AI5754, para los tres criterios: diámetro óptimo (OM), espesor máximo de la copa (MCT) y mínimo gap (MG). Se esperan comportamientos similares para los otros dos tipos de muestras.

Los ensayos de dureza Vickers se realizaron según la norma UNE EN6507-1 en secciones de componentes de AISI 1045-AI5754 y AISI-304 con AI5754 y AI6082, con estado MG. Todas las pruebas se realizaron con un medidor de dureza (Vickers microdureza FM-800) enfocado en puntos situados en las zonas no deformadas y deformadas del tubo (acero) y placa (aluminio). Como se aprecia en la Figura III.21, la dureza en el tubo de acero aumenta en la región deformada. Por el contrario, los valores de dureza de las chapas de aluminio disminuyen en las zonas deformadas. Se comprobó que las mediciones eran consistentes como se puede deducir de las mediciones de los materiales ensayados, AISI 304 y AI5754, con errores absolutos máximos por debajo del 5%.

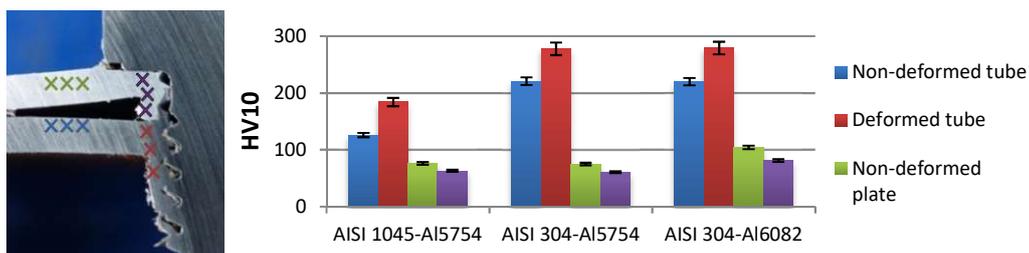


Fig. III.37. a. Áreas de ensayo para mediciones de dureza (tubo y placa); b. Mediciones de dureza Vickers para diferentes pares de materiales (Condición MG – mínimo espacio).

Además, se tomaron tres muestras de AISI 1045-AI5754 para realizar estudios de microdureza de los materiales a lo largo del eje vertical de la unión (Figura III.49). Para ello, se encapsularon y pulieron tres muestras correspondientes a los tres criterios establecidos: intervalo mínimo (MG), diámetro óptimo (OD) y espesor

máximo de la copa (MCT). En todos los casos se observa la transición del aluminio al acero AISI 1045, con una mayor dureza en el caso de la condición de espesor máximo de la fresa y menor dureza en el caso de un espacio mínimo. Los resultados fueron consistentes entre sí, con aumentos relativos similares en la dureza del acero y disminuciones en la dureza del aluminio con respecto a sus respectivos valores iniciales. Una vez más, las desviaciones máximas del valor medio fueron de aproximadamente el 7% en el peor de los casos.

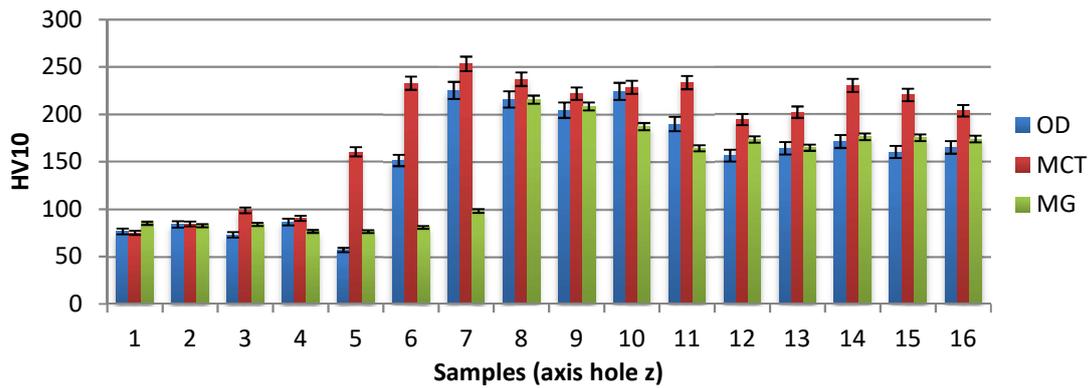


Figura III.38. Micro-durezas para los tres criterios.

5. Inspección por RX

Aspecto complementario de esta tesis ha sido comprobar la calidad de la junta mediante uso de rayos X en formato digital, utilizando la cabina de 189 KVA del CFAA de la UPV/EHU. La imagen muestra el perfil de la junta, donde se aprecian los gaps entre acero-aluminio y entre rosca y tornillo. Los gaps en este caso son excesivos, pese a que no se observan otro tipo de defectos.

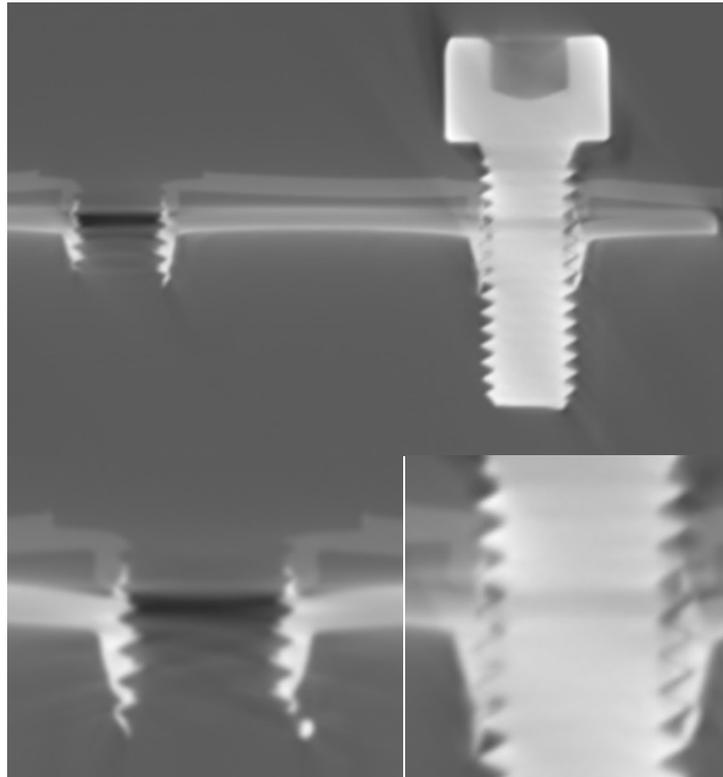


Fig. III.39. Inspección por RX digital, del corte sagital de la junta.

Como conclusión de este análisis, no parece ser una tecnología clave para este estudio, si bien ha permite observar el aspecto general de juntas, que de otra forma deben ser cortadas y destruidas.

Sin embargo la tecnología de RX es demasiado costosa, por lo que es fuera de lugar en entornos de producción de este tipo de procesos. Es un hecho en muchas aplicaciones que el número de tornillos o remaches está sobredimensionado para absorber el efecto nocivo de juntas mal realizadas.



Fig. III.40. Resultado de la inspección 3D digital RX. La hoja de aluminio no se muestra debido a su diferente penetración de la radiación RX.

6. Análisis del ciclo de vida

Dada la creciente conciencia medioambiental, un factor clave a tener en cuenta a la hora de avanzar en nuevas técnicas de fabricación es el impacto ambiental generado por dichas tecnologías. Por ello, en esta tesitura se debe de tener en cuenta no sólo la viabilidad técnica de la tecnología sino también la viabilidad ambiental. Por ello, el desarrollo de un “Análisis de Ciclo de Vida” (ACV) se hace indispensable con el fin de dar respuesta a esta cuestión. Es además interés de los organismos públicos el favorecer este acercamiento.

Un análisis de ciclo de vida además de cuantificar la huella ambiental se deben interpretar dichos resultados. De hecho, un ACV debe constar de los siguientes apartados:

- Objetivo y alcance del ACV.
- Análisis de Inventario.
- Evaluación del Impacto Ambiental.
- Interpretación del ACV.

A continuación, se procederá al desarrollo de dichos apartados hasta concluir la huella ambiental generada por los procesos de taladrado convencional y por friction drilling.

6.1. Objetivo y alcance del ACV

Como se ha expuesto en el párrafo anterior, el objetivo de este ACV es evaluar desde un punto de vista medioambiental la huella generada por el taladrado convencional y friction drilling. Concretamente, se ha aplicado a dichos procesos al taladrado de tubo de acero AISI 1045 junto a chapa de aluminio Al5754. En este caso el sistema bajo estudio es un centro de mecanizado Kondia A6. Como unidad funcional se ha considerado 1000 agujeros realizados. Los límites del sistema se muestran en la Figura III.41 y Figura III.42.

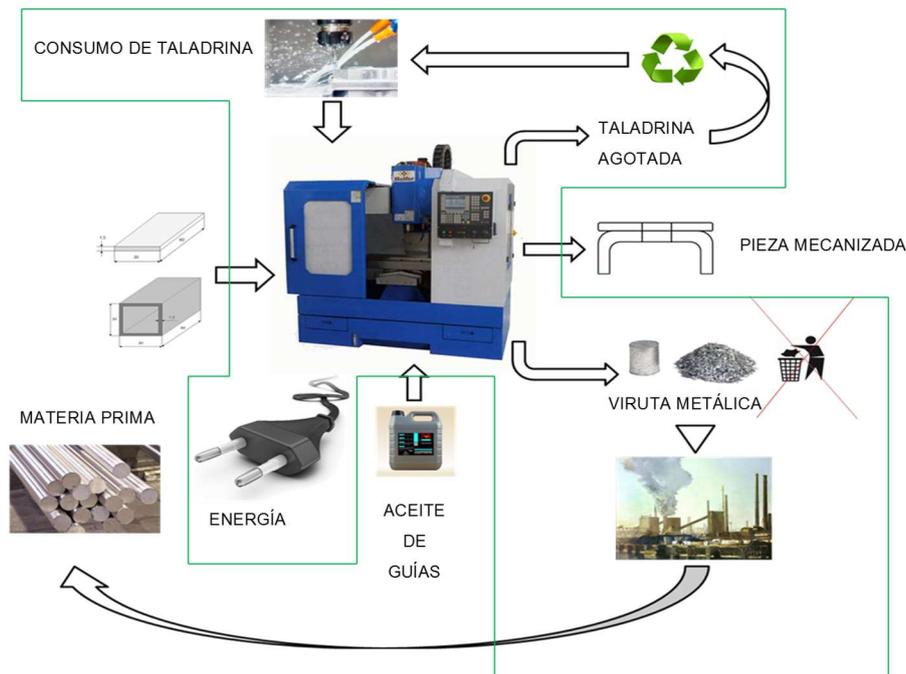


Fig. III.41. Esquema del proceso y límites del sistema para taladrado convencional.

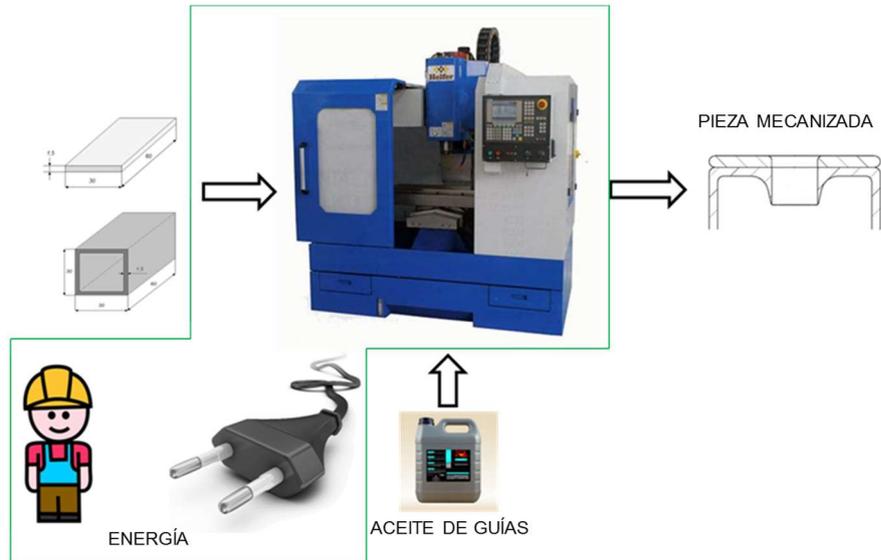


Fig. III.42. Esquema del proceso y límites del sistema para taladrado mediante friction drilling.

Como se observa en las figuras, en el proceso de taladrado convencional existe la generación de virutas además de la propia pieza mecanizada. Por otro lado, se hace necesario el uso de emulsiones de aceite (taladrina) con el fin de proteger la herramienta durante el proceso. Por ello, en este ACV se ha tenido en cuenta dentro de los límites del sistema el consumo de taladrina y posterior procesamiento una vez terminada su vida útil, la energía consumida durante el proceso de taladrado y el tratamiento de las virutas generadas. Sin embargo, al taladrar con la técnica de “friction drilling” dado que no existe generación de virutas ni uso de fluidos de corte los límites del sistema se reducen hasta la energía consumida durante el proceso.

Por otra parte, aunque las categorías de impacto seleccionadas están basadas en la norma ISO14017:2003, se ha utilizado los indicadores y factores de caracterización de la metodología de ACV TRACI. Esto es debido a que además de tener en cuenta la huella ambiental producida por los procesos también se hace mayor incidencia en los indicadores relacionados con la toxicidad humana. Concretamente las categorías de impacto utilizadas han sido:

- Calentamiento global: Se atribuye al 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 no permite que la radiación solar que rebota en la superficie del planeta escape hacia el espacio. Esto produce un fenómeno de inversión térmica que provoca un aumento de la temperatura global del planeta.

- ***Acidificación:*** 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. Es el nombre dado al descenso en curso del pH de los océanos de la Tierra, causado por la absorción de dióxido de carbono antropogénico desde la atmósfera. Mientras que la absorción natural de CO₂ por los océanos ayuda a mitigar efectos climáticos de las emisiones antropogénicas, se cree que el descenso de pH tendrá consecuencias negativas, principalmente en organismos y ecosistemas marinos.
- ***Cancerígenos:*** Un carcinógeno o cancerígeno es un agente físico, químico o biológico potencialmente capaz de producir cáncer al exponerse a tejidos vivos. Se acepta que el 90% de los cánceres humanos están provocados por factores ambientales o nutricionales que inducen a un proceso de carcinogénesis. Éstos incluyen el hábito de fumar, ciertos hábitos dietéticos y la exposición a la luz solar, a productos químicos y a fármacos. El benceno se encuentra comúnmente en el ambiente. Las principales fuentes de benceno en el ambiente son los procesos industriales. Los niveles de benceno en el aire pueden aumentar por emisiones generadas por la combustión de carbón y petróleo, operaciones que involucran residuos o almacenaje de benceno, el tubo de escape de automóviles y evaporación de gasolina en estaciones de servicio. La exposición breve (5 a 10 minutos) a niveles muy altos de benceno en el aire (10.000 a 20.000 mg) puede producir la muerte. Niveles más bajos (700 a 3.000 mg) pueden producir letargo, mareo, aceleración del latido del corazón, dolor de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento. En la mayoría de los casos, los efectos desaparecerán cuando la exposición termina y la persona empieza a respirar aire fresco. La ingestión de alimentos o bebidas que contienen niveles altos de benceno puede producir vómitos, irritación del

estómago, mareo, somnolencia, convulsiones, aceleración del latido del corazón, coma y la muerte. Por último, la exposición prolongada al benceno puede producir cáncer de los órganos que producen los elementos de la sangre, produciendo la leucemia. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que el benceno es un carcinógeno (puede producir cáncer) reconocido en seres humanos.

- No cancerígenos: 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. Se mide en niveles de cantidad de tolueno, que, aunque es una sustancia nociva, su toxicidad es muy inferior a la del benceno. El tolueno puede afectar al sistema nervioso. Niveles bajos o moderados pueden producir cansancio, confusión, debilidad, pérdida de la memoria, náusea, pérdida del apetito y pérdida de la audición y la vista. Estos síntomas generalmente desaparecen cuando la exposición termina. Los vapores de tolueno presentan un ligero efecto narcótico e irritan los ojos. Inhalar niveles altos de tolueno durante un período breve puede hacer que uno se sienta mareado o somnoliento. Puede causar, además, pérdida del conocimiento y, en casos extremos, la muerte. La concentración máxima permitida de los vapores del tolueno en los lugares de trabajo es de 50 ppm (partes por millón) (192 mg/m³).
- Efectos respiratorios: La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. El material particulado respirable presente en la atmósfera de nuestras ciudades en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras) se puede dividir, según su tamaño, en dos grupos principales. A las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 µm se las denomina PM10 y a la fracción respirable más pequeña, PM 2,5. Estas últimas están constituidas por aquellas partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2,5 micrómetros. Además, cada tipo de partículas está compuesto de diferente material y puede provenir de diferentes fuentes. En el caso de las PM 2,5, su origen está principalmente en fuentes de carácter antropogénico como las emisiones de las industrias, mientras que las partículas de mayor tamaño pueden tener en su composición un importante

componente de tipo natural, como partículas de polvo procedente de las intrusiones de viento del norte de África (polvo sahariano), frecuente en nuestras latitudes. Los efectos que las partículas causan en la salud de las personas han estado históricamente asociados a la exacerbación de enfermedades de tipo respiratorio, tales como la bronquitis, y más recientemente también se han analizado y demostrado sus efectos sobre dolencias de tipo cardiovascular. Los últimos trabajos científicos sugieren que este tipo de contaminación, está asociado con incrementos en la morbimortalidad de la población expuesta y al creciente desarrollo del asma y alergias entre la población infantil. En el caso de las PM 2,5, su tamaño hace que sean 100% respirables ya que viajan profundamente en los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio y depositándose en los alvéolos pulmonares, incluso pueden llegar al torrente sanguíneo. Además estas partículas de menor tamaño están compuestas por elementos que son más tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos) que los que componen, en general, las partículas más grandes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido recientemente en sus nuevos Valores Guía la recomendación de utilizar como indicador de la concentración de partículas materiales en el aire los valores de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras. Según los citados Valores Guía de protección para la salud de la OMS para valores medios anuales, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sería el nivel más bajo a partir del cual se ha detectado asociación entre efectos cardiopulmonares y mortalidad por cáncer de pulmón debido a la exposición prolongada a PM 2,5. Si nos centramos en los efectos a corto plazo, es decir, para valores medios en 24 horas, el valor guía de la OMS está situado en $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- ***Eutrofización:*** La eutrofización 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. Un río, un lago o un embalse sufren eutrofización cuando sus aguas se enriquecen en nutrientes. La problemática de esto está en que la existencia de exceso de nutrientes provoca el crecimiento en abundancia de las plantas y otros

organismos. Más tarde, cuando mueren, se pudren y llenan el agua de malos olores y le dan un aspecto nauseabundo, disminuyendo drásticamente su calidad. El proceso de putrefacción consume una gran cantidad del oxígeno disuelto y las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos. El resultado final es un ecosistema casi destruido. El desarrollo de la biomasa en un ecosistema viene limitado, la mayoría de las veces, por la escasez de algunos elementos químicos, como el nitrógeno en los ambientes continentales (especies de plantas) y el fósforo en los marinos, que los productores primarios necesitan para desarrollarse y a los que llamamos por ello factores limitantes. La contaminación puntual de las aguas, por efluentes urbanos o por la contaminación agraria o atmosférica, puede aportar cantidades importantes de esos elementos limitantes. Una elevada proporción de nitrógeno (alrededor del 30%) llega a través de la contaminación atmosférica al medio ambiente. Es por ello que se tomen valores de generación de dicha sustancia para valorar el impacto ambiental a lo que eutrofización se refiere que tiene cualquier proceso o sistema. Se considera un lago contaminado cuando sus niveles totales de nitrógeno disueltos superan los 1500 µg/l.

- Disminución de la capa de ozono: También denominado agujero de la capa de ozono. Es la zona de la atmosfera terrestre donde se producen reducciones anormales de la capa de ozono, fenómeno anual observado durante la primavera en las regiones polares y que es seguido de una recuperación durante el verano. En las mediciones realizadas en tiempos recientes se descubrieron importantes reducciones de las concentraciones de ozono en dicha capa, con especial incidencia en la zona de la Antártida. Se producen efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica. Se atribuyó este fenómeno al 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). Respecto a sus efectos sobre el medio ambiente, los clorofluorocarburos son sustancias con un elevado potencial de destrucción de la capa de ozono. Su producción, uso y puesta en el

mercado está prohibido en la Unión Europea por el Reglamento (CE) 2037/2000 sobre sustancias que agotan la capa de ozono. Se han aplicado comúnmente como líquidos refrigerantes, agentes extintores, propelentes para aerosoles y construcción de plásticos, debido a su alta estabilidad físico-química. También se encuentran presentes, aunque en proporciones muy pequeñas, en aislamientos térmicos y en productos comerciales como el freón, pinturas, barnices, etc. Al ser sustancias de síntesis industrial, no se contemplan fuentes naturales de emisión. Según los umbrales de emisión establecidos por el RD 508/2007 (kg/año), se establece una emisión máxima a la atmósfera de 1 kg/año.

- Ecotoxicidad: Cuando se refiriere a la ecotoxicidad, se habla de la alteración de ecosistemas con destrucción de la biodiversidad. La pérdida de equilibrio en los ecosistemas (extinción de especies vegetales y animales) puede ser producida por la contaminación del aire, agua o tierra. El objetivo de esta aproximación es ser capaz de predecir los efectos de la contaminación para la acción más eficiente y efectiva para prevenir o remediar cualquier efecto de deterioro ambiental que pueda ser identificado. En aquellos ecosistemas que están perdiendo calidad ambiental por efecto de la contaminación u otras actividades humanas, los estudios ecotoxicológicos pueden dar información para dar el mejor curso de acción para restablecer los bienes y los servicios ecosistemáticos. Se establecen un valor límite ambiental para una exposición diaria para el diclorobenceno de 122mg/m³.
- Niebla: Con este término se refiere a “niebla contaminante”, también conocida como “smog”. Es una 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. La niebla puede causar problemas respiratorios, especialmente en personas que tienen asma; puede dañar las membranas pulmonares, lo que causa dolor, malestar, tos e irritación de garganta; también produce sequedad en los ojos. Puede causar cáncer de pulmón en

la misma medida o incluso mayor de lo que lo puede hacer fumar. La niebla se puede formar en casi cada tipo de clima donde las industrias o el movimiento de las ciudades liberan grandes cantidades de contaminantes al aire. La combinación de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, catalizados por la radiación solar, forman ozono y nitrato de peroxiacilo. Al mismo tiempo se oscurece la atmósfera, tiñendo sus capas bajas de un color pardo rojizo y cargándola de componentes dañinos para todos los seres vivos y diversos materiales. Puede provocar enfermedades respiratorias como rinitis, bronquitis y asma.

6.2. Análisis de inventario

Con el fin de cuantificar el impacto ambiental se hace necesario analizar y recopilar los datos necesarios para llevar a cabo la posterior evaluación ambiental. Concretamente los resultados son obtenidos a partir de los datos recogidos durante los ensayos realizados anteriormente. Además, con el objetivo de reproducir el impacto ambiental de la forma más exacta posible se tuvo en cuenta el mix energético utilizado en la comunidad autónoma del País Vasco, donde los ensayos fueron realizados (Ver Tabla III.13).

Tabla III.13. Mix energético utilizado en el País Vasco.

Energía	Hidráulica	Ciclo combinado	Eólica	Solar	Térmica	Cogeneración
%	6,2	64,8	7,9	1,1	2,2	17,8

En cuanto a los tiempos de mecanizado para obtener una unidad funcional se calculó que se tarda 1 hora 45 minutos (1,65 horas, aprox.), es decir, 5,4 segundos/agujero y 0,5 segundos de desplazamiento en vacío para la realización del siguiente agujero en el caso del taladrado convencional. En el caso del friction drilling, el tiempo de mecanizado se reduce hasta los 16 minutos.

Sin embargo, para recopilar los datos necesarios referentes al tratamiento de virutas y taladrina se obtuvieron en diferentes bases de datos industrialmente

Capítulo III. Método propuesto

reconocidas. Específicamente se utilizó la base de datos EcoInvent® y la base de datos CPM de la Universidad de Chalmers.

Teniendo en cuenta todos estos datos, primeramente, se ha obtenido el impacto ambiental derivado de la generación de 1kWh el cual es mostrado en la Tabla III.14.

Tabla III.14. Impacto ambiental derivado de la generación de 1kW de energía.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	kg CO2 eq	0,464
Acidificación	H+ moles eq	0,194
Cancerígenos	kg benceno eq	0,00107
No cancerígenos	kg tolueno eq	3,545
Efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	0,00102
Eutrofización	kg N eq	0,00013
Disminución capa Ozono	kg CFC-11 eq	3,42564E-08
Ecotoxicidad	kg 2,4-D eq	0,787
Niebla	kg Nox eq	0,00142

Posteriormente, se ha procedido a recopilar los datos referentes al impacto ambiental generado por la producción de 1 m³ de taladrina. En dicha recopilación se ha tenido en cuenta las entradas y salidas mostradas en la Tabla III.15.

Tabla III.15. Entradas/salidas para la producción de 1m³ de taladrina.

Dirección	Naturaleza	Sustancia	Cantidad	Unidad	Entorno
Input	Recurso refinado	Aditivos	0,123873874	m ³	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Aceite base	0,867117117	m ³	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Parafina	0,009009009	m ³	Tecnoesfera
Output	Producto	Aceite lubricante	1	m ³	Tecnoesfera
Output	Residuo	R. peligroso	0,012927928	tonelada	Tecnoesfera

Una vez sabidas las entradas y salidas utilizadas en el proceso, utilizando la base de datos EcoInvent® se procedió al cálculo del impacto ambiental generado de la producción de 1m³ de taladrina. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III.16. Impacto ambiental derivado de la generación de 1m³ de taladrina.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Parafina	Aceite	Aditivos	Residuo Peligroso
Calentamiento global	kg CO2 eq	345,269	6,662	260,863	48,138	29,604
Acidificación	H+ moles eq	795,627	2,131	218,582	568,590	6,321
Cancerígenos	kg benceno eq	0,0786	0,0174	0	0,00545	0,0557
No cancerígenos	kg tolueno eq	595,456	134,810	0,0511	163,251	297,34
Efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	0,849	0,00956	0,805	0,00488	0,0292
Eutrofización	kg N eq	0,116	0,0023	0,07004	0,00605	0,0376
Disminución capa Ozono	kg CFC-11 eq	0,000228	4,96E-07	0	4,01153E-05	0,000187
Ecotoxicidad	kg 2,4-D eq	24,35	4,765	0,00118	4,587	14,996
Niebla	kg Nox eq	1,734	0,0221	1,523	0,118	0,0704

Por otra parte, una vez se ha terminado la vida útil de la taladrina, ésta debe ser considerada como residuo peligroso. Por tanto, estos deben ser entregados a gestores de residuos autorizados para que procedan a su tratamiento y eliminación. Con el fin de tener el impacto ambiental derivado de este proceso se han tenido en cuenta las entradas y salidas obtenidas de la base de datos CPM de la Universidad de Chalmers. En la Tabla III.17, se muestran dichos datos.

Tabla III.17 Entradas/Salidas para el tratamiento de 1m³ de taladrina.

Dirección	Naturaleza	Sustancia	Cantidad	Unidad	Entorno
Input	Recurso refinado	Sulfato de aluminio	0,048600347	kg	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Electricidad	0,000934643	MWh	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Emulsionante	0,001472738	kg	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Peróxido de hidrógeno	0,001435919	kg	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Ácido nítrico	0,09278248	kg	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Taladrina	1	m ³	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Polímeros	0,002650928	kg	Tecnoesfera
Input	Recurso refinado	Hidróxido de sodio	0,100014617	kg	Tecnoesfera
Output	Emisión	Aromáticos	0,006995504	kg	Río
Output	Emisión	Aceite mineral	0,001840922	kg	Río
Output	Emisión	Fenol	0,000736369	kg	Río
Output	Emisión	Hidrocarburos unipolares	0,001984514	kg	Agua
Output	Residuo	Aceite (desecho)	0,001778331	m ³	Tecnoesfera

Capítulo III. Método propuesto

Output	Residuo	Aceite contaminado (desecho)	0,001502193	m ³	Tecnoesfera
Output	Residuo	Agua contaminada con aceite (desecho)	0,944264239	m ³	Río
Output	Residuo	Aceite (desecho)	0,018895226	m ³	Tecnoesfera

Basándose en estos datos de entrada y salida se utilizó la base de datos EcoInvent® para calcular el impacto ambiental generado por dicho tratamiento. Los resultados se muestran en la Tabla III.18.

Tabla III.18. Impacto ambiental derivado del tratamiento de 1m³ de taladrina.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	<i>kg CO2 eq</i>	2485,45
Acidificación	<i>H+ moles eq</i>	143,30
Cancerígenos	<i>kg benceno eq</i>	0,13
No cancerígenos	<i>kg tolueno eq</i>	1850,98
Efectos respiratorios	<i>kg PM2.5 eq</i>	0,14
Eutrofización	<i>kg N eq</i>	0,15
Disminución capa Ozono	<i>kg CFC-11 eq</i>	0,00
Ecotoxicidad	<i>kg 2,4-D eq</i>	46,74
Niebla	<i>kg Nox eq</i>	3,48

6.3. Evaluación del impacto ambiental

Una vez inventariados los datos necesarios para llevar a cabo el ACV, se procede a la evaluación del impacto ambiental generado por los dos procesos motivo de estudio (taladrado convencional y friction drilling).

Consumo de energía

Como se ha indicado anteriormente, se ha utilizado un centro de mecanizado Kondia A6 para ambos procesos. Dicho centro posee una potencia total de 7,9-10 kWh.

Cabe mencionar que el taladrado conlleva un proceso previo de pretaladrado y uno posterior de desbarbado. El centro de mecanizado escogido para llevar a cabo la operación es capaz de llevar a cabo los tres procesos consecutivos. Las condiciones de corte utilizadas se han basado en una velocidad de avance de 400 mm/min junto a una velocidad del husillo de 2500 rpm para el diámetro deseado.

Como se indicó en el apartado de la definición del ACV, se ha obtenido un tiempo de taladrado de 0,45 segundos que junto con el pretaladrado y posterior desbarbado se ha calculado un tiempo de mecanizado medio de 5,4 segundos por agujero. Se ha supuesto 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. Se obtiene así un tiempo de operación total de 1 hora y 40 minutos (1,65 horas aproximadamente).

Teniendo en cuenta estos datos y los recogidos durante los ensayos realizados se ha obtenido la energía utilizada necesaria para obtener una unidad funcional es de 13,035 kW.

En el análisis de inventario se ha obtenido el impacto que tenía la producción y consumo de 1kW en función de la procedencia de la energía en el País Vasco. Por lo tanto, basándose en esos datos se ha procedido al cálculo del impacto ambiental derivado del taladrado convencional objeto de estudio. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Tabla III.19. Impacto generado por el consumo de energía en el taladrado.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>
Calentamiento global	<i>kg CO2 eq</i>	6,058
Acidificación	<i>H+ moles eq</i>	2,531
Cancerígenos	<i>kg benceno eq</i>	0,014
No cancerígenos	<i>kg tolueno eq</i>	46,219
Efectos respiratorios	<i>kg PM2.5 eq</i>	0,0133
Eutrofización	<i>kg N eq</i>	0,0018
Disminución capa Ozono	<i>kg CFC-11 eq</i>	4,46532E-07
Ecotoxicidad	<i>kg 2,4-D eq</i>	10,26
Niebla	<i>kg Nox eq</i>	0,0185

A diferencia del taladrado convencional, el friction drilling no precisa de ninguna operación adicional para llevarla a cabo. Por lo tanto, los tiempos de operación, se reducen en comparación con el caso del taladrado convencional. Concretamente, se ha obtenido un tiempo de mecanizado medio de 0,45 segundos por agujero, igual al de taladrado ya que se trata de espesores pequeños. Si proponemos de nuevo un tiempo de 0,5 segundos entre agujero y agujero en la cadena de producción, el

Capítulo III. Método propuesto

mecanizado de los 1000 agujeros conllevará un tiempo de 16 minutos aproximadamente (0,26 horas).

A partir de estos datos y los obtenidos durante los ensayos, se ha calculado un consumo energético de 2,08 kW en el caso del friction drilling. Combinando este valor con los calculados para la producción de 1kW de energía, el impacto ambiental generado por la energía consumida en el caso del friction drilling se refleja en la siguiente tabla:

Tabla III.20. Impacto generado por el consumo de energía en el friction drilling

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	<i>kg CO2 eq</i>	0,9668
Acidificación	<i>H+ moles eq</i>	0,4039
Cancerígenos	<i>kg benceno eq</i>	0,0022
No cancerígenos	<i>kg tolueno eq</i>	7,3753
Efectos respiratorios	<i>kg PM2.5 eq</i>	0,00212
Eutrofización	<i>kg N eq</i>	0,000289
Disminución capa Ozono	<i>kg CFC-11 eq</i>	7,1253E-08
Ecotoxicidad	<i>kg 2,4-D eq</i>	1,6372
Niebla	<i>kg Nox eq</i>	0,002953

Uso de taladrina

Su uso es 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 utilizado de taladrina en este caso es de 7 l/min. El tiempo en el que el flujo de taladrina es utilizado es de 1 hora y 40 minutos (tiempo de proceso para la obtención de la unidad funcional). Por tanto, se recircularán 700 litros de taladrina. Según se publicó en el informe de Byrne en 2003, de la taladrina

utilizada durante los procesos de mecanizado se pierde un 30% de taladrina debido a filtraciones, evaporaciones, derrames y salpicaduras. Por lo tanto, la taladrina consumida durante la vida útil de la taladrina es de 210 litros. Teniendo en cuenta que la taladrina tiene una durabilidad media de 6 meses con 16 horas diarias de trabajo (1920h), la taladrina consumida durante el proceso será de 0,182 litros. Teniendo en cuenta este dato, se ha obtenido el impacto ambiental generado por el uso de taladrina durante el proceso de taladrado convencional. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III.21. Impacto ambiental generado por el uso de taladrina.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Producción de taladrina</i>	<i>Tratamiento de taladrina</i>	<i>Total</i>
Calentamiento global	<i>kg CO2 eq</i>	62,838958	452,3519	74,2756484
Acidificación	<i>H+ moles eq</i>	144,804114	26,0806	171,158463
Cancerígenos	<i>kg benceno eq</i>	0,0143052	0,02366	0,01690875
No cancerígenos	<i>kg tolueno eq</i>	108,372992	336,87836	128,096877
Efectos respiratorios	<i>kg PM2.5 eq</i>	0,154518	0,2548	0,18264028
Eutrofización	<i>kg N eq</i>	0,021112	0,0273	0,02495438
Disminución capa Ozono	<i>kg CFC-11 eq</i>	4,1496E-05	0	4,9048E-05
Ecotoxicidad	<i>kg 2,4-D eq</i>	4,4317	8,50668	5,2382694
Niebla	<i>kg Nox eq</i>	0,315588	0,6336	0,37302502

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, el cálculo se ha realizado sólo para el proceso de taladrado convencional.

Capítulo III. Método propuesto

Concretamente se obtuvieron 62781 mm³ de viruta de Aluminio 5754 y AISI 1045. Sin embargo, al poseer diferentes densidades, el peso de viruta de aluminio fue de 0,1694 kg y 0,4941 kg para el acero.

Para el cálculo del impacto ambiental producido por el tratamiento de las virutas se ha tenido en cuenta el impacto ambiental derivado del uso de un secador centrífugo para la limpieza de la viruta. Esto es debido a que actualmente muchas empresas ya disponen de estos dispositivos en las plantas de producción con el fin de obtener un mayor rendimiento económico con la venta de la viruta totalmente limpia.

Teniendo en cuenta que el secador está dotado de una potencia de 4 kW, tiene una capacidad de secado de acero de 300 a 700 kg/h y que se obtienen por cada unidad funcional 663,5 kg de viruta, se ha calculado el impacto ambiental generado por este tratamiento.

Tabla III.22. Impacto derivado del secado de la viruta.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>
Calentamiento global	<i>kg CO2 eq</i>	1,856
Acidificación	<i>H+ moles eq</i>	0,776
Cancerígenos	<i>kg benceno eq</i>	0,00428
No cancerígenos	<i>kg tolueno eq</i>	14,18
Efectos respiratorios	<i>kg PM2.5 eq</i>	0,00408
Eutrofización	<i>kg N eq</i>	0,00052
Disminución capa Ozono	<i>kg CFC-11 eq</i>	1,3703E-07
Ecotoxicidad	<i>kg 2,4-D eq</i>	3,148
Niebla	<i>kg Nox eq</i>	0,00568

6.4. Interpretación del ACV

La Interpretación de Impactos del Ciclo de Vida es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema. Como se ha señalado anteriormente, la metodología usada a lo largo del ACV es la norteamericana TRACI, desarrollada en 1995. A

continuación se procede a la recopilación, suma y análisis del impacto ambiental generado por ambos procesos.

En la Tabla III.23, se muestran los impactos ambientales generados por el proceso de taladrado convencional y friction drilling, respectivamente.

Tabla III.23 Impacto ambiental total generado por ambos procesos.

Categoría de impacto	Unidad	Taladrado convencional	Friction drilling
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,856	0,9668
Acidificación	H+ moles eq	0,776	0,4039
Cancerígenos	kg benceno eq	0,00428	0,0022
No cancerígenos	kg tolueno eq	14,18	7,3753
Efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	0,00408	0,00212
Eutrofización	kg N eq	0,00052	0,000289
Disminución capa Ozono	kg CFC-11 eq	1,3703E-07	7,1253E-08
Ecotoxicidad	kg 2,4-D eq	3,148	1,6372
Niebla	kg Nox eq	0,00568	0,002953

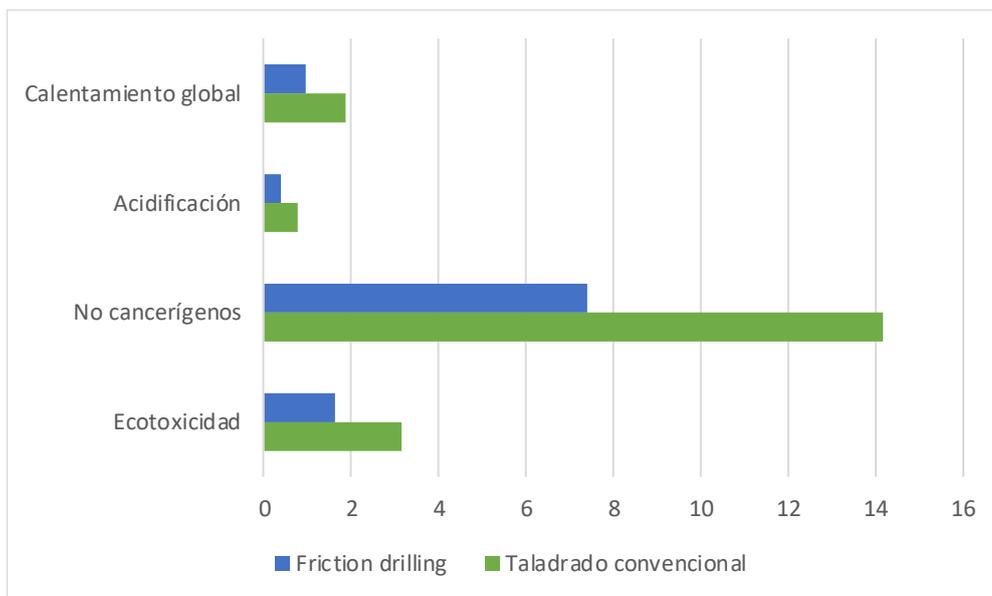


Fig. III.43. Valores totales correspondientes a ambos procesos (I).

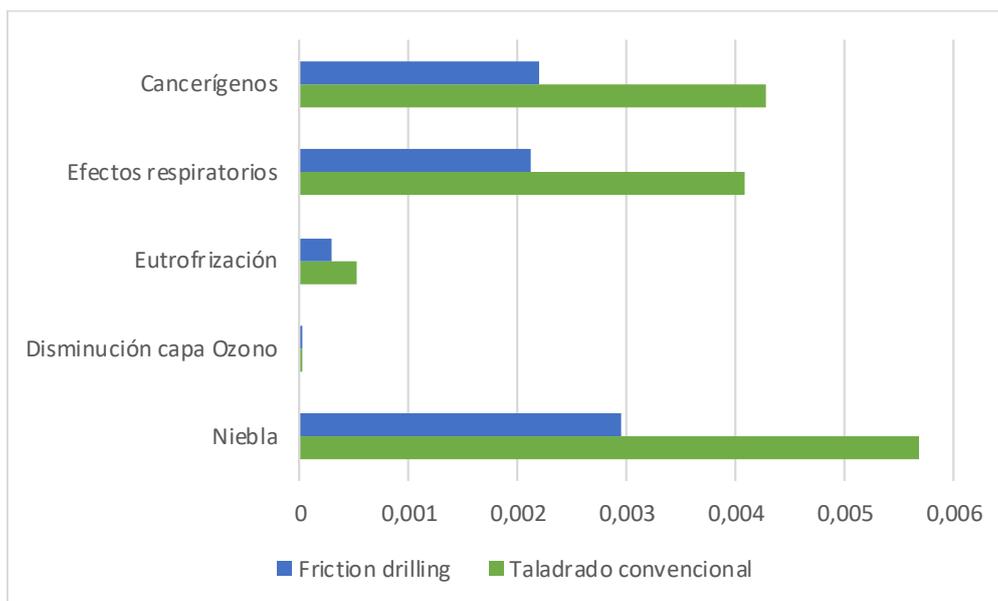


Fig. III.44. Valores totales correspondientes a ambos procesos (II).

A la vista de los resultados obtenidos se observa como desde un punto de vista medioambiental el utilizar la técnica de friction drilling para la realización de taladros presenta un mejor comportamiento que el uso de técnicas tradicionales. De hecho, todos los marcadores muestran una diferencia entre ambas técnicas que oscila alrededor del 48%.

Destacar que los resultados han sido divididos en dos grupos en función de los kg equivalentes generados. En concreto se han plasmado en la Figura III.28 aquellos que están por encima de los 0,01 kg equivalentes y en la Figura III.29 los que presentan valores inferiores. Esto es debido a que se ha considerado que por debajo de esta cifra se pueden despreciar los efectos sobre el medioambiente y toxicidad humana en el caso llevado a estudio.

En referencia a los marcadores más representativos, en el caso del taladrado tradicional se aprecia cómo se generan alrededor de 2 kg de CO₂ equivalentes (kg-CO₂ eq). Sin embargo, al realizar la unidad funcional con friction drilling se reduce por debajo de 1 kg de CO₂-eq. En cuanto a la acidificación se obtienen menores valores. En este caso, los moles de H⁺ equivalentes se sitúan en 0,776 y 0,4039, respetivamente. En cuanto a la categoría de no cancerígenos, presenta los valores

más altos. En el caso del taladro convencional se alcanzan los 14,18 kg de benceno equivalentes y 7,37 kg de benceno equivalente con el friction drilling. Por último, en cuanto a ecotoxicidad se refiere, los valores se sitúan en 3,15 kg de 2,4-D equivalente y 1,64 kg para el taladrado convencional y friction drilling.

Por tanto, como conclusión y a la vista de todos los resultados desde un punto de vista medioambiental, la técnica de taladrado por friction drilling es una tecnología más limpia en comparación con el taladrado convencional. Por todo ello y unido a la viabilidad técnica anteriormente estudiada hace que el friction drilling deba ser tenida en cuenta a la hora de ser planificada la fabricación piezas de la topología estudiada en esta tesis.

Capítulo 4. Conclusiones tecnológicas

Capítulo 4. Conclusiones tecnológicas

En esta tesis, se ha presentado un nuevo método para la producción rápida y económica de uniones atornilladas "sin tuerca", utilizando una combinación de dos técnicas de fabricación de agujeros, taladrado por fricción y roscado por laminación. El método combinado logra un proceso rápido para la producción de agujeros roscados en parejas de aleaciones metálicas disimilares, como es el caso de aceros y aleaciones de aluminio. Después de la perforación de forma simultánea de los pares de aluminio-acero, seguida de roscado por laminación, se puede introducir y roscar un tornillo para de este modo conseguir una junta atornillada apretada, sin necesidad de tuerca.

El taladrado y el roscado se realizan de forma consecutiva en la misma máquina-herramienta, reduciendo el tiempo total del proceso. Se estudiaron y caracterizaron también los parámetros del proceso para reducir el espacio entre las superficies, y generar una buena copa que permita realizar el proceso de roscado posterior.

Por otra parte, los ensayos mecánicos de varias uniones dieron como resultado un comportamiento mecánico similar al de las uniones atornilladas tradicionales. Finalmente, se realizaron ensayos de corrosión para una mejor comprensión de la unión fabricada. De esta manera, se obtuvieron mediante la aplicación esta técnica importantes ahorros de tiempo y dinero. El mercado objetivo para el nuevo enfoque es la industria de la calderería ligera con el fin de eliminar los cordones de soldadura o las uniones atornilladas clásicas utilizando tuercas.

Una vez finalizados todos los ensayos, analizados los antecedentes y fundamentos, y la realización del análisis de resultados, se pueden deducir las siguientes conclusiones relativas a parámetros de proceso y resultados.

1. La generación de uniones mecánicas sin tuerca, mediante un proceso combinado de friction drilling (FD) y roscado por laminación (FT), de combinaciones de acero y aleaciones de aluminio parece viable, dado que se consiguen especímenes de posible uso en aplicaciones diversas.

Capítulo IV. Conclusiones

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.

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:

1. Para cumplir el criterio de diámetro óptimo según la norma DIN13, los parámetros de mecanizado serían: $F=250\text{mm}/\text{min}$ y $S=2500\text{rpm}$.
2. Para cumplir el criterio hueco mínimo entre chapas, los parámetros de mecanizado serían: $F=150\text{mm}/\text{min}$ y $S=3500\text{rpm}$.
3. Para cumplir el criterio de mayor espesor de la copa generada, los parámetros de mecanizado serían: $F=450\text{mm}/\text{min}$ 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 4000rpm y $250\text{mm}/\text{min}$ y su valor fue de $1347,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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.

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.

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.

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

Capítulo IV. Conclusiones

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. Por otra parte:

- a. 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.
- b. 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.
- c. 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.
- d. 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.

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 (FT) 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 otros niveles superiores de MRL (manufacturing readiness level).

Capítulo 5. Contribuciones y Líneas Futuras

Capítulo V. Contribuciones y Líneas Futuras

1. Contribuciones

Tras la explicación del método y resultados obtenidos en varios ejemplos, es momento de determinar las principales contribuciones de esta tesis doctoral:

- 1- Se ha planteado un método general para poder generar uniones entre materiales disimilares unidos por fijación mecánica, mediante una combinación de procesos de deformación, concretamente el Taladrado por Fricción y el roscado por macho de laminación.
- 2- La viabilidad de esta técnica está demostrada, para un caso de materiales disimilares de valor en construcción mecánica, en concreto posibles esqueletos o estructuras de acero con pieles o cobertura de aluminio.
- 3- Se ha buscado disminuir la complejidad de la unión, actuando para no tener que utilizar tuerca, sino la propia copa generada en la unión por Taladrado por Fricción. Además, existe un efecto que suma por adhesión entre los materiales.
- 4- Se han establecido las pruebas mínimas que permitan seguir avanzado a futuro en la investigación, pudiendo llegar a concluir una etapa de investigación de nivel MRL 5 (Manufacturing Readiness Level 5) sin encontrar un obstáculo insalvable (stopper) en el proceso. Concretamente se han realizado ensayos de tracción con funcionamiento a cortante de la unión, y ensayos en cámara de corrosión salina, para estudiar la compatibilidad galvánica de las uniones.
- 5- Se han determinado el efecto de la velocidad de giro y el avance en el Taladrado por Fricción, que resultan ser ambos de importancia para la generación del calor de fluencia y de generación de la copa de la unión.
- 6- El roscado no se ha estudiado de forma intensiva dado que las pruebas determinan que es una operación factible, y por lo demás existe buen conocimiento previo en el grupo de desarrollo de este trabajo sobre esta operación.
- 7- Los tiempos de procesos, sencillez del proceso al realizarse en máquinas simples, y otros aspectos de operativa se han mostrado muy interesantes para campos de valor añadido comprometidos, como es el caso de la calderería fina.

8- Se ha divulgado los resultados en foros técnicos, con objeto de poder definir pares de materiales de interés industrial real para España.

2. Líneas Futuras

Este campo es muy novedoso, podría situarse en un MRL 2-3, y por tanto surgieron numerosos aspectos a resolver y líneas futuras; se marcan las siguientes:

1. Introducir en el método simulaciones por elementos finitos, dado que ya se realizan para establecer ideas iniciales en el proceso, pero con mayor intensidad. En el mercado existe software dedicado como Deform©, o podría hablarse de software más básico de MEF.
2. Introducir, caracterizar y tabular resultados de tensiones residuales en las uniones, tanto en las superficies de los agujeros como en las propias pieles, utilizando difracción de RX como forma más exacta o el método ASTM de hole drilling.
3. Extender el proceso a otros pares de materiales de interés para otros nichos, por ejemplo, AISI 1020 o AISI 1045 (F114) con aluminio.
4. Estudiar el proceso en aceros de alta resistencia, AHSS, chapas galvanizadas.
5. Introducir efectos de elementos accesorios como arandelas o retenes, o tornillos de mayor calidad.
6. Sistematizar el procedimiento, generando un manual industrial de aplicación entendible por empresas de calderería locales.

La memoria de la tesis concluye aquí, y por tanto este trabajo en MRL 3 no así el trabajo a realizar, que incluirá a futuro una valoración económica exacta de los resultados de aplicar esta metodología a futuro, y poder dar pasos hacia otros niveles como el 5 o incluso el MRL 6,7. P

or otro lado aspectos de acabado de las uniones podrán ser analizados empleando la célula de desbarbado del CFAA de la UPV/EHU. En la tabla se muestran algunas ideas de trabajo para mejora del proceso y control de riesgos y defectos.

Tabla V.1. Aspectos a considerar y soluciones para avanzar el MRL hasta el nivel 5.

Riesgo	Medida / Contingencia
Agrietamiento de la rebaba por contracción del material	<ul style="list-style-type: none"> • Atmósferas protectoras Ar • Parámetros proceso, mejor elección de los mismos.
Cambios microestructurales	<ul style="list-style-type: none"> • Control con Pirómetro. • Parámetros de proceso optimizados.
Rebaba entre chapas	<ul style="list-style-type: none"> • Pretaladro del agujero, para reducir fuerza de empuje. • Presión en el entorno más próximo, mediante utillaje.
Falta de unión	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento previo de la zona de unión. • Parámetros proceso
Corrosión galvánica	<ul style="list-style-type: none"> • Aislamiento eléctrico • Mantenimiento en seco • Revestimiento (del más noble) • Protección catódica
Adhesión del aluminio a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimiento PVD de la punta
Alcance de la temperatura máxima que puede soportar el recubrimiento de la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal gas inerte o CO2 • Parámetros proceso

Capítulo V. Contribuciones y Líneas Futuras

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.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

[Abrao et al., 2008] Abrão A.M., Campos Rubio J.C., Faria P.E., Davim J.P., The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials and Design* 2008, 29(2), 508-13.

[ACICAE, 2013] <http://www.acicae.es> (último acceso: 25/05/2017)

[Akkurt, 2011] Akkurt A., Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2011, 20(6), 960–68.

[Avilés et al., 2013] Avilés R., Albizuri J., Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue* 2013, 55, 230–44.

[Bansal et al., 2016] Bansal A., Sharma A.K., Kumar P., Das S., Investigation on microstructure and mechanical properties of the dissimilar weld between mild steel and stainless steel-316 formed using microwave energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2016, 230(3), 439-448.

[Barnes y Pashby, 2000] Barnes T.A., Pashby I.R. Joining techniques for aluminum space frames used in automobiles. Part II – adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of Material Processing Technology* 2000, 99, 72–79.

[Calabrese et al., 2015] Calabrese L., Proverbio E., Pollicino E., Galtieri G., Borsellino C. Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2015, 50(1), 10–17.

[Demir y Ozek, 2014] Demir Z., Özek C. Investigate the Effect of Pre-drilling in Friction Drilling of A7075-T651. *Materials and Manufacturing Processes* 2014, 29(5), 593-599.

Bibliografía

[Elósegui y López de Lacalle, 2010] Elósegui I., López de Lacalle L.N. Threading on ADI cast iron, developing tools and conditions. *AIP Conference Proceedings* 2010, 1345, 116–21.

[Engbert et al., 2011] Engbert T., Heymann T., Biermann D., Zabel A. Flow drilling and thread forming of continuously reinforced aluminium extrusions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2011, 225, 398.

[Esmaeili et al., 2014] Esmaeili F., Zehsaz M., Chakherlou T.N. Investigation the effect of tightening torque on the fatigue strength of double lap simple bolted and hybrid (bolted–bonded) joints using volumetric method. *Materials and Design* 2014, 63, 349–359.

[Fromentin et al., 2005] Fromentin G., Poulachon G., Moisan A. Precision and surface integrity of threads obtained by form tapping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2005, 54(1), 519-522.

[Fromentin et al., 2010] Fromentin G., Bierla A., Minfray C., Poulachon G. An experimental study on the effects of lubrication in form tapping. *Tribology International* 2010, 43, 1726–1734

[Grujicic et al., 2015] Grujicic M., Snipes J.S., Ramaswami S. Process modeling, joint virtual testing and construction of joint connectors for mechanical fastening by flow-drilling screws. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2015.

[Head et al., 1984] Head G.D., Le Master W.C., Bredesky L.P., Winter D.C. Flow Drilling Process and Tool Therefore, USA, Patent N° 4 428 214, 1984.

[Huiwen et al., 2015] Huiwen Z., Wei C., Jingshan H., Jiuchun Y., Shiqin Y. Formation and evolution of intermetallic compounds at interfaces of Cu/Al joints by ultrasonic-assisted soldering. *Journal of Materials Processing Technology* 2015, 223, 1–7.

[Ivanov y Kirov., 1997] Ivanov V., Kirov V. Rolling of internal threads: Part 1. *Journal of Materials Processing Technology* 1997, 72, 214–220.

- [Ivanov, 1997] Ivanov V. Rolling of internal threads: Part 2. *Journal of Materials Processing Technology* 1997, 72, 221–225.
- [Jia et al., 2015] Jia L., Shichun J., Yan S., Cong N., Junke C., Genzhe H. Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel. *Journal of Materials Processing Technology* 2015, 224, 49–59.
- [Kang y Kim, 2015] Kang M., Kim C. Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process. *Materials and Design* 2015, 81(15), 95–103.
- [Kim y Cho, 2014] Kim T.S., Cho Y.H. Investigation on ultimate strength and failure mechanism of bolted joints in two different aluminum alloys. *Materials and Design* 2014, 58, 74–88.
- [Kretschmer, 1981] Kretschmer G. Fließlochformen von Blechdurchzügen Teil I. *Blech Rohre Profile* 1981, 28(8), 331-333.
- [Ku et al., 2011] Ku W.L., Hung C.L., Lee S.M., Chow H.M. Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2011, 53(9-12), 935–944.
- [Landeta et al., 2015] Landeta J.F., Valdivielso A.F., López de Lacalle L.N., Giroto F., Pérez J.M. Wear of Form Taps in Threading of Steel Cold Forged Parts. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2015, 137, 031002-1-11.
- [Lee et al., 2007] Lee S.M., Chow H.M., Yan B.H. Friction drilling of IN-713LC cast superalloy. *Materials and Manufacturing Processes* 2007, 22(7-8), 893-897.
- [Lee et al., 2009] Lee S.M., Cho H.M., Huang F.Y., Yan B.H. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2009, 49, 81–88.
- [Liu et al., 2014] Liu X., Lan S., Ni J. Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel. *Materials and Design* 2014, 59, 50-62.

Bibliografía

[Mathurin et al., 2009] Mathurin F., Guillot J., Stéphan P., Daidié A. 3D Finite Element Modeling of an Assembly Process With Thread Forming Screw. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2009, 131, 041015-1-8.

[Miller et al., 2005] Miller S.F., Shih A.J., Blau P.J. Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum, and titanium. *Journal of Materials Engineering Performance* 2005, 14(5), 647–653.

[Miller et al., 2006] Miller S.F., Tao J., Shih A.J. Friction drilling of cast metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006, 46, 1526–1535.

[Miller et al., 2007] Miller S.F., Blau P.J., Shih A.J. Tool wear in friction drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007, 47, 1636–1645.

[Niknam y Songmene, 2015] Niknam S.A., Songmene V. Milling burr formation, modeling and control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2015, 229(6), 893–909.

[Olinda et al., 2012] Olinda de Carvalho A., Brandão L.C., Panzera T.H., Lauro C.H. Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60). *Journal of Materials Processing Technology* 2012, 212(8), 1753–1760.

[Olvera et al., 2012] Olvera D., López de Lacalle L.N., Urbikain G., Lamikiz A., Rodal P., Zamakona I. Hole Making Using Ball Helical Milling On Titanium Alloys. *Machining Science and Technology* 2012, 16(2), 173–188.

[Ozler y Dogru, 2013] Ozler L, Dogru N. An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. *Materials and Design* 2013, 28(4), 470-475.

[Qiao et al., 2016] Qiao F., Cheng K., Wang L., Guo L. An experimental investigation on the dissimilar joining of AA6061 and 1Cr18Ni9Ti by refill friction stir spot welding and its mechanical properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2016, 230, 779-785.

[Qu y Blau, 2008] Qu J., Blau P.J. A new model to calculate friction coefficients and shear stress in thermal drilling. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2008, 130, 1–4.

[Shanjeevi et al., 2016] Shanjeevi C., Satish Kumar S., Sathiya P. Multi-objective optimization of friction welding parameters in AISI 304L austenitic stainless steel and copper joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2016, 230(3), 449-457.

[Singh et al., 2016] Singh S., Gupta D., Jain V. Recent applications of microwaves in materials joining and surface coatings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2016, 230(4), 603-617.

[Sun et al., 2007] Sun X., Stephens E.V., Khaleel M.A. Fatigue behaviours of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals. *International Journal of Fatigue* 2007, 29, 370-386.

[van Geffen, 1976] van Geffen J.A. Piercing Tools, U.S. Patent No. 3, 1976, 939-983.

[Weingaertner, et al., 1996] Weingaertner W.L., Tikala F., Lopes J.C. Flowdrilling: bushes formed in thin plates, *International Manufacturing Engineering Conference*, Connecticut, USA, ASME, 1996, 227-231.

[Weingaertner, et al., 1997] Weingaertner W.L., Tikala F., Lopes J.C. Flowdrill system: high resistance threads in thin metal sheets. *Journal for Manufacturing Science and Production* 1997, 1(1), 41-50.

[Wittke et al., 2015] Wittke P., Walther F., Liu Y., Biermann D.. Influence of the production process on the deformation and fatigue performance of friction drilled internal threads in the aluminium alloy 6060, *Materials Testing* 2015, 57(4), 281-88.

[Zhang et al., 2015] Zhang K., Lei Z., Chen Y., Liu M., Liu Y. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser-TIG hybrid welded dissimilar joints of Ti-22Al-27Nb and TA15. *Optics and Laser Technology* 2015, 73, 139-145.

[Zhou et al., 2014] Zhou L., Nakata K., Tsumura T., Fujii H., Ikeuchi K., Michishita Y., Fujiya Y., Morimoto M. Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Filling Friction Stir-Welded Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2014, 23(10), 3718-3726.

Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints

Proc IMechE Part B:
J Engineering Manufacture
1–14
© IMechE 2016
Reprints and permissions:
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav
DOI: 10.1177/0954405416661002
pib.sagepub.com


Gorka Urbikain¹, Jose M Perez², Luis N López de Lacalle¹ and Aritz Andueza¹

Abstract

In this article, a new method for the rapid and economical production of 'nutless' bolted joints is presented, using a combination of two hole-making techniques, namely, form drilling and form tapping. The combined method achieves a quick way for the production of threaded holes on couples of dissimilar metal alloys, as it is the case of steels and aluminium alloys. After the simultaneous form drilling on the aluminium–steel pairs and followed by form tapping, a fastener can be introduced and screwed for achieving a tight bolted joint, without any necessity of nut. However, form drilling and threading are performed consecutively in the same machine tool, reducing the whole process time. The process parameters were studied for reducing the gap between surfaces and producing a good cup for making the posterior threading. Then, mechanical testing of several test pieces resulted in a similar behaviour than traditional bolted joints. Finally, corrosion tests were performed for a better understanding of the joint manufactured. In this way, savings in time and money are derived from the application of the approach. Target markets for the new approach are the light boilermaking industry in order to eliminate either welding beads or classical bolted joints using nuts.

Keywords

Form processes, friction drilling, nutless joints, dissimilar materials

Date received: 30 September 2015; accepted: 27 June 2016

Introduction

Currently, several industrial sectors ask for new approaches for joining metals of very different melting points, difference that makes welding process impossible, as it is the case of steel with aluminium. Here, welding is impossible with traditional thermal welding techniques because when steel is melting, aluminium alloys are already boiling. However, the joining of dissimilar materials is a necessity because in some cases, the structures need high-temperature resistance in one area and a good corrosion resistance in another, or toughness or wear resistance is required in one point, while high strength is required in another area. The joint of a stiff and high-strength metal such as steel with a light alloy is a good solution for applications in which the structural skeleton could be made out of steel, whereas skins and cover plates could be made in aluminium of the 5xxx group.

This technology, usually known as dissimilar material joining (DMJ), has been associated with metallic alloys including low and medium carbon steels and

low-alloy steels, stainless steel, nickel, copper, and aluminium alloys and other non-metal materials. In the 1990s, there were research works involving titanium alloys, ceramics, polymers, and composites materials. Moreover, currently, in automotive applications, the joint of metals and plastics is really a research hot topic¹ leading to different friction or heat-based techniques applied to a number of duos of materials: (1) friction stir welding (FSW) in Al5083 and steel,² stainless steel, and copper³ or friction stir spot welding;⁴ (2) laser welding of Al5082 and steel⁵ and different titanium alloys;⁶ and (3) other techniques such as ultrasonic-assisted soldering of Cu–Al joints,⁷ arc braze welding for Al–Fe dissimilar metal joints,⁸ and microwave energy to weld

¹University of the Basque Country, Bilbao, Spain

²CDTI, Madrid, Spain

Corresponding author:

Gorka Urbikain, University of the Basque Country, Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain.

Email: gorka.urbikain@ehu.es

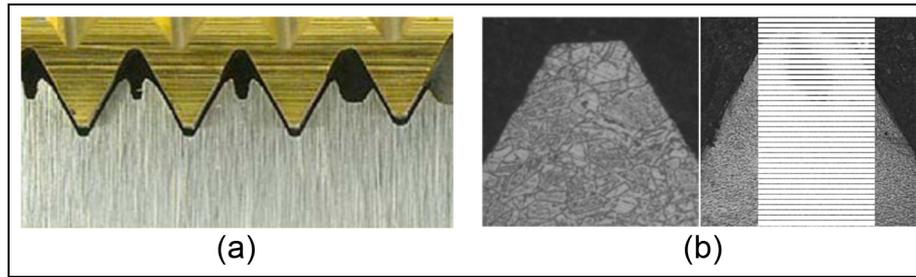


Figure 1. (a) Mechanism of thread formation with tap lobes and (b) microstructure of a thread produced with cut and roll taps.

dissimilar materials.^{9,10} In the case of joining of two metallic alloys, several factors must be taken into account including

- Differences in melting temperatures.
- Thermal expansion–contraction, mismatch during joining and in service.
- Fixtures and constraint effects on joining stresses.¹¹
- Formation of brittle intermetallic compounds during joining, which may lead to very frail joints.^{12,13}
- Heating–cooling rate effect on the microstructure of the joint, which could affect the strength and precision of the final joint.
- Galvanic corrosion problems.¹⁴

Particularly, hole making is a basic technology in automotive sector and aeronautics. For instance, vehicle builders use the flow drill screwing (FDS[®]; from the Swedish company EJOT[®]) in addition to metal inert gas (MIG) welding or punch riveting for high-strength sheet metal joints. In the case of aircraft turbines, the risk and cost are maximal in hole-making operations because of the large accumulated machining times.¹⁵ Taking these requirements for DMJ into account, friction techniques are now being considered because they produce metal flow without melting, being the base of several techniques such as friction welding (FW; rotational and linear), FSW, friction drilling (FD), and form tapping (FT). Simulation techniques and computational approach were also used¹⁶ to help to establish the effect of various flow-drilling screw processes and material parameters on the performance of the resulting flow-drilling screw joint, useful for analysing the whole-vehicle crash or even in simulations of vehicle component manufacturing.

The form process has several advantages with respect to traditional drilling. First, there is no need for cooling. In the traditional drilling process, coolant fluids are necessary to reduce friction and heat and to enhance chip evacuation, just the opposite of what FD intends. Second, unlike traditional chip removal processes, the main mechanism is friction, and no chip is expected. Therefore, it is often defined as a ‘clean’ or ‘green’ process. In the case of bolted joints, if the hole needs to be threaded, the need of a nut can also be avoided in some cases. This application is of great

interest when it comes to make threaded holes in tubular or geometries that do not allow accessibility from the exit side such as appliances.

Most of the workpiece material in contact with the rotational tool becomes the generated cup (see Figure 1) with only a small burr at the part tool entrance side. There are two options when it comes to this upper burr; one possibility is that it is crushed between the tool ring and the piece, which implies that process is absolutely chipless. The other possibility is that the material is removed from the workpiece by a chip breaker located around the tool shank. Even in the latter case, the amount of material removed is small and is extracted out from the workpiece, and it still remains a clean process.

Adherence of work material to the tool causes sliding conditions that tend to increase the frictional work done. The surface quality of holes is compromised by such conditions and may be a factor in reducing the fatigue life of joints.¹⁷ Ku et al.¹⁸ showed that the drilling bit conical shape (angle) and spindle rotational speed were the most significant machining parameters that affect hole inner roughness while friction contact area ratio was the only significant parameter for the bushing length. FD has been applied to different materials. The effect of tool bit parameter, tool geometry, and materials was also studied in Ozler and Dogru¹⁹ for AISI 1010, showing that the hole zone temperature increased with increasing drilling speeds and decreasing feed rates. In the case of plastic materials, the effect of the cutting tool geometry was investigated in Abrão et al.,²⁰ suggesting that the relation between the thrust force and delamination is not trivial. The possibility of making a pre-hole is offered in Demir and Özek,²¹ according to the thermal conductivity of aluminium alloys and a nickel-based superalloy by FD in Lee et al.,²² where the results show that higher rotation speed and faster feed rate achieve better roundness and roughness.

Once the hole is open and the cup formed, the FD tool is extracted and FT process is performed. Threading process is widely spread in a lot of mechanical applications since it is essential in the procedure to produce screw joints, the most extended way of assembly of mechanical components. Two methods can be used to create an inner thread, either by forming or by cutting. So, in the case of forming, the thread is

generated due to deformation of the raw material in a cold working way, whereas in the case of cut tapping, thread is obtained by chip removal as it is common in other machining processes.²³

This work proposes the use of forming taps, also being known in industry as *roll taps*. Cold deformation in threading is interesting due to several aspects, such as the following:

- It is a clean (chipless) process since threads are not cut but formed.
- Stronger threads are produced, thanks to iso-stress level lines which are parallel to the thread profile.
- Good thread calibration: during threading, several forming lobes act successively (Figure 1(a)), and the possibility of producing oversized threads is lowered.
- Improved tool life: taps can last from 3 to 10 times more than current cut taps.

The above advantages make this technique recommendable in a lot of applications, especially in automatic operations where high productivity rates are required as it is the case of automotive applications.^{24,25} Moreover, its improved tool life makes it particularly interesting for automated operations (approximately 10,000 threads without supervision).

However, allowable stress for the screw joint calculation when threads are made with cut taps is lower than the case when threads are made by FT. In the cut tap case, there is no advantage from the strain hardening of the hole inner thread surface. With formed threads made by FT, the workpiece material shows higher resistance due to the *strain hardening* effect derived from the cold forming action of taps. Moreover, flank angle errors are prevented in the roll tap case because material flows along the tap profile without any clearance. However, the imperfection at the minor diameter typical of formed threads (thread peaks), so-called claws or split crest (Figure 1(b)), has no direct influence on the thread or screw strength.²⁶

FT is feasible in ferrous and non-ferrous metals if hardness and tensile strength are not above 200 HBN and 800 MPa, respectively. It strengthens material on thread flanks, in particular in the thread root area, and the strain hardening effect has a positive influence on the overall strength of fasteners and screw joints under dynamic stresses, as demonstrated.^{27,28} Either at rolling and burnishing processes^{29,30} or at friction threading³⁰, fatigue behaviour is directly affected by strain hardening. In³¹, the authors showed that the friction threads lead to much better mechanical, profile and microstructural property. In the latter work, formed threads showed the best and cut threads the worst mechanical properties which were correlated with the production-related profile qualities and changes in microstructure.

In this work, a combination of two forming processes, FD and FT, for the assembly of dissimilar sheet

metallic parts using fasteners is presented. This approach simplifies the need of using nuts and rings and even the bolt itself (for certain applications), becoming a *nutless* fastener joint. The processes were studied and optimized by measuring both the key process magnitudes and the resulting specimens on the couples Al5754-AISI 1045 and Al5754-304L stainless steel. These couples were tested in comparison with conventional joints made by traditional drilling for achieving a bolted joint with nut. As a result, the combination leads to joints with similar properties to those produced by conventional cutting processes but with reduced cost impact.

Optimization of form processes

The method implies the consecutive use of FD and FT; therefore, both techniques were analysed. FD process is a non-conventional generation for hole making on metal sheets. It is based on the material flow using the heat caused by the friction of a conical shape rotary tool without cutting edges. The FD tool has two different sections: a conical surface that penetrates the hole and softens the sheet material and a cylindrical segment responsible for the final hole diameter. As a result, a significant burr appears at the hole exit, the so-called *cup*.^{32–34} Burrs are an undesirable phenomenon occurring in machining operations,³⁵ reducing assembly and machined part quality; however, FD takes advantage of burrs for producing the cup that eliminates the need of using a nut in the joint. Before the manufacturing of the final specimens, sections 'FD' and 'FT' develop the experimental procedure to identify and fix the optimum cutting parameters for both form processes.

FD

The experimental tests were carried out in a three-axis milling centre. A maximum spindle power of 10 kW was more than enough for the application. To ensure an adequate clamping, a fixture was specially designed. This one allows the alignment of the workpiece with respect to the axes of the machine and prevents the deflection of the sheets during the hole making. Figure 2 shows the main elements for the experimental set-up including materials, fixture, and tools.

Three dissimilar joints were investigated, combining two types of common aluminium alloys with two types of steels (common AISI 1045 and 304 stainless steel):

- Case A: square-section tubes (30 × 30) of AISI 1045 and sheets of Al 5754 (thickness = 1.5 mm).
- Case B: square-section tubes (30 × 30) of stainless steel AISI 304 and sheets of Al 5754 (thickness = 1.5 mm).
- Case C: square-section tubes (30 × 30) of stainless steel AISI 304 and sheets of Al 6082 (thickness = 1.5 mm).

Regarding FD tools, in all cases, carbide tools (90% WC and grain size 1 μm), Ø7.3 mm were employed for

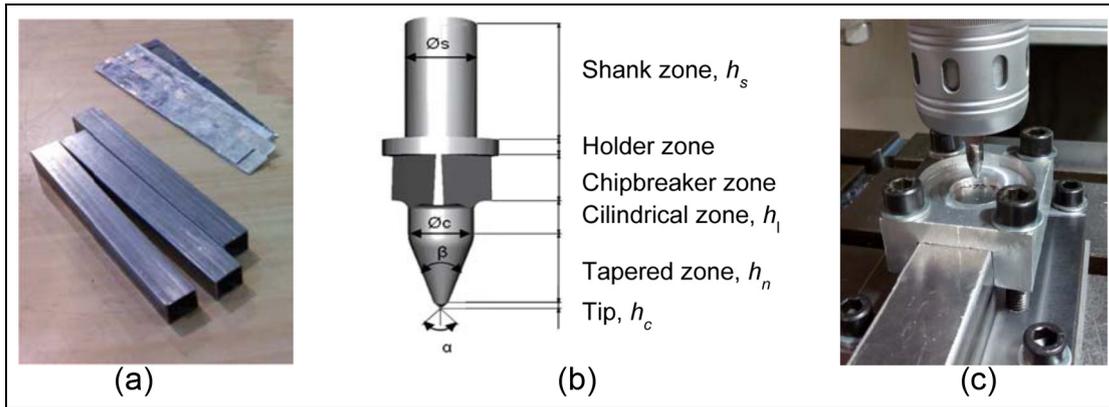


Figure 2. (a) Workpiece: sheets and tubes, (b) friction drilling tool, and (c) detail of the clamping fixture.

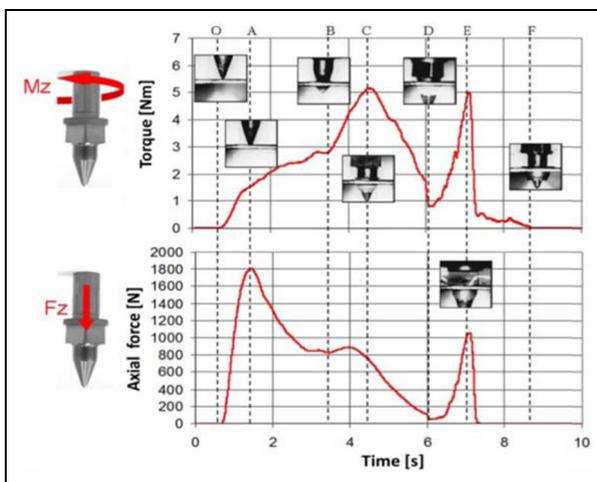


Figure 3. Evolution of force and torque in friction drilling.

achieving M8 \times 1.25. The main geometrical factors (see Figure 3) were as follows: $h_s = 15$ mm, $\varnothing_s = 8$ mm, $h_l = 5.4$ mm, $\varnothing_c = 7.3$, $h_n = 7.6$ mm, $h_c = 0.9$ mm, $\beta = 40^\circ$, and $\alpha = 90^\circ$.

A campaign of trials was designed to verify the influence of the two main parameters affecting the FD process: the spindle speed and the penetration (feed) speed. These parameters were swept from 1500 to 4500 r/min and from 150 to 500 mm/min, respectively. Throughout the process, online magnitudes (cutting force, torque, and temperature) and offline magnitudes (hole diameter, gap, and cup size) are measured to evaluate the best combination (f_z , S).

Forces and torque. The force monitoring allows understanding of the friction mechanisms during the deformation process and the generation or rupture mechanisms of the upper side of the burr.^{34,36} To measure the thrust force and torque, an Artis[®] device based on strain gauges was used. It consists of (1) rotor, located at the toolholder; (2) stator, at 5 mm distance from the rotor; (3) transducer, which receives the load

signal of the inductive sensor and converts it into voltage; (4) acquisition board, with a sampling frequency between 0 and 1000 Hz and data transfer capabilities to a PC via USB; and (5) notebook with Quick Data, for data recording. During the tests, a sampling frequency of 800 Hz was used. The signal was post-processed with MATLAB[®] to find the torque and average and maximum forces. Comparing to a Kistler[®] dynamometer where the centre of the hole and the Kistler table must be aligned, the measurements using Artis are simpler and direct because the acquisition is independent of the working point. Figure 3 points out the most relevant stages during the hole-making process:

- OA: the central area of the tool (tip) rubs against the surface of the workpiece while advancing, and the thrust force increases.
- AB: as the process progresses, the contact area between the conical tool tip and the workpiece increases, and thus, the friction and the associated torque start growing because the radius is increased.
- BC: the cylindrical portion of the tool contacts the burr portion of higher thickness, resulting in a slight increase in the thrust force and rapid increase in the torque values.
- CD: the torque decreases when the cylindrical portion of the tool starts to deform the burr region of lower thickness. The thrust force also experiences a steady decline.
- OF: this region corresponds to the tool chip breaker area. The top burr is crushed by the tool resulting in higher torque and axial force.
- EF: this region refers to the tool retraction. The thrust force decreases rapidly to zero, although there is a slight friction between workpiece and tool as shown by the measured axial moment.

This general trend is shared by all the three cases. Figure 4 shows the force and torque for case A specimens. Higher plate thicknesses (Figure 4(a)) will increase both the thrust force and torque, with a non-

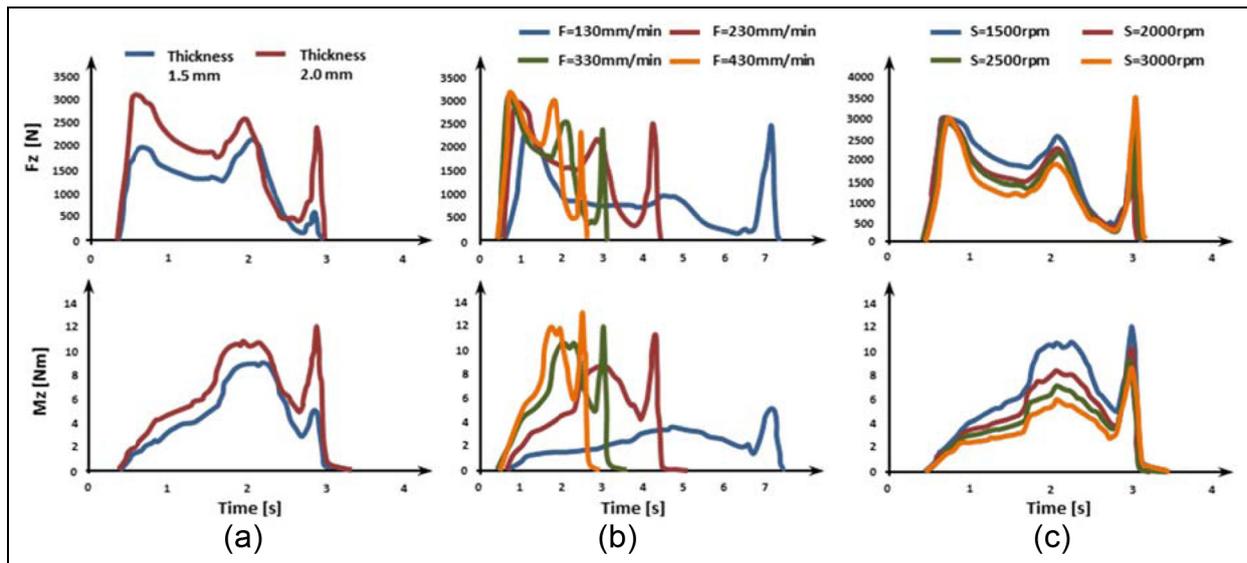


Figure 4. Evolution of force and torque in friction drilling (case A): (a) effect of plate thickness ($S = 1500$ r/min and $F = 330$ mm/min), (b) effect of feed rate ($S = 1500$ r/min), and (c) effect of spindle speed ($F = 330$ mm/min).

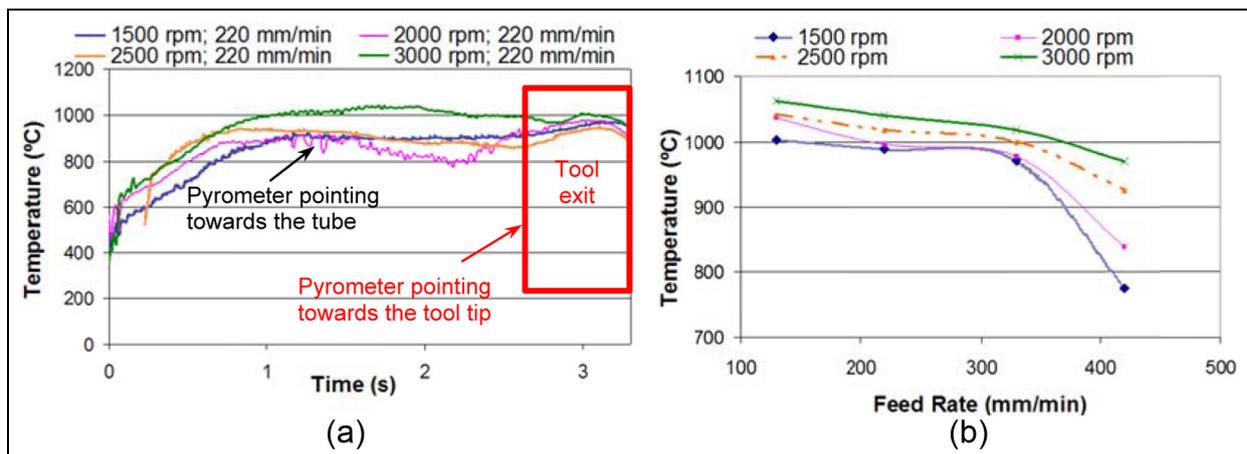


Figure 5. Temperature evolution with time: (a) influence of spindle speed and (b) influence of feed rate.

proportional augmentation at the tool exit. Due to a bigger volume of softened material, the contact area between the cup and the tool increases, and so, higher frictional forces and deformation resistance occur. For a constant spindle speed, the thrust force is proportional to the feedrate (Figure 4(b)). This is due to lower contact times between workpiece and tool, that is, less amount of heat is generated to soften the material. Finally, when the rotational speed increases (maintaining constant feed values), the thrust forces and torque decrease because more heat comes from the greater frictional time (Figure 4(c)).

Temperature. The temperature reached by the workpiece is an important factor for a correct cup formation. When this value is low, the chip is prone to fractures and tends to remove the material radially to the hole.

However, when the temperature is high, the cup has a cylindrical shape, but thermal distortion can appear during cooling.^{37,38}

In this case, the temperature was recorded using a two-colour pyrometer (Impac[®] IGAR 12 LO, with measuring range from 350 °C to 1300 °C) that points towards tool exit (Figure 6). The signal was captured in real time using a computer and specific software.

The heat is first generated by pure friction. Then, the tapered zone also increases heat generation due to friction and plastic deformation of the material. The cooling rate of the material after machining is also important as it determines the microstructural transformations. The maximum temperature affects the quality of the generated cup. If low, brittle cups are observed, while higher temperatures lead to cylindrical shaped ones (more suitable for threading). The maximum temperature is dependent on the rotational speed and tool



Figure 6. (a) Characterization of hole quality and (b) gap area in friction drilling (cases A, B, and C).

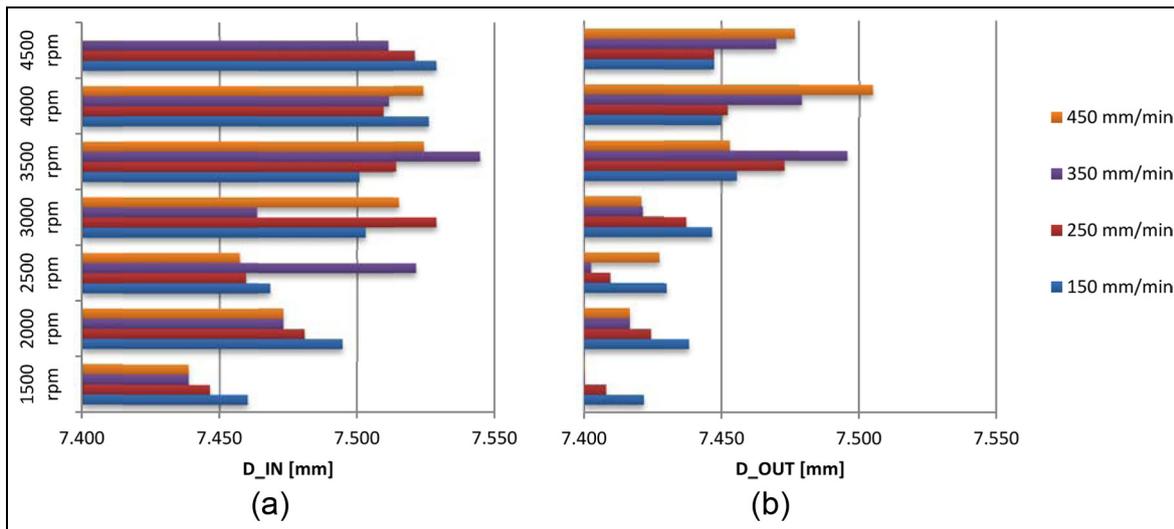


Figure 7. (a) Input and (b) output diameters against cutting conditions.

feed. When increasing the rotational speeds, higher friction between tool and workpiece occurs, leading to high process temperatures (Figure 5). However, the maximum temperature at the tool exit is quite similar for all the spindle speeds. However, the increase in the feed rate results in a decrease in the maximum temperature since the contact time between tool and workpiece decreases.

Hole quality. In conventional drilling with twist drills, the hole diameter diminishes due to tool wear. On the contrary, in FD, just the opposite is experienced because of the progressive adhesion of the work material onto the tool bit surface.

The hole quality can be studied by means of five parameters; first, input diameter D_{in} (on the top plate of aluminium) and output diameter D_{out} (on the tubular steel); second, by measuring the gap created between the two components (P_t and P_c in Figure 6) and the cup thickness. The gap can cause differential aeration of the joint and must be as small as possible because it causes metal corrosion as a result of the formation of an oxygen concentration cell, due to an uneven supply of air on the metal surface.

Figure 7 shows the variation in the hole diameter based for case A (AISI 1045-A15754). While it is

observed with consistency between both diameters, smaller values for the output diameter lead to slightly tapered holes.

Using the indirect measures of P_c and P_t parameters, the gap may be calculated (Figure 8). From this plot, high spindle speeds and low feed rates are the best combination to achieve a minimum gap (MG).

The cup size defined on the total depth and cup thickness is affected by the choice of the drilling parameters. A cross section of the holes was done in order to measure consistently and accurately the burr shape. To characterize the thickness of the burr, a microscope, Mitutoyo[®] TM-100, was used. It is equipped with 2- μ m heads to ensure accurate positioning and adjustment. The measurements were chosen at different heights in the vertical axis (Figure 9). From them, it follows that higher feed rates cause an increase in the burr thicknesses along its entire length favouring subsequent threading operations.

Relationships between main parameters and basic criteria. As a summary of preliminary results in section 'FD', Table 1 represents some of the main relationships between the input (I) and the output (O) variables. The output variables are sub-divided into (1) online magnitudes (force, torque, and temperature) and/or (2)

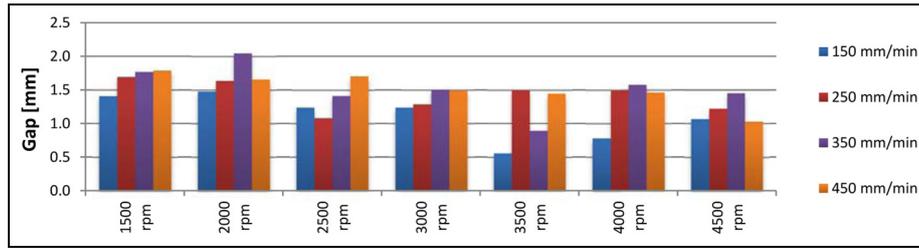


Figure 8. Gap between sheets against cutting conditions (case A).

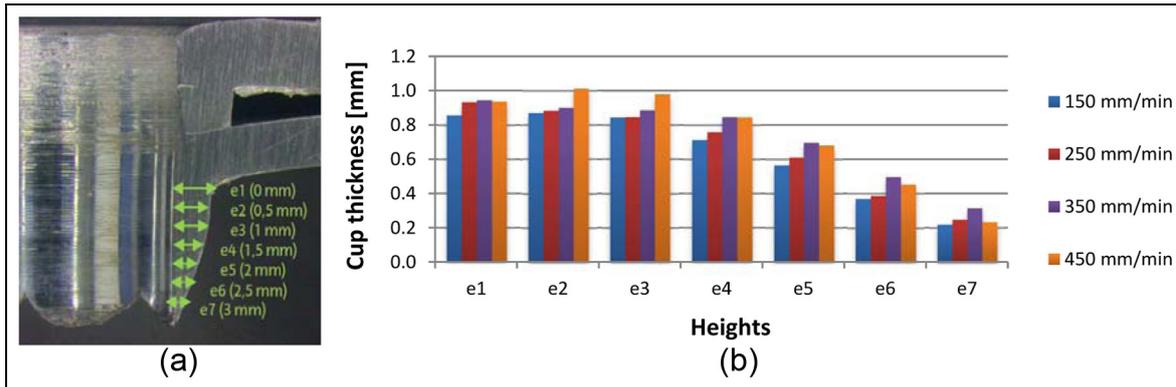


Figure 9. (a) Measurement at different heights and (b) cup thickness at S = 3000 r/min.

Table 1. Influence between input (I) and output (O) parameters.

Input variables	Output variables					
	Thrust force, F_z	Torque, M_z	Temperature, T	Diameter, D	Gap	Cup thickness
↑ Spindle speed, S	↓	↓	↑	↑	↓	↓
↑ Feed speed, F	↑	↑	↓	↑ or ↓ ^a	↑	↑
↑ Plate thickness, t	↑	↑	↑	↑	↑	↑

^aDepending on the spindle speed.

offline value, related with hole quality. Increasing the spindle speed is advantageous for achieving lower cutting forces and torque for an MG but leads to higher deviations from the nominal diameter. However, either decreasing the feed rate or increasing the plate thickness will increase the tool–workpiece contact times (i.e. the temperature).

So, depending on the objective, there are several criteria depending on which objective do we have:

1. MG: the smaller the gap between sheets, the lower the exposure that the metal will have to the environment, thus improving its corrosion resistance. The parameters giving the MG in AISI 1040-A15754 were as follows: F = 150 mm/min and S = 3000 r/min.
2. Optimum diameter (OD): the OD is defined from the standard DIN 13. These parameters are as follows: F = 250 mm/min and S = 2500 r/min.

3. Maximum cup thickness (MCT): a large cup or burr thickness make easier and stronger the next stage of FT, resulting in F = 450 mm/min and S = 3000 r/min.

Additionally, the typical drilled by twist drill bolted joint with nut is also considered, referred with capital letter BJ (after bolted joint).

FT

Subsequently, the hole needs to be threaded by FT. Regarding the tool, taps are often polygonal geometries with at least five lobes. Taps are made of high-strength steel (HSS) coated with titanium nitride (TiN) to provide a core with enough toughness but harder surface. In some cases, anti-friction coatings or internal lubrication are advisable. Also, they may include tapered cutting edges with smaller diameter to initiate the material

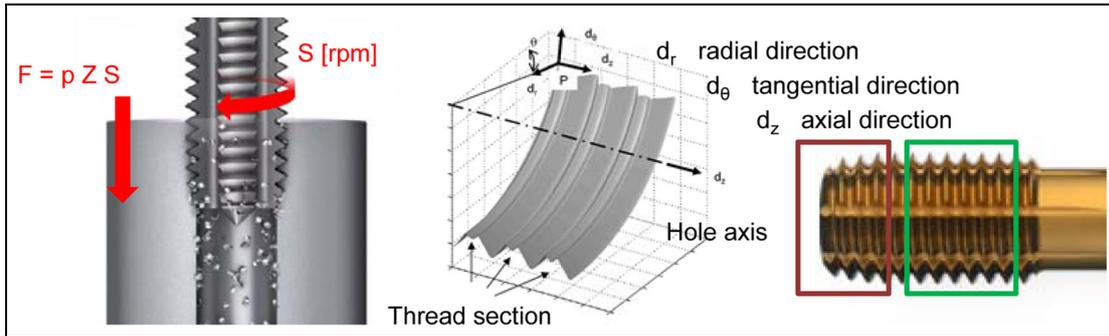


Figure 10. FT: thread operation, thread section, and tap geometry.

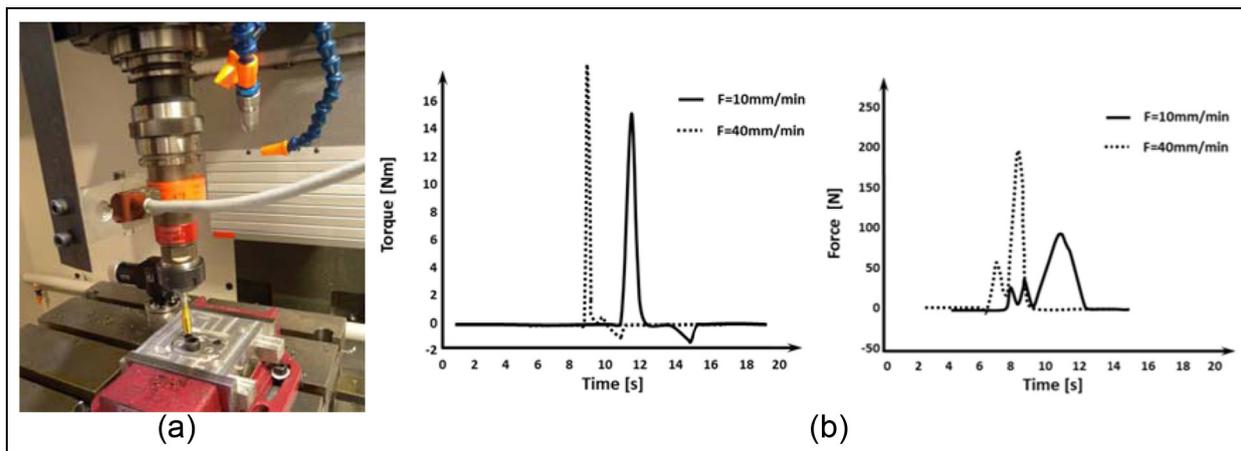


Figure 11. Form tapping (a) experimental set-up and (b) torque (left) and thrust (axial) force (right).

removal. According to the hole machined with the $\varnothing 7.3$ form tool, a form tap (Emuge[®]) for M8 was selected.

In FT, the maximum depth of the thread and the maximum thread pitch are the most important parameters (Figure 10). An FT is characterized by (1) the entrance zone, at the tool tip, which is a tapered geometry where the lobes progressively increase the nominal diameter (ISO 8830), and (2) the cylindrical part, which acts as a supporting system, guiding the tap during threading operation. The maximum depth of thread is significantly higher than in the case of conventional threading (cutting) tools, being limited by the quality of the coolant and the tool length. The maximum pitch of the thread depends on the material properties of the workpiece. The upper limit is often below 3.5 mm. Indeed, not all the materials are suitable for FT, that is, due to the intrinsic deformation involved, the material should have a minimum ductility (minimum failure resistance at 5%) and should not exceed a maximum mechanical resistance of 1400 N/mm².

Another important aspect is the influence of the pre-machining diameter. Too small diameters will lead to excessive rolling phenomena and forces during the process. Inversely, if this diameter is too large, the core section is not enough rolled, and the core diameter will be too small.

Regarding possible changes in the material, due to deformation mechanisms, work hardening may also arise in the affected zone. This phenomenon is accentuated the greater the wear. Additionally, since there is crushing and deformation, internal compressive stresses appear which are advantageous to enhance the mechanical resistance of the thread.

As in the previous section, a test series was designed to select the most suitable cutting parameters for consistent thread through hole trials' rolling friction generated by drilling. To do this, the same clamping system referred in section 'Analysis of part quality' was employed (Figure 11(a)). The use of an absolutely rigid toolholder was considered risky due to the non-perfect synchronization between the spindle rotation and the linear feed because tap must follow the inverse spiral path during extraction. Preliminary tests make this option not recommendable due to the poor repeatability of the operations.

For the threading cutting tests, different feed rates (10–40 mm/min) were conducted at constant spindle speed (600 r/min), recommended by the tool manufacturer. Figure 11(b) shows the values of torque and force for the extreme cases. As a conservative criterion, the criterion with the lowest feed rate was chosen since it generates a low amplitude and damped peak.

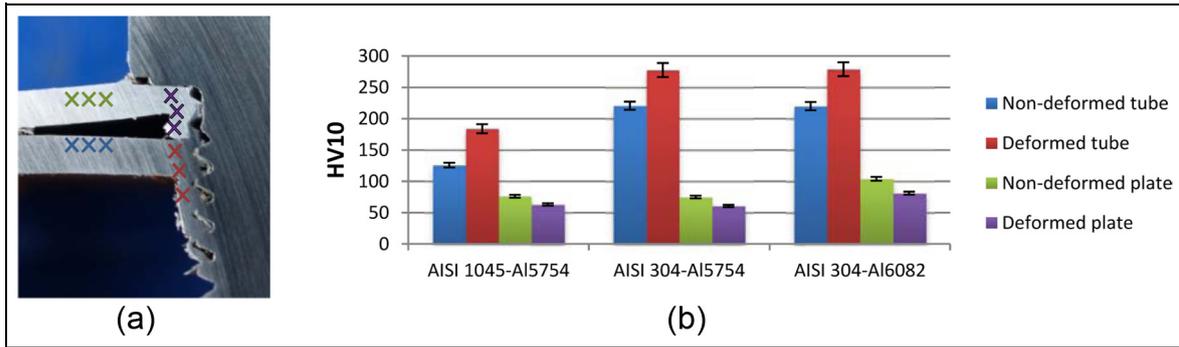


Figure 12. (a) Test areas for hardness measurements (tube and plate) and (b) Vickers hardness measurements for different pair materials (MG condition).

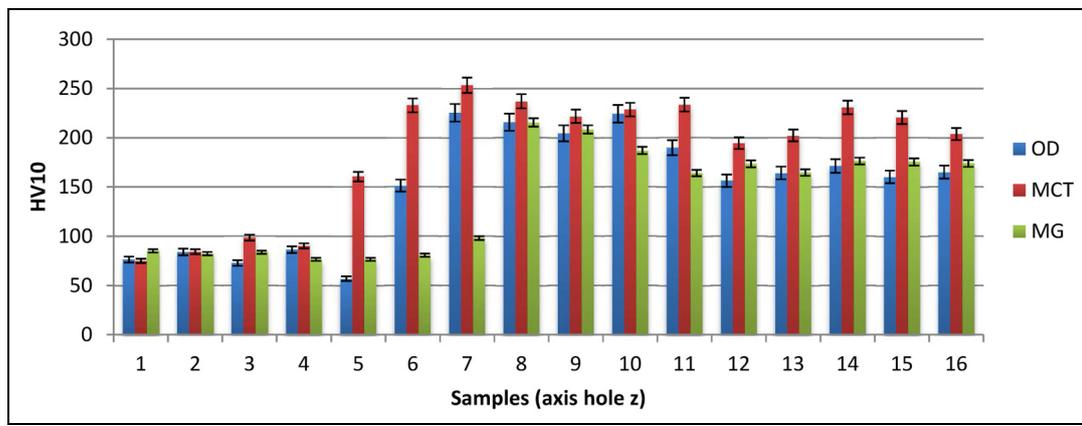


Figure 13. Micro-hardness for the three criteria.

Analysis of part quality

In this section, the main results from the mechanical and corrosion tests are depicted. To evaluate the joint properties, micro-hardness analysis and shear cutting tests were performed. Then, a series of salt spray tests was done to verify qualitatively the corrosion of the specimens.

Micro-hardness measurements

The hardness study involved two stages: first, the difference in hardness between the deformed and undeformed zones was analysed for the three couples of materials. Second, the difference in the hardness along the z-axis of the hole was quantified for the pair AISI 1045-AI5754, for the three criteria: OD, MCT, and MG. Similar behaviours are expected for the other two specimen types.

Vickers hardness tests were performed according to norm UNE EN6507-1 in sections of specimens of AISI 1045-AI5754 and AISI-304 with AI5754 and AI6082, with MG condition. All the tests were done using a hardness meter (Vickers micro-hardness FM-800)

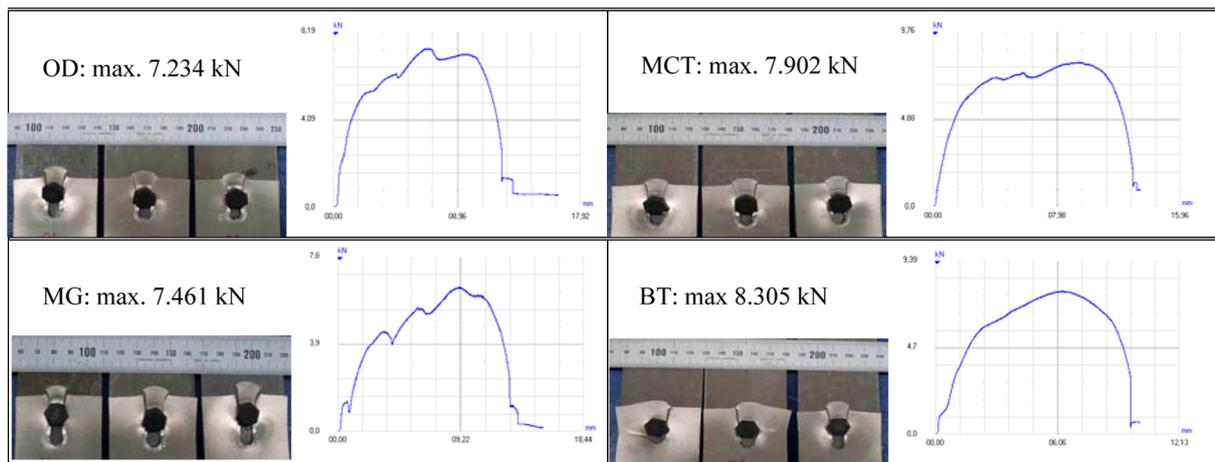
focusing on points located at the undeformed and deformed zones of the tube (steel) and plate (aluminium). As seen in Figure 12, the hardness in the steel tube increases in the deformed region. On the contrary, the hardness values for the aluminium sheets decrease in the deformed areas. The measurements were found to be consistent as it can be deduced from the measurements from the materials shared, AISI 304 and AI5754, with maximum absolute errors below 5%.

Additionally, three samples of AISI 1045-AI5754 were taken to perform micro-hardness studies of the materials along the vertical axis of the joint (Figure 13). To do this, three samples corresponding to the three criteria set out in section ‘Analysis of part quality’ were encapsulated and polished: MG, OD, and MCT. In all cases, the transition from aluminium to AISI 1045 steel is observed, with a greater hardness in the case of maximum burr thickness condition and lower hardness in the case of MG. The results were consistent with each other, with similar relative increases in the steel hardness and decreases in the aluminium hardness with respect to their respective initial values. Again, the maximum deviations from the mean value were about 7% at the worst case.

Table 2. Results of the shear cutting tests.

Reference	Maximum load (average; kN)	Range for deviations (kN)	Failure mode
OD	7.234	+0.28 to -0.24	Mode D (shear of the sheet border)
MCT	7.902	+0.34 to -0.28	Mode D (shear of the sheet border)
MG	7.461	+0.30 to -0.33	Mode D (shear of the sheet border)
BJ	8.305	+0.21 to -0.20	Mode C (tearing of the sheet) or D (shear of the sheet border)

OD: optimum diameter; MCT: maximum cup thickness; MG: minimum gap; BJ: bolted joint.

Table 3. Final state of the test parts and load–displacement graphs.

OD: optimum diameter; MCT: maximum cup thickness; MG: minimum gap; BJ: bolted joint.

Mechanical resistance

To characterize mechanically the joints, shear tests were carried on case A specimens with two objectives: first, to compare the ultimate strength for the three criteria; second, to study the failure modes of the machined parts. Either from FD process (OD, MCT, and MG) or from conventional drilling (BJ), the joint assembly was completed using steel screws.

The shear tests were performed with three testing samples per criterion in a universal testing machine, pulling the two sheets from opposite-coaxial jaws so that the screw suffers pure shear stress. As a result, the type of failure is obtained and the maximum force recorded. A priori, the possible mechanisms could be (1) failure of the joint between materials (at the interface), (2) failure of the softest material (aluminium), and (3) screw breakage.

Table 2 depicts the maximum loads (averaged from three samples) and the corresponding failure mode for each of the types. The failure mode classification is selected according to the criteria in the Metallic Material Properties Development and Standardization (MMPDS-01).

In all cases, the shear mechanical resistance was limited by the mechanical strength of the aluminium. However, the MCT condition seems to be the best

choice, that is, the nearest from BJ condition. Table 3 shows the final states of the joints after the failure together with the corresponding load versus displacement graphs. Only the graphs associated with case A are plotted because similar graphs and consequences are extracted for case B.

Galvanic corrosion

When dissimilar materials are put to work in a dry atmosphere (or more general, in non-electrolyte media), nothing occurs. However, if the same equipment contacts electrolyte (salts solutions, acids, or alkalis), corrosion of the less noble metal (a metal with less electrode potential) will occur. Such type of corrosion is called galvanic or dissimilar metal corrosion which is influenced by environmental, electrochemical, metallurgical, or geometrical factors. These can be resumed into three main factors: the difference of electrode potentials of various metals and alloys, the ratio between anode and cathode areas, and the electrical conductivity of media. The greater the difference of electrode potentials between dissimilar metals, the more severe the galvanic corrosion.

The salt spray (or fog) test is a standardized and popular corrosion test method, applied to several dissimilar joints following the guidelines of ISO 9227

Table 4. Results: corroded surface in percentage (from the total surface).

Reference (two samples/reference)	Condition	$t_1 = 24$ h			$t_2 = 48$ h		
		Tube (%)	Plate (%)	Screw (%)	Tube (%)	Plate (%)	Screw (%)
Case A + galvanized screw	MG	30	10w	15w	40	10w	5-10w
Case A + steel screw	MG	40	10w	30	40	15w	30
Case A + steel screw	OD	30	5w	20	40	5w	20
Case A + steel screw	MCT	25	10w	20	30	15w	20
Case A + steel screw + nut	BJ	30	10w	30	30	15w	30
Case B + steel screw	MG	0	5w	20	0	5w	20

OD: optimum diameter; MCT: maximum cup thickness; MG: minimum gap; BJ: bolted joint.

**Figure 14.** (a) Specimens inclined in support and (b) specimens after 48 h in the fog.

Corrosion tests in artificial atmospheres – salt spray tests, 2006 (salt type: 5% NaCl/95% distilled H₂O, temperature in the cabin: 35 °C, salt spray recovery speed: 1.2 mL/h, pH of the recovered salt fog (25 °C): 6.7, and density of the recovered salt fog = 1.031 g/cm³). It is important that the specimens were placed at a certain angle to facilitate the saline attack over the surface. As a matter of fact, the purpose of this testing was to understand the behaviour of joints in severe atmospheres. In this case, two specimens were analysed for each case in Table 4.

The tests ended at t_2 (48 h) due to the occurrence of iron rust in most elements. First, the specimens were cleaned with a brush to remove salt and corrosion products. Then, the presence of surface rust on the various elements of the specimen (tube, plate, and screws) was observed. The results of the corrosion test at times $t_1 = 24$ h and $t_2 = 48$ h are shown in Table 4 showing the percentage of the entire surface of the elements having iron corrosion (reddish). White rust, for aluminium or galvanized steel, is indicated with 'w' (Figure 14).

Concerning the corrosion and case A, no appreciable differences were observed between the test pieces with different manufacturing conditions (OD, MCT, and MG). All aluminium sheets suffered white corrosion at time t_2 . Except case B, the other specimens and the screws (galvanized and steel) suffered iron corrosion after 48 h of testing.

When removing the screws of the specimens, it was observed that case A was easier to disassemble than

case B. Due to the presence of screws, electrochemical corrosion also occurred. The difference in the concentration of ions made the solution becoming stagnant leading to crevice corrosion (Figure 15). This effect is due to localized depletion of dissolved oxygen in the vicinity of the burr.

From the examination of the probes at the mean section, it was observed that the plate was curved and welded with the tube serving as a base for the future thread (Figure 16(a)). This effect occurred for all the combinations of specimens. Figure 16 shows the difference between a suitable welded union and incorrect union (no welding) leading to a low-quality thread between steels (not studied here).

From these results, a second series of tests was done specifically on case B with stainless steel probes. These are coded as follows: OD1 = OD (with screw), OD2 = OD (without screw), MG, and MCT. Table 5 shows the results of each specimen in detail, with the percentage of the corroded surface. The following notation was used: '–', ferric corrosion; 'w', white aluminium corrosion (loss of metallic bright and pitting); and 'b', brown-coloured corrosion: observed in zones contaminated from near rusted elements. The tube–screw interface was noted as 'ts'.

All the specimens of case B are corroded at $t = 144$ h on the aluminium sheets. The tubes and screws are not affected, but slight-reddish colouration is observed at the screw heads, near the cup (tube–sheet interface). Among all the specimens, a lower degree of corrosion is

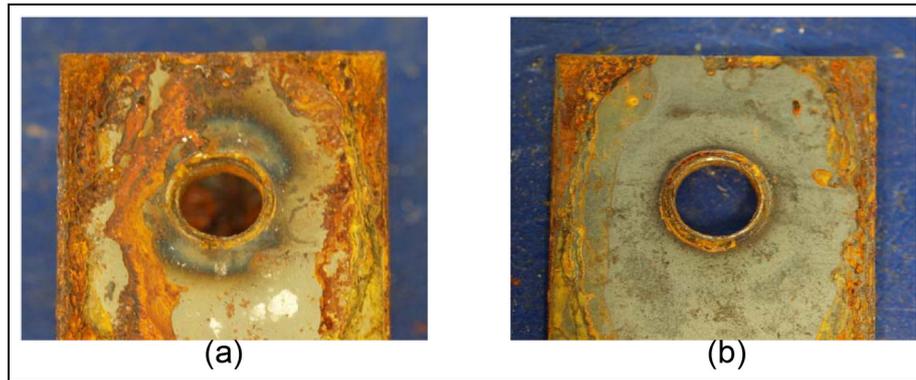


Figure 15. Details of crevice corrosion: (a) tube and (b) plate.

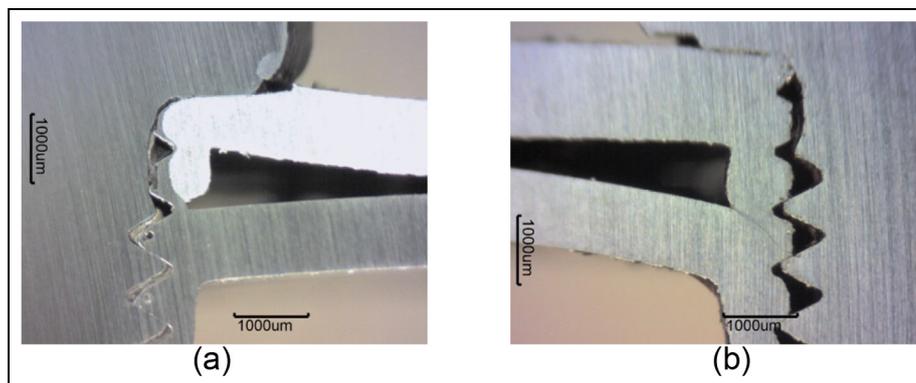


Figure 16. (a) Welded union between plate and tube necessary for a suitable thread (case B) and (b) union without connection between plate and tube (AISI 1045 and 1020).

Table 5. Results: corroded surface in percentage (from the total surface).

Reference	Part	48 h	144 h	240 h	288 h	360 h
OD1	Tube (%)	0; ts = 0	0; ts = 0	0; ts = 0	0; ts = 2w	0; ts = 2b
	Sheet (%)	< 1w	2w + 10b	5w + 15b	5w + 15b	5w + 15b
	Screw (%)	20; ts = 50	30; ts = 50			
OD2	Tube (%)	0; ts = 0	0; ts = 2w			
	Sheet (%)	< 1w	2w + 2b	2w + 2b	5w + 2b	15w + 2b
	Screw (%)	–; ts = 50				
MG	Tube (%)	0; ts = 1w	0; ts = 1w	0; ts = 2w	0; ts = 2w	0; ts = 2w
	Sheet (%)	1w	2w + 10b	5w + 10b	5w + 10b	5w + 10b
	Screw (%)	1; ts = 0	5; ts = 50	20; ts = 50	20; ts = 50	20; ts = 50
MCT	Tube (%)	0; ts = 0	0; ts < 1w	0; ts = 2w	0; ts = 5w	0; ts = 5w
	Sheet (%)	< 1w	2w + 5b	5w + 10b	5w + 10b	10w + 15b
	Screw (%)	1; ts = 20	5; ts = 30	5; ts = 30	5; ts = 30	10; ts = 50

OD1: optimum diameter (with screw); OD2: optimum diameter (without screw); MCT: maximum cup thickness; MG: minimum gap; –: ferric corrosion; w: white aluminium corrosion; b: brown-coloured corrosion; ts: tube–screw interface.

observed on the plates with MG condition. Concerning the MCT specimens, these do not generate burr at the tube, thus causing a weaker union.

Then, the metallographic inspection of the corroded aluminium sheets was performed. Figure 17 shows the corrosion pits due to the retained salt. The maximum pitting depth (0.3 mm) was found at the inner surface of the sheets. This accelerates the corrosion process, so

it limits the application of the process in harsh conditions.

Conclusion

This article proposes a novel approach, based on the combination of FD and FT, for joining sheets and tubes made from dissimilar materials. First, both



Figure 17. Pits on the probe with MG condition.

processes were studied and monitored to obtain the most performing conditions (according to different quality criteria). Suitable values for the rotational speed and feed were defined for both processes. Second, the mechanical behaviour of the new joints was verified against common bolted joints made with conventional drilling. From the mechanical tests, it was deduced that the new joints have similar properties and collapse under similar stress thresholds than the ones made by traditional cutting processes. Therefore, comparing to classical bolted unions (that use conventional drilling and require nuts), the presented technique offers not only a cleaner solution (less chips and lubricants) but a reliable option with comparable mechanical properties. In the case study, the test tubes broke down due to the collapse of the softest material. Some of the most important results are as follows:

- In the least favourable case, the mechanical strength of the joint by FD + tapping represents 87% of the typical resistance by conventional drilling + threading.
- A similar corrosion behaviour is seen on the different kinds of specimens (OD, MG, and MCT) for cases A and B. The specified cutting conditions do not seem to affect the service life of the specimens.
- The steel tubes gained higher hardness in the deformed areas. This is not true for the adjacent zones of the aluminium sheets whose hardness values decrease with respect to the properties of the material base.
- For the specimens type A, the aluminium sheets suffer white corrosion after 48 h. The AISI 1045 tubes suffer iron corrosion after 48 h of operation, while AISI 304 stainless steel presents a good aspect.
- As a major drawback, the FD process causes a separation between the tube and the sheet. This allows the accumulation of moisture and salt leading to crevice corrosion and pitting that reduce the service life of potential products in adverse conditions. This determines the field of application of the product.

- For aggressive conditions, the pair Al5754-AISI 304 is recommended with the MG condition to delay as much as possible the corrosion onset. Coating countermeasures will also be advisable in this case.

Acknowledgements

The authors thank UFI 11/29 in Mechanical Engineering of the UPV/EHU for its support to this project and CiC marGUNE (Eortek ESTRATEUS). In addition, the authors gratefully acknowledge the advice of I. Azkona and J. Fernández from Metal Estalki as well as to the former student Deividi Nardi.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

References

1. Barnes TA and Pashby IR. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: part II – adhesive bonding and mechanical fasteners. *J Mater Process Tech* 2000; 99: 72–79.
2. Liu X, Lan S and Ni J. Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel. *Mater Design* 2014; 59: 50–62.
3. Shanjevi C, Satish Kumar S and Sathiya P. Multi-objective optimization of friction welding parameters in AISI 304L austenitic stainless steel and copper joints. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2016; 230(3): 449–457.
4. Qiao F, Cheng K, Wang L, et al. An experimental investigation on the dissimilar joining of AA6061 and 1Cr18Ni9Ti by refill friction stir spot welding and its mechanical properties. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2016; 230: 779–785.
5. Jia L, Shichun J, Yan S, et al. Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel. *J Mater Process Tech* 2015; 224: 49–59.
6. Zhang K, Lei Z, Chen Y, et al. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser-TIG hybrid welded dissimilar joints of Ti–22Al–27Nb and TA15. *Opt Laser Technol* 2015; 73: 139–145.
7. Huiwen Z, Wei C, Jingshan H, et al. Formation and evolution of intermetallic compounds at interfaces of Cu/Al joints by ultrasonic-assisted soldering. *J Mater Process Tech* 2015; 223: 1–7.
8. Kang M and Kim C. Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process. *Mater Design* 2015; 81(15): 95–103.
9. Bansal A, Sharma AK, Kumar P, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of the dissimilar weld between mild steel and stainless steel-316 formed

- using microwave energy. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2016; 230(3): 439–448.
10. Singh S, Gupta D and Jain V. Recent applications of microwaves in materials joining and surface coatings. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2016; 230(4): 603–617.
 11. Sun X, Stephens EV and Khaleel MA. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals. *Int J Fatigue* 2007; 29: 370–386.
 12. Kim TS and Cho YH. Investigation on ultimate strength and failure mechanism of bolted joints in two different aluminum alloys. *Mater Design* 2014; 58: 74–88.
 13. Esmaili F, Zehsaz M and Chakherlou TN. Investigation the effect of tightening torque on the fatigue strength of double lap simple bolted and hybrid (bolted–bonded) joints using volumetric method. *Mater Design* 2014; 63: 349–359.
 14. Calabrese L, Proverbio E, Pollicino E, et al. Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints. *Corros Eng Sci Techn* 2015; 50(1): 10–17.
 15. Olvera D, López de, Lacalle LN, Urbikain G, et al. Hole making using ball helical milling on titanium alloys. *Mach Sci Technol* 2012; 16(2): 173–188.
 16. Grujicic M, Snipes JS and Ramaswami S. Process modeling, joint virtual testing and construction of joint connectors for mechanical fastening by flow-drilling screws. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*. Epub ahead of print 30 March 2015. DOI: 10.1177/0954405415577709.
 17. Miller SF, Shih AJ and Blau PJ. Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum, and titanium. *J Mater Eng Perform* 2005; 14(5): 647–653.
 18. Ku WL, Hung CL, Lee SM, et al. Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel. *Int J Adv Manuf Tech* 2011; 53(9–12): 935–944.
 19. Ozler L and Dogru N. An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. *Mater Manuf Process* 2013; 28(4): 470–475.
 20. Abrão AM, Campos Rubio JC, Faria PE, et al. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Mater Design* 2008; 29(2): 508–513.
 21. Demir Z and Özek C. Investigate the effect of pre-drilling in friction drilling of A7075-T651. *Mater Manuf Process* 2014; 29(5): 593–599.
 22. Lee SM, Chow HM and Yan BH. Friction drilling of IN-713LC cast superalloy. *Mater Manuf Process* 2007; 22(7–8): 893–897.
 23. Elósegui I, López de and Lacalle LN. Threading on ADI cast iron, developing tools and conditions. *AIP Conf Proc* 2010; 1315: 116–121.
 24. Fromentin G, Bierla A, Minfray C, et al. An experimental study on the effects of lubrication in form tapping. *Tribol Int* 2010; 43: 1726–1734.
 25. Fernández J, Fernández A, López de, Lacalle LN, et al. Wear of form taps in threading of steel cold forged parts. *J Manuf Sci E: T ASME* 2015; 137: 031002.
 26. Olinda de Carvalho A, Brandão LC, Panzera TH, et al. Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60). *J Mater Process Tech* 2012; 212(8): 1753–1760.
 27. Ivanov V and Kirov V. Rolling of internal threads: part 1. *J Mater Process Tech* 1997; 72: 214–220.
 28. Ivanov V. Rolling of internal threads: part 2. *J Mater Process Tech* 1997; 72: 221–225.
 29. Akkurt A. Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel. *J Mater Eng Perform* 2011; 20(6): 960–968.
 30. Avilés R, Albizuri J, Rodríguez A, et al. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *Int J Fatigue* 2013; 55: 230–244.
 31. Wittke P, Walther F, Liu Y, et al. Influence of the production process on the deformation and fatigue performance of friction drilled internal threads in the aluminum alloy 6060. *Mater Test* 2015; 57(4): 281–288.
 32. Van Geffen JA. *Piercing tools*. Patent 3939683A, USA, 1976.
 33. Miller SF, Blau PJ and Shih AJ. Tool wear in friction drilling. *Int J Mach Tool Manu* 2007; 47: 1636–1645.
 34. Miller SF, Tao J and Shih AJ. Friction drilling of cast metals. *Int J Mach Tool Manu* 2006; 46: 1526–1535.
 35. Niknam SA and Songmene V. Milling burr formation, modeling and control. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture* 2015; 229(6): 893–809.
 36. Qu J and Blau PJ. A new model to calculate friction coefficients and shear stresses in thermal drilling. *J Manuf Sci E: T ASME* 2008; 130: 014502.
 37. Lee SM, Cho HM, Huang FY, et al. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools. *Int J Mach Tool Manu* 2009; 49: 81–88.
 38. Zhou L, Nakata K, Tsumura T, et al. Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel filling friction stir-welded joints. *J Mater Eng Perform* 2014; 23(10): 3718–3726.

técnica y *tecnología*

SEPTEMBER 2015 - www.interempresas.net

33

Spanish technology in metalworking



REPORT

THE MACHINE-TOOL FACES
NEW CHALLENGES, INCLUDING
THE INDUSTRIAL REVOLUTION 4.0

ARTICLE

WP9. OUTLINE OF A QUALITY
SYSTEM AND STANDARD FOR THE
CERTIFICATION OF CONFORMITY

INTERVIEW

JORGE GARCÍA KAIBIDE, PRESIDENT OF
THE SPANISH ASSOCIATION
OF MACHINE TOOL IMPORTERS (AIMHE)

DISSIMILAR METAL JOINTS:

A NEW APPROACH BASED ON FORM DRILLING AND TAPPING

G. URBIKAIN (GORKA.URBIKAIN@EHU.ES),
A. RODRIGUEZ-EZQUERRO AND L.N. LÓPEZ DE LACALLE,
UNIVERSITY OF THE BASQUE COUNTRY, AND J.M. PEREZ, CDTI.

In this paper, a new method for the rapid and economical production of 'nutless' bolted joints is presented, by using two hole-making techniques, namely, form drilling and form tapping. The combined method achieves a quick way for the production of threaded holes on couples of dissimilar metal alloys, as it is the case of steels and aluminium alloys. After the simultaneous form drilling on the aluminium-steel pairs followed by form tapping, a fastener is introduced and screwed for achieving a tight bolted joint, without any necessity of nut. On the other hand, form drilling and threading is performed consecutively in the same machine tool, reducing the whole process time. The process parameters are studied for reducing the gap between surfaces and for producing a good cup for making the threading. Mechanical testing of several test pieces results in a similar behaviour than traditional bolted joints. Finally corrosion tests were performed for a better understanding of the joint manufactured in this way. In this way, savings in time and money are derived from the application of the approach. Target markets for the new approach are the light boiler making industry for eliminating welding or classical bolted joints, the yacht industry for example for making steel skeletons with aluminium alloy skin, solar panel support structures, and others.

Application of form processes for nutless joints on dissimilar materials

G. Urbikain^{1,a}, J.M. Perez², A. Andueza¹, L.N. López de Lacalle¹

¹ University of the Basque Country, Bilbao, Spain

²CDTI, Madrid, Spain

gorka.urbikain@ehu.es

Abstract

In this paper a new method for the rapid and economical production of “nutless” bolted joints is presented, by using two hole-making techniques, namely form drilling and form tapping. The method allows a quick way for the production of threaded holes on couples of dissimilar metal alloys, as are steels and aluminium alloys. After form drilling and threading fasteners are introduced in the threaded holes for achieving a tight bolted joint without any necessity of nuts. In this way, savings in time and money are derived from the application of the approach. Target markets for the new approach are the light boiler making industry for eliminating both welding and screw-nut joints, yachts for making steel skeletons and aluminium alloy skin.

Keywords: *form processes, friction drilling, nut-less joints, dissimilar materials*

1. Industrial context

The work here presented is included in the general attempt for making tight joints of dissimilar metal alloys sheets. Currently, the light boiler maker industry ask for new approaches for joining metals of very different melting points, as it is the case of steel with aluminium. Thermal welding is impossible with tradition welding techniques, because when steel is being melt aluminium alloys are boiling. In some cases, an structure needs high-temperature resistance in one area and a good corrosion resistance in another, or toughness or wear resistance is required in one point at the same time that high strength is required in another location. However the joint of a stiff and high strength metal as steel, and a light alloys as aluminium ones can be a god solution for same application, in which skeleton is mead out of steel whereas skins and cover plates are made in aluminium of the 5xxx group. Other cases could be considered in other applications, for example aluminium and copper for electrical terminals, and others. The branch of joining techniques is known as Dissimilar Material Joining (DMJ).

Friction techniques are now in the scope because they produce metal flow without melting, being the base of several techniques as friction welding (rotational and

linear), friction stir welding (FSW), and friction drilling and form taping.

DMJ research has been associated with metallic alloys including carbon and low-alloy steels, stainless steel, nickel, copper, and aluminium alloys. In the 1990s, there were research works involving titanium alloys, ceramics, polymers, and composites materials. Lately, in automotive application the joint of metal and plastic is really a research hot topic.

In joining metallic alloys, several factors must be taken into account including:

- Differences in melting temperature
- Thermal expansion-contraction mismatch during joining and in service
- Fixturing and constraint effects on joining stresses
- Formation of brittle intermetallic compounds during joining which may lead to brittle joints
- Heating and cooling rate effects on the microstructure of the joint, which may affect the strength and precision control of heat input
- Potential for galvanic corrosion problems in service

Joining processes for may be grouped into different categories:

1. Fusion arc welding processes: shielded metal arc welding (SMAW), gas tungsten arc welding (GTAW or TIG), gas metal arc welding (GMAW), and plasma arc welding (PAW)
2. Solid-state joining processes: friction stir welding, ultrasonic welding, friction and inertia welding, diffusion bonding, explosive bonding, and roll cladding
3. Brazing and soldering
4. Adhesive bonding
5. Mechanical joints are as riveting, bolts and fasteners. The two latter ones have the main advantage of being removable, being studied in the sections below.

Joints between different metallic materials are very common in industrial applications such as automotive industry, domestic appliances, solar trackers, etc. For instance, vehicle builders use the flow drill screwing FDS® (from Swedish company EJOT) process additionally to MIG welding or punch riveting for high strength sheet metal joints (see Figure 1 in the AudiTT©)

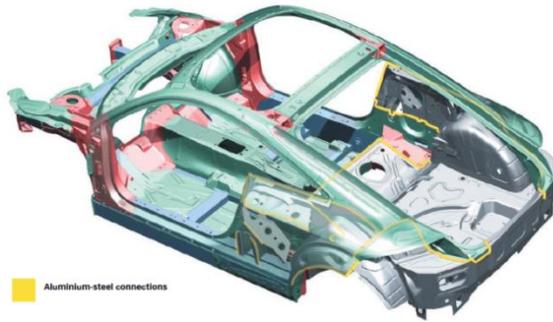


Figure 1. Connection between steel-aluminium (Audi©)

In this work, we propose a combination of form processes, namely form drilling and form tapping, for the assembly of dissimilar sheet metallic parts using fasteners but avoiding the need for nuts. The processes were studied and optimized by measuring key magnitudes and the resulting specimens were tested in comparison with conventional joints made by traditional drilling. As a result, the combination leads to joints with similar properties to conventional cutting processes with reduced costs.

2. A combined view of the form techniques

Friction (form) drilling process is a non-conventional generation process of holes in sheets. It is based on material removal by friction and heat caused by a rotary tool without cutting edges. The tool has two different sections: a conical surface that opens the hole and softens the sheet material; a cylindrical one responsible for the final hole diameter. As a result, a significant burr exit appears in [1-3].

The process has many advantages over traditional processes. First, there is no need for cooling. In the traditional drilling process, employing lubricant is necessary to reduce friction and heat and to enhance chip evacuation, just the opposite of what friction drilling intends. Therefore, it is often defined as a clean process. Additionally, the burr can be threaded.

This application is of great interest when it comes to making threaded holes in tubular or complex geometries that do not allow accessibility. Most of the material of the workpiece in contact with the tool becomes part of the burr generated (see Figure 2) at the bottom of the part and a small part of the material generates burrs on top. There are two options when it comes to the upper burr, one possibility is that it is crushed by the tool ring and the material to remain in the piece, which implies that it is a process without generating chip. The other possibility is that the material is removed from the workpiece; for this purpose the tool will use a chip breaker between the ring and the cylindrical region. However, being the amount of material removed small, it still remains a clean process. Finally, tool life profits from the fact that no cutting edges do not exist.

After making the hole, form tapping process follows. Threading process is widely spread in a lot of mechanical applications since it is essential in the

procedure to produce screw joints, the most extended way of assembly mechanical components. Two methods can be used to create an inner thread, either by forming or by cutting, being as manufacturing processes very different. So in the case of forming, the thread is generated due to deformation of the raw material in a cold working way, whereas in the case of cut tapping thread is obtained by chip removal as it is common in other machining processes [4].



Figure 2. The process for threaded holes in only one sheet of metal (Form drilling©)

This work will aim at the former of these techniques using forming taps, also being known in industry as roll taps. Cold deformation in threading is interesting due to several aspects, namely:

1. Form tapping is a chip-less process since threads are “formed” and not “cut”. There is no need of chip removal from blind holes, and the risk of a not good extracting of chips from threaded holes is absolutely avoided.
2. Stronger threads are produced, particularly in materials susceptible to strain hardening, such as steel and stainless steel.
3. It leads to a good thread calibration. As metal flows into the cavity defined by tap profile and fulfils it, the possibility of producing oversized threads is low. Several forming lobes acts successively, as it will explain later on.
4. Roll taps are stronger than cut taps. The absence of chips in the process eliminates the need for flutes in the tapping tool, resulting in a stronger tool section. The oil grooves of some roll taps only reduce a little the tap section.
5. Tool life is strongly improved. Forming taps can last from 3 to 10 times more than cut taps. The risk of tool breakage is lower that of the cut tap case.

The above advantages make this technique recommendable in a lot of applications, especially in automatic operations where high productivity rates are required.

On the other hand, allowable stress for the screw joint calculation when threads are made with cut taps is lower than the case when threads are made by form tapping. In the cut tap case, there is no advantage from the strain hardening of the hole inner thread surface. Additionally in cut tapping angle errors on thread flanks can happen, causing unfavourable distribution of stresses in the final thread/screw contact, limiting the tightening force of the bolt or the screw joint. With formed threads, workpiece material shows higher resistance by the strain hardening

effect derived from the cold forming action of taps. Moreover, flank angle errors are prevented in the roll tap case because material flows along tap profile without any clearance. On the other hand, the imperfection at the minor diameter typical of formed threads (thread peaks), named claws or split crest (Figure 3), a defect that will be explained later on, had not a direct influence on the thread/screw strength, as it is referred by De Carvalho et al. [5].

Cold forming processes are usually applied on low-carbon steels or non-ferrous alloys. So, form tapping is primarily a cold forming process done at room temperature; form tapping is feasible in both ferrous and non-ferrous metals if hardness and tensile strength are not above 200 HBN and 800 MPa respectively. Form tapping strengthens material on thread flanks, in particular in the thread root area. The strain hardening effect had a positive influence on the overall strength of fasteners and screw joints under dynamic stresses, as demonstrated [6, 7].

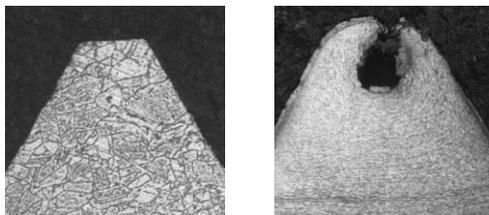


Figure 3. General aspect of a thread with cut and roll taps. a. Microstructure after a cut tapping operation. b. Microstructure after a form tapping operation.

Despite the above advantages, form tapping is a little-studied process for which scientific production is low in comparison with cut tapping. However form tapping is widely applied in manufacturing internal threads of extruded tubes and it is a promising technique for mass production in the automotive industry. For this reason, form tapping is tackled in the present work.

The following section helps interpret the influence of various parameters on the hole and thread quality.

3. Process performance.

This paragraph develops the experimental methodology to identify the most critical factors of the processes. The experimental tests were carried out in a multi-tasking machining centre (Kondia A6 model). To ensure an adequate clamping, a fixture was specially designed. This allows the alignment of the workpiece with respect to the axes of the machine and prevents the deflection of the sheets during the hole making. Figure 4a shows the main elements for the experimental set-up including:

- Workpieces: tubes (30x30) of AISI 1045 and sheets (thickness=1.5 mm) of Al 5754
- Tools: carbide tool, D7.3 mm for M8x1.25

A campaign of trials was designed to check the influence of the main parameters affecting the process: the spindle speed and the penetration (feed) speed. These parameters were swept from 1500-4500 rpm and 150-500 mm/min.

3.1. Forces and torque

The force characterization allows to understand the friction mechanisms during the deformation process and the generation/rupture mechanisms of the upper side of the burr [8, 9]. To measure the thrust force and torque the Artis© device shown in Figure 4b, was used. It consists of: a) rotor, located at the toolholder; b) stator, located at a max. distance of 5 mm from the rotor; c) transducer, which receives the load signal of the inductive sensor and converts it into voltage; d) acquisition board, with a sampling frequency between 0-1000 Hz and data transfer capabilities to a PC via USB; e) notebook with Quick Data, for data recording. During the tests, a sampling frequency of 800 Hz is used. The signal is post-processed with Matlab or Excel to find the torque and average and maximum forces. Comparing to a Kistler dynamometer where the centre of the hole and the Kistler table must be aligned, the measurements using Artis are simple and direct because the acquisition is independent of the working point.



Figure 4. a. Sheets (Al), tubes (AISI1045), tools and fixture for the friction drilling process; b. Force-torque measurement with Artis©

The values obtained are useful in the description of the process (Figure 5):

- OA: the centering area of the tool rubs against the surface of the workpiece so, while advancing the thrust force increases. The maximum thrust force is reached when the increase in the material temperature in contact with the tool reduces the resistance to be deformed.
- AB: as it progresses, the contact area between the tapered portion of the tool and the workpiece increases and thus, the friction and the associated torque start growing.
- BC: the cylindrical portion of the tool contacts the burr portion of higher thickness, resulting in a slight increase of the thrust force and rapid increase in the torque values.
- CD: the torque decreases when the cylindrical portion of the tool starts to deform the burr region of lower thickness. The thrust force also experiences a steady decline.
- OF: this region corresponds to the tool chip breaker area. The top burr is crushed by the tool resulting in higher torque and axial force.
- EF: this region refers to the tool retraction. The thrust force decreases rapidly to zero although there is a slight friction between workpiece-tool as shown by the measured axial moment.

If keeping constant rotational speed, the thrust forces increase with the feed. This is due to lower contact times between workpiece and tool, this is, less amount of heat is generated to soften the material. On the other hand,

when the rotational speed is increased (maintaining constant feed values), the thrust forces and torque decrease.

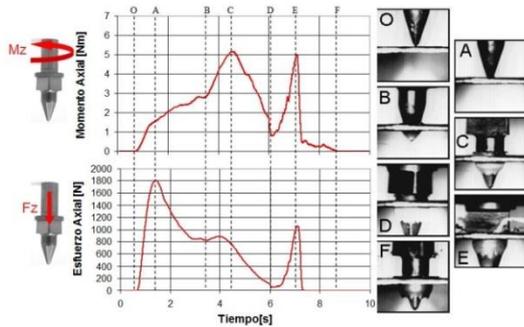


Figure 5. Evolution of force and torque in friction drilling

3.2. Temperature

The temperature reached by the workpiece is an important factor for burr formation. When this value is low, the chip is more prone to fractures and tends to remove the material radially to the hole. On the other hand, when the temperature is large, the burr has a cylindrical shape [10, 11].

The temperatures generated in the drilling process were collected using a two-color pyrometer (Impac© IGAR 12 LO), which measures temperatures in the range 350-1300°C (Figure 6a). The signal capture was done in real time using a computer and specific software.

The maximum temperature reached in the process is dependent on the rotational speed and tool feed. When increasing the rotational speeds, higher friction between tool and workpiece occurs, leading to high process temperatures. Figure 6b shows the maximum temperatures of the process depending on the speed and tool feed. As it can be seen, the process temperature is directly related to the rotational speed. The increase of the feedrate results in a decrease of the maximum temperature, since the contact time between tool-workpiece decreases.

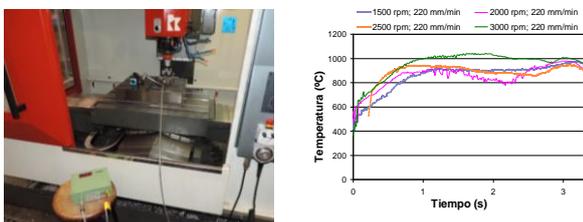


Figure 6. a. Temperature measurement set-up; b. Temperature evolution vs. time.

3.3. Hole quality

Studying the hole made by conventional drilling along with wear, it is found that the dimension of the diameter diminishes due to wear of the tool. On the contrary, in friction drilling, just the opposite is experienced because of the progressive adhesion of the work material onto the tool surface.

The hole quality can be studied by means of the input

(on the top plate of aluminium) and output (on the tubular steel) diameters and the gap created between the two components (Figure 7).

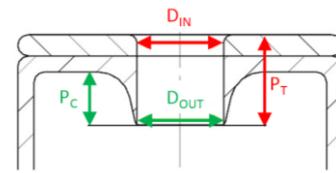


Figure 7. Characterization of hole quality

Figure 8 shows the variation in the hole diameter based on the swept conditions. For identical feed and spindle speeds, the input/output diameters are very similar, resulting in a slight taper hole. In the figures below, it is seen the lower the feedrate and higher rotational speed, the higher is the generated burr.

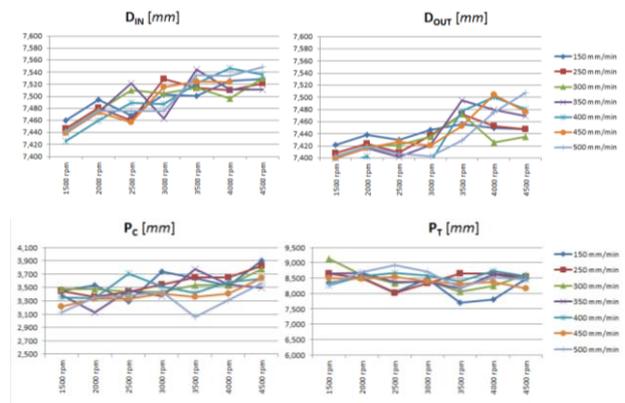


Figure 8. Input/output diameters and burr heights against cutting conditions

Resulting from the figures in the bottom side, the gap is calculated and so, the higher the speed and lower the feed, the lower will be the gap between the sheets, which is highly advisable (Figure 9).

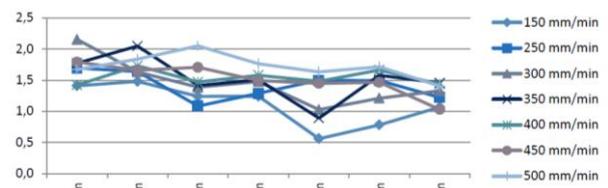


Figure 9. Gap between sheet against cutting conditions

3.4. Burr size

The hole diameter and the total depth and thickness of the burr are affected by the choice of the drilling parameters. A cross section of the holes was done in order to measure consistently and accurately the burr shape. To characterize the thickness of the burr a microscope, Mitutoyo© TM-100, was used. It is equipped with two Digimatic micrometer heads to ensure accurate positioning and adjustment. Then,

measurements were chosen at different heights in the vertical axis (Figure 10). From them, it follows that higher feedrates cause an increase in the burr thicknesses along its entire length.

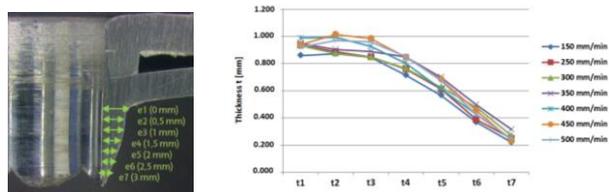


Figure 10. a. Measurement at different heights; b. Burr thickness at S=3000 rpm

There are several criteria when it comes to choosing the optimal machining parameters in this process:

1. Minimum gap: the smaller the gap between sheets, the lower the exposure that will have the metal to the environment thus improving its corrosion resistance. The parameters giving the minimum gap are: $v_f = 150$ mm/min and $S = 3000$ rpm.
2. Optimum diameter: the optimum diameter is defined from the standard DIN 13. These parameters are: $v_f = 250$ mm/min and $S = 2500$ rpm.
3. Maximum burr thickness: to make easier and stronger the next stage of form tapping: $v_f = 450$ mm/min and $S = 3000$ rpm.

4. Form tapping

Subsequently, the hole needs to be threaded by form tapping. Regarding the tool, taps are often polygonal geometries with at least five edges. They are made of HSS coated with titanium nitride (TiN) to provide toughness. In some cases anti-friction coatings or internal lubrication are advisable. Also, they may include tapered cutting edges with smaller diameter to initiate the material removal. According to the hole machined with the D7.3 form tool, a form tap (Emuge©) for M8 was selected.

In form tapping, the maximum depth of the thread and the maximum thread pitch are the most important parameters. The maximum depth of thread is significantly higher than in the case of conventional threading (cutting) tools, being limited by the quality of the coolant and the tool length. The maximum pitch of the thread depends on the material properties of the workpiece. The upper limit is often below 3.5 mm. Indeed, not all the materials are suitable for form tapping, this is, due to the intrinsic deformation involved, the material should have a minimum ductility (minimum failure resistance at 5%) and should not exceed a maximum mechanical resistance of 1,400 N/mm².

Another important aspect is the influence of the pre-machining diameter. Too small diameters will lead to excessive rolling phenomena and forces during the process. Inversely, if this diameter is too large, the core

section is not enough rolled and the core diameter will be too small.

Regarding to possible changes in the material, due to deformation mechanisms, work hardening may arise too in the affected zone. Finally, since there is crushing and deformation, internal compressive stresses appear which are advantageous to enhance the mechanical resistance of the thread.

As in the previous section, a test series was designed to select the most suitable cutting parameters for consistent thread through holes trials rolling friction generated by drilling. To do this, the same tooling referred in section 3 is employed. Figure 11 details the measurement scheme (by Artis©) to determine the thrust force and torque.

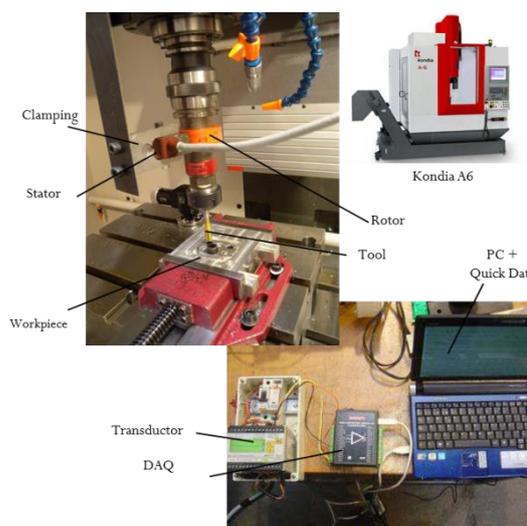
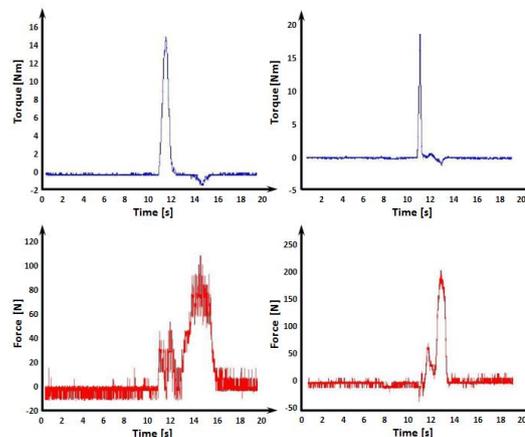


Figure 11. Measurement set-up (force/torque) in form tapping

For the threading cutting tests, different feed rates (10-40 mm/min) were conducted at constant spindle speed (600 rpm), recommended by the tool manufacturer. The following graph shows the values of torque and force for the extreme cases. As a conservative criterion, the criterion with the lowest feedrate was chosen since it generates a wider (more damped) peak (additionally to obvious lower absolute values).



**Figure 12. Force and torque in form drilling
a. $v_f=10$ mm/min (left); b. $v_f=40$ mm/min (right)**

5. Joint properties

Following to the monitoring activities, microhardness analysis and shear cutting tests were done in order to verify the mechanical behaviour of the manufactured test parts.

5.1 Microhardness measurements

For a more complete analysis, some samples were taken to perform microhardness studies of the material along vertical axis of the joint. To do this, three samples corresponding to the three criteria set out in section 3 were selected: minimum gap, optimum diameter and maximum burr thickness. To do this, the samples were encapsulated and polished. Then, the tests were done using a hardness meter (Vickers microhardness FM-800). Samples were extracted throughout the generated hole at 0.5 mm equally spaced points (Figure 13). In all cases, the transition from aluminium to steel is observed, with a greater hardness in the case of maximum burr thickness condition and lower hardness in the case of minimum gap. The results are consistent and no abrupt decay was detected at the region near the interface between the metals.

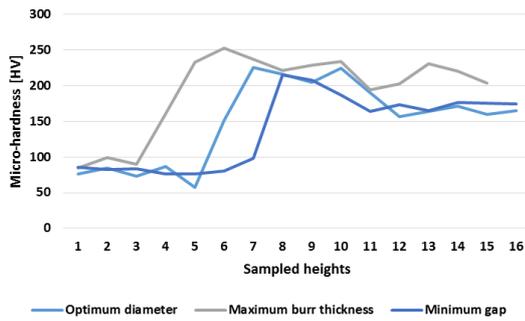


Figure 13. Micro-hardness for the three criteria

5.2 Mechanical resistance

To characterize mechanically the joints, shear tests were carried out with two objectives: first, to compare the ultimate strength for the three criteria; second, to study the main failure modes of the machined parts. Table 1 shows the data/nomenclature from the different types of samples. After the process of drilling friction (MG samples, OD and MBT) or after conventional drilling (BJ) the assembly is completed using steel screws. The sheets of both materials are overlapped to adapt the test specimen with 3 samples per criterion.

Table 1. Test probes for shear cutting tests

Reference	Material	Condition
MG	AISI1045 steel + Al 5754	Minimum gap
OD	AISI1045 steel + Al 5754	Optimum diameter
MBT	AISI1045 steel + Al 5754	Max. burr thickness
BJ	AISI1045 steel + Al 5754	Bolted joint

The shear tests were performed in a universal testing machine, pulling the two sheets from opposite-coaxial jaws so that the screw suffers pure shear stress. Thus, the type of failure and maximum force are detected and

recorded. Before the tests, the possible mechanisms would be: failure of the joint between materials (at the interface), failure of the softest material (aluminium) or failure of the screw itself.

Table 2 depicts the maximum loads (kN) and the corresponding failure mode for each of the samples. The failure mode classification is selected according to the criteria in the Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-01).

Table 2. Results of the shear cutting tests

Reference	Max. load (kN)	Failure mode
MG 1	6.449	Mode D, shear of the sheet (border)
MG 2	8.163	Mode D, shear of the sheet (border)
MG 3	7.770	Mode D, shear of the sheet (border)
OD 1	7.442	Mode D, shear of the sheet (border)
OD 2	7.547	Mode D, shear of the sheet (border)
OD 3	6.714	Mode D, shear of the sheet (border)
MBT 1	8.067	Mode D, shear of the sheet (border)
MBT 2	7.713	Mode D, shear of the sheet (border)
MBT 3	7.926	Mode D, shear of the sheet (border)
BJ 1	7.761	Mode C, tear of the sheet
BJ 2	8.609	Mode C, tear of the sheet
BJ 3	8.546	Mode D, shear of the sheet (border)

In all the cases, the shear mechanical resistance was limited by the mechanical strength of the aluminium, thus all the samples have similar behaviour. Besides, the maximum burr thickness condition seems to be the best choice from the three criteria for form processes. Figure 14 shows the final states of the joints after the failure together with the corresponding load vs. displacement graphs.

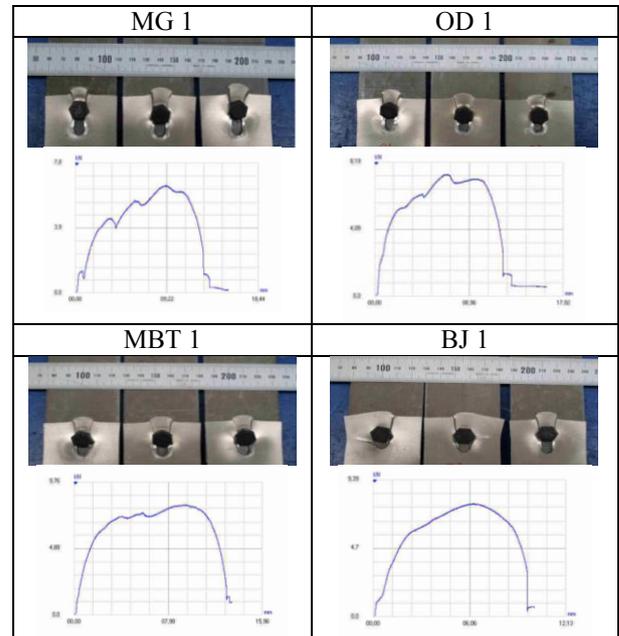


Figure 14. Final state of the test parts and load-displacement graphs

6. Conclusions

This paper proposes a novel approach, based on the combination of friction drilling and form tapping, to connect sheets and tubes made from dissimilar materials. Firstly, both processes were studied and monitored to

obtain the most performing conditions (according to different quality criteria). Second, the mechanical behaviour of the new joints was verified against common bolted joints made with conventional drilling. From the mechanical tests, it is deduced that the new joints have similar properties and collapse under similar stress thresholds. In the cases in study, the test tubes broke down due to the softest material. Therefore, comparing to classical bolted unions (that use drilling and require nuts), the presented technique offers not only a cleaner solution (less chips and lubricants) but a reliable option with comparable mechanical properties. Further works will deal with wear aspects (because of the Aluminium adhesion) and corrosion properties of the parts.

Acknowledgements

We thank to the UFI 11/29 in Mechanical Engineering of the UPV/EHU for its support to this project. In addition, gratefully acknowledge the advice of I. Azkona and J. Fernández from Metal Estalki. We are also grateful to the support from Eortek ESTRATEUS and CiC marGUNE.

References

- [1] Geffen, J. A. van, "Piercing Tools", U.S. Patent No. 3, (1976) pp. 939-683.
- [2] Miller, S.F., Blau, P.J., Shih, A.J., "Tool wear in friction drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, (2007) pp. 1636-1645.
- [3] Miller, S.F., Tao, J., Shih, A.J., "Friction drilling of cast metals", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, (2006) pp. 1526-1535.
- [4] Elósegui, I., López de Lacalle, L. N., "Threading on ADI cast iron, developing tools and conditions", *American Institute of Physics (AIP), Conference Proceedings* 1345, (2010) pp. 116-121.
- [5] Olinda de Carvalho, A., Brandão, L. C., Panzera, T. H., Lauro, C.H., "Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60)", *Journal of Materials Processing Technology* 212, Issue 8, (2012) pp. 1753-1760.
- [6] Ivanov, V., Kirov, V., "Rolling of internal threads: Part 1", *Journal of Materials Processing Technology* 72, (1997) pp. 214-220.
- [7] Ivanov, V., "Rolling of internal threads: Part 2", *Journal of Materials Processing Technology* 72, (1997) pp. 221-225.
- [8] Miller, S. F., Li, R., Wang, H., and Shih, A. J., "Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128, (2006) pp. 802-810.
- [9] Qu, J., Blau, P.J., "A new model to calculate friction coefficients and shear stress in thermal drilling", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 130, (2008) pp. 1-4.
- [10] Miller, S.F., Tao, J., Shih, A.J., "Friction drilling of cast metals", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 1526-1535.
- [11] Shin Min Lee, Han Ming Cho, Fuang Yuan Huang, Biing Hwa Yan, "Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 81-88.

Making steel - aluminum joints by fast alternative processes

- Article for the Conference "WELDING 2017",
organized by ASR - Welding Association of Romania, city of Iasi, April 6th - 7th 2017 -

Authors:

López de Lacalle, Luis Norberto¹; Urbikain Pelayo, Gorka¹; Azkona, Ibon²;
Pérez, José María³; Verbitchi, Victor^{4*}; Cojocaru, Radu⁴; Boțilă, Lia-Nicoleta⁴;
Ciucă, Cristian⁴; Perianu, Ion-Aurel⁴

¹University of the Basque Country, Bilbao, Spain

²Company Metal Estalki S.L., Basque Country, Spain

³Centre for Industrial - Technological Development - CDTI, Madrid, Spain

⁴National Research & Development Institute for Welding and Material Testing
- ISIM Timisoara, Romania

e-mail: norberto.lzlacalle@ehu.es; gorka.urbikain@ehu.es; iazkona@metalestalki.com;
JMPP@cdti.es; vverbitchi@isim.ro; rcojocaru@isim.ro; lbotila@isim.ro; cciuca@isim.ro;
aperianu@isim.ro

*corresponding author: vverbitchi@isim.ro

Keywords: dissimilar joints, steel-aluminum, alternative processes, fast processes, friction drilling, threading by form tapping, rotary broaching, friction stir welding (FSW)

Abstract

Certain fast alternative processes are proposed for application to constructive elements of cars, tools or metal structures, with corrosion protection.

Friction drilling was used for Ø7,3 mm holes, followed by form tapping for threading M8x1,25 and calibration by rotary broaching, for the following joints:

a. 30 mm x 30 mm square-section tubes of AISI 1045 steel and sheets of Al 5754 aluminium alloy (thickness 1.5 mm);

b. 30 mm x 30 mm square-section tubes of AISI 304 stainless steel and sheets of Al 5754 aluminium alloy (thickness 1.5 mm).

Friction stir welding (FSW) was used with tools having 2.4 mm long pin and four flat bevels, respective conical pin, by rotational speed of 1000-2000 rev / min, welding speed of 20-80 mm / min, for the joints:

c. sheets of EN AW 1200 aluminum alloy (thickness 2 mm) with sheets of S235 steel (thickness 3 mm);

d. sheets of S235 steel (thickness 1.5 mm) with sheets of EN AW 1200 aluminum alloy (thickness 2 mm).

Measuring of the process temperature, size and metallographic analysis, shear or tensile testing, as well as corrosion tests have been performed.

1. Introduction

This paper describes some contributions to the development of new technologies based mainly on forming methods [1, 2] for joints between dissimilar materials. These joints are very common in industries such as automotive, electrical energy production or manufacture of various devices. In the state of the art of technique, formation processes have become increasingly important because they reduce the need for further processing as they are joints without nuts. In addition, they are environmentally friendly methods that do not require lubricants and do not produce chips. The alternative methods of forming addressed here are: friction drilling [1, 3, 4], threading by form tapping [1, 5, 6], rotary broaching [1], as well as friction stir welding (FSW) [2, 7-15]. Potential applications are in the following areas: automotive industry, energy generation, manufacturing, welded metal constructions, maintenance and repair. One of the target applications is the joining of steel to aluminum for metallic structures frames, where steel serves as strength structure and aluminium is the surface element.

2. Friction drilling, form tapping and rotary broaching

2.1. Friction drilling

Friction or form drilling (FD) [1, 3, 4] is a non-conventional process for hole making on metal sheets. This process is based on the material flow by using the heat caused by the friction of a conical shape rotary tool without cutting edges. The FD tool has two different sections: a conical surface that penetrates the hole and softens the sheet material and a cylindrical segment guiding for the final hole diameter. As a result, a significant burr appears at the hole exit, the so-called *cup*. Burrs are an undesirable phenomenon occurring in machining operations; however, FD takes advantage of burrs for producing the cup that eliminates the need of using a nut in the joint, since threading is applied on the cup inner surface.

The process has several advantages with respect to traditional drilling. First, there is no need for cooling, because heating is controlled and there is no chip evacuation. It is often defined as a “clean” or “green” process.

2.2. Form tapping

Threading process is widely spread in a lot of mechanical applications since it is essential in the procedure to produce screw joints, the most extended way of assembly mechanical components. As presented in the Figure 1, after the friction drilling, in the case of the threading by form tapping [1, 5, 6] the thread is executed by the cold deformation of the material. This application is of great interest when it comes to make threaded holes in tubular or complex geometries that do not allow accessibility from the outlet side.

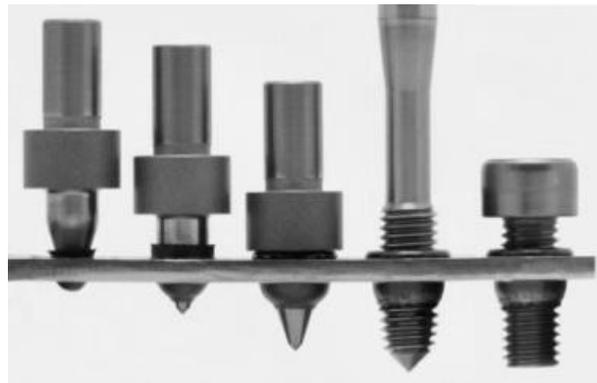


Figure 1. The combined process for friction drilling and form tapping [3-6]

2.3. Rotary broaching

Rotary broaching [1] is a process for the execution of precise holes or calibration of common holes. The involved tool is a broach. It consists of very small and hard chisels on a support, as a whole part. The broach processes the holes by means of fine chips.

3. Experiments on friction drilling, form tapping and rotary broaching

Two dissimilar joint types were investigated:

Case A. Joining of square-section tubes (30x30) of steel AISI 1045 and sheets of aluminium alloy EN AW 5754 (thickness=1.5 mm).

Case B. Joining of square-section tubes (30x30) of stainless steel AISI 304 and sheets of aluminium alloy EN AW 5754 (thickness=1.5 mm).

3.1. Friction drilling operation

The aluminium sheets, the steel tubes, a clamping adaptor and the tool holder for the forming processes are shown in the Figure 2.

Carbide tools (90% WC and grain size 1 micron), $\varnothing 7.3$ mm were employed to make M8x1.25 thread. The main sizes of the friction tool (Figure 3) are: $h_s = 15$ mm, $\varnothing_s = 8$ mm, $h_l = 5.4$ mm, $\varnothing_c = 7.3$ mm, $h_n = 7.6$ mm, $h_c = 0.9$ mm, $\beta = 40^\circ$, $\alpha = 90^\circ$.

A detail of the clamping fixture of the equipment for both friction drilling and form tapping is illustrated in the Figure 4.



Figure 2. Workpiece: sheets, tubes and clamping adaptor for the forming processes

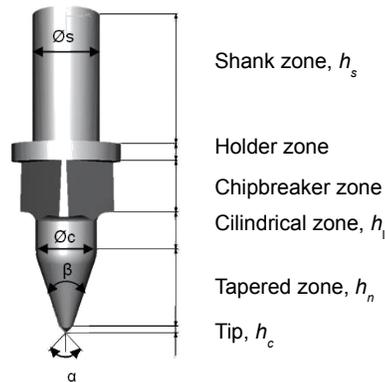


Figure 3. Friction drilling tool [1]



Figure 4.

3.2. Form tapping operation

Taps are made of high speed steel (HSS) coated with titanium nitride (TiN) to provide a core with enough toughness but harder surface. In some cases anti-friction coatings or internal lubrication are advisable. According to the hole machined with the $\varnothing 7.3$ mm tool for friction drilling (drilling bit), a form tap for M8 thread was selected.

A form tapping tool is characterized by: the tool tip, which has a tapered geometry where the lobes progressively rise to the nominal diameter, according to ISO 8830; respectively, the cylindrical part, which guides the tap during the threading operation.

In the Figure 5, the thread sizes as geometrical parameters of form tapping are analyzed. The threading operation is illustrated in the Figure 6, where F means the feed

rate of the threading process, p is the thread pitch, Z is the amount of turns and S is the rotational speed.

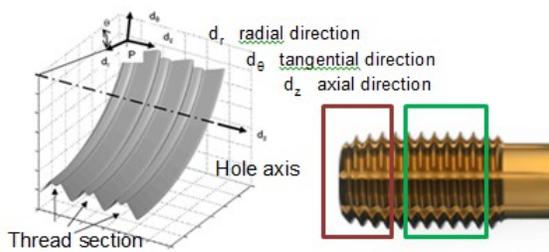


Figure 5. Thread sizes as geometrical parameters of form tapping

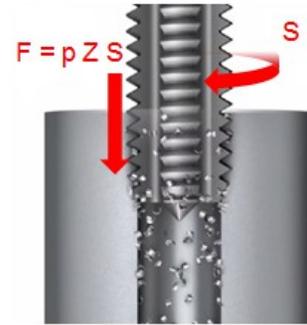


Figure 6. Threading operation

4. Testing on samples of friction drilling-based processes

4.1. Temperature measurement

The temperatures obtained in the drilling process were monitored using a two-color pyrometer, which measures temperatures in the range 350-1300°C. The signal acquisition was done in real time using a computer and specific software. The temperature reached by the workpiece is an important factor for burr formation. When this value is low, the chip is more prone to fractures and tends to remove the material. When the temperature is high, the burr has a cylindrical shape. The highest temperature registered during the process was 800 – 1070°C [1].

4.2. Burr size

Cross sections of the holes were made in order to measure consistently and accurately the burr shape. To characterize the thickness of the burr a microscope, was used. It is equipped with two digital micrometer heads to ensure accurate positioning and adjustment. Measurements were done at different heights on the vertical axis. From the measurements, it follows that higher feed rates cause an increase in the burr thicknesses along its entire length. By the involved test specimens, the largest burr height is 3.0 mm, and the largest thickness is 1.0 mm [1].

4.3. Shear test

The shear test is performed using a universal testing machine which pulls each of the sheets so that the screw joint is subjected to pure shear stress (Figure 7). The failure mode classification is selected according to the criteria of the documentation “Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-01)” and the load vs displacement curves are obtained. The maximum load was 7.234 – 8.305 kN and the failure mode was shear of the sheet border [1].

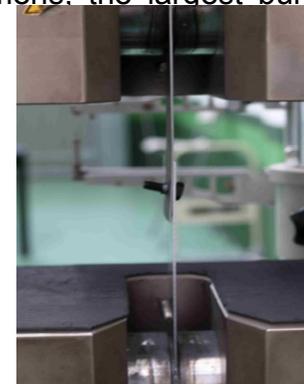


Figure 7. Shear test of the FD-FT joints

4.4. Corrosion check: salt spray tests

The salt spray (or fog) test is a standardized and popular corrosion test method, applied to several dissimilar joints following the guidelines of ISO 9227:2012 "Corrosion tests in artificial atmospheres-Salt spray tests". (Salt type: 5% NaCl / 95% distilled H₂O; Temperature in the cabin: 35°C; Salt spray recovery speed: 1.2 ml/h; pH of the recovered salt fog by 25°C: 6.7; Density of the recovered salt fog is 1.031g/cm³). It is important that the specimens were placed at a certain angle to facilitate the saline attack over the surface (Figure 8). After 48 h of operation, the AISI 1045 tubes suffered corrosion traces on 30-40% of the surface, while AISI 304 stainless steel presented a good aspect. The sheets of EN AW 5754 aluminum alloy presented corrosion traces on 5-15% of the surface in the case A and 1-5% of the surface in the case B [1]. By comparison, the corrosion withstand of EN AW 5754 aluminum alloy is better than that of AISI 1045 steel, which justifies the plating made in the case A. The gap between the tube and the sheet must be tight, to avoid corrosion. For aggressive conditions, the pair EN AW 5754-AISI 304 is recommended. Thus, the field of application of these joints can be determined [1].



Figure 8.a. Cabins for saline fog tests



Figure 8.b. Specimens in inclined support for saline test [1]

5. The equipment and tools for FSW joining

By the FSW process, overlap dissimilar joints were made of both steel and aluminum alloy, in order to make some structure elements of steel covered with aluminum sheet, for corrosion withstand.

5.1. FSW equipment

The program of experiments was conducted on the specialized FSW machine of ISIM Timișoara (Figure 9) with the following main technical features [11-15]: vertical thrust force 10 kN; servomotor power for rotating the FSW tool 4 kW; FSW tool rotational-speed 300-1450 rev / min; welding speed 10-480 mm / min.



Figure 9. FSW equipment used in the experiments [2]

The FSW machine has the following units: 1 - Servomotor for vertical positioning; 2 - Transducer for vertical force; 3 - Servomotor for rotating the FSW tool; 4 - Control panel; 5 – Electrical cabinet; 6 - Infrared camera; 7 – Force and temperature recorder; 8 - FSW tool; 9 - Thermocouple; 10 - Fixture; 11 – Sheets to be welded; 12 - The frame of the equipment; 13 – Travel table; 14 - Servomotor for welding speed.

5.2. Welding tools

The geometry, type and dimensions of the FSW tool have an important contribution by the FSW joining of overlapped sheets, closely correlated with the chemical, physical and mechanical characteristics of the materials to be welded [7-15]. Depending on the nature and thickness of the materials to be welded, the following welding tools were used, shown in the Figure 10.

As material for the fabrication of the welding tools, sintered tungsten carbide P20S has been used (mixture of tungsten carbide WC, titanium TiC, tantalum TaC and niobium NbC carbides, all embedded in the matrix of cobalt Co).

P20S sintered carbide material has the hardness of 1500 HV, maintains its properties at 1200-1300°C and is highly wear resistant [11-15].

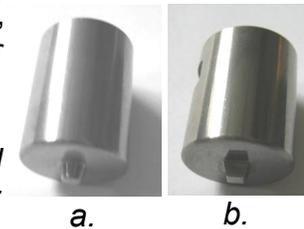


Figure 10. FSW tools used
a. FSW tool with flat conical pin;
b. FSW tool with pin having four bevels

6. Making steel – aluminium joints by FSW

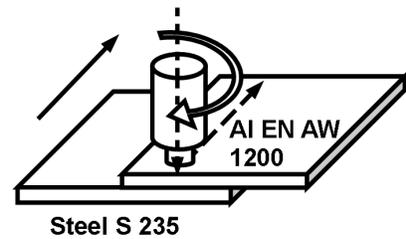
Case C. FSW overlap joining EN AW 1200 aluminum alloy sheet (s = 2 mm) with S235 steel sheet (s = 3 mm), according to SR EN 10025-2.

Table 1 shows the FSW joining parameters for the case C.

Table 1. Case C. Joining Parameters of the Test Joint P11 [2]										
Materials	Thick-ness [mm]	Tool				Welding parameters				Segment
		Material	Pin type	Pin length l_{pin} [mm]	Type/Shoulder diameter $\varnothing_{shoulder}$ [mm]	Rotational speed n [rot/min]	Travel speed v [mm/min]	Rotation sense	Thrust force F_z [N]	Placing
Aluminium EN AW 1200 / Steel S235	2.0 3.0	Tungsten carbide P20S	Conical pin. Pin worn. Tool replaced	2.4 Large base 4 mm; Small base 3 mm	smooth 20	1200	20	clock-wise	2600-2900	P11.1

Aluminium EN AW 1200 / Steel S235	2.0 3.0	Tung- sten carbide P20S	Pin with 4 bevels	2.4	smoo- th 20	1200	(By start 20) 30	clock- wise	2300- 2800	P11.2
Aluminium EN AW 1200 / Steel S235	2.0 3.0	Tung- sten carbide P20S	Pin with 4 bevels	2.4	smoo- th 20	1200	50	clock- wise	2500- 2800	P11.3
Aluminium EN AW 1200 / Steel S235	2.0 3.0	Tung- sten carbide P20S	Pin with 4 bevels	2.4	smoo- th 20	1200	80	clock- wise	2500- 3000	P11.4

EN AW 1200 aluminium (Al 99), on the rolling direction, 120 mm x 350 mm, placed above. Overlap 60 mm. Steel S235, on the rolling direction, 120 mm x 350 mm. Welding conditions according to SR EN ISO 25239-4 [16]. Ambient temperature: 18.0°C. S235 steel sheet temperature, after welding (at start place): 66°C (P11.1); 34,6°C (P11.2).



In the Figure 11 the execution of the FSW joining test sample P11 is shown, P11.2 segment. The welding process is running uniformly.



Figure 11. Running the FSW joining test P11, on the P11.2 segment [2]

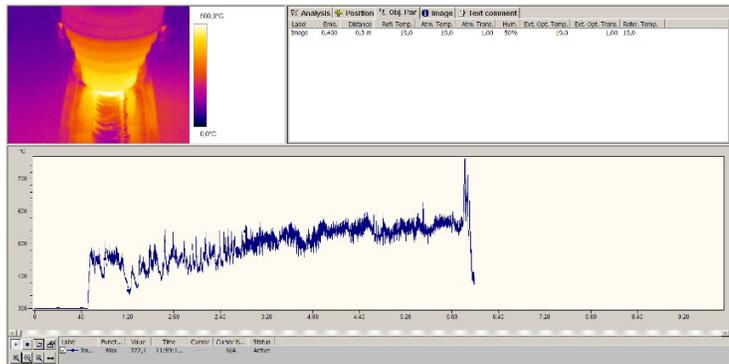


Figure 12. Evolution of the temperature during the welding process, by the execution of the P11.2-P11.4 segments

On the temperature evolution graph shown in the Figure 12, reduced variations of temperature can be observed during the FSW welding process; the maximum temperature is in the range 400 - 550°C, which indicates an adequate plastification of aluminium. There are no punctual large variations of temperature that could cause punctual plastification variations, because temperature uniformity in the sheet mass is not obtained instantaneously. In the Figure 13.a the assembly of the P11 joint test

sample is presented, after the joining operation by the FSW process. The joint appearance is adequate and no welding imperfections on the surface are revealed. The steel sheet, placed in the lower position, is heat-affected (Figure 13.b). This proves that the FSW weld has penetration on the whole thickness of the sheet.



Figure 13.a. Front view of the FSW joint test sample P11 [2]



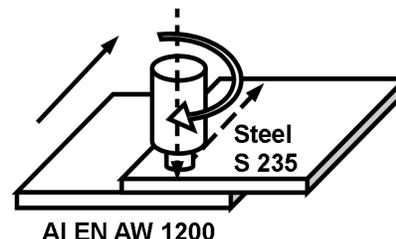
Figure 13.b. Rear view of the FSW joint test sample P11 [2]

Case D. FSW overlapp joining of S235 steel sheet ($s = 1.5$ mm), according to SR EN 10025-2, with EN AW 1200 aluminium alloy sheet ($s = 2$ mm). In the Table 2 the FSW joining parameters for the Case D are given.

Table 2. Case D. Joining Parameters of the Test Joint P12 [2]										
Materials	Thick-ness [mm]	Tool				Welding parameters				Segment
		Material	Pin type	Pin length l_{pin} [mm]	Type/Shoulder diameter $\varnothing_{shoulder}$ [mm]	Rotational speed n [rot/min]	Travel speed v [mm/min]	Rotation sense	Thrust force F_z [N]	Placing
Steel S235 / Aluminium EN AW 1200	1.5 2.0	Tungsten carbide P20S	Flat conic-al pin	2.0 Large base 4 mm; Small base 3 mm	Flat 20	1200	20	clock wise	(Start 457-1535) 3795-6900	P12.1
Steel S235 / Aluminium EN AW 1200	1.5 2.0	Tungsten carbide P20S	Flat conic-al pin	2.0 Idem	Flat 20	1200	(By start 20) 30	clock wise	3700-5100	P12.2

Steel S235 / Aluminium EN AW 1200	1.5 2.0	Tung sten carbide P20S	Flat conic -al pin	2.0 Idem	Flat 20	1200	(By start 30) 40	clock wise	3800-5530	P12.3
-----------------------------------	------------	------------------------	--------------------	----------	---------	------	------------------	------------	-----------	-------

Steel S235, on the rolling direction, 120 mm x 350 mm.
 EN AW 1200 aluminium (Al 99), on the rolling direction, 120 mm x 350 mm, placed below. Overlap 60 mm.
 Welding conditions according to SR EN ISO 25239-4 [16].
 Ambient temperature: 18°C.
 EN AW 1200 aluminium sheet temperature, after welding (at start place): 47,4°C (P12.1); 40°C (P12.2).



In the Figure 14 the assembly of the joining test sample P12 is presented, after the execution of the joining segments by the FSW process.

The FSW welding process was performed under normal conditions. Visual examination carried out after the execution of each pass found that joint segments executed by the FSW process on the test joint P12 have an adequate appearance. On the FSW joint segments no welding defect is revealed.



Figura 14. Test joint P12 after the execution of the FSW joining [2]

7. Verification of the FSW joints

7.1. Checking the joint Case C

Macroscopic analysis (Figure 15) reveals clearly the formation of the overlap FSW welded joint aluminium-steel, characteristic to the couples "soft" material – "hard" material. The friction joint zone is not very clear, but the mechanical fastening is very distinct instead, namely the formation of "whiskers" of steel, strongly anchored in the volume of the softer material, aluminum (areas A).

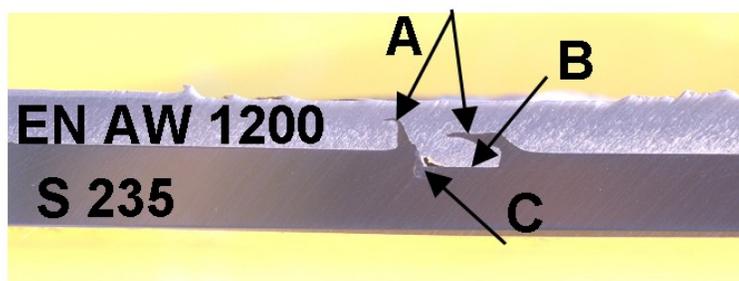


Figure 15. macroscopic analysis, Case C, FSW joint, Aluminium alloy EN AW 1200 / Steel S235 [2]

It is also to notice that an equivalent volume of aluminium migrated into the base material steel (area B). In the nugget, in the contact

area between aluminium and steel a small imperfection of the kind "cavity" (area C) is detected. This imperfection is accidental and it has minimal influence on the mechanical characteristics of the welded joint.

When tested for tensile strength (Figure 16) by the classical method (withdrawal), extents within the interval from 34.5 to 47.8 N / mm² were obtained; and the average value of the tensile strength was $R_m = 42.5 \text{ N / mm}^2$. These values are in the range of the tensile strength of the aluminium alloy EN AW 1200, which has the main share in the weld metal.

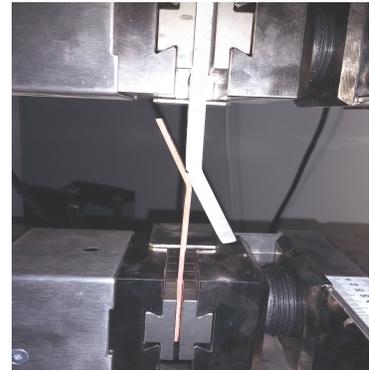


Figure 16. Tensile test of a FSW joint (withdrawal) [2]

7.2. Checking the joint Case D

By analyzing the macroscopic appearance, the tendency to form mechanical grip is revealed in the areas B, Figure 17, but the catch mode is different from the previous

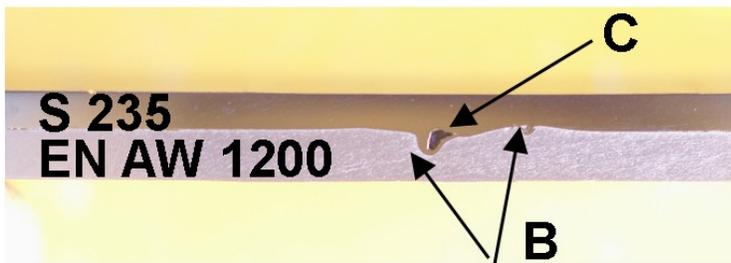


Figure 17. Macroscopic analysis, case D, steel S235 / aluminium alloy EN AW 1200 overlap joint [2]

case; the phenomenon of "anchoring" the two materials is not as much significant. In the contact area between the two materials (area C), an imperfection of the "tunnel" type is formed, of approx. 1.5 mm² (in sectional view). The imperfection was formed in steel, which has migrated to aluminium. In that area, sufficient mixing of the two materials, characteristic of the

FSW process, did not occur. Said imperfections of the cases C and D are permissible based on the levels of acceptance of FSW joints [16].

The tensile test results did not differ very much from the previous case. There have been maximum force values in the range $F_{max} = 2700 - 4880 \text{ N}$, with the average tensile strength extent $R_m = 41.2 \text{ N / mm}^2$. The values are in the domain of the tensile strength of unalloyed aluminium. This result is explained by the much higher weight of aluminium in the joint metal.

8. Conclusions

Joining tests have been executed for friction drilling, followed by form tapping for threading, as well as optional calibration by rotary broaching, in order to make dissimilar overlap joints of sheets of 5754 aluminum alloy, with 30 mm x 30 mm square pipes of AISI 1045 steel, respectively AISI 304 stainless steel.

Temperature variation monitored during these processes has allowed the proper run of the processes and appropriate forms of the joints.

The mentioned test joint samples were subjected to the following tests: measurement of the sizes of the cup formed by friction drilling; shear test; corrosion testing in moist

saline environment. The comparison of the results obtained allow the selection of the materials, depending on the intended application.

High spindle speeds and low feed rates are the best combination to achieve a minimum gap between sheet and tube. The gap between the tube and the sheet must be sealed tight, to avoid corrosion.

Based on the trials carried out, target applications of these processes are dissimilar joints of steel (carbon steel, low alloy or stainless steel), with aluminum alloy, for parts of automobile body and household appliances.

The dissimilar overlap FSW joining samples P11 and P12 for EN AW 1200 aluminum sheets, in couple with S235 steel sheets have appropriate appearance after welding and by the macroscopic metallographic analysis. Tensile strength is in the range from 34.5 to 47.8 N / mm², with the average value 42.5 N / mm², respectively 41.2 N / mm². These values are comparable to the tensile strength of EN AW 1200 aluminium alloy, as this material occupies the bulk section of the executed dissimilar joints. The allowable imperfections of the joint have not influenced the tensile strength values.

Target applications for the FSW dissimilar joints of EN AW 1200 aluminium alloy with S235 steel consist in the execution of structure elements of car body, appliances, tools or metal structures, with corrosion protection.

The mentioned processes are proposed to increase productivity in industrial technologies for series production. The duration of an operation executed by the processes addressed here is comparable to or lower than similar conventional processes. Jigs, mechanization and automation reduce auxiliary times and allow repeatability.

Aknowledgement

This article is based on results of the project with the title "A rapid joint by alternative processes", acronym J-FAST, in the frame of the Manunet Program, financed by both the Local Funding Program GAITEK of the Basque Country, Spain and the Executive Unit for Financing the Higher Education, Research, Development and Innovation UEFISCDI of Romania.

References

- [1] Urbikain Pelayo, Gorka¹ (¹University of the Basque Country, Bilbao, Spain); Pérez, José M.² (²CDTI, Madrid, Spain); López de Lacalle, Luis N.¹; Andueza, Aritz¹: "Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, July, 2016, 0954405416661002, pages 1-14, SAGE Journals. <http://online.sagepub.com>.
- [2] Verbițchi, Victor; Cojocaru, Radu; Boțilă, Lia-Nicoleta; Ciuca, Cristian; Perianu, Ion-Aurel: Project "A rapid joint by alternative processes". Acronym: J-FAST. Scientific and technical report in full - RST. Manunet Program. Contract No. 17 / 2015-2017. Stage 2 / 2016, pages 1-329. ISIM Timișoara, November 2016. Beneficiary: UEFISCDI.
- [3] Boopathi, M., Shankar, S., Manikandakumar, S., Ramesh, R., "Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel", Procedia Engineering 64 (2013) pag. 1219–1226.

- [4] Liedl, G., Bielak, R., Ivanova, J., Enzinger, N., Figner, G., Bruckner, J., Pasic, H., Pudar, M., Hampel, S., "Joining of Aluminum and Steel in Car Body Manufacturing", *Physics Procedia* 12 (2011) pag. 150–156.
- [5] Chowdhary, S., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., "Modeling forces including elastic recovery for internal thread forming", *Journal of Manufacturing Science & Engineering, ASME* (2003) 125 pag. 681-688.
- [6] Fromentin, G., Poulachon, G., Moisan, A., "Metallurgical aspects in cold forming tapping", *NCMR Proceedings, Leeds, UK* (2002) pag. 373-377.
- [7] Kimapong, K., Watanabe, T., "Lap Joint of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Steel by Friction Stir Welding", *Materials Transactions* 46 (4) (2005) pag. 835-841.
- [8] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P., Dawes, C.J., "Friction-stir butt welding", GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991).
- [9] Fuller, C.B., "Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs", *Friction Stir Welding and Processing, ASM International, 2007*, pag.7-37.
- [10] Arbogast, W. J., "Friction Stir Welding: After a Decade of Development", *Weld. J.*, vol.85, March 2006, pages 28-35.
- [11] Cojocaru, R.; Boțilă, Lia-Nicoleta; Ciucă, C.; Dașcău, H.; Verbițchi, V.: "Friction Stir Lap Welding of Light Alloy Sheets". The 10th International Conference STRUCTURAL INTEGRITY OF WELDED STRUCTURES, July 11th-12th, 2013, Timișoara, Romania. Proceedings of the Conference. Published by TTP Trans Tech Publications Ltd., Pfaffikon, Switzerland, 2013. ISSN print 1022-6680. Pages 187-193.
- [12] Boțilă, Lia-Nicoleta¹ (¹ISIM Timișoara); Cojocaru, R.¹; Ciucă C.¹: "Characteristics of friction stir welding tools for high hardness materials". TIMA 11. The 5th International Conference "Innovative technologies for joining advanced materials". Timisoara, Romania, 2011. Proceedings, 8 pages.
- [13] Cojocaru, Radu; Boțilă, Lia-Nicoleta; Ciuca, Cristian: "Device for friction stir welding aluminum alloys". Patent no. 127635 of the 30th June 2015. (Registration no. of the patent application A01277 of the 6th December 2010, State Office for Inventions and Trademarks - OSIM Bucharest).
- [14] Boțilă, Lia-Nicoleta; Cojocaru, Radu; Ciuca, Cristian; Verbițchi, Victor; et al.: "Nucleu" Program (2009-2013). PN 09 160104 Project, "Development of friction stir welding (FSW) process for joining metallic materials with high mechanical strength and high hardness". Stage VII. ISIM Timisoara.
- [15] Cojocaru, R.; Ciuca, C.; Boțilă, Lia-Nicoleta; Verbițchi, V.; Perianu, I.A.: "Partnerships" Program. National Project 219 / 2014-2017. "Innovative, clean and efficient technologies for joining metallic and polymeric materials used in the automotive industry, using the friction stir welding technique (Inova-FSW)". ISIM Timisoara.
- [16] SR EN ISO 25239:2011- "Friction welding with combined movement. Aluminum", Part 4: "Specification and qualification of the welding procedure" and Part 5: "Quality requirements and inspection".