



Universidad de Oviedo

TRABAJO FIN DE MÁSTER: Recargue mediante procesos de soldadura para la aplicación de recubrimientos metálicos anticorrosivos

Fátima González Fernández

Tutora: Inés Fernández Pariente

Máster en Ciencia y Tecnología de los Materiales
Centro Internacional de Postgrado



Escuela de Minas, Energía
y Materiales de Oviedo



Oviedo, Julio de 2016

Contenido

1. Introducción	1
2. Estado del conocimiento	3
2.1. Recargue mediante soldadura	3
2.2. Situación actual del proceso de recargue	6
2.3. Técnicas de recargue empleadas	13
2.3.1. <i>Cold Metal Transfer</i>	13
2.3.2. <i>Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)</i>	21
3. Materiales	26
3.1. Materiales base	26
3.1.1. <i>Acero P22/T22</i>	26
3.1.2. <i>Acero 16Mo3 (según norma UNE-EN 10216-2) (28)</i>	27
3.2. Materiales de aporte	28
3.2.1. <i>Hilo de acero inoxidable ER 347Si (AWS A5.9)</i>	28
3.2.2. <i>Hilo de acero inoxidable 309LSi (AWS A5.9)</i>	29
3.2.3. <i>Hilo de acero inoxidable ER 307(AWS A5.9)</i>	29
3.2.4. <i>Hilo de aleación CuSi3Mn1 (EN 14640)</i>	30
3.2.5. <i>Aleación SG CuAl8 (DIN 1733)</i>	30
4. Método experimental	32
4.1. Equipos	32
4.1.1. <i>Estación multi-soldadura de FRONIUS®</i>	32
4.1.2. <i>Equipamiento CMT</i>	35
4.1.3. <i>Equipamiento GTAW</i>	38
4.2. Procedimiento	39
4.2.1. <i>Preparación de los tubos</i>	39
4.2.2. <i>Colocación de los tubos</i>	41
4.2.3. <i>Colocación del hilo y la antorcha</i>	44
4.2.4. <i>Selección de parámetros de soldeo</i>	46
4.2.4.1. Soldadura CMT	46
CuSi3Mn1-16Mo3	47
ER 347Si-P22	49
4.2.4.2. Soldadura TIG	51
ER 307-P22	52

309LSi-P22.....	54
ER 347Si - P22.....	54
SG CuAl8 – 16Mo3.....	56
5. Resultados	59
5.1. Cupón 1: SG CuSi3 – 16Mo3 (CMT).....	59
5.2. Cupón 2: ER 347Si – P22 (CMT).....	60
5.3. Cupón 3: ER 307 – P22.....	61
5.4. Cupón 4: 309LSi – P22.....	63
5.5. Cupón 5: 347Si – P22.....	64
5.6. Cupón 6: SG CuAl8 – 16Mo3	64
6. Conclusiones	66
7. Referencias	68

1. Introducción

En cualquier industria en la que se utilicen aceros a altas temperaturas en ambientes corrosivos en mayor o menor medida, es habitual que aparezcan fallos en servicio de algún componente. Esto puede provocar la parada de una parte o de toda la instalación, con las correspondientes consecuencias que de ello se derivan. Este es el problema que presentan algunas de las empresas que recurren al Centro Tecnológico Aimen en busca de soluciones. En general son empresas del sector energético que manejan calderas, intercambiadores de calor y tuberías por las que circulan fluidos (corrosivos o no) a altas temperaturas (y altas presiones), y que pueden estar en contacto con gases corrosivos (generalmente por la cara exterior).

Aunque los fallos pueden deberse a múltiples causas, a efectos del presente trabajo nos interesan especialmente aquellos que se deben a los materiales y a los que se puede dar solución mediante procesos de soldadura, pilar fundamental del área de Ingeniería de Soldadura y Corrosión, en el que se ha desarrollado esta investigación.

Los problemas asociados al funcionamiento de este tipo de instalaciones son, principalmente, de corrosión en tuberías y conductos, por utilizar un material incapaz de resistir la agresividad de las condiciones de servicio. Estos materiales se van oxidando, perdiendo progresivamente material, es decir, reduciendo su espesor. Esta reducción de espesor deriva en un incremento paulatino de la temperatura media de servicio del material, endureciendo poco a poco las condiciones de operación del material. Además, debido a esta oxidación, se forman depósitos de óxido que pueden bloquear por completo los conductos o que incluso pueden viajar hacia las turbinas de vapor, erosionándolas y disminuyendo considerablemente su eficiencia y su vida útil (1).

Para combatir estos problemas, se podría cambiar el material por otro más resistente al medio corrosivo, pero esta solución resulta, por lo general, muy costosa. La solución alternativa que se ofrece desde el área de Ingeniería de Soldadura y Corrosión consiste fundamentalmente en revestir las paredes de los componentes sometidos a corrosión, con materiales más resistentes a estos ambientes corrosivos que los propios materiales de los que están fabricados en origen. Así, se pueden utilizar, entre otros, metales como el cobre y sus aleaciones, o algún tipo de acero aleado o inoxidable, específicamente formulados para resistir las condiciones de los ambientes corrosivos.

El objetivo de este trabajo es recabar, mediante la puesta en práctica de los conceptos teóricos, una serie de datos empíricos útiles sobre la tecnología de recargue automatizado mediante soldadura de arco eléctrico que nos permita mejorar nuestro conocimiento y con ello disminuir nuestro tiempo de respuesta ante futuras consultas de nuestros clientes. Para ello, se realizarán pruebas con distintas técnicas de soldeo (CMT y GTAW) y distintos materiales base y de aportación. Aunque en este

trabajo no nos mueva la demanda concreta de un cliente, sí sabemos que mejorar la experiencia en esta área puede facilitar que diversas empresas con problemas de este tipo acudan al Centro Tecnológico Aimen con el fin de recibir un asesoramiento técnico efectivo.

El fin último es lograr depositar sobre un determinado material, otro material que, al tener mayor resistencia a los ambientes corrosivos, permita obtener una superficie recubierta que suponga un incremento en resistencia a corrosión con respecto a la superficie sin recargar. Nos proponemos conseguir unos recargues de una calidad tal que permitan cualificar el procedimiento de soldeo según la norma UNE-EN ISO 15614 y según la sección IX: 2013 del código ASME.

Toda la parte empírica del presente proyecto se ha desarrollado en el área de Ingeniería de Soldadura y Corrosión del citado Centro Tecnológico Aimen, una de las Asociaciones de Investigación de referencia a nivel estatal en el campo de los materiales metálicos.

En la Figura 1 se muestra un "header" típico de una planta energética. Este conducto de gran espesor de acero extruido recibe fluidos desde los tubos. En él los fluidos se mezclan y se homogenizan. Este podría ser un componente a recargar interiormente.



Figura 1: Vista de un "header" típico de una planta energética. (1)

2. Estado del conocimiento

2.1. Recargue mediante soldadura

La soldadura por arco eléctrico, en general, es un proceso de unión de dos o más piezas, de materiales iguales o disimilares, utilizando la energía aportada por un arco eléctrico que se establece entre un electrodo y la pieza o piezas a soldar. Es un tipo de soldadura por fusión, en el que se suele emplear un material de aporte que será fundido conjuntamente con una parte localizada del material o materiales base a unir. Ese charco de material fundido (denominado *baño de soldadura*), al enfriarse, solidifica, dando lugar a una unión fija a la que se le denomina *cordón*.

En nuestro caso, no se ha realizado una soldadura propiamente dicha, porque no se trata de realizar una unión de piezas, sino que se han utilizado los principios de la soldadura por arco para la aplicación de una serie de cordones sobre la superficie de otro material. En particular, se han depositado cordones de materiales resistentes a la corrosión sobre tubos de otros materiales comúnmente empleados en tuberías con temperaturas de servicio altas (>400°C), de manera circunferencial.

El recargue mediante soldadura es un procedimiento muy comúnmente empleado en la reparación o modificación de piezas existentes, así como en el acabado de superficies. Consiste en depositar mediante fusión un material con las propiedades deseadas (resistencia a la abrasión, resistencia a corrosión, resistencia a la temperatura,...) para modificar la superficie de otro material que no tiene tan buenas propiedades. Para ello, se funde el material que se va a aportar (también se fundirá parcialmente el material base) mediante procedimientos de soldeo, para que, una vez solidificado este baño metálico, se forme un cordón sólido en la superficie del material. El cordón resultante de llevar a cabo un proceso de recargue se denomina *recargue*. Mediante la deposición de varios cordones se obtiene una superficie recargada, con alguna propiedad mejorada. En casos de reparaciones puede darse la situación de que el material de aporte del recargue sea idéntico al material base, ya que en este caso no se busca mejorar ninguna propiedad concreta, sino simplemente, depositar más material en una zona localizada en la que el material original se ha perdido por alguna causa (erosión, corrosión,...).

La soldadura de recargue ha adquirido en los últimos años una importancia notable debido a que permite mejorar las características superficiales de algunos componentes, de una forma más económica (generalmente) que la sustitución de la pieza completa. Este tipo de soldadura también se utiliza para alargar la vida útil de componentes que han dejado de funcionar porque se han desgastado o deformado. En la Figura 2 se puede ver un claro ejemplo de este tipo de recargues. En ella se muestra el cazo de una retroexcavadora a la que se le ha aplicado un recargue metálico con un material más duro, mediante soldadura.

En las empresas, donde el factor económico suele ser de vital importancia, optar por una solución relativamente rápida y eficaz, como lo es el recargue mediante

procesos de soldeo, suele ser una buena opción, por lo que forma parte de la práctica habitual de empresas de diversos sectores.



Figura 2: Recargue duro en la cuchara de una excavadora

Actualmente son muchos los procesos de soldadura por arco eléctrico disponibles para la aplicación de recargues. Los más importantes pueden clasificarse como: procesos de soldeo con electrodo revestido SMAW (para este proyecto la descartamos por no prestarse a automatización), con electrodo no consumible (TIG), con electrodo consumible -bajo protección gaseosa (MIG/MAG o GSFCAW) o con protección mediante fundentes (SSFCAW o SAW)-.

La soldadura mediante SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) es un procedimiento cómodo para su aplicación en campo, por no necesitar gas de protección. Al no poderse automatizar es un proceso necesariamente manual, por lo tanto, poco productivo. Además, desde el punto de vista de un centro tecnológico, en el que se persigue aportar soluciones repetitivas y de alta calidad, no se pueden dar garantías de buenos resultados cuando el factor humano tiene tanta importancia. Por este motivo, no se ha planteado la posibilidad de efectuar los recargues mediante soldadura con electrodo revestido.

El soldeo por arco sumergido (SAW: *Submerged Arc Welding*) utiliza un flux o fundente en polvo como protección del baño de fusión. Debido a su alta tasa de deposición de material, permite obtener cordones de grandes espesores si los comparamos con cualquiera de las otras técnicas.

La soldadura por arco sumergido requiere de un sistema de depósito de flux (normalmente también de un sistema de aspiración para retirar el exceso), lo que limita las posiciones de soldeo, de tal modo que solo es posible el soldeo en posición de sobremesa.

Si se desea soldar o recargar tubos o cualquier pieza cilíndrica mediante SAW, debe disponerse de un sistema como el que se muestra en la Figura 3, que permita ir girando el tubo a medida que se suelda, sin que el flux se caiga y el baño quede desprotegido. Con los medios disponibles en Aimen podría conseguirse un proceso semiautomático en chapas planas, sin embargo, no sería inmediato llevarlo a cabo en tubos, que es el formato que decidimos emplear, por ser uno de los escenarios reales más fácilmente reproducibles de las empresas que solicitan asesoramiento.



Figura 3: Recargue mediante arco sumergido de un rodillo

La soldadura con electrodo de tungsteno no consumible bajo protección de gas inerte (TIG: *Tungsten Inert Gas* o GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding*) es un proceso limpio (libre de escorias y proyecciones) por lo que permite obtener cordones más resistentes a la corrosión (ausencia de defectos) que otras técnicas en las que la protección del arco no es tan efectiva. El electrodo en este proceso es de tungsteno (puede estar aleado en pequeña proporción con otros metales) y no se consume durante el proceso. El material de aporte, cuando el proceso es manual, se añade en forma de varilla que se aproxima al arco para ser fundida. Cuando se emplean medios automáticos, el aporte puede hacerse de forma continua, por ejemplo con bobina de hilo, y la técnica ofrece más posibilidades que en el modo manual. Este proceso es fácilmente automatizable gracias a los medios de los que dispone el departamento de Industria Pesada de Aimen, por lo que es una de las técnicas de soldeo empleadas en este proyecto. Más adelante se describirá en profundidad la técnica y se detallarán los parámetros utilizados.

Dentro de los procesos de soldeo con hilo consumible podemos distinguir dos categorías según el tipo de hilo empleado. Por un lado, si el hilo empleado es macizo tendremos los procesos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) en los que el arco se protege mediante un gas que puede ser inerte (MIG: *Metal Inert Gas*) o activo (MAG: *Metal Active Gas*). Por otra parte están los procesos con hilo tubular (FCAW: *Flux Cored Arc Welding*), en los que los hilos de material de aporte tienen su núcleo relleno con un

flux o fundente que protege al arco. Según sea el tipo de fundente que contengan, puede ser necesario utilizar un gas de protección o no. Si el hilo requiere gas de protección hablaremos de GSFCAW (*Gas Shielded Flux Cored Arc Welding*) y si este no es necesario estaremos ante un proceso SSFCAW (*Self Shielded Flux Cored Arc Welding*). En este trabajo se ha empleado CMT (*Cold Metal Transfer*) una evolución tecnológica del MIG/MAG que se describirá más adelante, pero cualquiera de estos tipos de soldadura con hilo consumible sería aplicable, ya que las mismas máquinas pueden adaptarse a cualquiera de los procesos de hilo consumible.

2.2. Situación actual del proceso de recargue

Al realizar una búsqueda entre los artículos publicados durante los últimos años en revistas de investigación científica del campo de los materiales (*Materials Science and Engineering, Materials Today, Revista de Metalurgia, Science...*), se puede comprobar que, aunque la soldadura de recargue es un proceso que suscita cierto interés en la comunidad científica, no son muy numerosas las publicaciones al respecto. Además, la mayoría de ellas tratan los distintos procesos de soldadura de un modo teórico, o se centran en estudiar los cambios microestructurales que sufre el material recargado (2), información que resulta de altísimo interés para un estudio profundo de los materiales, pero que se aleja de los objetivos del presente trabajo. También se pueden encontrar algunos artículos en los que se desarrollan interesantes teorías matemáticas que permiten optimizar determinados procesos (3) -como el método de Taguchi para la optimización de parámetros TIG (4), (5)- o que estudian cómo es el movimiento del baño de fusión durante la soldadura (6) o que intentan predecir el aspecto final del cordón de soldadura (7).

Sin embargo, desde el punto de vista ingenieril, considero escasas las publicaciones sobre este tema que tengan un carácter práctico, fácilmente aplicable en la práctica en alguna empresa del sector metalúrgico. Por este motivo, incluiré en esta revisión aquellos *papers* que han resultado más relevantes para el alcance concreto de este proyecto.

Recientemente se ha publicado un estudio (8) con similares objetivos a los de este trabajo. El él se persigue conseguir los parámetros óptimos para recargar con un acero inoxidable austenítico (AISI 316) mediante GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) un acero poco aleado, con el fin de mejorar su resistencia a corrosión. Para ello han utilizado CO₂ como gas de protección y han probado distintos valores de intensidad, voltaje y velocidad de soldeo. Una vez hechas estas pruebas *bead-on-plate* (utilizar el soldeo para depositar un cordón sobre la chapa, no para unir distintas piezas) han tabulado los resultados, fijándose en el aspecto y calidad final del cordón, en las proyecciones producidas durante el soldeo y en la calidad de la transferencia de metal. Así, han filtrado los resultados, quedándose solamente con aquellos con mejor aspecto, sobre los que posteriormente han realizado diversas pruebas. Por un lado, han medido durezas, concluyendo que el incremento de esta no ha sido muy

significativo en ninguna de las muestras. También han observado mediante microscopía óptica el aspecto de la interfase metal de aporte-metal base, comprobando que la unión metalúrgica es satisfactoria en todos los casos. Finalmente, la prueba más determinante ha sido un ensayo de corrosión por inmersión durante 24 horas en una disolución corrosiva, lo que ha permitido cuantificar la pérdida de masa por corrosión de las distintas pruebas. Tal y como cabía esperar, la probeta con menor tasa de corrosión es la que ha experimentado un menor aporte térmico (*heat input*) durante el soldeo. Esta es también una premisa importante en nuestro trabajo debido a que un bajo *heat input*, junto con una baja penetración, implican menor dilución, lo cual repercute en la menor “contaminación” del material de aporte con “material base”.

Como ya he comentado anteriormente, en este trabajo se ha utilizado TIG y CMT como técnicas de soldeo. Cuando se buscan artículos relacionados con los recargues mediante TIG (o GTAW) se pueden encontrar algunos trabajos en los que se está utilizando esta tecnología para obtener aleaciones superficiales de una forma relativamente sencilla y económica. Se puede destacar, en este campo, el trabajo llevado a cabo por J.-H. Chen et al. (9), en el que se ha utilizado la soldadura de recargue por TIG para obtener una aleación multielemental (Ni, Cr, Co, Mo, Al) con mejorada resistencia al desgaste. Su objetivo es conseguir una estructura lo más parecida posible a la equi-molar CoNiCr. Los resultados en cuanto a composición más similar a la deseada, son mejores en un recargue de doble pasada que en un recargue de pasada única. Esto mismo sucede con la resistencia al desgaste, la cual mejora con respecto a la del material base en las dos situaciones, siendo mejor en la aleación conseguida con el recargue multipasada, ya que aumenta la fracción en volumen de microestructura rica en Molibdeno. El material de aporte en este caso es una mezcla de polvos compactados y depositados sobre la chapa de metal base. Este formato de material de aporte, representado en el esquema del proceso en la Figura 4, difiere del habitual (por bobina de hilo). Posteriormente este estudio ha sido revisado, centrando el interés en la microestructura obtenida (10).

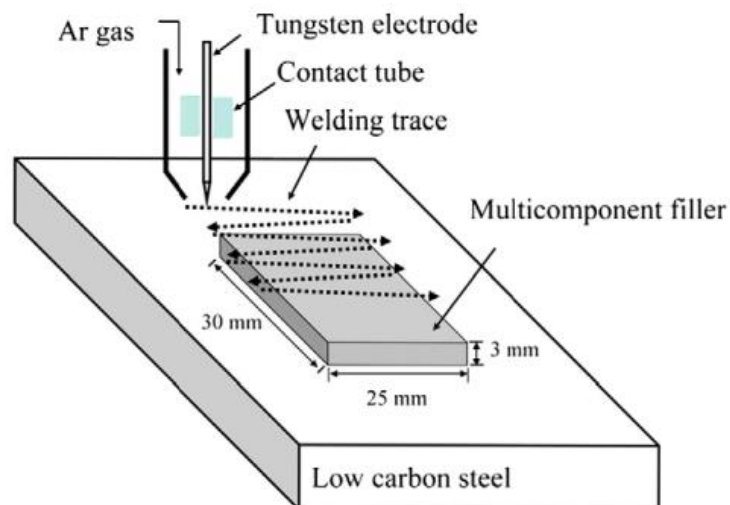


Figura 4: Representación esquemática del proceso GTAW para obtener la aleación deseada (10)

Continuando con la soldadura mediante electrodo no consumible, GTAW, podemos citar otro interesante artículo (11) que estudia el efecto que produce a nivel microestructural el uso de corriente pulsada en lugar de corriente constante, en un recargue de acero super duplex (depositado sobre un acero de alta resistencia, débilmente aleado). En esta investigación se pretende demostrar o desmentir las hipótesis formuladas por otros investigadores. Para ello, se realizan recargues reales y se estudia cómo ha sido el crecimiento de grano de la austenita, los distintos tipos de austenita formada y se evalúan las consecuencias que esto puede tener en las propiedades del material. El cambio microestructural sufrido por el material se justifica por el diferente aporte térmico que sufre la pieza y por la variación que ello conlleva en la velocidad de enfriamiento. Además, un menor aporte térmico evita que el crecimiento de las dendritas sea tan grande, por lo que se obtiene una microestructura de grano más fino, por lo tanto, más tenaz. Sin embargo, si nos centramos en la resistencia a corrosión, los beneficios que parecía aportar la corriente pulsada, se ven oscurecidos por la aparición de defectos en la capa pasiva formada, perdiendo por ello resistencia a corrosión. Aunque en esta publicación el uso de corriente pulsada resulte perjudicial, no tiene por qué serlo en nuestro caso concreto, ya que los materiales con los que se efectúan los recargues poseen una microestructura muy diferente y mucho más simple que la de estos aceros super-duplex. He aquí la demostración de la importancia de poner en práctica las distintas combinaciones de materiales base y materiales de aporte, ya que la extrapolación de resultados en circunstancias como estas (es muy complicado predecir el comportamiento de un material basándose en el comportamiento de otro con microestructura de partida muy diferente) resulta muy complicada.

Si centramos nuestra búsqueda en el problema de la corrosión, podemos encontrar soluciones técnicas a problemas reales como la propuesta por J.C. Dutra et al. (12), que consiste en utilizar sistemas robóticos flexibles que permiten recargar mediante GMAW el exterior de las paredes de los tubos de una planta termoeléctrica, sin necesidad de desplazarlos de su ubicación. El sistema que han diseñado se puede ver en funcionamiento en la Figura 5. Con este sistema que han desarrollado consiguen recargar de forma efectiva grandes superficies de tuberías en poco tiempo con una alta calidad, obteniendo una tubería con mejores propiedades que las del material de partida.

Aunque en nuestro trabajo no buscamos una forma de recargar externamente los tubos en su posición final (durante el servicio), el estudio de estos brasileños sí que presenta ciertas similitudes con el nuestro. Por un lado, una de las premisas que buscan es la menor dilución posible, lo cual también es uno de nuestros objetivos, ya que la aplicación potencial de nuestros recargues será la misma que la de estos investigadores. Por otra parte, es fundamental el acabado superficial de los recargues (la presencia de defectos puede actuar como concentrador de tensiones, como región de acúmulo de fluidos corrosivos,...) por lo que se opta por evitar el recargue manual. Finalmente, otro punto en común de nuestro trabajo con el de estos autores es la posición de soldeo. En su caso la posición de cornisa (en algunas pruebas también

sueldan en vertical) ha sido impuesta por las condiciones de servicio de los tubos. En nuestro caso, hemos priorizado la posición de cornisa (PC) porque permite cualificar a la vez la posición de sobremesa (PA) sin necesidad de realizar otro cupón.

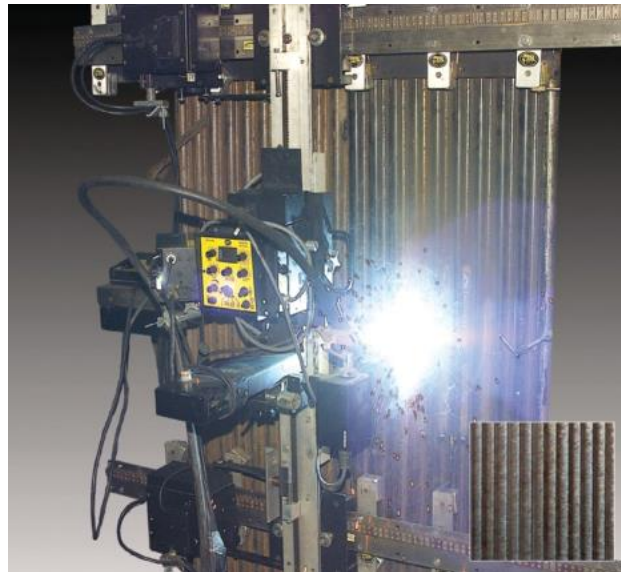


Figura 5: Sistema robótico flexible diseñado para el recargue de tubos de caldera (12)

Volviendo al TIG podemos citar un artículo de reciente publicación (13) en el que se revisa el estado actual de la técnica y sus aplicaciones y se realizan una serie de pruebas con innovadoras configuraciones de antorcha-hilo. En este documento se destaca la importancia del TIG en soldaduras que necesariamente requieren de alta calidad (cero defectos), a pesar de su baja productividad en comparación con otras técnicas. En la realización del citado de trabajo se emplea concretamente el soldeo TIG con aporte de hilo caliente (*Hot Wire-GTAW*). En este tipo de soldeo, el hilo de aporte lleva aplicada una determinada intensidad que contribuye a fundir el hilo, pudiendo invertirse así en fundir el metal base el resto de la energía de arco (cuando el hilo se aporta en frío, parte de la energía del arco se invierte en fundirlo).

En el artículo se destaca el importante incremento en la tasa de deposición que esta variante del TIG supone, permitiendo velocidades de alimentación de hilo entre 3 y 10 veces mayores que las que se consiguen con el TIG convencional (*cold wire*). A pesar de que el HW-GTAW supone ya un incremento de productividad con respecto al GTAW convencional, los autores de esta publicación han dedicado sus esfuerzos a conseguir un método innovador que permita que la productividad de la técnica sea todavía mayor. Basándose en un diseño descrito por John Norrish en 2016, que consiste en un cabezal multi-cátodo con capacidad para 3 electrodos y en las conclusiones de sus investigaciones, han desarrollado una antorcha con capacidad para 2 electrodos (el tercer electrodo en el diseño de Norrish no incrementaba tan significativamente la velocidad de soldeo). Esta antorcha de doble cátodo se ha utilizado con un único sistema de aporte de hilo (como se puede ver en la Figura 6) y con 2. Además, el arco puede pulsarse, por lo que han probado la antorcha de doble cátodo, con aporte doble de hilo, con arco pulsado.



Figura 6: Antorcha de doble cátodo empleada en este trabajo (FRONIUS SpeedClad®)

Por otra parte, también han probado a utilizar en sus pruebas una antorcha de un único cátodo (electrodo), pero con un sistema de doble aporte de hilo.

Para medir la eficiencia del depósito de material se ha analizado el contenido en hierro. Todos los datos se han representado y el resultado se muestra en la Figura 7.

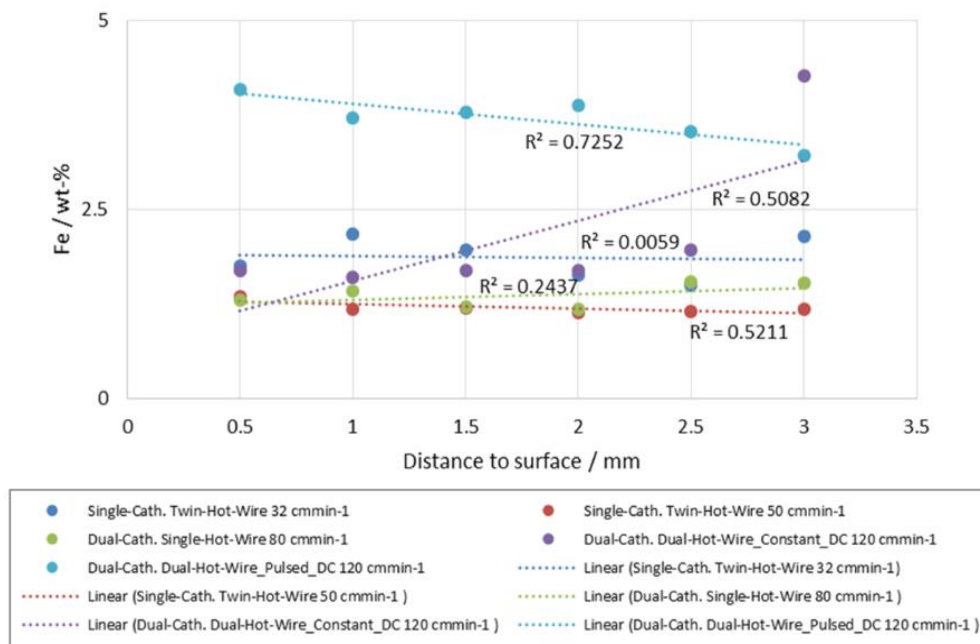


Figura 7: Contenido en hierro en función del proceso aplicado y de la distancia a la superficie

Una conclusión fundamental que se puede extraer de estos resultados es que el uso de corriente pulsada incrementa notablemente la productividad, si se compara con el uso de corriente constante con idéntica configuración. Además, los autores destacan un mejor aspecto del cordón a las velocidades más altas, con mayor homogeneidad. El cordón soldado a la mínima velocidad presentaba la peor distribución elemental.

A la vista de los resultados se podría decir que el uso de dos cátodos en la misma antorcha permite aumentar la velocidad de soldeo notablemente. El uso de 2 hilos en lugar de uno hace aumentar la cantidad de material depositado (y según cual sea el objetivo, también la velocidad). Pero lo que realmente representa una mejora significativa en la productividad del proceso es el uso de corriente pulsada.

En otro artículo (14) se visualiza el comportamiento del arco de TIG y el resultado final obtenido cuando se emplea como gas de protección un flujo alternante de argón y helio. Con la adición del helio al argón (gas empleado en la mayoría de las ocasiones) se modifican las propiedades termo-físicas del plasma, lo que permite un mayor control del arco, suponiendo importantes mejoras en la transferencia térmica, en la formación del arco y en la soldabilidad del material. El flujo pulsado de gases se puede utilizar también en la soldadura GMAW. Tanto en soldadura GMAW como en GTAW de aceros y aluminios, se pueden lograr importantes beneficios, como un mayor control de la distorsión y un afino de la microestructura, lo que repercute positivamente en las propiedades mecánicas. La frecuencia con la que se pulsa el flujo gaseoso influye en la dinámica del movimiento del baño de fusión y en la geometría final del cordón solidificado.

Como se puede comprobar, en los últimos años el número de publicaciones relacionadas con el TIG es bastante significativo, pero como decía anteriormente la mayor parte de estas investigaciones se han centrado en dar solución a problemas distintos a los que nosotros queremos abordar. Muchos de estos textos se centran en el estudio microestructural de aleaciones complejas, o en la optimización de parámetros en soldaduras de aceros inoxidable (15), principalmente austeníticos (por ser los más utilizados), entre otros asuntos. Aunque este no va a ser nuestro caso, gran parte de la información (parámetros, conclusiones, dilución,...) que se extrae de estos artículos puede ser de gran utilidad. Además, estos documentos se caracterizan por su innovación técnica, componente clave desde el punto de vista ingenieril, y más aún si cabe teniendo en cuenta que el presente trabajo se ha realizado en un centro tecnológico. Más adelante se expondrán las condiciones concretas de las pruebas realizadas, donde se podrá comprobar que se han aplicado algunas de estas innovaciones tecnológicas, como por ejemplo el aporte de hilo caliente (*hot wire*), el uso de corriente pulsada o la aplicación del sistema AVC, que más adelante se explicará.

Aunque en este trabajo nos centraremos en efectuar recargues con finalidad anticorrosiva, los mismos principios técnicos pueden aplicarse en recargues duros, es decir, con finalidad anti-desgaste. Los recargues para superficies sometidas a desgaste representan un campo de investigación interesante, debido al ahorro que puede suponer evitar el reemplazo de un componente en servicio (o, al menos, alargar su vida útil), depositando sobre el componente originar un material más duro. En este campo el número de publicaciones científicas es incluso mayor que en los recargues anti-corrosión. Una de las revisiones más completas que he encontrado del estado de la técnica en relación con los recargues anti-desgaste, es el trabajo de Patricio F.

Mendez et al. (16) En este extenso artículo, tras detallar el aspecto microestructural de los sistemas de materiales que van a emplear (carburos de cromo y carburos de wolframio-silicio), explican brevemente todas las técnicas que han empleado. Cabe destacar que en otros departamentos del Centro Tecnológico Aimen se utilizan algunas de las técnicas más recientemente inventadas que se describen en el artículo (PTAW: *Plasma Transferred Arc Welding*, LBW: *Laser Beam Welding*, FSP: *Friction Stir Processing*). A pesar de lo innovadoras que puedan parecer estas técnicas, me he fijado especialmente en la familia de técnicas GMAW y dentro de ésta, me ha resultado especialmente novedosa la posibilidad de aporte de un hilo caliente (macizo o tubular), a mayores del material aportado directamente en el arco (electrodo consumible). Por el momento, Aimen no dispone de las herramientas necesarias para emplear esa configuración, por lo que no se empleará en este trabajo.

Como he comentado anteriormente, el TIG o GTAW no será el único proceso de soldeo empleado en este trabajo, sino que además se empleará una evolución del GMAW, denominada CMT (*Cold Metal Transfer*). La principal característica distintiva de esta técnica frente al GMAW convencional es el menor aporte térmico al material base. Además, en el CMT la transferencia de material es más precisa que en cualquier otro proceso GMAW. Esta técnica presenta sobre el TIG la ventaja de ser más productiva (permite soldar a velocidades mayores), pero la calidad de los cordones es normalmente inferior a la de los cordones obtenidos por TIG. Por ser el CMT una técnica de reciente implantación, todavía no son muy abundantes los artículos publicados sobre recargues con esta técnica. Sin embargo, el principal motivo por el que emplearla es el mismo que el que nosotros perseguimos: disminuir el aporte térmico a la soldadura (lo cual repercute en el calentamiento del tubo) y disminuir la dilución (perjudica las propiedades anticorrosivas del recargue).

De un modo similar a lo que ocurría con el TIG, el CMT se aplica principalmente en soldeo de chapas finas, sobre todo de aluminio y acero inoxidable. También es una técnica adecuada para recargues debido a la alta calidad de los cordones depositados y al control de la dilución que se puede alcanzar. Pickin et al. (17) emplearon el CMT y GMAW pulsado para aplicar recargues a una chapa de aluminio. Al realizar una macrografía de los cordones, se puede comprobar que la dilución es menor en el caso de los cordones depositados por CMT, lo cual nos interesa de cara a nuestro trabajo. Si lo que se persiguiese fuese una mayor superficie reforzada (más altura de cordón) sería preferible optar por la soldadura pulsada, que además presenta la ventaja de una mejor distribución de la dilución.

En cuanto a los problemas que puede presentar la soldadura CMT (18) está la posible aparición de agrietamiento durante la solidificación (no suele suponer un problema cuando se trata de recargues, ya que está fuertemente relacionado con las configuraciones angostas de algunas posiciones de soldeo), la selección inadecuada del gas de protección (puede provocar excesivas proyecciones e inestabilidad en el arco) y la selección inadecuada de la velocidad de soldeo (lo que podría provocar porosidad y distorsión del material).

2.3. Técnicas de recargue empleadas

2.3.1. Cold Metal Transfer

La técnica de soldadura conocida como *Cold Metal Transfer* (CMT) es una tecnología de reciente descubrimiento que se integra dentro de la soldadura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). En la Figura 8 se puede ver un esquema en el que se representan los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el soldeo GMAW. Aunque algunos autores incluyan dentro de GMAW la soldadura con electrodo tubular (alambre relleno de flux), sería sencillo diferenciar por el aspecto del cordón tras la soldadura, un tipo de soldadura del otro, ya que el soldeo con electrodo tubular, FCAW, dejaría el cordón cubierto por una escoria, que en GMAW no aparece porque no se emplean los fundentes que la forman.

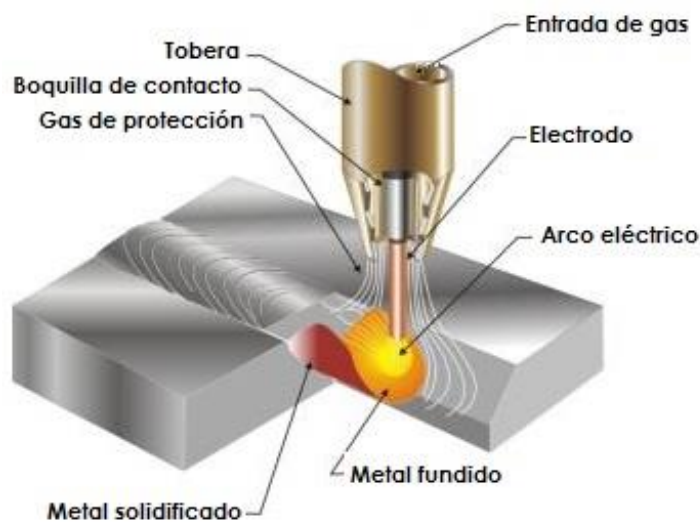


Figura 8: Esquema del soldeo GMAW

En los procesos GMAW el calor necesario es generado por un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible (hilo de material de aporte) y el metal que se va a soldar (en nuestro caso, recargar). El electrodo es un hilo o alambre macizo y desnudo, que se alimenta de forma continua automáticamente. Por lo general, este alambre viene enrollado en una bobina que se va devanando y alimentando (mediante un sistema alimentador de hilo) a la velocidad que solicite el operador o soldador. Para el soldeo MIG/MAG se emplean fuentes de alimentación de tensión constante (el uso de fuentes de intensidad constante requeriría de un sistema de alimentación de hilo de velocidad variable, muy complejo). Si el electrodo no es macizo, sino que lleva en su interior un flux o fundente, estaríamos hablando de otro proceso similar, que pasaría a catalogarse dentro de la soldadura FCAW (*Flux Cored Arc Welding*). Por lo tanto, siempre que hablemos de GMAW (o MIG/MAG) estaremos utilizando un electrodo macizo. Este electrodo se convierte en el metal depositado (metal aportado) a medida que se va consumiendo. El electrodo, el arco, el metal fundido y las zonas adyacentes de metal base quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante una corriente de gas, aportada por la tobera de la pistola, concéntricamente al alambre/electrodo. (19)

Una característica del soldeo GMAW es la autorregulación del arco. Al tocar el hilo la pieza, la intensidad de cortocircuito que se origina es muy elevada, por lo cual el extremo del alambre se funde inmediatamente, estableciéndose un arco (cebado instantáneo) cuya longitud es función de la tensión elegida en la fuente. Una vez cebado el arco entra en juego el fenómeno de la regulación, suministrando la fuente la intensidad necesaria para fundir el alambre a medida que este se suministra, manteniéndose la longitud de arco correspondiente a la regulación de voltaje elegida. Si por cualquier causa, la distancia entre el extremo del alambre y la pieza aumenta, la tensión y la longitud de arco aumentarán pero, al mismo tiempo, la intensidad disminuirá, por lo que la fusión será más lenta hasta que se restablezca la longitud y el voltaje inicial. Cuando la distancia entre la pieza y el alambre disminuyen sucede el efecto contrario (19). La longitud del arco y el *stick-out* (distancia entre la pieza a soldar y la boquilla o punta de contacto) pueden variarse para modificar el comportamiento del arco.

Llegados este punto, cabe aclarar cuáles son los **modos de transferencia** de material (19), (20), (21) que pueden darse en la soldadura MIG/MAG:

- **Transferencia en cortocircuito:** En esta tipo de transferencia, el metal se deposita cuando se establece un cortocircuito entre la pieza (metal base) y el electrodo (hilo de aportación). Los cortocircuitos producidos por el contacto del electrodo con el baño fundido, ocurren con mucha regularidad entre 50 y 200 veces por segundo. Se consigue así un arco muy estable con valores de corriente y tensión bajos, lo que deriva en un bajo aporte térmico (heat input) a la soldadura. Debido a este bajo aporte de calor, la pieza sufre menor distorsión y la penetración es menor. Por este motivo, este modo de transferencia es ideal para la soldadura de chapas finas. Además, debido a que el baño de fusión es reducido, es el modo de transferencia más adecuado para las soldaduras en vertical, cornisa y bajo techo.

Para conseguir que la transferencia de metal se produzca por cortocircuito, se debe cumplir:

- Valores de tensión bajos (<22V)
 - Valores de intensidad bajos (<250A)
 - El gas de protección debe ser, preferentemente, CO₂ o alguna mezcla Ar/CO₂.
- **Transferencia globular:** Cuando se opera con este tipo de arco, el metal se transfiere en gotas de gran tamaño. El hilo se va fundiendo por su extremo a través de gotas gruesas de un diámetro hasta tres veces mayor que el del electrodo. La separación de las gotas ocurre cuando el peso de estas excede la tensión superficial que tiende a sujetarlas en la punta del electrodo. La fuerza electromagnética que actuaría en una dirección para separar la gota, es pequeña con relación a la fuerza de gravedad en el rango de transferencia globular (sobre 250A). Las gotas a

punto de desprenderse oscilan hacia los lados y la transferencia de metal es dificultosa. Debido a esto el arco es inestable y se producen muchas proyecciones. Además el baño de fusión es grande, por lo que se suele recomendar soldar en horizontal (sobremesa). Al emplearse una corriente tan alta se consigue bastante penetración, por lo que la transferencia globular se utiliza para soldar acero dulce de gran espesor (superior a 10mm).

Para conseguir que la transferencia sea globular se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Valores de tensión intermedios (Entre 22V y 28V)
- Intensidad alta (>200A)
- Gas de protección rico en CO₂ y Ar

No es habitual soldar con este tipo de arco, pero accidentalmente puede que el rango de intensidad y voltaje produzca este tipo de transferencia.

- **Transferencia por arco spray o pulverización axial:** El metal es transportado a alta velocidad en partículas muy finas a través del arco. La fuerza electromagnética es lo bastante fuerte como para expulsar las gotas desde la punta del electrodo. Se tiene transferencia spray al soldar con argón acero inoxidable y metales no ferrosos como el aluminio. Se obtiene gran penetración y una buena acción limpiadora (debido a que el electrodo está conectado al polo positivo, es decir, debido a que se trabaja con polaridad inversa). Al utilizar gas activo CO₂, se requieren amperajes superiores a 200 (De 220 a 500 A), y una tensión de arco entre 28 a 40 V.

Este tipo de transferencia se utiliza para recargues y todas las soldaduras en posición horizontal, ya que se pueden utilizar alambres de gran diámetro.

El principal inconveniente es que el baño que se genera es muy grande, difícil de controlar en determinadas posiciones, por lo que se desaconseja en soldaduras en posición vertical ascendente o bajo techo.

Para que se produzca una transferencia spray debe cumplirse:

- Que el alambre esté conectado al polo positivo (+) polaridad inversa (CCEP: Corriente Continua Electrodo Positivo)
- Que el gas de protección sea Ar, He o mezclas de estos gases
- Que exista una elevada intensidad de corriente
- Que la tensión del arco sea relativamente alta

La acción decapante que realiza la utilización de polaridad inversa (CCEP) es muy importante, sobre todo cuando se sueldan metales que forman películas de óxido muy protectoras, como el aluminio o el magnesio. Este decapado se produce porque los iones positivos del plasma, chocan a gran velocidad con el cátodo (la pieza que se está soldando) "bombardeándola" de forma continua, arrancando así los óxidos refractarios que la recubren.

- Transferencia por arco pulsado:** es una modalidad del tipo spray, que se produce por pulsos a intervalos regularmente espaciados, en lugar de suceder al azar como ocurre en el arco spray. Este tipo de transferencia se obtiene cuando se utiliza una corriente pulsada, que es la composición de una corriente de baja intensidad, que existe en todo momento (es constante) y se denomina de fondo o base, y un conjunto de pulsos de intensidad elevada denominada corriente de pico. La intensidad de fondo sirve para precalentar y acondicionar el alambre que va avanzando continuamente. En cuanto se aplica la corriente de pico, saltará la gota. La ventaja fundamental de este método es la importante reducción de calor aplicado que se produce con respecto al método arco-spray, lo cual se traduce en la posibilidad de soldar en spray piezas de menor espesor, obtener menores deformaciones y soldar en todas las posiciones. Las principales desventajas de las fuentes de energía de corriente pulsada son el incremento de coste que suponen con respecto a las demás fuentes, y que solo se pueden utilizar mezclas de gases con bajo contenido en CO₂ (18% máximo). La dificultad para establecer los parámetros de soldeo adecuados debido al gran número de variables a introducir suponía un inconveniente hasta la aparición de las fuentes de tipo sinérgico. Con ellas, el soldador solo tiene que ajustar la velocidad de avance del alambre y los datos sobre el material de aportación, el gas de protección y el diámetro del electrodo. A partir de estos datos la fuente de corriente ajusta automáticamente los parámetros idóneos siguiendo la curva sinérgica que tiene programada.

Los cuatro modos de transferencia que se acaban de describir, se representan en la Figura 9:

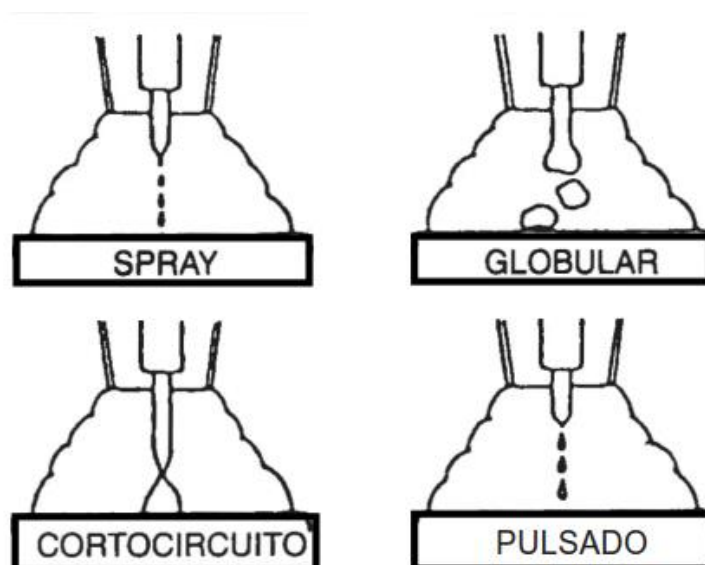


Figura 9: Modos de transferencia MIG/MAG

Sin embargo, el modo de transferencia de metal en CMT no se puede clasificar en ninguno de los convencionales de la soldadura GMAW. En este caso, el modo de transferencia será simplemente "CMT". La transferencia en CMT es similar a una transferencia en cortocircuito, pero presenta sus propias particularidades.

CMT es una tecnología relativamente nueva que nace para satisfacer las exigencias cada vez más estrictas de estabilidad del proceso, reproducibilidad y rentabilidad. Para lograrlo, desacopla parcialmente el arco eléctrico de la velocidad de alimentación de hilo. Aunque la transferencia del hilo de aporte se produce en cortocircuito, controlando simultáneamente los ciclos del arco eléctrico y la velocidad de alimentación de hilo, la energía es suficiente para fundir a la vez el material base y una pequeña gota del material de aporte. El resultado es un material transferido en el momento del cortocircuito, con una baja energía de arco y por lo tanto, un bajo aporte térmico a la soldadura (17) (18).

El modo básico de operación del CMT se caracteriza por una fase de formación del arco durante la cual se forma una gota de material fundido en la punta del hilo de aporte (el electrodo) y la posterior creación de un baño de soldadura. Tras un tiempo determinado el hilo (electrodo) se alimenta para hacer contacto con el baño de soldadura o el material base, produciéndose un cortocircuito. Durante esta fase se inicia la transferencia de metal y la corriente del arco se reduce considerablemente. Después de un corto intervalo de tiempo, el electrodo se retrae mecánicamente. Esta retracción ayuda a que el glóbulo fundido se deposite sobre el baño de soldadura. El arco se reinicia y el ciclo se repite con alta frecuencia, consiguiendo depositar hasta 130 gotas de metal por segundo. Este proceso se representa en la

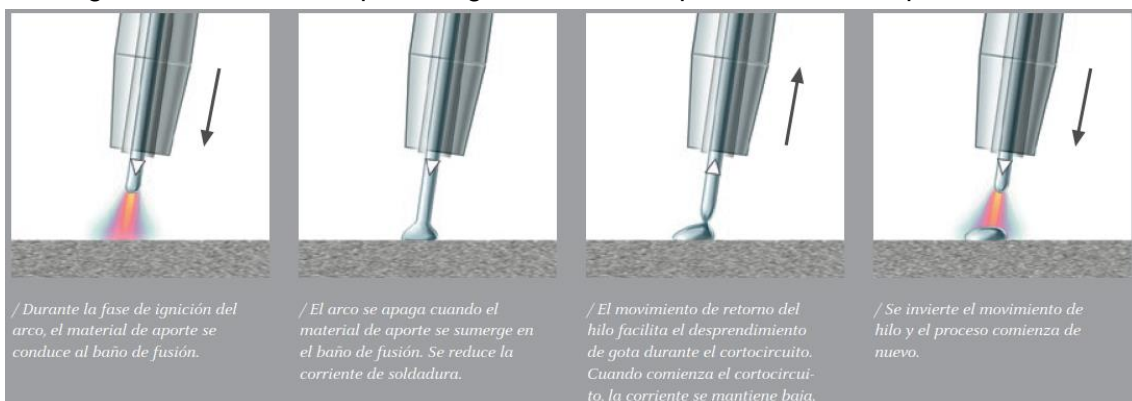


Figura 10.

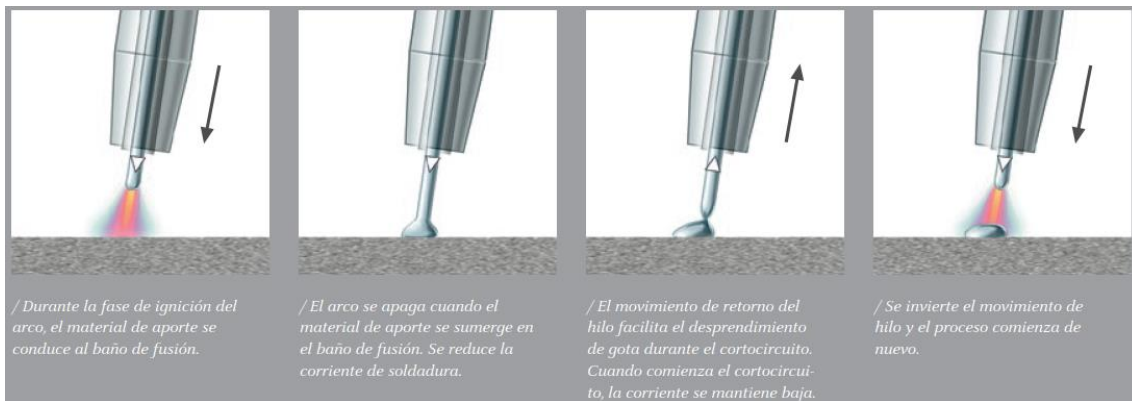


Figura 10: Transferencia de metal en un ciclo CMT (Fronius ®)

Gracias a la precisa retracción del hilo se consigue una transferencia de material limpia y libre de salpicaduras (o con muy pocas). Para conseguir que la alimentación se produzca de esta forma “discontinua”, se coloca un buffer de alambre en la manguera de alimentación que convierte el movimiento de alambre de alta frecuencia superpuesta en un transporte de hilo lineal.

Este proceso es único, no solo porque la retracción del hilo es la que gobierna la transferencia del metal, sino también porque la transferencia de material tiene lugar a baja intensidad y baja tensión, lo que abre un enorme nicho de aplicación en el soldeo de chapas de pequeño espesor (baja distorsión) (17) (18). En la Figura 11 se representa un ciclo de trabajo típico en soldeo CMT.

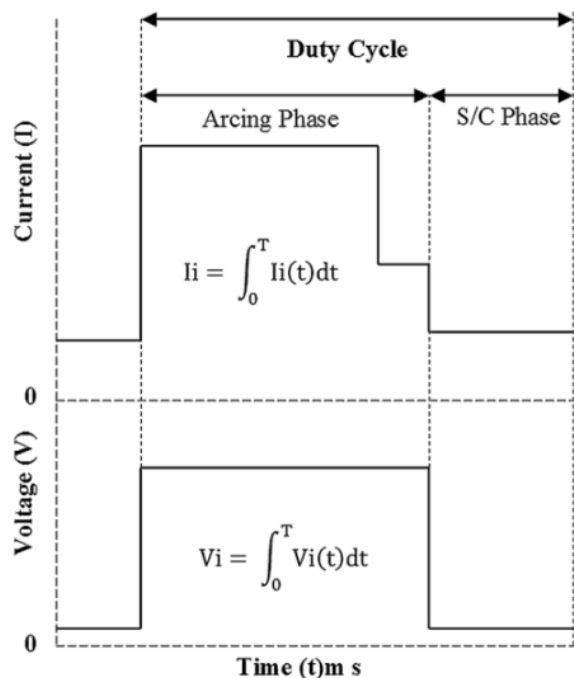


Figura 11: Valores instantáneos de tensión e intensidad en un ciclo CMT

Cuando se quiere obtener una mayor tasa de depósito de material, o se desea incrementar la penetración para soldar secciones mayores, se puede emplear CMT pulsado (denominado por Fronius® como *CMT Pulse*).

El CMT pulsado combina el uso de corriente pulsada del MIG/MAG convencional, con la retracción del hilo del CMT. El resultado es una transferencia de metal más controlada y un aporte de metal más controlado que en MIG/MAG y una penetración mayor que con CMT sin pulsar (22). En la Figura 12 se muestra la combinación de ciclos CMT y ciclos pulsados que dan lugar a este innovador método de transferencia de metal.

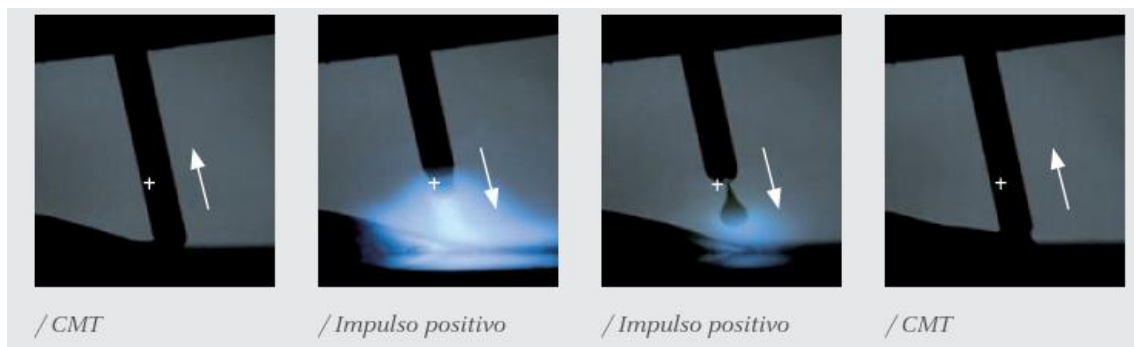


Figura 12: Combinación de ciclos CMT y ciclos pulsado (CMT Pulse, by FRONIUS®) (23)

Para cuando se desea disminuir más incluso el aporte térmico a la soldadura, se puede emplear otra modificación del CMT, conocida como *CMT Advanced* (denominación de la marca Fronius®). En el CMT Advanced la polaridad de la corriente de soldadura está integrada en la regulación del proceso. El cambio de polaridad se produce en la fase de cortocircuito, garantizando la estabilidad del proceso CMT. Este proceso se esquematiza en la Figura 13.

Esta mejora del CMT permite absorber mejor las diferencias de altura en el arco y se pueden llegar a obtener tasas de deposición hasta un 60 % superiores (23).

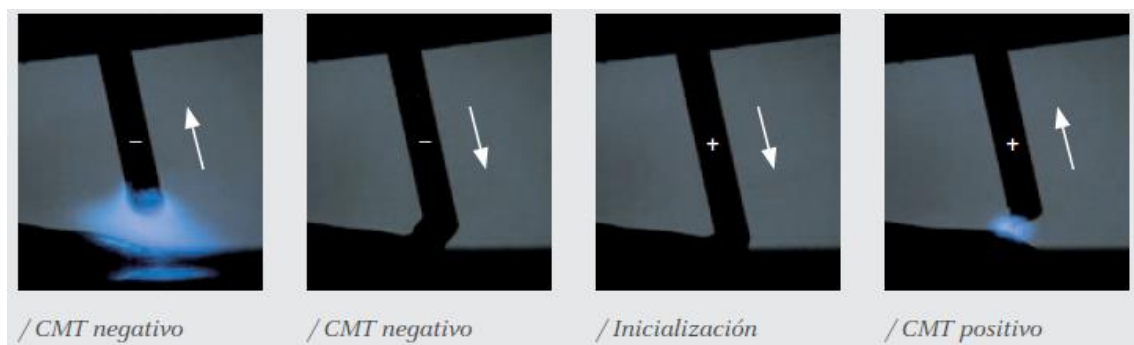


Figura 13: Combinación de CMT negativo y CMT positivo (CMT Advanced, by FRONIUS®) (23)

La combinación de CMT Pulse y CMT Advanced da lugar a CMT Advanced Pulse. En esta tecnología los ciclos CMT de polaridad negativa y los ciclos de pulsado de polaridad positiva se combinan para conseguir mayor precisión y dominio del arco.

Esta tecnología de reciente invención puede representarse de forma esquemática como se ve en la Figura 14.

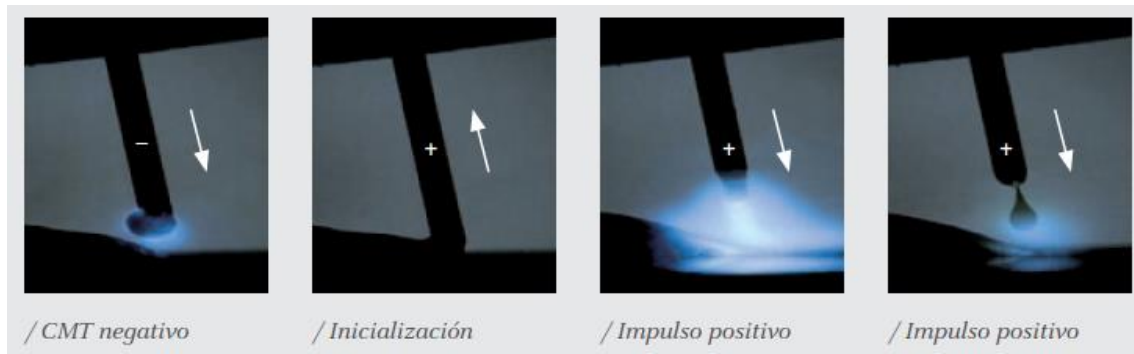


Figura 14: Combinación CMT negativo y ciclos pulsado (CMT Advanced Pulse, by FRONIUS®)

Cualquiera de los procesos CMT, al reducir el aporte térmico con respecto al GMAW convencional, reduce la dilución. Este hecho es fundamental en la soldadura de recargue, ya que permite ahorrar material o, visto de otro modo, permite que el recargue sea más efectivo al ser menor la contaminación por metal base de la superficie recargada (23). Este es el principal motivo por el que hemos utilizado CMT en este trabajo, aunque el proceso presenta otras ventajas interesantes en nuestro caso:

- **Menor formación de proyecciones:** contribuye a obtener un cordón libre de defectos, aumentando la calidad del recargue
- **Menor deformación del material:** la disminución del aporte térmico también repercute en la deformación que sufre el material durante la soldadura, reduciéndola. Gracias a esto, los tubos recargados se curvarán menos que si se soldasen con GMAW convencional o pulsado.
- **Mayor velocidad de soldadura:** El depósito de material es más efectivo, por lo que se puede soldar a velocidades más altas, sin perder el buen aspecto del cordón.

En la Figura 15 se grafican una serie de curvas que nos permiten comparar grosso modo el aporte térmico de las distintos modos de transferencia metálica.

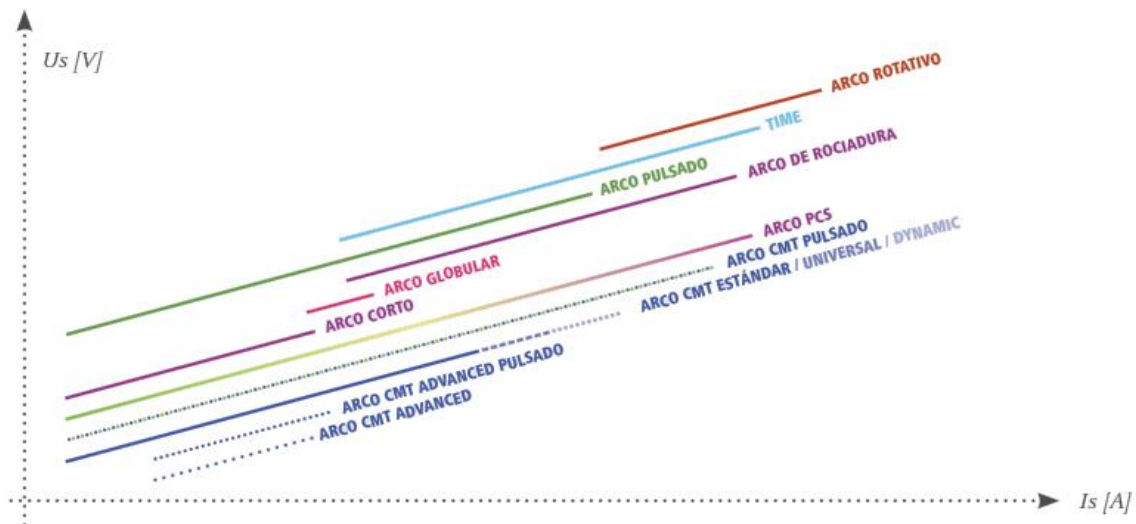


Figura 15: Comparación de las tecnologías de arco (23)

Suponiendo igual rendimiento de todas las técnicas, el aporte térmico (*heat input*) es menor con CMT que con cualquier otra técnica GMAW, independientemente del modo de transferencia empleado. Si se tiene en cuenta el rendimiento, la diferencia a favor del CMT es aún mayor (las técnicas CMT tienen rendimientos mayores que las GMAW convencionales).

2.3.2. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo no consumible (GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding* o TIG: *Tungsten Inert Gas*) es un proceso de soldeo por arco que utiliza como fuente de energía un arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible (de tungsteno o alguna aleación del mismo) y la pieza a soldar, mientras que el baño de fusión queda protegido por un gas inerte (generalmente en Europa se emplea argón) que se inyecta hacia la tobera y que reemplaza el aire atmosférico. Puede soldarse con o sin aporte de material. Cuando se realiza soldeo manual, la aportación se aplica mediante varillas. Cuando se automatiza o robotiza el proceso, el material de aportación puede alimentarse desde una bobina que se va devanando. El metal se irá alimentando de forma automática a la velocidad solicitada por el operador (19).

La Figura 16 muestra de forma simplificada los elementos presentes en la soldadura por arco con electrodo no consumible.

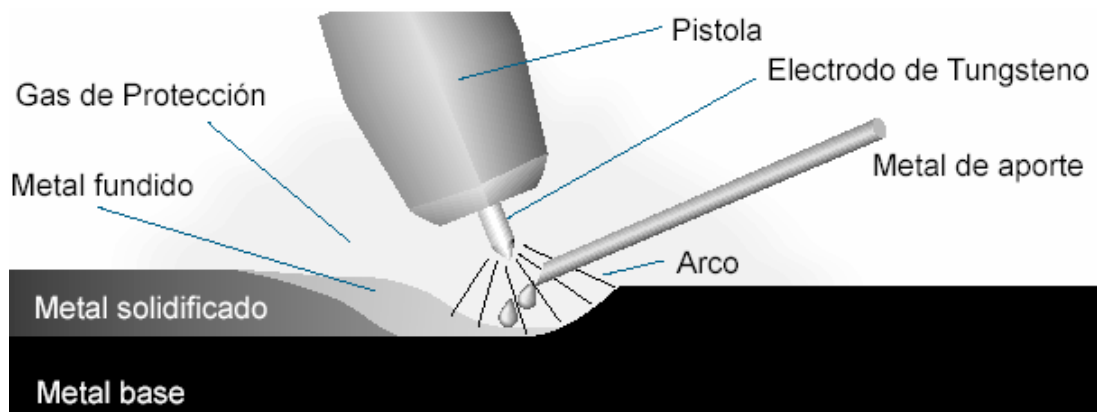


Figura 16: Esquema del proceso TIG/GTAW con aporte de metal

Este proceso tiene gran aplicación en la soldadura de secciones finas, sobre todo en aceros inoxidable y aleaciones no férricas, principalmente de aluminio. Entre las principales ventajas del soldeo GTAW se puede destacar que no se producen proyecciones (debido a que no hay transporte de metal en el arco), que no se produce escoria (el material de aporte es un hilo o varilla maciza, sin fundentes) y que puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones (el baño de fusión es pequeño y manejable).

Estas ventajas permiten que la soldadura GTAW se caracterice por su alta calidad y ausencia de defectos. Su alto grado de control sobre la soldadura le permite competir con otras técnicas como el GMAW, aunque con GTAW se obtienen, por lo general, cordones más resistentes y de mayor calidad (15; 19).

Entre las desventajas del TIG se encuentra su baja productividad, si se compara con otras técnicas como GMAW y su relativamente alto aporte térmico a la soldadura. El problema de la baja productividad puede paliarse mediante el empleo de soldeo TIG con aporte de hilo caliente, mejora que proporciona la posibilidad de incrementar la tasa de deposición de metal. El inconveniente del excesivo aporte térmico para algunas aplicaciones (soldadura en chapas finas, recargues,...) puede minimizarse empleando corriente pulsada.

El tipo de corriente empleada (constante o pulsada) en la soldadura GTAW, tiene efectos significativos en los resultados de la soldadura. Cuando se emplea GTAW pulsado, la magnitud de la corriente va alternando entre el valor pico, I_p , (máximo) y el valor base, I_b , (mínimo), variando periódicamente a una cierta frecuencia- véase la Figura 17-. En cada pulso, el pico de intensidad calienta y funde la pieza que se está soldando y forma el baño de fusión, mientras que cuando la intensidad está en el mínimo (base), el arco se mantiene y se aporta menos calor a la soldadura. Como resultado, el empleo de GTAW pulsado combina las favorables características de arco de la alta intensidad, con el bajo aporte térmico de la intensidad baja, lo que deriva en multitud de aplicaciones industriales para obtener soldaduras de alta calidad (6).

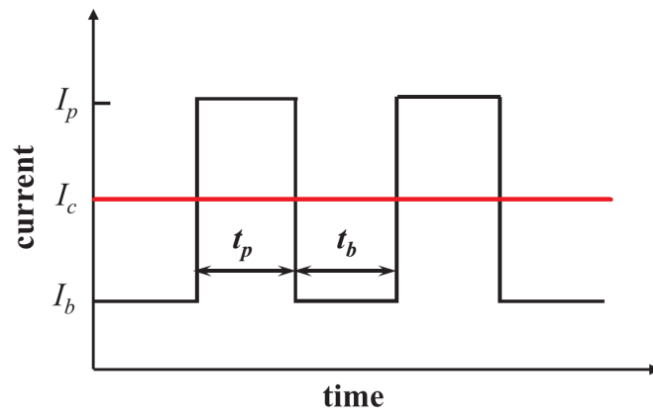


Figura 17: Representación esquemática de la intensidad GTAW con corriente constante (I_c) y con corriente pulsada (I_p/I_b)

El cordón de soldadura que se forma en la pieza tras solidificar el baño de fusión presentará, siempre que se use corriente pulsada, las marcas onduladas que muestran el avance del arco en cada pulso (“las aguas de la soldadura”).

Normalmente, cuando hablamos de GTAW o TIG con aportación de metal, nos referimos a la soldadura de arco por electrodo no consumible, con aporte de metal en frío (la opción más lógica cuando se suelda manualmente). Sin embargo, cuando hablamos de soldadura automatizada, las posibilidades que la técnica ofrece son mayores, pudiendo aportarse material “en caliente”. A esta tecnología se le conoce como Hot Wire-GTAW, es decir, Soldadura de Arco con electrodo de Tungsteno, con aporte de hilo caliente.

La tecnología Hot Wire-GTAW fue inventada en 1964 por A.F. Manz y desarrollada posteriormente por Linde. Es muy común en la soldadura GTAW, añadir un material de aporte en forma de hilo, sobre todo cuando los espesores a soldar son gruesos. Con el GTAW convencional, este hilo se añade al baño en estado “frío”, es decir, a temperatura ambiente. La energía del arco tiene entonces que encargarse de fundir, no solo el material base, sino también este material de aportación, lo que reduce la eficiencia del proceso.

En GTAW con aporte de hilo caliente, el hilo se calienta por efecto Joule hasta un punto cercano al de fusión y se añade en este estado al baño de fusión, bajo el electrodo. Esto previene que el metal de aporte enfríe el baño y mejora la fluidez del mismo, dando lugar a cordones de aspecto más liso. Como el hilo se aporta casi fundido, prácticamente toda la energía del arco está disponible para penetrar en el metal base o para generar el baño de soldadura. Por este motivo, con Hot Wire-GTAW se consiguen velocidades de soldeo 2 o 3 veces mayores que cuando el hilo se aporta frío. Esta tecnología permite incrementar la tasa de depósito de material, y además, la calidad del cordón obtenido suele ser mayor que con Cold Wire-GTAW (24).

Se emplean en esta tecnología dos fuentes de alimentación separadas: la antorcha de GTAW está conectada a la fuente de energía como es habitual, lo que le

permite establecer el arco que funde el metal del área bajo el electrodo, mientras que el hilo está conectado a otra fuente de alimentación diferente. La fuente que alimenta el hilo le suministra una corriente a través de un circuito a la punta de contacto por donde el hilo se alimenta, cuando el alambre toca el baño de soldadura. El calentamiento por resistencia del cable lo proporciona la caída de potencia en toda la extensión del alambre siguiendo la relación I^2R . La resistencia está determinada por la longitud del hilo que sobresalga (stick-out) y por el diámetro del mismo, siendo menor cuanto mayor sea este diámetro (24).

A continuación en la Figura 18 se esquematiza el funcionamiento del Hot Wire GTAW.

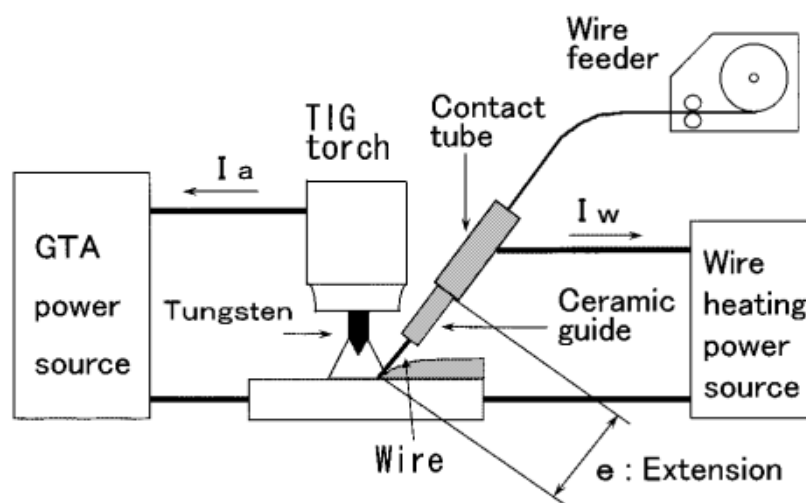


Figura 18: Principio básico de funcionamiento del Hot Wire GTAW (34)

Uno de los mayores inconvenientes que presenta el HW-GTAW es la dificultad para su uso en modo manual. En nuestro caso concreto, la facilidad para automatizar el proceso es una ventaja, porque nos permite minimizar el factor humano, minimizando la intervención del operador. Sin embargo, para el uso en pequeñas empresas, no resulta económicamente viable afrontar la inversión que supone la compra de un equipo de soldeo automatizado o de soldeo robotizado.

Como ventaja que presenta el soldeo mediante Hot Wire-GTAW, en nuestro caso, está la posibilidad de emplear el sistema de control de voltaje conocido como AVC (*Arc Voltage Control*). Este sistema contribuye a la obtención de cordones de soldadura de buena calidad mediante la aproximación o el alejamiento del electrodo a la pieza para mantener constante esta distancia, lo que a su vez mantiene estables los parámetros de soldeo. Más adelante se explicará en detalle el funcionamiento de este sistema, cuando se describan los equipos empleados en el presente trabajo.

En la Figura 19 se muestra un robot ejecutando una soldadura de recargue mediante GTAW con aporte de hilo caliente.

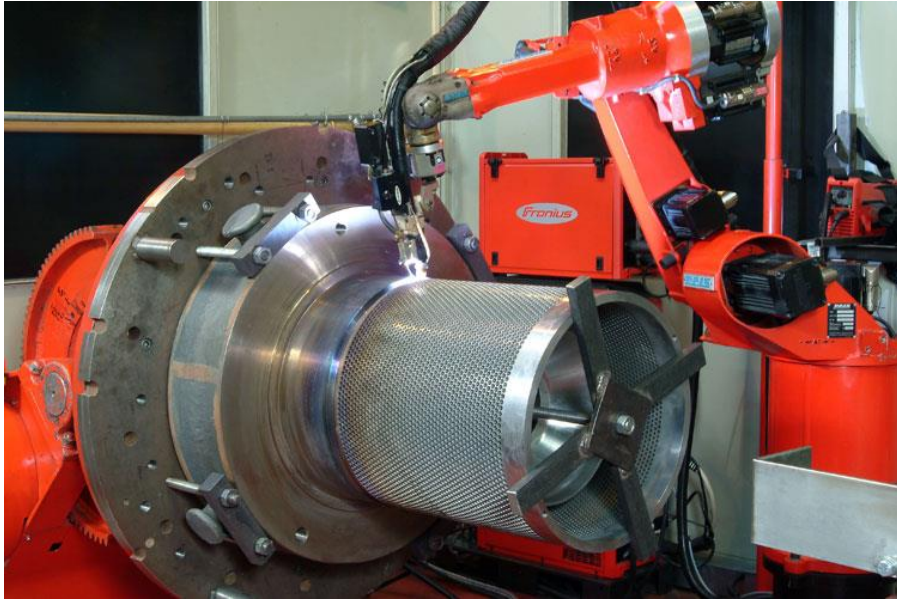


Figura 19: Robot realizando un recargue mediante Hot Wire-GTAW

3. Materiales

Como este trabajo consiste en efectuar recargues de materiales resistente a la corrosión sobre tubos rígidos de un material que no está especialmente diseñado para ello, se pueden distinguir dos grupos de materiales: materiales base y materiales de aporte.

3.1. Materiales base

Cuando hablamos de material base nos referimos al material del que están hechos los tubos que se van a recargar. En la Figura 20 se pueden ver unos tubos rígidos similares a los que se han empleado en este trabajo.



Figura 20: Tubos del mismo tipo que los empleados en este trabajo

3.1.1. Acero P22/T22

El grado de acero P22 (P de “*pipe*”-según norma ASTM A335) o T22 (T de “*tube*”-según norma ASTM A213) -ambas denominaciones se refieren al mismo material (equivale aproximadamente al acero 10CrMo9-10 según EN 10216-2:2013), pero la norma ASTM hace distinción entre conductos (*pipes*) y tubos (*tubes*), de ahí las diferentes denominaciones, que en este trabajo se utilizarán indistintamente- es un acero ferrítico diseñado para fabricar tuberías o conductos “*sin costura*” o “*sin soldadura*” que operan a altas temperaturas de servicio. Los tubos fabricados con este material deben poder doblarse y embridarse. Además, deben ser soldables mediante soldadura por fusión. A los tubos incluidos en estas normas se les conoce como tubos de acero cromo-molibdeno, por ser estos dos sus aleantes principales (sus proporciones varían, dando lugar a distintos aceros Cr-Mo), los que más condicionan sus propiedades.

El molibdeno aporta a esta aleación un incremento de la resistencia a tracción, del límite elástico, de la resistencia al desgaste y también aumenta su templabilidad. Por otra parte, restringe el crecimiento de grano y ayuda a que el acero no se fragilice por acción del cromo. El molibdeno es muy eficaz aumentando la resistencia a la fluencia a altas temperaturas. Además, ayuda a aumentar la resistencia a corrosión y a inhibir las picaduras (25; 26; 27).

El cromo, en proporciones menores del 12%, no aporta carácter inoxidable al acero. Sin embargo, sí aumenta la resistencia a la oxidación a altas temperaturas (25; 26; 27).

Estos tubos cromo-molibdeno se emplean en la industria energética, en refinerías y en plantas petroquímicas, donde los fluidos transportados se encuentran a altas temperaturas y altas presiones.

En la Tabla 1 se refleja la composición química del acero P22/T22:

C	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Si (máx.)	Cr	Mo
0,05-0,15 (%)	0,30-0,60 (%)	0,025(%)	0,025(%)	0,50(%)	1,90-2,60(%)	0,87-1,13(%)

Tabla 1: Composición química acero P22 (en % en peso) (26)

Los tubos fabricados bajo los estándares de esta norma, además de cumplir los valores de composición fijados, deben superar una serie de ensayos (ultrasonidos, corrientes inducidas,...) que garanticen el cumplimiento de las condiciones de suministro exigidas.

De este acero se han empleado tubos cilíndricos de dos espesores distintos (5,6 mm y 8,7 mm) ambos con diámetro exterior de 60,3 mm en estado de recocido.

3.1.2. Acero 16Mo3 (según norma UNE-EN 10216-2) (28)

Se trata de un acero aleado para temperaturas de servicio elevadas (alrededor de 500 °C) porque posee buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas.

Es un acero especialmente recomendado para ser empleado a altas temperaturas debido a su resistencia a la fluencia. Además, como es soldable, puede utilizarse para construir equipos en centrales eléctricas, conductos de sistemas de escape, partes calientes de maquinaria o plantas de incineración.

Su composición química (% en peso) se recoge en la Tabla 2:

C	Si (máx.)	Mn	P (máx.)	S (máx.)	N (máx.)	Cr (máx.)	Cu (máx.)	Mo	Ni (máx.)
0,12 – 0,20 (%)	0,35 (%)	0,40 - 0,90 (%)	0,035 (%)	0,035 (%)	0,012 (%)	0,30 (%)	0,30 (%)	0,25-0,36 (%)	0,30 (%)

Tabla 2: Composición química acero 16Mo3 (29)

La Norma obliga a que los aceros estén completamente calmados, por lo que se añade aluminio a la colada. El porcentaje de aluminio que contiene la aleación es variable y debe determinarse para cada colada (28).

Del mismo modo que sucedía con el acero P22, la Norma obliga al fabricante a garantizar la calidad de suministro, realizando ensayos a los tubos para descartar defectos internos y externos.

De este material se emplearon tubos cilíndricos “sin costura” de diámetro exterior 60,3 mm y espesor de pared 5,6 mm en estado de recocido.

3.2. Materiales de aporte

Como materiales de aporte se han empleado bobinas de hilo macizo de distintas aleaciones metálicas, como las que se muestran en la Figura 21.



Figura 21: Bobinas de hilo para soldadura GMAW/GTAW

3.2.1. Hilo de acero inoxidable ER 347Si (AWS A5.9)

El hilo macizo ER 347Si (se designa como G 19 9 NbSi en la norma ISO 14343-A) es un alambre de acero inoxidable austenítico comúnmente empleado para la soldadura de aceros inoxidables CrNi estabilizados con Ti ó Nb. Su alto contenido en silicio favorece la mojabilidad.

Cuando se trata de soldadura de recargue, la selección del hilo de aporte a emplear no se realiza según los mismos criterios que cuando se realiza una unión de piezas, sino según las propiedades que se desea obtener en el recubrimiento.

En nuestro caso, nos interesa generar un recubrimiento de este acero por sus buenas propiedades frente a la corrosión generalizada, frente a la corrosión intergranular (sustituye al AISI 304 en aplicaciones en las que puede aparecer corrosión intergranular) frente a la corrosión por picaduras y frente a la oxidación a altas temperaturas (30). Naturalmente, tras haber efectuado el recargue será necesario realizar ensayos a los tubos (macrografías, doblados laterales,...) con el fin de comprobar la compatibilidad de los materiales y la soldabilidad entre ellos.

En la fabricación de recalentadores y sobrecalentadores de calderas se emplea 347H, sin embargo, nosotros hemos empleado esta aleación, 347Si, porque el rango de temperaturas que el material soporta es suficiente en nuestro caso y porque el material estaba disponible en el stock de consumibles del departamento.

Hemos empleado concretamente el hilo LNM 347Si de la marca LINCOLN ELECTRIC®, de 1,2mm de diámetro, cuya composición química típica (% en peso de material depositado) se recoge en la Tabla 3:

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb
0,05(%)	1,4(%)	0,7(%)	19,2(%)	9,9(%)	0,1(%)	0,6(%)

Tabla 3: Composición química típica de metal depositado acero LNM 347Si (31)

Es un hilo apto para soldadura MIG/MAG y TIG. Los gases de protección recomendados son el argón y mezclas Ar+O₂ ó Ar+CO₂.

3.2.2. Hilo de acero inoxidable 309LSi (AWS A5.9)

Se trata de un hilo macizo inoxidable Cr-Ni para la soldadura de acero inoxidable con acero al carbono. Se designa como G 23 12 LSi en la norma ISO 14343-A. De igual forma que el hilo 347Si, este hilo está enriquecido en silicio para aumentar el mojado.

Es un hilo comúnmente empleado en soldaduras disimilares entre acero al carbono e inoxidable y también se emplea en recargues intermedios (cuando se desea depositar otro acero inoxidable menos compatible con un acero de base) por lo que la compatibilidad entre el material base y el hilo de aporte probablemente sea muy alta.

Está recomendado para su uso en hornos y calderería, intercambiadores de calor e instalaciones de tratamiento de sales fundidas por su buena resistencia a la corrosión a las altas temperaturas. Estos son los motivos que nos han hecho escogerlo como material de aporte.

Hemos empleado concretamente el hilo LNM 309LSi de la marca LINCOLN ELECTRIC®, de diámetro 1,2mm, cuya composición química típica (% en peso de material depositado) aparece reflejada en la Tabla 4:

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,02(%)	1,8(%)	0,8(%)	23,3(%)	13,8(%)	0,14(%)

Tabla 4: Composición química típica de metal depositado acero LNM 309LSi (31)

Con este hilo se emplean como gases de protección el argón y mezclas de este con CO₂ o con O₂.

3.2.3. Hilo de acero inoxidable ER 307(AWS A5.9)

Es un hilo sólido de acero inoxidable apropiado para soldaduras disimilares y para soldar aceros austeníticos y ferríticos con difícil soldabilidad. Se denomina como G 18 8 Mn en la norma EN ISO 14343-A.

De igual modo que el 309LSi, se usa a menudo como material de recargues intermedio, por lo que no esperamos que aparezcan problemas de compatibilidad entre el material base y el recargue (30).

Debido al alto contenido en Mn, las soldaduras ejecutadas con este material presentan muy bajo riesgo de fisuración y agrietamiento en caliente porque se obtienen cordones con alta ductilidad.

El hilo empleado ha sido concretamente el OERLIKON INERTFIL ER307 de diámetro 1,2mm. La composición química típica (% en peso) del material depositado mediante GMAW se recoge en la Tabla 5:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0,07(%)	0,8(%)	6(%)	0,01(%)	0,009(%)	18(%)	8(%)	0,05(%)

Tabla 5: Composición química típica mediante GMAW con Ar+2%O₂ como gas de protección (32)

Es un hilo recomendado para soldadura GMAW pero también es apto para GTAW. Se emplean comúnmente mezclas de Ar+O₂ o Ar+CO₂.

3.2.4. Hilo de aleación CuSi3Mn1 (EN 14640)

Hilo continuo sólido de cobre para soldadura GMAW de aleaciones de cobre, y para soldeo fuerte de aleaciones de acero galvanizado. También se emplea en soldadura GTAW. Su denominación hace referencia a que contiene aproximadamente un 3% de silicio y un 1% de manganeso. La norma AWS 5.7 lo denomina ER CuSi-A.

Este material presenta buenas propiedades mecánicas a alta temperatura, y buena resistencia a la corrosión en diferentes ambientes químicos. Por este motivo se emplea en ambientes marinos y en la industria química.

Al no ser un hilo destinado a la soldadura de aceros será fundamental realizar ensayos a los tubos recargados para comprobar la calidad de la unión.

Se ha empleado concretamente un hilo PRAXAIR® M-Simax SG CuSi3 de diámetro 1,2mm. Este hilo presenta una composición química aproximada (% en peso) que se detalla en la Tabla 6.

Si	Mn	Cu	Sn	Zn	Fe
3,4(%)	1,1(%)	>94,4(%)	<0,2(%)	<0,2(%)	<0,3(%)

Tabla 6: Composición química aproximada del hilo (33)

Para la soldadura con este metal de aporte se emplea normalmente Ar 100% como gas de protección.

3.2.5. Aleación SG CuAl8 (DIN 1733)

Hilo sólido para soldadura y recargue de bronce-aluminio y aleaciones de cobre. También para recargue de acero, acero fundido y aleaciones de níquel. Se denomina como ER Cu Al-A1 por la AWS 5.7 y como S Cu 6100 por la EN ISO 14640.

Este material posee elevada resistencia a la corrosión en medio marino (se emplea en distintos componentes de embarcaciones) y a diferentes tipos de ácidos, dependiendo de la concentración y temperatura. También presenta una excelente resistencia a la erosión. Está indicado para la fabricación de intercambiadores de calor.

Aunque es un hilo, al igual que el anterior, cuyo componente mayoritario es el cobre, está destinado a recargues de distintos materiales, por lo que se esperan mejores resultados.

Hemos empleado concretamente un hilo PRAXAIR® ARGON M-ALBZ 8 CuAl8 de 1,0mm de diámetro. La composición química aproximada del hilo (% en peso) se recoge en la Tabla 7:

Si	Mn	Fe	Cu	Ni	ZN	Pb	Al	Otros
<0,20(%)	<1,00(%)	<0,50(%)	resto	<0,80(%)	<0,20(%)	<0,02(%)	7,50-9,50(%)	<0,40(%)

Tabla 7: composición química del hilo (% en peso) (30)

Es un hilo diseñado para soldadura GMAW, aunque se puede emplear también en GTAW. Se suele emplear como gas de protección Ar o mezclas de Ar/He.

4. Método experimental

4.1. Equipos

Para la ejecución de trabajos de soldadura automatizada, como los que se han realizado en este trabajo, es preciso disponer de un automatismo capaz de soldar bajo las órdenes de un operador. En nuestro caso, se ha empleado una estación multi-soldadura de la marca FRONIUS® que lleva acopladas las fuentes de alimentación y los demás equipos auxiliares necesarios para llevar a cabo este trabajo. Los equipos empleados se describen en los epígrafes siguientes:

4.1.1. Estación multi-soldadura de FRONIUS®

La estación multi-soldadura FMW (*Fronius Multi Welding*) es un sistema que se utiliza para realizar múltiples uniones mediante cordones de soldadura y que está especialmente diseñado para ejecutar recargues por soldadura mediante MIG/MAG, TIG, plasma y CMT. El sistema consiste en una serie de componentes que se montan como se muestra en el esquema de la Figura 22 para trabajar como un conjunto:

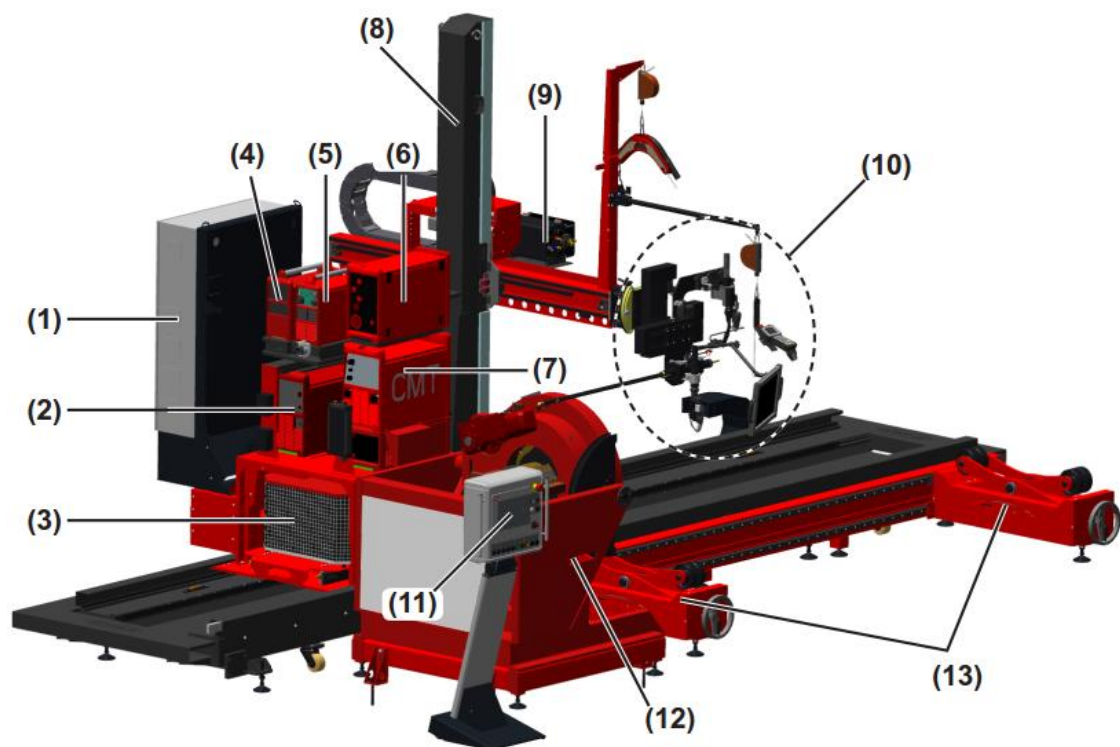


Figura 22: Descripción gráfica de la celda FMW

1. Armario de distribución FMW
2. Fuente de alimentación TIG MW5000
3. Unidad de refrigeración Chilly15
4. Fuente de alimentación TIG TT2200
5. Fuente de alimentación plasma PM 10
6. Alimentador de hilo VR 7000

7. Fuente de alimentación CMT Advanced 4000 con unidad de refrigeración FK4000
8. Columna FCB y brazo con cabezal de soldadura montado sobre él
9. Alimentador de hilo KD 1500-D11
10. Cabezal de soldadura con diferentes antorchas
11. Controlador del sistema HMI-T10
12. Mesa giratoria e inclinable FRP 1500
13. Unidades de soporte FRS 1000

Por tratarse la celda FMW de un automatismo, no ofrece todas las posibilidades que sí ofrecería, un robot (programación más compleja). Sin embargo, dispone de 5 ejes de desplazamiento lineal (3 destinados a desplazamientos grandes y 2 de ajuste fino), cuenta con una mesa inclinable, y permite soldar empleando el giro de la mesa.

Los ejes de la estación FMW se distribuyen espacialmente como se muestra en la Figura 23.

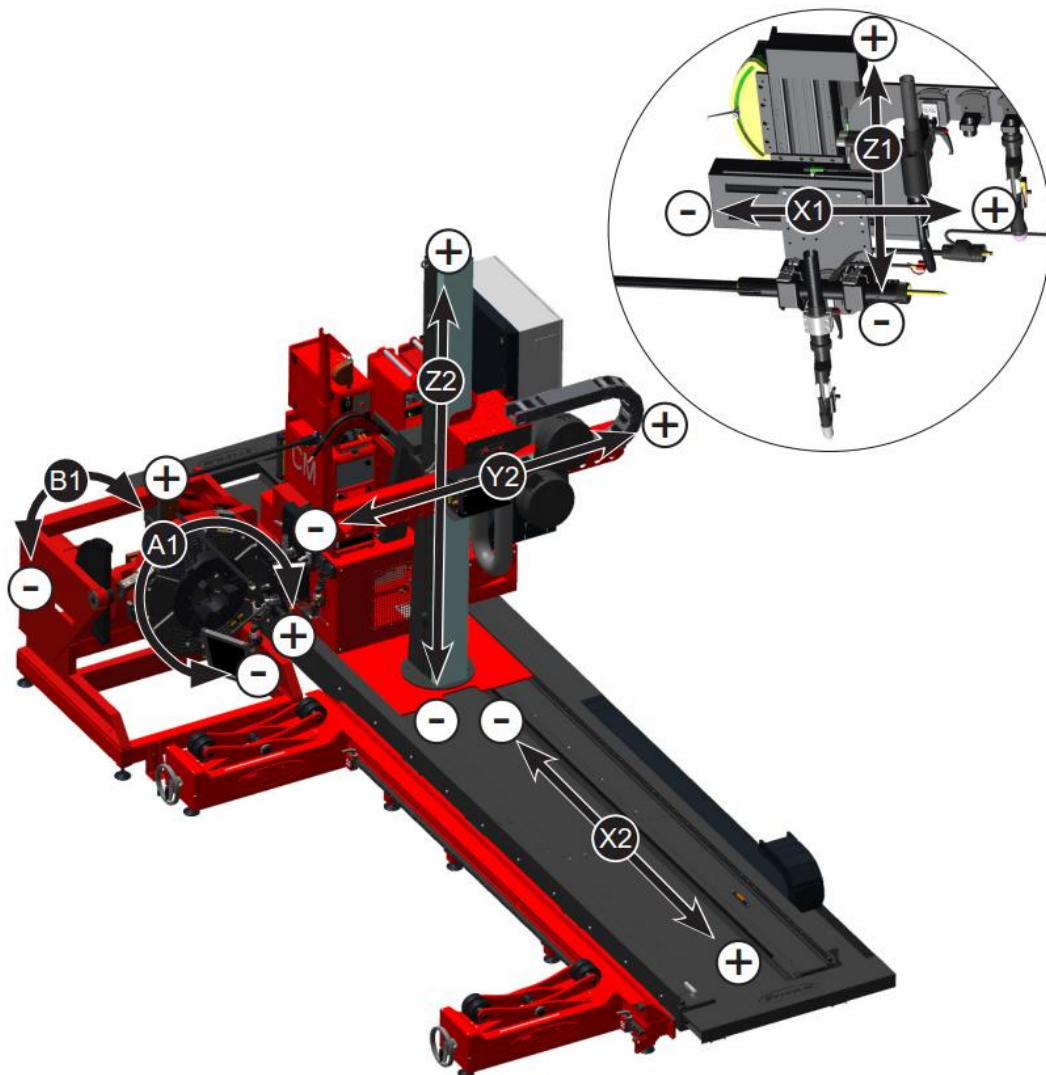


Figura 23: Visión de conjunto de los ejes de la estación FMW

A1: eje de giro de la mesa sobre su eje (360°)

B1: eje de inclinación de la mesa (135°, desde la posición horizontal)

X1: eje de desplazamiento horizontal fino

Z1: eje de desplazamiento vertical fino

X2: eje de desplazamiento horizontal (sentido del *track*) de largo recorrido

Y2: eje de desplazamiento horizontal (perpendicular al track) de largo recorrido

Z2: eje de desplazamiento vertical (columna) de largo recorrido

El eje de giro A1 se emplea para soldar o recargar tubos o conductos cilíndricos o cónicos, manteniendo fija la antorcha de soldadura. Según se oriente la pieza con el eje B1, y la antorcha de soldadura, la posición de soldeo será diferente. En este trabajo se ha soldado en 2 posiciones que se esquematizarán más adelante: PA (sobremesa) y PC (cornisa).

Los ejes X1 y Z1 no se suelen emplear para soldar porque tienen un corto recorrido ($\approx 120\text{mm}$), sin embargo, cuando la precisión que el trabajo requiere lo recomienda, pueden seleccionarse como ejes de soldeo. Los ejes X1 y Z1 pueden intercambiarse (el sistema puede girarse 90°, quedando X1 en vertical y Z1 en horizontal) para trabajar con la antorcha en una posición perpendicular a la que presenta por defecto. En este trabajo se han empleado X1 o Z1 como ejes de soldeo para garantizar un desplazamiento preciso entre cordones y evitar huecos o sobre espesores entre cordones al recargar.

Los ejes finos, X1 y Z1 se suelen emplear para oscilar la antorcha durante la soldadura o para operar con los sistemas AVC ó ACC de control de voltaje (para TIG y plasma) o control de corriente (para MIG/MAG), debido a la citada precisión.

Normalmente se emplean para soldar los ejes X2, Y2 y Z2. El eje X2 (carro) permite un recorrido en horizontal de 4500mm. El eje Y2 (brazo) permite un desplazamiento en horizontal (perpendicular al carro) de 1500mm. El eje Z2 (columna) tiene un recorrido en vertical de 2000mm.

En la Figura 24 se representan las posiciones de soldeo (los ángulos representan la posición de la antorcha con respecto a la vertical) más habituales según la norma UNE-EN ISO 6947:

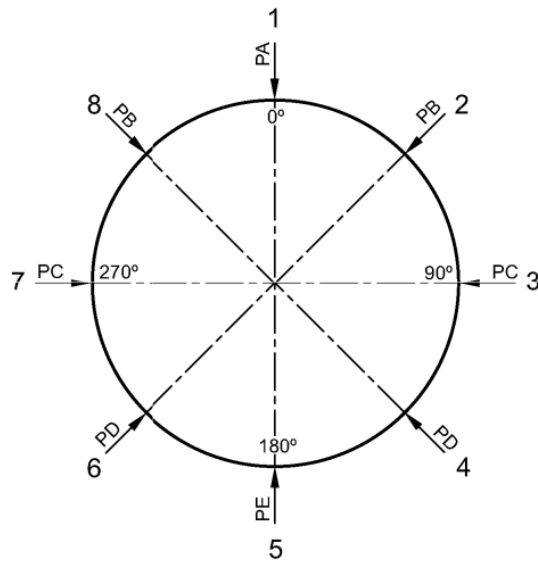


Figura 24: Posiciones de soldeo según UNE-EN ISO 6947

Se han empleado las posiciones PA y PC:

- PA: posición plana, con la antorcha a 0° con la vertical
- PC: posición horizontal, con la antorcha a 90° con la vertical

Estas posiciones, adaptadas al soldeo de tubos se pueden ver en la figura

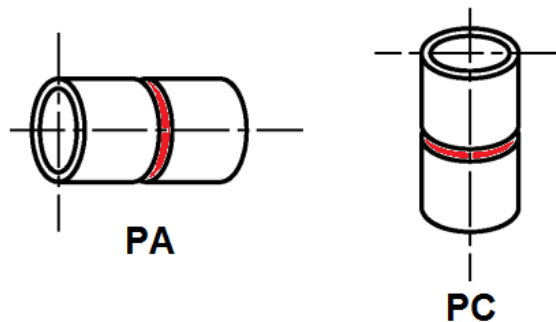


Figura 25: Posiciones empleadas en este trabajo para el soldeo de tubos (34)

En ambos casos, la antorcha permanece estática (en perpendicular a la zona a soldar) y es el tubo el que gira a una determinada velocidad angular (eje de giro de la mesa, A1), que se traduce en la velocidad de soldeo (lineal).

4.1.2. Equipamiento CMT

Para la soldadura CMT (y para MIG/MAG en general), el sistema FMW está dotado de una **fuentes de alimentación CMT 4000 Advanced** de la marca FRONIUS®, capaz de proporcionar una intensidad durante el soldeo de hasta 400A, y una tensión de hasta 34V. Esta fuente de alimentación debe estar conectada a una serie de equipos auxiliares:

- Como cualquier fuente de alimentación en soldadura, deberá estar conectada a un **cable de masa**. Al emplear la mesa giratoria, el cable de masa va conectado internamente a esta.

- Las fuentes CMT emplean una **unidad de refrigeración** propia (a mayores del sistema de refrigeración general de la máquina). En este caso, la unidad de refrigeración es FK 4000 de FRONIUS®.
- Tendrá que estar conectado a una fuente de **gas protector**
- Será necesario un **alimentador de hilo** continuo, en este caso VR 7000 y una sirga, es decir, una manguera por cuyo interior viaja el hilo (electrodo).

Para poder soldar con CMT, habrá que convertir la alimentación de hilo continua, en un movimiento discontinuo a alta velocidad. Para ello es necesario introducir un **buffer de hilo**, que acumula el exceso de hilo cuando este se retrae y lo expulsa a continuación, cuando es necesario que avance. El buffer de hilo trabaja conjuntamente con el **mecanismo de alimentación**, ubicado en la **antorcha**. Este mecanismo de alimentación arrastra el hilo siendo el que se gobierna el movimiento del mismo, haciéndolo avanzar o retraerse.

Por último, para poder automatizar la soldadura, esta fuente deberá conectarse a la **interfaz del automatismo** (HMI T-10) desde donde se controlará. A su vez será necesario conectarla al **mando a distancia RCU 5000i**, desde donde se seleccionará la curva sinérgica más adecuada para el soldeo, teniendo en cuenta el material de aporte, su diámetro y el gas de protección empleado, entre otros factores. La base de datos del RCU 5000i cuenta con más de 180 curvas sinérgicas guardadas, que pueden ser ligeramente modificadas para optimizar la soldadura.

En la Figura 26 se esquematizan los componentes básicos necesarios para ejecutar soldadura CMT con un robot. Estos elementos permanecen prácticamente invariantes en el caso de soldadura automatizada (nuestro caso).

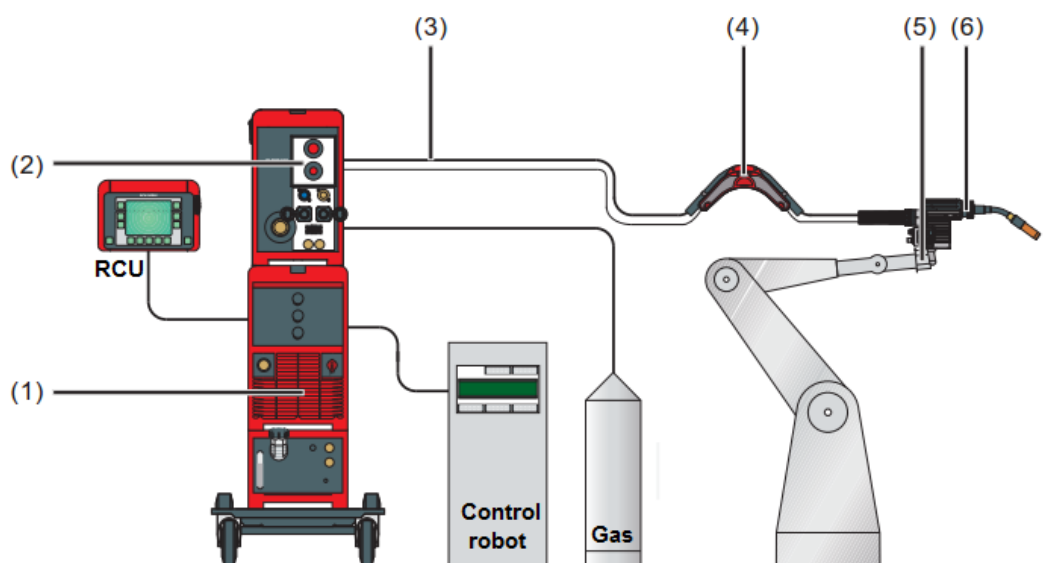


Figura 26: Simplificación de los elementos necesarios para el soldeo CMT robotizado

1. Fuente de alimentación CMT
2. Alimentador de hilo
3. Conjunto de mangueras flexibles
4. Buffer de hilo
5. Caja de colisión
6. Unidad de dirección de la antorcha

El alimentador de hilo consiste simplemente en un sistema que va devanando la bobina de hilo de aporte por medio de unos rodillos con unas ranuras acorde con el diámetro del hilo. A estos rodillos se les puede aumentar o rebajar la presión que ejercen sobre el hilo según sea el material de aporte que se esté empleando, es decir, se apretarán cuando se emplee hilo de acero y se aflojarán cuando se emplee hilo de aluminio, por ejemplo. Este sistema alimentador de hilo se muestra en la Figura 27.

Por otra parte, para conseguir una adecuada alimentación de hilo que permita la soldadura CMT se necesita un *buffer* de hilo, como el que se puede ver en la Figura 28. Este *buffer* trabajará conjuntamente con el alimentador de hilo de la antorcha, cuyo detalle se ilustra en la Figura 29. Este sistema de arrastre de hilo consiste en dos rodillos que giran adelante y atrás a alta velocidad y alta frecuencia, proporcionando un flujo discontinuo de hilo al arco. Estos rodillos pueden ser apretados o aflojados para aumentar o rebajar la tensión sobre el hilo, como sucedía con los rodillos de la devanadora de hilo.

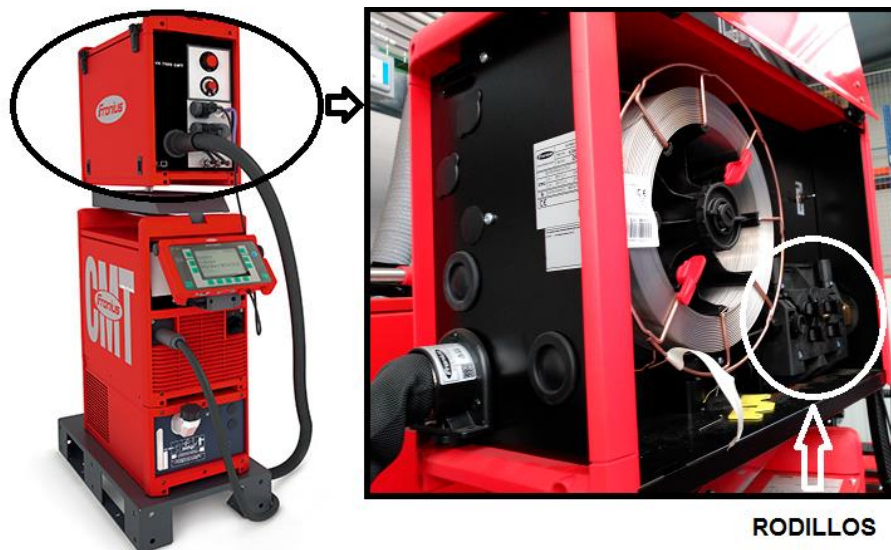


Figura 27: Alimentador de hilo VR 7000



Figura 28: Buffer de hilo CMT. Detalle muelle para acumulación de hilo.



Figura 29: Sistema de arrastre del hilo de la antorcha

4.1.3. Equipamiento GTAW

Para la soldadura GTAW o TIG se emplean, en la misma estación multi-soldadura, otros equipamientos distintos. Al disponer el sistema de una serie de enganches rápidos para la sujeción de las antorchas, el cambio de antorchas es relativamente cómodo y no demora mucho tiempo. La soldadura GTAW, incluso en su versión *hot wire* necesita menos equipamiento que la soldadura CMT. En este caso se emplea:

- Un **cable de masa**, imprescindible en cualquier proceso de soldadura por arco eléctrico. En nuestro caso irá conectado a la mesa directamente, sin cables externos.
- La **fuentes de alimentación** TIG TT 2200, capaz de proporcionar una intensidad de hasta 220A y un voltaje de hasta 18,8V o la fuente de alimentación MW 5000, que alcanza intensidades de hasta 500A y tensiones de hasta 30V. Se empleará una u otra según la aplicación.
- Una **antorcha de soplete TIG** TT4500, con tobera de gas protector de cerámica, en cuyo interior se encuentra el electrodo de tungsteno (puro o aleado), perfectamente sujeto por una virola tensora. Esta antorcha está refrigerada por agua en todo momento, por lo que está conectada, entre otras mangueras, a la del circuito de refrigeración.

- El electrodo deberá seleccionarse adecuadamente según el proceso y el material a soldar. En nuestro caso se ha empleado un electrodo de 3,2mm de diámetro de Tungsteno (W) aleado con aproximadamente un 1% de óxido de lantano (La_2O_3), es decir, un electrodo WLa10 (según norma UNE-EN ISO 6848) (35). Este electrodo se emplea en soldeo tanto en corriente continua como en alterna, de multitud de materiales, entre ellos los aceros, desde los no aleados hasta los altamente aleados. Es una de las mejores alternativas a los electrodos aleados con torio, con la ventaja de que no presentan radiactividad ni la exposición al polvo emitido durante el afilado resulta cancerígena. Aunque los más duraderos son los electrodos aleados con tierras raras, para este trabajo, estos electrodos son perfectamente válidos, además de una opción bastante económica.
- También es fundamental el afilado del electrodo. En este trabajo, el ángulo de afilado es de 30° .
- La manguera de entrada de **gas protector**
- Un **alimentador de hilo** KD 1500-D11, con sistema para aportar **hilo caliente**. El sistema de alimentación de hilo termina en una boquilla anexa a la antorcha, con posición regulable. La antorcha con el alimentador de hilo anexo empleados se pueden ver en la Figura 30.

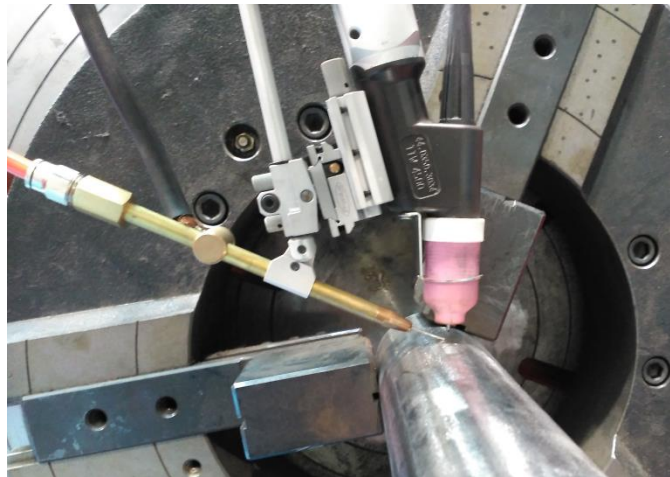


Figura 30: Antorcha TIG con sistema de aporte de hilo acoplado

4.2. Procedimiento

4.2.1. Preparación de los tubos

El primer paso es cortar el trozo de tubo que se empleará como metal base. Este paso es muy importante porque estos tubos se suministran en longitudes de 5 a 6 metros, por lo que sin cortar serían difíciles de manejar. Para la realización de pruebas previas de parámetros, se emplearon segmentos de unos 300mm de longitud, pero

para recargar los cupones definitivos, han sido necesarios trozos más largos (desde unos 1500mm hasta unos 1800mm).

Con estos tubos mucho más largos se pretendía paliar el calentamiento tan elevado que sufría el material base durante la soldadura cuando se empleaban tubos cortos (de uno 300mm). Lo ideal sería emplear un **sistema de refrigeración** durante el soldeo, que evitase el sobrecalentamiento del material, pero, en el momento de realización de este trabajo, no se disponía de un sistema de refrigeración con la versatilidad tal que pudiese adaptarse a los distintos diámetros y longitudes de tubo, y a las distintas posiciones de soldeo, mientras el tubo a refrigerar gira en la mesa (es un problema el giro pero también las reducidas dimensiones disponibles en la mesa para colocarlo).

En este momento, se está intentando desarrollar un sistema de refrigeración que se pueda emplear en estos casos y en situaciones similares que puedan presentarse en el futuro. Una vez que se disponga de este sistema de refrigeración, se podrán emplear segmentos de tubo más pequeños, en vez de emplear tubos largos, soldarlos y cortar el trozo que se necesite). Además, podrán soldarse un número mayor de cordones sin que se alcancen temperaturas tan altas en el material base que puedan deteriorar sus propiedades. En este trabajo fue necesario realizar paradas cada cierto número de cordones para esperar a que el material enfriase lo suficiente para seguir soldando sin perjudicar sus propiedades.

En condiciones de suministro los tubos están recubiertos de una imprimación que los protege, pero que debe eliminarse antes de recargar la superficie, para no contaminar la soldadura. Para ello se emplea una amoladora eléctrica. Primero se desbasta la superficie con un disco de amolado, que permite eliminar de una forma grosera la capa de imprimación. Posteriormente se eliminan las imperfecciones que se hayan producido en el primer amolado y los posibles residuos que hayan quedado de la imprimación en la superficie con un disco de láminas abrasivas, comúnmente conocido como “disco mil hojas”. Así se consigue una superficie libre de contaminantes, lista para soldar. En la Figura 31 se muestran las herramientas empleadas en el amolado.



Figura 31: 1) Amoladora eléctrica, 2) Disco de desbaste grosero, 3) Disco de desbaste fino

En la Figura 32 se muestran varios tubos en las condiciones de recepción, todavía con la imprimación protectora. A continuación, en la Figura 33 se puede observar un segmento de tubo ya preparado, tras el amolado de su superficie.



Figura 32: Tubos en estado de recepción



Figura 33: Segmento de tubo preparado

4.2.2. Colocación de los tubos

En este trabajo es fundamental la sujeción y la alineación de los tubos en la mesa. Los tubos se anclan rígidamente a la mesa, por medio de unas mordazas de las que la mesa dispone y deben colocarse lo más nivelados posibles, en cualquiera de las posiciones, PA o PC. No olvidemos que la mesa va a girar sobre su eje, mientras la antorcha de soldeo permanece fija. Por este motivo, un mal centrado del tubo repercutiría en la distancia tubo-antorcha a lo largo de un cordón, haciendo variar el *stick-out* en la soldadura CMT y la distancia entre el electrodo (y el sistema de aporte de hilo a él acoplado) y la pieza. La variación de estos parámetros provoca irregularidades y defectos que pueden llegar a ser tales que invaliden el cupón recargado.

En la Figura 34 puede observarse un tubo preparado y anclado a la mesa giratoria con las mencionadas mordazas, dispuesto verticalmente para ser recargado mediante CMT en posición de cornisa PC.



Figura 34: Tubo preparado y anclado listo para ser soldado en PC

En el caso de la soldadura CMT, la alineación de la pieza es fundamental, porque las variaciones en el *stick-out*, repercuten en el voltaje del arco. Si estas variaciones son significativas, pueden aparecer defectos en los cordones.

En el caso de la soldadura TIG, el equipo cuenta con un sistema capaz de corregir la distancia entre el electrodo y la pieza denominado AVC (*Arc Voltage Control*). Este sistema no pudo emplearse en las primeras pruebas realizadas debido a una avería en los ejes finos (X1 y Z1) necesarios para ejecutarlo, por lo que el posicionamiento en estos casos tuvo que ser manual. Si este posicionamiento manual es bueno, el aspecto de los cordones también lo será, pero de no ser así, se pueden obtener cordones con muchos defectos, porque la posición en el TIG es todavía más crítica que en el CMT. Si el electrodo y el hilo se acercan excesivamente al tubo, el electrodo puede entrar en contacto con el baño, contaminándose y deteriorándose, afectando inmediatamente al arco. Por el contrario, si el electrodo y el hilo se alejan del tubo, cambiará la forma del arco y el hilo se depositará goteando (se oye crepitar al caer las gotitas), por lo que se producen cordones poco uniformes, fomentándose la aparición de defectos.

El AVC es un sistema que mide el voltaje del arco y, por medio de un servomotor en circuito cerrado, corrige la posición de la antorcha de soldadura para mantener constante el voltaje del arco, como se ilustra en la Figura 35.

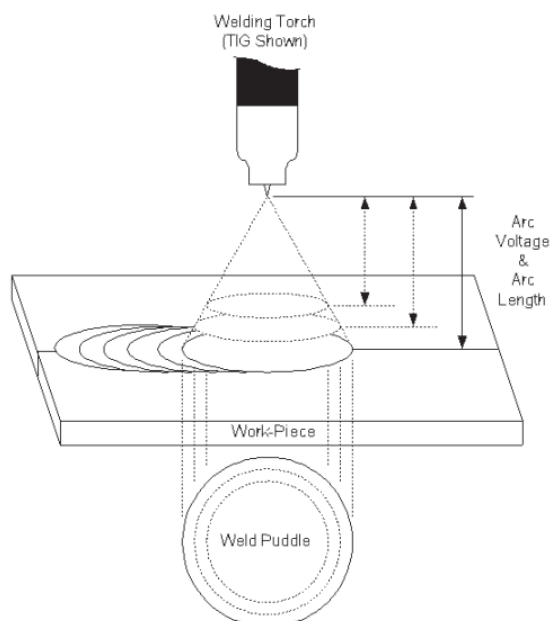


Figura 35: Ilustración simplificada de la teoría del AVC (36)

Un voltímetro digital mide el voltaje de la gota a través de un resistor u otro componente en dos puntos. Así, cuando la corriente aumenta o disminuye, el voltaje aumenta o disminuye proporcionalmente a esta. De igual modo, si la antorcha se aleja o acerca de la pieza, el voltaje varía de manera directamente proporcional con la distancia a la pieza.

En el panel de control del automatismo se selecciona un determinado voltaje y el cabezal en el que está engarzada la antorcha aplica las correcciones de posición necesarias (se aleja de la pieza o se acerca a ella) para alcanzar ese valor de voltaje y mantenerlo.

La importancia de este sistema de control de voltaje se puso de manifiesto con la llegada de la soldadura automatizada, donde el *heat input* es crítico. Como las fuentes de alimentación del TIG son de corriente constante, ofrecen una intensidad constante sin tener cuenta el valor del voltaje. Los problemas aparecen cuando el voltaje no se mantiene constante, porque el calor aportado (*heat input*) a la pieza que está siendo soldada tampoco lo será. Con la llegada de los sistemas AVC, se puede conseguir que el aporte térmico sea constante en la pieza a soldar, lo que repercute en una mayor calidad en la soldadura automatizada. (36)

En la celda multi-soldadura de FRONIUS® esta corrección de la posición se ejecuta con los ejes finos (X1 o Z1 dependiendo de cómo esté colocada la antorcha y la pieza). El eje que no se esté usando para el sistema AVC queda libre, disponible para ser empleado con la función de oscilación de la antorcha o para ejecutar el desplazamiento entre cordones de una forma más precisa que con los ejes de largo recorrido. Esta segunda opción es la que hemos adoptado nosotros en este trabajo aprovechando que no se ha empleado oscilación.

4.2.3. Colocación del hilo y la antorcha

El primer paso es fijar la antorcha y pre-situarla de una forma grosera en la posición semejante a la que tendrá al soldar. Anteponiendo este paso evitamos mover la antorcha y la sirga con el hilo ya dentro, lo que puede deformarlo y afectar a la alimentación. Tanto la antorcha de soldadura TIG como la de CMT pueden engarzarse de forma rápida y sencilla en cualquiera de los conectores de los que dispone el equipo FMW. Se elegirá el que permita todos los desplazamientos necesarios para acceder a la zona de soldadura evitando colisiones. El equipo también cuenta con una pareja de abrazaderas (a ambos lados del conector principal) pensadas para sujetar una lanza TIG de más de 1 metro de longitud, especialmente diseñada para recargar tubos interiormente. En estas abrazaderas se puede sujetar también la antorcha de TIG normal (corta).

Los ejes X1 y Z1, anclados perpendicularmente entre sí, pueden girarse 90 grados, permitiendo variar la antorcha para soldar desde la posición de soldeo plano hasta la horizontal. También se puede girar la antorcha hasta 90° en la dirección perpendicular, lo que permite está sujeta aplicar ángulos de avance a la antorcha, para soldar empujando o arrastrando. A mayores del ángulo que permiten girar los utillajes donde va sujeta la antorcha (a su vez sujetos en los ejes X1 y Z1), la antorcha CMT cuenta con un cierto recorrido de giro adicional que también actúa sobre el ángulo de avance de la antorcha. La antorcha TIG solo tendrá ese recorrido adicional si se conecta a un conector de enganche rápido.



Figura 36: Antorcha CMT colocada en el conector principal. Ejes X1 y Z1 girados 90° con respecto a su posición original

La Figura 36 muestra el resultado de la colocación de la antorcha CMT en el conector principal, mientras que la Figura 37 ejemplifica la colocación de la antorcha TIG en las abrazaderas. En ambos casos se suelda en PC. Como se ha comentado anteriormente, los ejes X1 y Z1, mutuamente perpendiculares, intercambiar su posición si se giran 90°. Este hecho también se pone de manifiesto en las citadas figuras.

Por otra parte, en la Figura 38 se puede observar el giro adicional que ofrece la antorcha CMT, muy similar al que se consigue colocando la antorcha TIG en los conectores (colocándola en las abrazaderas se pierde esa posibilidad de giro).

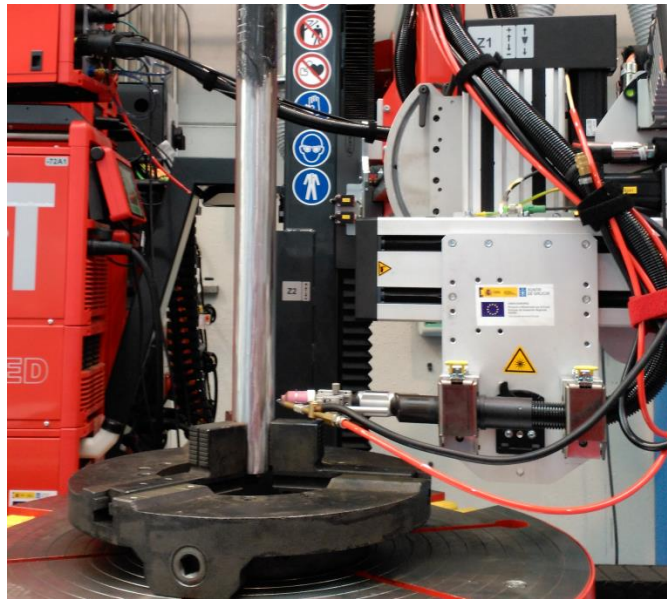


Figura 37: Antorcha TIG colocada en las abrazaderas. Ejes X1 y Z1 en su posición original. Tubo parcialmente amolado.



Figura 38: Sistema que permite el giro adicional de la antorcha CMT para modificar su ángulo de avance

Una vez que la antorcha está situada en su conector o abrazadera, es el momento de introducir el hilo de material de aporte. Para la colocación del hilo se debe tener en cuenta que los rodillos empleados en el alimentador sean los adecuados para el diámetro de hilo que se está empleando y que ejerzan la presión suficiente sobre este. Es fundamental, colocar las sirgas (mangueras a través de las que viaja el hilo) lo más rectas posibles, para evitar problemas en la alimentación del hilo. Esta precaución es crítica en el caso del CMT, debido al propio proceso de alimentación de hilo mediante constantes retracciones. También habrá que ser especialmente cautos con

la alineación de las sirgas cuando se empleen hilos blandos o cuando el aporte de hilo sea "pulsado", por ejemplo, cuando se emplea TIG-pulsado con variaciones en la velocidad de aporte de hilo entre el valor de corriente de pico y el de base.

En el caso del soldeo CMT, habrá que ajustar también la presión de los rodillos del mecanismo de arrastre presente en la antorcha (véase Figura 29).

Una vez colocado el hilo, se hace un ajuste fino de la posición de la antorcha con respecto al tubo:

- En soldeo CMT, se coloca la antorcha con el ángulo de avance deseado (para nosotros 10°) y se fija el *stick out* adecuado (en nuestro caso 18 mm).
- En soldeo TIG con aporte de hilo, se coloca la antorcha con el ángulo de avance pertinente (0° en nuestro caso), se coloca el electrodo perfectamente afilado y se ajustan las posiciones relativas entre hilo y electrodo, y entre electrodo y pieza. En nuestro caso se ha empleado un ángulo de aporte para el hilo de 30° (medidos con respecto a la tangente al tubo en el punto más próximo a la antorcha) y una distancia electrodo-pieza de aproximadamente 4mm. Normalmente el hilo se coloca de tal forma que se aporta inmediatamente por delante del arco. En algunas de nuestras pruebas se ha tenido que alejar unos milímetros el hilo del electrodo para evitar la contaminación accidental del electrodo.

4.2.4. Selección de parámetros de soldeo

Aunque el soldeo CMT y el *hot wire*-TIG son procesos de soldadura relativamente recientes, el Centro Tecnológico Aimen, cuenta con cierta experiencia en el manejo de este tipo de técnicas, por lo que hemos tomado como referencia algunas de las pruebas que se han hecho en el Centro con anterioridad.

4.2.4.1. Soldadura CMT

Este trabajo se ha empezado por el proceso CMT. Aunque en Aimen se había utilizado con anterioridad la tecnología CMT para aplicar recargues, los materiales empleados en este trabajo, tanto de aporte como de base, son diferentes a los que se habían recargado anteriormente. El primer paso en la soldadura CMT con estos equipos es seleccionar en el control remoto (RCU 5000i) la curva sinérgica adecuada para los materiales que se van a soldar. Una vez hecho esto, ya se pueden realizar pruebas con distintos parámetros de soldeo.

Al haber seleccionado la curva sinérgica, el equipo habrá limitado el rango de parámetros de soldeo para adaptarlos al material. La intensidad se selecciona porcentualmente, siendo 100% el máximo para cada curva. La tensión y la velocidad de alimentación de hilo, se fijan automáticamente para esa intensidad de acuerdo con la curva sinérgica. No se puede actuar sobre la velocidad de hilo, pero sí sobre el voltaje, parcialmente. Para ello se puede emplear el valor de corrección de arco, que

permite subir el arco (aumentar voltaje, introduciendo valores de corrección positivos) o bajarlo (disminuir voltaje, con valores de corrección negativos) ligeramente.

La velocidad de soldadura es independiente de la curva sinérgica y puede ser fijada por el usuario. Es muy importante tener en cuenta que la máquina no nos advierte si seleccionamos una velocidad lineal superior a la que se puede alcanzar mediante el giro de la mesa. La velocidad angular máxima de giro de la mesa es de 3rpm, por lo que, para los diámetros de tubo empleados ($\approx 60\text{mm}$), la velocidad lineal de soldadura máxima es de aproximadamente 56,5cm/min.

Se debe fijar también un valor para el paso, que permita el solape parcial entre cordones, y una velocidad de etapa (velocidad a la que se desplaza el eje que avanza para proporcionar el paso definido).

A continuación se describen los parámetros empleados en las dos parejas de *material base-material de aporte* recargadas por CMT (ambas sin precalentamiento del material base):

CuSi3Mn1-16Mo3

Esta ha sido la primera pareja de materiales que se ha intentado recargar mediante CMT. En este caso el reto fundamental se encuentra en el empleo de un hilo de una aleación de cobre. Este hilo no está pensado para soldar aceros, pero debido a la buena resistencia a ambientes marinos que podría conferirle al material base, hemos intentado encontrar unos parámetros que permitiesen un recargue exitoso.

En todas las pruebas previas, incluso en la prueba para cualificación se empleó un segmento corto de tubo de unos 320mm de longitud. Este tubo, como se ha descrito anteriormente, tiene un diámetro exterior de 60,3mm y un espesor de pared de 5,6mm. El hilo es de diámetro 1,2mm. Se ha empleado como gas de protección **Ar100%** ya que el material de aporte no es férreo, con un caudal de **16l/min** (normalmente se elige un valor de caudal en l/min igual o superior al diámetro en mm de la boquilla de la tobera, que en este caso es de 15mm).

Alcanzar unos parámetros óptimos para esta pareja de materiales resultó muy laborioso. Los cordones solían ser muy altos, lo que ofrecía la ventaja de obtener un mayor espesor depositado, pero complicaba la consecución de un solape satisfactorio entre cordones. Para evitar que estos cordones tuviesen esa forma, optamos por bajar el aporte de hilo, lo que obligaba a bajar también tensión e intensidad. Como el equipo regula los parámetros por medio de una curva sinérgica, esos tres parámetros (intensidad, voltaje y alimentación de hilo) se modifican conjuntamente. Otro de los parámetros con los que jugamos fue la velocidad de soldadura, aumentándola al máximo posible.

Después de múltiples pruebas, en posición de cornisa (antorcha en horizontal, PC), decidimos cambiar la posición de la antorcha y soldar en posición plana (PA) para evitar los descuelgues que se producían debido al gran tamaño del baño de soldadura.

Finalmente conseguimos una combinación de parámetros (**I: 122A, V: 11,5V (corrección de arco: -3%), velocidad de alimentación de hilo: 5,38m/min y velocidad de soldeo: 56,5cm/min**) con los que se obtenían cordones con buen aspecto y con unas dimensiones aceptables (**3mm de alto y 4mm de ancho**) en esta nueva posición, **PA**.

La siguiente tarea era mejorar el aspecto del inicio y el final de cordón, que solían quedar muy sobredimensionados. Este asunto también resultó complejo por la multitud de posibilidades que ofrece la máquina para modificar los parámetros de inicio y final (se puede introducir una rampa de potencia al inicio y al final, un tiempo de retardo en el desplazamiento inicial, un tiempo de permanencia al final,...). Cabe destacar que la estación FMW se había empleado en muy pocas ocasiones, por lo que se han ido descubriendo las posibilidades adicionales que aportaba y las limitaciones con respecto a los otros equipos a medida que se han ido haciendo pruebas.

Una vez optimizados los inicios y finales de cordón, había que conseguir un solape adecuado (porcentaje de ancho de cordón compartido por dos cordones paralelos consecutivos) ajustando el paso (distancia entre el centro de dos cordones consecutivos). En el esquema de la Figura 39 se representan estos dos conceptos, paso y solape. Para calcular el solape que se obtiene se emplea la ecuación siguiente:

$$\text{Solape (\%)} = \frac{\text{Ancho cordón} - \text{Paso}}{\text{Ancho Cordón}} \cdot 100$$

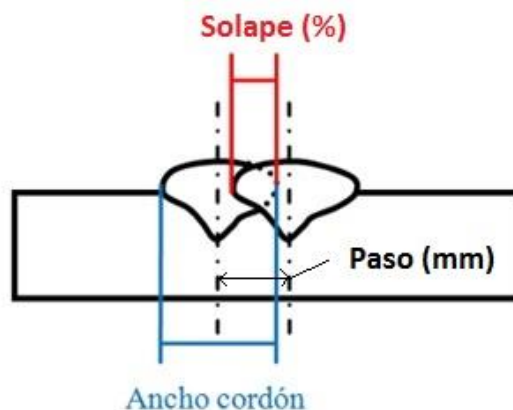


Figura 39: Sección de dos cordones de soldadura que ilustra los conceptos de paso y solape entre cordones

En esta estación multi-soldadura el paso entre cordones se realiza mediante una rampa de desplazamiento, a una velocidad definida por el operador. Es decir, se fija un valor de paso y una velocidad de desplazamiento para el eje que ejecuta el paso, dando como resultado una rampa con mayor o menor pendiente según sea mayor o menor esta velocidad de desplazamiento del eje. Si esta velocidad no es la adecuada, pueden quedar huecos en la zona de la rampa, por lo que conviene ajustarla bien.

También debe ser adecuada la trayectoria circunferencial recorrida desde el inicio del cordón hasta el inicio de la rampa del paso. En este caso, con **360°** se obtenían buenos resultados, pero esto no siempre es así, pudiendo ser necesario variar algunos grados ese recorrido.

Después de conseguir buenos resultados con un paso de **3,5mm (12,5% de solape)** y una **velocidad de paso de 12cm/min**, apareció otro problema. El aspecto de los primeros 10 o 12 cordones y el de los siguientes solía ser muy distinto. Esto se debía al calentamiento que sufría el material base durante la soldadura. El hilo de aleación de cobre es mejor conductor del calor que el acero base, por lo que el cordón en su enfriamiento disipaba muy rápidamente el calor hacia el tubo, subiendo la temperatura de este en gran medida. Al no disponer de un sistema de refrigeración adecuado, se decidió soldar dividiendo la longitud total (150mm) en **sectores de 10 cordones**. Al acabar de soldar los 10 cordones se esperaba hasta que la temperatura del tubo bajase hasta los 120-150°C (sin forzar el enfriamiento) para poder seguir soldando el siguiente sector, y así sucesivamente.

Siguiendo este procedimiento se consiguió recargar la longitud de tubo necesaria para intentar cualificar este procedimiento de soldeo (150mm). Aunque el aspecto del recargue al hacer una observación visual parece bueno, será necesario realizar ensayos que determinen si el recargue se ha ejecutado con éxito. En la Figura 40 se puede ver el aspecto que presentaba el tubo una vez terminado el recargue, listo para ser ensayado. Los resultados de estos ensayos se presentarán en el apartado de resultados del presente trabajo.



Figura 40: Aspecto final del tubo de acero 16Mo3 recargado mediante CMT con hilo CuSi3Mn1 en posición PA.

ER 347Si-P22

Con esta pareja de materiales esperábamos conseguir unos parámetros adecuados más rápido porque ya disponíamos de unos parámetros de partida por haberse realizado con anterioridad en el Departamento algunas pruebas con este hilo sobre aceros similares al P22. Además, el soldeo de la pareja de materiales anterior nos ha aportado cierta experiencia en el manejo de la estación FMW y en la resolución de los problemas que pueden surgir en este proceso.

Inicialmente hemos empleado en las primeras pruebas Ar100%. Al observar que el arco era ligeramente inestable y que se producían bastantes proyecciones, decidimos cambiar este gas de protección por **Ar+2%O₂**. Esta mezcla se emplea

cuando se sueldan dos materiales féreos y proporciona más energía al arco. El caudal de gas fijado vuelve a ser **16l/min**. El empleo de esta mezcla de gases repercute en la penetración obtenida, que en este caso es más ancha y menos profunda que con Ar100%, como se ilustra en la Figura 41.

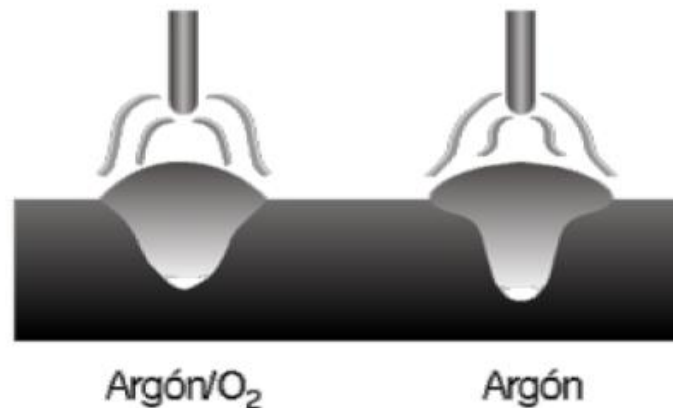


Figura 41: Esquema de la diferente penetración conseguida según el gas de protección elegido
(37)

Con estos materiales hemos empezado a hacer pruebas directamente en **PA**, para evitar los problemas que habíamos tenido anteriormente. Los parámetros que decidimos emplear, porque producían cordones con buen aspecto, fueron: **Intensidad de 153A, Voltaje de 11,4V** (es necesaria una **corrección del arco de +30%**, para alcanzar ese voltaje partiendo de la curva sinérgica cargada), **velocidad de alimentación de hilo de 3,76m/min** y **velocidad de soldeo de 56,5cm/min**. El **paso entre cordones** ha sido de **3,4mm**, con una **velocidad de etapa de 12cm/min**. Como los cordones tenían unas dimensiones aproximadas de **3mm de alto y 5mm de ancho**, este paso equivale a un **solape del 32%**.

Para minimizar el número de paradas necesarias, empleamos un tubo de 1,20m y lo apoyamos sobre los rodillos que tiene la máquina para que el calor se disipase mejor (los rodillos son metálicos). Estos rodillos también contribuyen a mantener más recto el tubo y minimizar así los problemas derivados de una mala alineación. Como el calentamiento no era tan alto con estos materiales, se pretendía soldar toda la longitud necesaria sin hacer paradas, sin embargo, se hizo una parada intermedia, para no dañar el material porque el calentamiento que estaba sufriendo este era importante.

Al inicio, el primer cordón presentaba irregularidades, porque el arco no fue estable hasta haber soldado algunos centímetros (esto puede deberse a que el material base estaba muy frío para ser soldado con esos parámetros). Al volver a iniciar el recargue tras la parada intermedia, los primeros centímetros del primer cordón, volvieron a sufrir problemas similares a los del inicio. En este caso puede tratarse de un problema de temperatura al igual que al inicio pero es muy probable que en este fallo haya influido la colocación de la antorcha antes de empezar a soldar, solapando en exceso con el cordón anterior, lo que puede haber provocado inestabilidades en el arco. Por este motivo fue necesario reparar el recargue, amolando el primer cordón y la zona afectada por las irregularidades en el reinicio tras

la parada intermedia, volviendo a depositar material sobre esa zona (también con CMT y con el mismo equipo) y volviendo a amolar para igualar el espesor recargado con el de los cordones colindantes.

El tubo recargado y reparado cuyo aspecto se puede observar en la Figura 42 fue ensayado en busca de defectos, prestando especial atención a esas zonas en las que ha necesitado reparación. Los resultados de estos ensayos se detallan en el epígrafe 5.



Figura 42: Aspecto del tubo de acero P22 recargado con ER347Si mediante CMT. Reparado con CMT. Amolado en la zona reparada.

Debido a los múltiples problemas que había presentado el proceso CMT, decidimos pasar al soldeo TIG (sobre todo al ver los resultados de los ensayos). Otro de los procesos que se querían probar era el CMT Advanced, pero debido a la limitación de tiempo disponible, decidimos posponer el uso de ese proceso y se intentará recargar mediante CMT Advanced más adelante en Aimen, pero no será objeto de este trabajo.

4.2.4.2. Soldadura TIG

Este proceso de soldeo se ha elegido por la posibilidad de emplear un arco pulsado para minimizar el aporte térmico. Además, el equipo permite la posibilidad de aporte de hilo caliente, por lo que se puede reducir aún más el *heat input* sobre la soldadura. El TIG no emplea una curva sinérgica, sino los valores directamente introducidos por el operador. Por este motivo, es muy importante tener una idea previa de en qué rango de valores de intensidad moverse, ya que no habrá ningún límite previamente impuesto por la máquina para ese tipo de materiales.

En la soldadura TIG no se introduce el valor del voltaje, sino que este solo será necesario cuando se quiere emplear el sistema AVC para mantener constante la distancia entre la pieza y el electrodo. Ese valor del voltaje será constante, aun empleándose un arco pulsado como en nuestro caso.

La mayoría de las máquinas de soldeo TIG, cuando se emplean con corriente pulsada, funcionan introduciendo una frecuencia del pulso (en Hz) para fijar el número de repeticiones del ciclo por segundo. Algunas permiten descompensar el ciclo dando mayor peso a la intensidad de pico que a la de base o viceversa. También es frecuente introducir el valor numérico de la intensidad máxima (I_{pico}) en A, y a continuación indicar el valor de la intensidad mínima (I_{base}) mediante el porcentaje que representa sobre esta. En esta máquina, ambos valores (intensidad de pico y de base) se introducen en amperios. Además, la frecuencia se introduce a la inversa. Se asigna el tiempo (en ms) que se desea que permanezca cada valor de intensidad, obteniéndose indirectamente la frecuencia. Mediante este sistema es más sencillo descompensar el ciclo porque se puede fijar, por ejemplo, un tiempo de I_{pico} de 200ms y uno de I_{base} de 250ms.

Por otra parte, al no emplearse una curva sinérgica, la alimentación del hilo no está vinculada a los valores de intensidad fijados, por lo que será seleccionada por el operador. En este caso, la alimentación de hilo aparece en cm/min en vez de en m/min como en CMT porque el aporte de material es significativamente menor. Esto repercutirá en el tamaño del baño, que será también menor, siendo por lo tanto más manejable, sobre todo en posición de cornisa (PC).

En algunos casos hemos empleado TIG con aporte de hilo caliente. La intensidad que se le desea aplicar al hilo para calentarlo la selecciona el operador libremente y puede ser diferente en el momento de I_{pico} con respecto al I_{base} . De igual modo, la velocidad de alimentación de hilo puede ser diferente en I_{pico} y I_{base} .

En la soldadura TIG también se pueden añadir rampas de potencia iniciales y finales, con todas las posibilidades que ofrecía el equipo en CMT.

El electrodo utilizado en todas las pruebas ha sido el WLa10 de 3,2mm de diámetro. La punta del mismo se ha afilado a unos 30° y se afila periódicamente cuando se aprecia que ha perdido ligeramente la punta. El gas de protección también ha sido el mismo en todas las pruebas, **Ar100%**, siendo el caudal de **12l/min**, inferior que el empleado en CMT, porque también es más estrecha la boquilla de la tobera.

Para recargar los cuatros cupones mediante TIG, tampoco se ha empleado precalentamiento del metal base.

Las parejas de materiales empleados, por orden cronológico son:

ER 307-P22

Con esta pareja de materiales hemos tenido algunos problemas para alcanzar unos parámetros buenos, debido a la escasa experiencia previa en el manejo del equipo, pero el tiempo necesario para obtener unos buenos parámetros ha sido muy inferior al que necesitamos con CMT. Esto se debe a que el arco de TIG proporciona siempre unos cordones finos y regulares, generalmente más anchos y planos, que, por lo tanto, son más fáciles de optimizar.

Al ver los buenos resultados que se obtenían en PA, se decidió cambiar la posición de soldeo a **PC**, que aunque resulte más compleja, permite cualificar el procedimiento de recargue también para PA y PB, sin necesidad de soldar un cupón a mayores en dicha posición.

Para las pruebas definitivas se ha empleado un tubo de 850mm de longitud, 60,3mm de diámetro exterior y 5,6mm de espesor de pared. Para evitar acumulaciones de material en el inicio de los cordones, se ha empleado un **ángulo de vuelo de 3°**, es decir, la mesa gira 3° a la misma velocidad de giro a la que girará para soldar, antes de abrir el arco. Así se consigue que el arco no se inicie en una posición estática y, por lo tanto, un inicio de cordón más plano. También se ha empleado un ángulo adicional de soldadura al final de cada sector, para que el final del cordón sea recto (compensando los grados que recorre el equipo al hacer la rampa de paso).

La **velocidad de soldeo** empleada ha sido de **23cm/min**. Los valores de intensidad son: I_{pico} : **190A**, I_{base} : **100A**, I_{hilo} : **75A** (constante). La velocidad de **alimentación de hilo** también fue constante, a **150cm/min**. El **tiempo de permanencia** a cada intensidad fue de **250ms** para cada una, quedando así compensado el tiempo a intensidad máxima y mínima a una frecuencia de 2Hz.

Los cordones obtenidos tenían unas dimensiones aproximadas de **6mm de ancho y 2 mm de alto**. Como el **paso entre cordones** elegido ha sido de **3,8mm**, el **solape** conseguido es de un **37%** aproximadamente. La **velocidad de paso** es de **12cm/min**.

Se ha empleado el sistema AVC para mantener el **electrodo a 3mm de la pieza**. Para ello, el **voltaje** empleado es de **10V**. Cabe destacar que en este caso el hilo no se colocó para que el depósito de metal sucediese justo bajo el electrodo, por la escasa distancia disponible, sino que se posicionó de tal forma que el aporte de material sucedía 1 o 2 mm por delante del electrodo.

Para soldar este tubo se ha tenido que dividir la longitud total a recargar en sectores de 5 o 6 cordones, esperando a que el material enfriase antes de soldar el siguiente sector, como se había hecho en CMT. El rango de temperaturas hasta las que se dejaba enfriar el tubo es de 120-140°C. Entre sectores, al parar, se corregía la posición del electrodo en unos 0,6mm (hacia atrás) para garantizar un buen solape. Debido a esto, los cambios de sector se notan a simple vista, porque hay un ligero sobre espesor en la zona en la que solapa el último cordón de un sector con el primero del siguiente.

El aspecto del tubo recargado, justo antes de ser sometido a ensayos (se ha cortado hasta una longitud de unos 350mm para manejarlo más cómodamente) es el que se muestra en la Figura 43. En ella se aprecia como en los cráteres de cada sector hay un ligero descenso en el espesor de metal depositado. Estos finales de sector (cráteres) se intentarán mejorar en los próximos tubos recargados, pero si los ensayos no revelan lo contrario, no suponen un defecto que impida la cualificación del

procedimiento. Los resultados de los ensayos se agrupan en el epígrafe 5 de este trabajo.



Figura 43: Aspecto del tubo de P22 recargado con ER307 mediante Hot Wire TIG

309LSi-P22

Partiendo de los parámetros empleados en la pareja de materiales anterior, esperábamos encontrar pronto los óptimos para esta pareja de materiales. Tanto es así que los pocos cambios que se han hecho, han sido muy poco significativos. Se ha mantenido la intensidad de pico y base, modificando únicamente el tiempo de permanencia a cada una de ellas, que en este caso ha sido ligeramente distinto: 280ms para la I_{pico} y 300ms para la I_{base} . El paso se ha mantenido, porque también son iguales las dimensiones de los cordones. El procedimiento seguido ha sido idéntico al anterior, soldando por sectores de 5 o 6 cordones.

La posición de soldeo se mantiene, en PC. La longitud del tubo empleado en este caso es de 1200mm (se cortará posteriormente para llevarlo a ensayar), pero el diámetro y el espesor se mantiene.

Se han modificado ligeramente las rampas de potencia inicial y final y se ha aumentado el ángulo de vuelo inicial hasta 10° , para optimizar los inicios y finales, jugando también con el retardo en la alimentación de hilo. Con esto se ha conseguido mejorar el aspecto del recargue con respecto al tubo anterior. El resultado se muestra en la Figura 44, donde vemos el tubo ya cortado, listo para realizar los ensayos pertinentes. Los resultados, al igual que los que se hayan obtenido de la inspección de los demás tubos se presentarán en el apartado de resultados de este trabajo.



Figura 44: Tubo de P22 recargado con hilo 309LSi mediante Hot Wire TIG

ER 347Si - P22

Esta pareja de materiales ya se había empleado anteriormente mediante CMT pero se ha vuelto a utilizar, para intentar cualificar el recargue por las dos técnicas de

soldeo. En el momento de iniciar estas pruebas, ya se había recibido el tubo de mayor espesor de pared, por lo que se empleó en este caso el tubo de **8,7mm de espesor**. El diámetro exterior del tubo sigue siendo el mismo, 60,3mm y la longitud es un poco mayor, 1800mm, aunque presenta tramos recargados debido a las pruebas previas que se han hecho sobre él.

Hemos partido de los mismos parámetros que en el primer tubo recargado por TIG (ER 307-P22) y los hemos ido modificando ligeramente para adaptarlos a la respuesta del nuevo material de aporte. En este caso se ha ejecutado la soldadura en posición plana, en **PA** porque este acero ER347 fluye más (gracias al silicio) y por lo tanto, se descuelgan más los cordones. Ahora el electrodo y el hilo se han separado un poco más, precisamente porque este hilo al fundir fluye mejor que el ER307. La pieza y el electrodo también están ahora un poco más lejos (unos 3,5mm), por lo que hemos aumentado el **voltaje del AVC** hasta los **11V**. Como en los casos anteriores, aun aumentando la distancia entre el electrodo y la pieza, hemos colocado el hilo ligeramente adelantado, para que el aporte de material no suceda inmediatamente debajo del electrodo, pudiendo contaminarlo.

Finalmente, los parámetros de soldeo en el recargue definitivo han sido: I_{pico} : **200A**, I_{base} : **110A**, I_{hilo} : **75A** (constante). La **velocidad de soldeo** se ha aumentado hasta los **25cm/min**, así como la velocidad de **alimentación de hilo**, que se fijó en **165cm/min (pico)** y **170cm/min (base)**. El **tiempo de permanencia** de las intensidades es de **250ms** tanto para I_{pico} como I_{base} .

Se vuelve a emplear el mismo procedimiento de recargar por sectores de 5 o 6 cordones. En este caso el **paso** entre cordones es de **4mm** (salvo en el cambio de sectores, que vuelve a disminuirse hasta unos 3,2mm). La **velocidad de etapa** (la del eje que ejecuta el paso) sigue siendo de **12cm/min**.

Se eliminó el ángulo de vuelo inicial y se optimizaron las rampas de potencia, dando lugar a un recargue con buen aspecto. En dos cordones aproximadamente en la mitad del recargue, el sistema AVC falló, probablemente debido a una ligera contaminación accidental del electrodo. En ese momento, optamos por continuar recargando sin el sistema de corrección de voltaje, por lo que quedamos expuestos a la posible desalineación del tubo. Afortunadamente, el tubo estaba bastante bien colocado (sobre los rodillos y bien nivelado), y los siguientes cordones quedaron con un buen aspecto. Obviamente, antes de soldar el siguiente sector se limpió el electrodo y se volvió a afilar, para evitar que se volviese a repetir la incidencia. El montaje del tubo en PA, apoyado sobre los rodillos de la máquina se puede ver en la Figura 45.

Para evitar encontrar fallos en esos cordones en los que el sistema AVC falló, hemos hecho dos cordones con los mismos parámetros de TIG, pero sin aporte de material sobre esa zona, eliminando las pequeñas irregularidades. El aspecto del tubo una vez recargado y listo para llevar a ensayos se muestra en la Figura 46. Más adelante se expondrán los resultados en el epígrafe correspondiente.

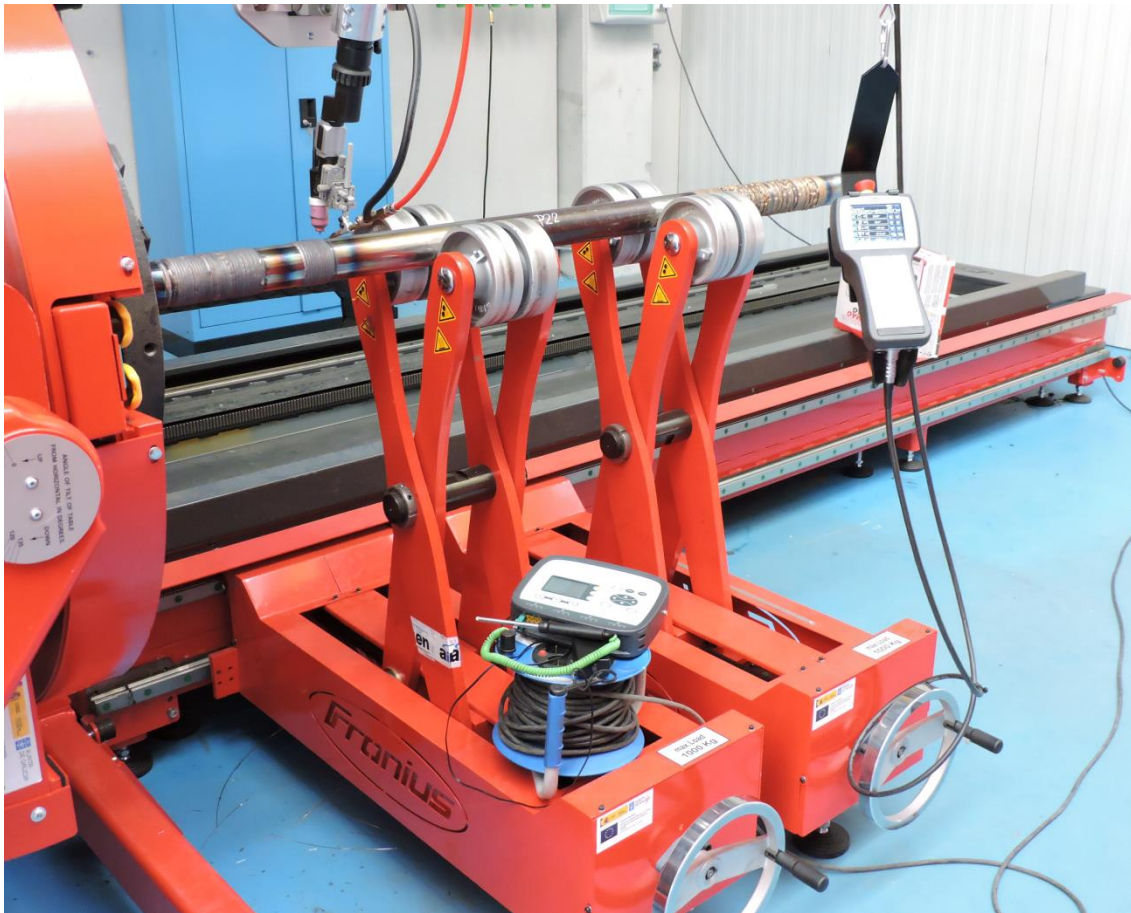


Figura 45: Montaje del tubo P22 sobre los rodillos de la FMW para recargar en PA



Figura 46: Tubo de P22 recargado con ER347Si mediante Hot Wire TIG

SG CuAl8 – 16Mo3

Tras haber empleado distintos aceros inoxidable como materiales de aporte, hemos intentado el recargue con un hilo de aleación de cobre. El acero 16Mo3 es más afín a los recargues con aleaciones de cobre, porque tienen en común algunas de las aplicaciones. Además el acero 16Mo3 es más fácilmente soldable que el P22, por lo que hemos vuelto a emplear este material. Se ha recargado en posición plana, PA, para poder emplear los rodillos para ayudar a disipar el calor generado, ya que con este material se espera que el calentamiento del metal base sea muy elevado.

Como cabía esperar, los parámetros que en el acero daban buenos resultados, en el hilo de SG CuAl8 daban muchos problemas, por lo que hubo que hacer cambios drásticos en los parámetros. Los más significativos fueron el aumento de la frecuencia

hasta los **10Hz (50ms en I_{pico} , 50ms en I_{base})** y la **desactivación** de la función de **aporte de hilo caliente**. La intensidad empleada fue de **200A** para la máxima y **110A** para la mínima. La velocidad de alimentación de hilo se aumentó hasta los **200cm/min** en el pico de intensidad y **192cm/min** en el valle. Para evitar problemas de contaminación se alejó todavía más el electrodo de la pieza, hasta unos 5mm, lo que equivale a un voltaje del AVC de **11,5V**. Con este hilo es aún más importante garantizar que el aporte de material no se haga justo debajo del electrodo, porque este en seguida se contamina y el arco se desestabiliza debido a que el sistema AVC pierde las referencias de voltaje. Además el hilo es más flexible que los de acero, por lo que tiene tendencia a doblarse más y acaba acercándose al electrodo más de lo que cabría esperar al posicionarlo antes de soldar.

Se fijó un **paso de 4mm, solapando** así los cordones un **33%**, ya que su **ancho es de 6mm (alto de 2mm)**. El procedimiento a seguir volvía a consistir en recargar varios cordones, parar para dejar enfriar y reiniciar. En esta ocasión los sectores fueron de 4 o 5 cordones. En este caso también se desplazó la antorcha hacia atrás entre sectores para garantizar el solape.

Cuando ya habíamos conseguido estos parámetros, nos dispusimos a intentar recargar un cupón, como los anteriores. Por la mitad del recargue, el aspecto de los cordones se volvió muy malo y en ese momento descubrimos que la bobina estaba mal hilada y eso estaba provocando problemas de alimentación que repercutían sobre el aspecto de los cordones. Decidimos parar el recargue, porque el aspecto de los cordones era muy malo (se habían formado acumulaciones de material en forma de bola y zonas sin material) por lo que no era factible la reparación. Acto seguido cambiamos la bobina por otra e iniciamos de nuevo el recargue.

El aspecto final era bastante bueno, salvo en algunos cordones en los que el sistema AVC parecía no estar respetando el voltaje definido y no había contaminación en el electrodo. Todavía no se conocen las causas de este fallo, pero se piensa que puede deberse al hecho de que la conductividad del material base y la del material de aporte es muy distinta y eso acaba afectando al control del voltaje. Para intentar corregir las irregularidades en estos cordones se han hecho algunos cordones con TIG sin aporte en las zonas afectadas. Algunos pequeños tramos quedaron con un déficit de material, por lo que se ha aportado más también con TIG en la misma máquina. Posteriormente se han amolado los cordones con sobreespesor, dejando un espesor recargado aproximadamente uniforme.

El aspecto de este tubo una vez reparado, amolado y cortado es el que se muestra en la Figura 47. Posteriormente se ha enviado al departamento de ensayos. Los resultados obtenidos se incluirán en el apartado 5 de este trabajo.

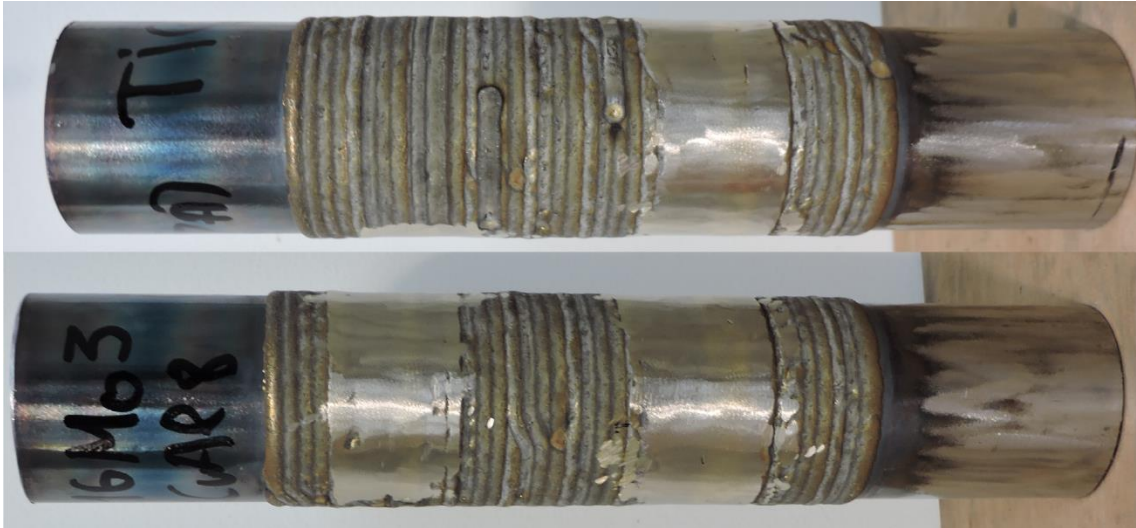


Figura 47: Aspecto del tubo de 16Mo3 recargado con SG CuAl8 mediante TIG con aporte de hilo frío

5. Resultados

El propio Centro Tecnológico Aimen cuenta con personal cualificado para la realización de los distintos ensayos requeridos para comprobar la calidad de los recargues. A todos los cupones, antes de ensayarlos por cualquier otra técnica, se les ha sometido a Inspección Visual (según ISO 17637 y según QW-194), test superado por todos ellos. A continuación se les ha realizado el ensayo por Líquidos Penetrantes (según ISO 3452 y QW-195) para buscar defectos superficiales. Si los cupones superaban este ensayo, se sometían a análisis químico (según QW-453) y doblado lateral transversal (según ISO 5173 y QW-160). La superación de estos ensayos permite cualificar el procedimiento según el código ASME. Sin embargo, la normativa europea es más estricta y exige, además de estos ensayos, la realización de macrografías (según norma ISO 17639) y del ensayo de dureza Vickers (según ISO9015-1).

En este caso, el análisis químico es necesario debido a que la finalidad de los recargues es la de resistir la corrosión. Se realiza según un procedimiento interno de Aimen, que comprueba que la composición del material aportado se mantenga dentro del rango deseado.

Si estos cupones no superaban el ensayo de líquidos penetrantes podían o bien repararse y someterse de nuevo al ensayo, o bien desecharse en caso de considerar no viable la reparación. De cualquier modo, si estos cupones superan los ensayos tras haber necesitado reparación, no permiten la cualificación del procedimiento, siendo necesario recargar un nuevo cupón.

Los resultados obtenidos en los distintos cupones son:

5.1. Cupón 1: SG CuSi3 – 16Mo3 (CMT)

Pese a que el aspecto superficial del recargue era bueno, al someter el cupón al ensayo por líquidos penetrantes se revelaron una serie de defectos que indican faltas de fusión, como se puede observar en la Figura 48. Se produjeron faltas de fusión en todos los inicios de sector. Este es uno de los motivos por los que consideramos que el CMT no es apto para aplicar recargues que involucren materiales tan distintos (aleación de cobre – acero para altas temperaturas). Consideramos que no tiene sentido intentar recargar este acero u otros similares con aleaciones de cobre por CMT, al menos si las condiciones son las mismas que se han empleado en este caso.

A la vista de los resultados, no ha lugar a intentar reparar el cupón ni se va a intentar volver a soldar por CMT esta pareja de materiales, ya que el problema no está en los parámetros de soldeo, sino en la incompatibilidad de los materiales. Si se deseara aportar este material sobre un acero similar al 16Mo3 que hemos empleado, mediante CMT, se debería tener la precaución de aplicar un recargue intermedio con un material afín al material de aporte y al de base. También se podría optar por cambiar de proceso y emplear, por ejemplo, el soldeo TIG.



Figura 48: Indicaciones de defectos reveladas mediante el ensayo de líquidos penetrantes en el cupón 1

Este primer cupón de ensayo se rechaza, por lo que la cualificación del procedimiento en este caso ha sido fallida.

5.2. Cupón 2: ER 347Si – P22 (CMT)

Como se había indicado anteriormente, este tubo se envió para ensayar tras haber realizado sobre él una reparación. Al someter este tubo recargado al ensayo por líquidos penetrantes, aparecen una serie de indicaciones lineales en las zonas reparadas (véase Figura 49), que impiden que el cupón supere el ensayo. Para intentar corregir estos defectos de la reparación anterior, se decide repararlos manualmente mediante TIG. El aspecto final tras esta segunda reparación se muestra en la Figura 50. Después de esta reparación, el cupón superó satisfactoriamente el test de líquidos penetrantes y se extrajeron de él varias probetas que se sometieron a doblado lateral transversal, superando la prueba con éxito. Con las probetas dobladas se corrobora la buena unión entre material de aporte y material base y se comprueba que los dos materiales unidos no forman una unión metalúrgica frágil.



Figura 49: Indicaciones lineales en el ensayo de líquidos penetrantes del cupón 2.

Aunque tras la reparación, el cupón supere todos los ensayos (como ha sido el caso), no servirá para cualificar el procedimiento de soldeo, debido a que el código ASME y la norma ISO no admiten reparaciones en los procedimientos. Si se desea cualificar este procedimiento, se deberá volver a soldar otro cupón con los mismos parámetros pero esta vez libre de defectos. Está previsto que esto se realice más adelante, una vez que se disponga del sistema de refrigeración adecuado.



Figura 50: Aspecto del cupón 2 tras ser reparado mediante TIG manual

5.3. Cupón 3: ER 307 - P22

Este cupón de ensayo presentaba buen aspecto, a excepción de ligeras imperfecciones en los cráteres de cada sector (ligeramente hundidos) y en los solapes entre sectores (ligero sobreespesor). Al someter el tubo recargado al ensayo por líquidos penetrantes no se reveló ninguna indicación, como se puede observar en la Figura 51, por lo que el tubo ha superado satisfactoriamente esta prueba.

Posteriormente se extrajeron varias probetas de este cupón para someterlas al ensayo de doblado, cuyo resultado ha sido satisfactorio, como también lo ha sido el resultado del análisis químico.



Figura 51: Ausencia de indicaciones en el ensayo de líquidos penetrantes del cupón 3

La superación de estos ensayos ha conducido a la obtención de la cualificación del procedimiento de soldeo, según ASME (PQR: *Procedure Qualification Record*). Al superar los ensayos de dureza y el ensayo macrográfico se ha conseguido cualificar también según ISO (WPQR: *Welding Procedure Qualification Record*), alcanzando con este cupón el objetivo propuesto.

En la Figura 52 se muestra el detalle de una macrografía practicada a este cupón sobre la que se señalan las huellas del barrido de durezas realizado. La superficie ha sido atacada con Kalling.

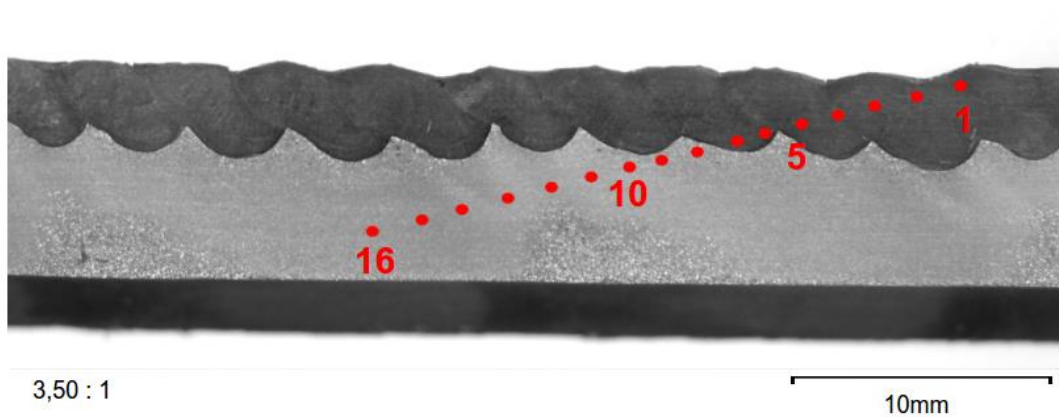


Figura 52: Detalle de la macrografía realizada al Cupón 3 con las marcas proximas de las indentaciones para el barrido de durezas

Los valores de dureza obtenidos en esas indentaciones son los recogidos en la Tabla 8, todos ellos inferiores al límite admitido por la norma para este grupo de materiales.

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valor dureza HV5	170	164	174	173	186	173	170	258	280	279	288	248	220	228	207	173

Tabla 8: Resultado barrido de durezas

5.4. Cupón 4: 309LSi – P22

Se ha sometido este cupón al ensayo de líquidos penetrantes. El resultado fue satisfactorio, ya que no se detectaron defectos superficiales de ningún tipo, como se observa en la Figura 53.



Figura 53: Ausencia de indicaciones en el ensayo de líquidos penetrantes sobre el cupón 4

Tras este ensayo, la probeta ha superado el de doblado lateral transversal y el análisis químico, por lo que se ha obtenido la cualificación del procedimiento de soldadura para este cupón según el código ASME IX. A continuación se realizaron el análisis macrográfico y el barrido de durezas, necesarios para cualificar el procedimiento de recargue según la norma europea.

En la Figura 54 se indican, sobre el detalle de la macrografía realizada al Cupón 4, los puntos donde se ha medido la dureza. A continuación, la Tabla 9 recoge los valores de dureza obtenidos. Todos estos valores son sobradamente inferiores a los máximos admitidos para superar el ensayo.

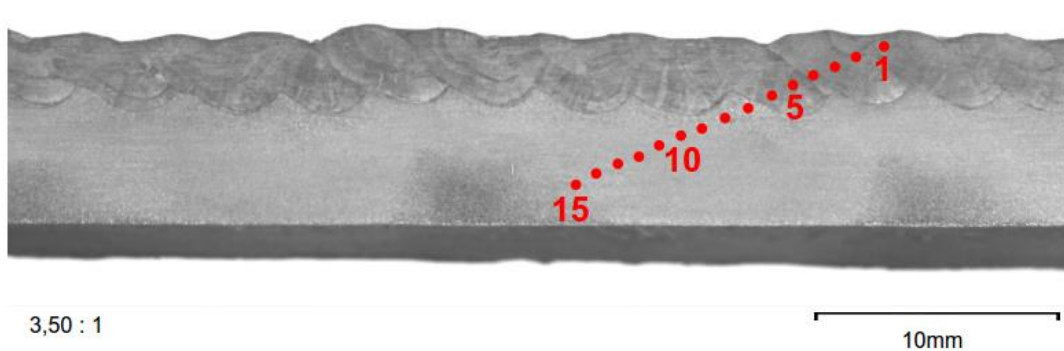


Figura 54: Marcas de las indentaciones practicadas para medir dureza sobre una imagen de detalle de una macrografía realizada al Cupón

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor dureza HV5	186	194	191	191	236	237	268	311	329	332	319	320	283	246	239

Tabla 9: Resultados del barrido de durezas realizado al Cupón 4

En la Figura 55 se muestra el aspecto de las probetas extraídas de este cupón tras ser sometidas al ensayo de doblado lateral transversal.



Figura 55: Probetas del Cupón 4 tras ser sometidas al ensayo de doblado

5.5. Cupón 5: 347Si - P22

El cupón ha superado los ensayos de inspección visual, líquidos penetrantes, doblados laterales, análisis químico, análisis macrográfico y ensayo de durezas. Sin embargo, por haberse practicado una ligera reparación sobre él, no se puede cualificar el procedimiento de recargue en este cupón, ni por ASME ni por ISO. Para cualificar el procedimiento sería necesario recargar de nuevo otro cupón en las mismas condiciones, sin efectuar ninguna reparación, y que este superase los ensayos pertinentes. Es posible que este nuevo recargue se realice cuando se disponga del sistema de refrigeración. De todos modos, aunque no se han obtenido las cualificaciones, se considera que el recargue de este cupón nos ha aportado el conocimiento suficiente sobre técnica y parámetros.

En la Figura 56 se muestra el resultado del ensayo por líquidos penetrantes, superado satisfactoriamente, sin ninguna indicación.



Figura 56: Resultado del ensayo por líquidos penetrantes en el cupón 5

5.6. Cupón 6: SG CuAl8 - 16Mo3

En el momento de finalización de mi estancia en Aimen, este cupón se había ensayado por líquidos penetrantes, revelándose algunos pequeños defectos en los cráteres de cada sector. Próximamente se procederá a reparar manualmente mediante TIG para intentar que desaparezcan estos defectos. Si esto se consiguiese, se realizarían pruebas de doblados laterales y análisis químico, con el fin de conocer si la

unión ha sido satisfactoria y si la calidad del material depositado es la perseguida. Aun superándose estos ensayos, este cupón no conducirá a la cualificación del procedimiento por haber sido reparado. Si se desea obtener tal cualificación, se deberá efectuar un recargue libre de defectos y sin reparaciones.

6. Conclusiones

En este trabajo se han realizado recargues por soldeo Hot Wire-TIG sobre tubos de acero P22 empleando como materiales de aporte distintos aceros inoxidables. También se han depositado otros recargues sobre acero 16Mo3 con aleaciones de cobre como materiales de aporte.

Tras el análisis de los resultados se pueden enumerar las siguientes conclusiones relativas a los procesos y a los materiales:

- I. El soldeo CMT es apto para la aplicación de recargues siempre y cuando los materiales involucrados sean soldables entre sí. Es especialmente interesante por su relativo bajo aporte térmico a la soldadura aunque se debe tener en cuenta la necesidad de un posible precalentamiento del material base, así como las necesidades de refrigeración, siendo deseable no tener que hacer paradas durante las cuales pueden aparecer defectos.
- II. El soldeo TIG, en su modalidad con corriente pulsada, es adecuado para recubrir con un metal la superficie de otros, porque el empleo de estos pulsos de corriente disminuye el *heat input* con respecto al TIG sin pulsar. En ocasiones puede ser conveniente aportar el material en caliente (Hot Wire-TIG) para disminuir aún más el aporte térmico, pero debe comprobarse siempre el comportamiento del hilo ante este calentamiento.

En cuanto al comportamiento de los materiales involucrados en este trabajo, podemos concluir que:

- I. Recargar acero 16Mo3 con hilo ER CuSi3 mediante CMT sin precalentamiento conduce a la aparición de faltas de fusión, por lo que se deduce que probablemente este no sea el proceso más adecuado para el recargue de materiales tan distintos (acero para altas temperaturas – aleación de cobre) y se estima que este hecho puede ser extrapolable a otros materiales similares.
- II. Creemos que si se incorporase refrigeración podría ser posible soldar con CMT toda la longitud necesaria de tubo (150mm) sin hacer paradas y, por lo tanto, sin arriesgarse a que se produzcan errores en paradas y reinicios.
- III. Un ligero precalentamiento junto con una buena refrigeración puede ayudar a que los parámetros CMT funcionen bien desde el inicio y se mantengan, si se logra mantener la temperatura del material base constante (en un cierto rango).
- IV. El posicionamiento adecuado de la antorcha entre cordones es crítico tanto en CMT como en TIG. Si este no se realiza correctamente, el cordón no tendrá buen aspecto porque los parámetros de soldeo no están hallados para configuraciones de la zona a soldar distintas.

- V. En los recargues mediante TIG, los tres aceros inoxidables empleados como materiales de aporte (ER 347Si, 309LSi y ER 307) produjeron uniones de calidad con el acero base P22.
- VI. El protocolo de disminución del paso entre sectores ha dado resultados satisfactorios. Con esta bajada del paso se compensa el menor ancho del primer cordón de cada sector debido a que el material de aporte se deposita sobre un material base a menor temperatura que en los cordones siguientes.

7. Referencias

1. *Coal-fired power materials*. **Vis Viswanathan, Robert Purgert, Patricia Rawls**. August 2008, s.l. : Advanced Materials & Processes. part I.
2. *Gamma phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel*. **Shing-Hoa Wang, Po-Kay Chiu, Jer-Ren Yang, Jason Fang**. 420, Taipei, Taiwan : Materials Science and Engineering , 2006, Vol. A.
3. *Parametric Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Processes by Using Factorial Design Approach*. **C Prabakaran, P venkatachalam, K Suresh Kumar and K Lenin**. Tamil Nadu, India : Journal of Scientific & Industrial Research , 2014, Vol. 73.
4. *Parametric Optimization of TIG welding of Galvanized Steel with AA1050 using Taguchi Method*. **J. Pasupathy, V. Ravisankar, C. Senthilkumar**. 5, Tamilnadu, India : International Journal of Science and Research (IJSR), 2012, Vol. 3.
5. *Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method*. **M. Yousefieh, M. Shamanian, A. Saatchi**. Isfahan, Iran : Journal of Alloys and Compounds, 2011, Vol. 509.
6. *Numerical investigation of weld pool behaviors and ripple formation for a moving GTA welding under pulsed currents*. **J.W.Liu, Z.H.Rao, S.M.Liao, H.L.Tsai**. Hunan, China : International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, Vol. 91.
7. *Optimization of pulsed GT Awelding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets*. **P.K.Giridharan & N.Murugan**. Tamil Nadu, India : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, Vol. 40.
8. *Weld Cladding with Austenitic Stainless Ateel for imparting Corrosion Resistance*. **Biswajit Khara, Nanda Dulal Mandal, Anindya Sarkar, Mithun Sarkar, Bhaskar Chakrabarti & Santanu Das**. 1, West Bengal, India : Indian Welding Journal, 2016, Vol. 49.
9. *Characteristics of multi-element alloy cladding produced by TIG process*. **Jie-Hao Chen, Pei-Hsing Hua, Pei-Nung Chen, Chia-Ming Chang, Ming-Che Chen, Weite Wu**. Taichung, Taiwan : Materials Letters, 2008, Vol. 62, págs. 2490–2492.
10. *Microstructure and wear properties of multicomponent alloy cladding formed by gas tungsten arc welding (GTAW)*. **J.H.Chen, P.N.Chen, C.M.Lin, C.M.Chang, Y.Y.Chang, W.Wu**. Taichung, Taiwan : Surface & Coatings Technology, 2009, Vol. 203.
11. *Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process*. **Abbas Eghlimi, Morteza Shamanian, Keyvan Raeissi**. 244, Isfahan, Iran : Surface & Coatings Technology, 2014.

12. *Development of a flexible robotic welding system for weld overlay*. **Jair Carlos Dutra, Nelso Gauze Bonacorso, Regis Henrique Gonçalves e Silva, Renon Steinbach Carvalho, Fernando Costenaro Silva**. 24, Florianópolis, Brasil : Mechatronics, 2014.
13. *Advanced Gas Tungsten Arc Weld Surfacing Current Status And Application*. **Stephan Egerland, Johannes Zimmer, Roland Nussbaumer, Gerhard Posch, Bernd Rutzinger**. 3, Wels, Austria : Soldagem & Inspeção, 2015, Vol. 20.
14. *Visualisation of alternating shielding gas flow in GTAW*. **I. Bitharas, S. W. Campbell, A. M. Galloway, N. A. Mc Pherson, A. J. Moore**. 91, s.l. : Materials and Design, 2016.
15. *Research on Gas Tungsten Arc Welding of Stainless Steel - An Overview*. **D. Devakumar, D.B Jarabaraj**. 1, Chennai, India : International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014, Vol. 5.
16. *Welding processes for wear resistant overlays*. **Patricio F. Mendez, NAirn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi Gol, Gentry Wood**. 16, Edmonton, Alberta, Canada : Journal Of Manufacturing Processes, 2013.
17. *Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding*. **C.G. Pickin, S.W. Williams, M. Lunt**. 211, Bedfordshire, England, United Kingdom : Journal of Materials Processing Technology, 2010.
18. *Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products*. **Robert Talalaev, Renno Veinthal, Andres Laansoo and Martin Sarkans**. 3, Tallinn (Estonia) : Estonian Journal of Engineering, 2012, Vol. 18.
19. **Riesco, Germán Hernández**. *Manual del soldador*. 16^a. s.l. : CESOL, 2006.
20. Diweld welding. [En línea] <http://www.diweld.com/#!clases-de-transferencia-por-arco-en-sold/cy1>.
21. Wikipedia. [En línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_MIG/MAG#Transferencia_del_metal.
22. *Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy*. **C. G. Pickin and K. Young**. 4, Coventry (UK) : Science and Technology of Welding and Joining, 2006, Vol. 11.
23. Fronius.es. [En línea] http://www.fronius.es/cps/rde/xchg/SID-D7D226E1-61301D1A/fronius_espana/hs.xsl/8403_11258.htm#.V2mlh6JWIYo.
24. **Henon, Barbara K**. Arc MACHines. [En línea] <http://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>.

25. Federal Steel Supply Inc. [En línea] <http://www.fedsteel.com/products/alloy-pipe-and-tube/astm-a335-chrome-moly-pipe.html>.
26. **International, ASTM**. Specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high temperature service. SA-335. 2004.
27. Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy steel boiler, superheater and heat-exchanger tubes. A 213.
28. **AENOR**. Tubos sin soldadura para usos a presión. Condiciones técnicas del suministro. UNE-EN 10216-2. 2014.
29. **Mittal, Arcelor**. sections.arcelormittal.com/. [En línea] <http://sections.arcelormittal.com/es/productos-y-servicios/gama-de-productos/calidades-de-acero.html>.
30. Catálogo general OERLIKON. s.l. : OERLIKON.
31. **ELECTRIC, LINCOLN**. Catálogo de consumibles Lincoln Electric.
32. **SANVIK**. 18.8.Mn Welding Wire Datasheet.
33. **ESAB**. Catálogo de productos.
34. **AENOR**. Soldaduras. Posiciones de trabajo. Definición de los ángulos de pendiente y de rotación. Norma UNE-EN ISO 6947. 2011.
35. Soldeo y corte por arco. Electrodo de wolframio no consumibles. Clasificación. UNE-EN ISO 6848. 2015.
36. **ARC PRODUCTS, (A Lincoln Electric Company)**. AVC-5 ARC VOLTAGE CONTROL OPERATIONS AND SERVICE MANUAL. San Diego : s.n., 2011.
37. **CESOL**. Apuntes del Máster en Soldadura y Tecnologías de Unión.
38. *Development of Hot Wire TIG Welding Methods Using Pulsed Current to Heat Filler Wire*. Katsuyoshi Hori, Hiroshi Watanabe, Toshiharu Myoga, Kazuki Kusano. 3, s.l. : QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, 2003, Vol. 21.