

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo:

Influencia del tipo de gas de protección en la soldadura semiautomática de aceros inoxidable para uso a altas temperaturas

Carlos Escobar González

Entidad colaboradora: Praxair España S.L.U.

Tutor industrial o externo: Antonio Calleja Palacio

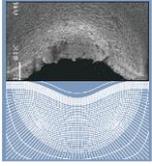
Departamento: Operaciones

Tutor académico: Cristina Rodríguez González

Departamento: Construcción e Ingeniería de Fabricación

Universidad de Oviedo

Julio 2016



***Master interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo:

***Influencia del tipo de gas de protección en la soldadura semiautomática
de aceros inoxidable para uso a altas temperaturas***

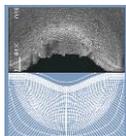
*Antonio Calleja
Palacio*

*Cristina Rodríguez
González*

*Carlos Escobar
González*

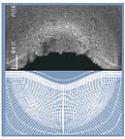
Universidad de Oviedo

Julio 2016

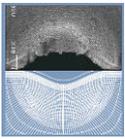


ÍNDICE

1	Introducción	3
1.1	Objetivo del proyecto	4
1.2	Alcance del proyecto	4
2	Proceso del soldeo.....	4
2.1	Soldadura por arco eléctrico protegido por gas.....	4
2.1.1	Soldeo TIG	6
2.1.2	Soldeo por plasma (PAW)	7
2.1.3	Soldeo MIG/MAG	8
2.2	Parámetros de soldeo.....	9
2.2.1	Modos de transferencia	12
2.3	Gases de soldadura.....	16
2.3.1	Argón.....	19
2.3.2	Helio	20
2.3.3	Dióxido de carbono.....	21
2.3.4	Oxígeno.....	22
2.3.5	Hidrógeno.....	22
2.3.6	Nitrógeno.....	22
2.3.7	Mezclas de gases.....	23
2.4	Selección del gas de protección	25
3	Selección del gas de protección para soldadura semiautomática de acero inoxidable para uso a altas temperaturas.....	30
4	Procedimiento experimental.....	32
4.1	Ensayos de soldaduras protegidas con Argón	33
4.1.1	Cordón de recargue.....	33
4.1.2	Soldadura en ángulo.....	34
4.1.3	Soldadura horizontal.....	36
4.1.4	Soldadura plana	37
4.2	Ensayos de soldadura protegida con Helistar SS	40
4.2.1	Cordón de recargue.....	40
4.2.2	Soldadura en ángulo.....	41
4.2.3	Soldadura en horizontal.....	42



4.2.4	Soldadura plana	43
4.3	Comparativa y conclusiones	45
4.3.1	Conclusiones	49
5	Presupuesto	50
5.1	Coste de material	50
5.2	Coste mano de obra directa	50
5.3	Coste de puesto de trabajo y mano obra indirecta	50
5.4	Coste ensayos	50
5.5	Coste ingeniería	51
5.6	Coste total del proyecto	51
6	Bibliografía	52
6.1	Libros	52
6.2	Apuntes	52
6.3	Normativa	52



1 Introducción

La soldadura es el proceso de unión fija entre dos piezas metálicas más utilizado en la mayoría de los sectores productivos como la industria naval, automoción o la construcción. Existen gran cantidad de técnicas de soldeo pero, sin duda, las más utilizadas son las técnicas de soldeo por arco eléctrico.

Durante el proceso de soldeo por arco eléctrico, se alcanzan temperaturas muy altas, pudiendo superar los 3000°C. Los metales a altas temperaturas tienden a oxidarse rápidamente y además pueden reaccionar con los contaminantes presentes en la atmósfera. Para evitar esto, los procesos de soldeo por arco eléctrico necesitan que se cree una atmósfera libre de contaminantes alrededor del baño de fusión, utilizándose para ello los gases de protección. Además, estos gases facilitan la transferencia de material ya que, al ionizarse, favorecen la formación del arco eléctrico.

Pero no todos los gases de protección actúan de la misma manera. Cada gas posee unas propiedades físicas únicas que pueden afectar de forma importante a la velocidad de soldeo y a la calidad de la soldadura.

Cuando se consideran todos los gastos de la operación de soldadura, es necesario tener en cuenta cómo afecta la selección del gas al coste general. En la Figura 1 se puede observar como el coste del gas de soldadura es aproximadamente un 5% del coste total de la operación de soldadura.

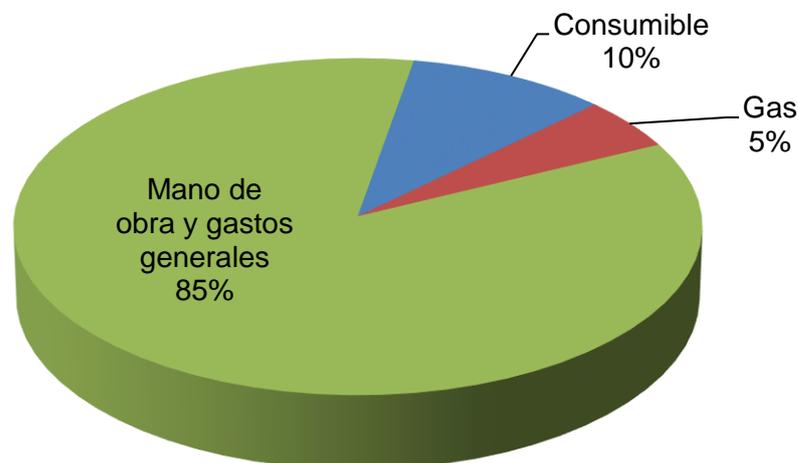
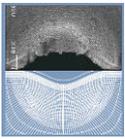


Figura 1: Costes de soldadura

Sin embargo, la selección de un gas de soldadura más apropiado en función del proceso tendrá un fuerte impacto sobre la productividad, traduciéndose en un ahorro en trabajo y mano de obra de entre un 10 y un 20%, además de mejorar las propiedades de la soldadura.



Para conseguir esto, es necesario que el usuario tenga buen conocimiento de cómo afecta cada gas al proceso de soldadura, para así poder seleccionar el más adecuado.

1.1 Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto es explicar cómo afectan los diferentes gases de protección de la soldadura a las técnicas de soldeo por arco eléctrico, haciendo especial hincapié en la soldadura semiautomática de aceros inoxidable para uso a altas temperaturas y, mediante un ejemplo de aplicación directa, demostrar los efectos beneficiosos de un gas con unas propiedades que optimicen el proceso frente a un gas de protección genérico.

1.2 Alcance del proyecto

En el presente proyecto se expondrá una breve explicación de los procesos de soldadura por arco eléctrico, su principio de funcionamiento y los parámetros a controlar más importantes, así como la importancia del gas de protección. A continuación, se explicarán los efectos de los diferentes gases utilizados en la protección de la soldadura, así como de sus mezclas y se crearán unas tablas de apoyo para la selección del gas de protección más apropiado en cada aplicación.

Por último, se resolverá un caso de aplicación real de selección del gas de protección, realizando además unos ensayos caracterizadores con los que se mostrarán las diferencias en una soldadura realizada con un gas apropiado y con uno que no lo es.

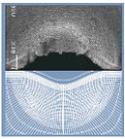
2 Proceso del soldeo

Se denomina soldeo al proceso por el cual se unen dos o más piezas con el objetivo de establecer una continuidad entre ellas, bien sea con o sin calentamiento de las mismas, con o sin aplicación de presión y con o sin aportación de material.

Dentro de la variedad de técnicas de soldeo existentes, en la industria actual las más utilizadas son las de soldeo por fusión, como la soldadura por oxigas, por resistencia eléctrica... pero las más utilizadas son las técnicas de soldeo por arco eléctrico. Por ello, se explican a continuación los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión de su funcionamiento.

2.1 Soldadura por arco eléctrico protegido por gas

El arco eléctrico es una descarga eléctrica que se produce entre dos materiales conductores separados por un gas y con una diferencia de potencial entre ambos. Los materiales conductores se denominan electrodos, siendo el ánodo el positivo y el cátodo el negativo. El gas que se encuentra entre los dos electrodos se denomina plasma. Durante la descarga, los electrones se mueven del



cátodo al ánodo y, a su vez, hay iones positivos que se mueven en dirección contraria. Cuando se produce un choque entre los electrones y los iones positivos se liberan gran cantidad de luz y calor. Este calor es utilizado para fundir las piezas a soldar en los procesos de soldeo por arco eléctrico.

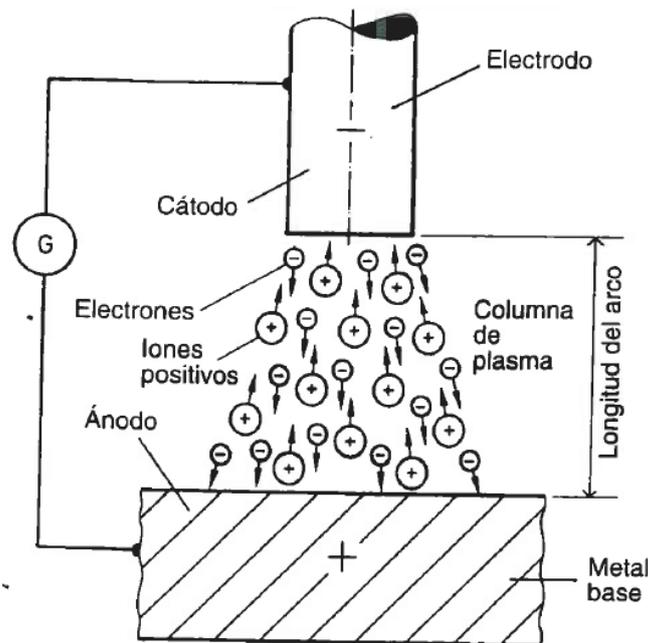
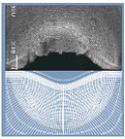


Figura 2: Descripción del arco eléctrico

Para que se produzca el fenómeno del arco eléctrico, es necesario que el gas que se encuentra en la columna de plasma pase de ser prácticamente aislante, como lo es en condiciones normales, a conductor. Para ello, se tiene que producir la separación de sus átomos en iones y electrones mediante el proceso de ionización. La ionización se consigue mediante el bombardeo de electrones desde uno de los electrodos al gas. Cuando un gas está total o parcialmente ionizado se denomina plasma.

En estado normal, los átomos de un gas tienen igual número de electrones que de protones, sin embargo, a una temperatura muy elevada se puede conseguir que uno o varios de sus electrones se separen del átomo, dejando atrás un ión positivo.

Para que se produzca el bombardeo de electrones desde uno de los electrodos al gas, es necesario suministrarle la energía suficiente. El procedimiento más sencillo es calentar el electrodo a una temperatura muy elevada y para ello, el método más utilizado para iniciar el arco es realizar un cortocircuito entre la pieza y el electrodo, es decir, hacer que se produzca contacto entre los dos conductores, de manera que se produce un calentamiento muy fuerte en el extremo del electrodo negativo al pasar una corriente muy elevada.



Una vez establecido el arco y el gas se ha convertido en plasma, sólo se necesitan unos pocos voltios para mantener el arco. Los electrones van del cátodo al ánodo y los iones del plasma se dirigen hacia el cátodo al que ceden su energía cinética, que se transforma en calor. Así, se mantiene la temperatura en el cátodo para que siga emitiendo electrones y no se pierda el arco eléctrico hasta que se separen los electrodos.

A continuación, se describen las principales técnicas de soldeo cuyo principio de funcionamiento se basa en el arco eléctrico y que necesitan el aporte de un gas de protección.

2.1.1 Soldeo TIG

Se trata de un procedimiento de soldeo por arco eléctrico en el que el arco se produce entre el electrodo, que es de tungsteno, y el metal a soldar. Dado que la temperatura de fusión del tungsteno es superior a la temperatura alcanzada en el arco, el electrodo no se funde, es decir, no es consumible. Pero para que el electrodo de tungsteno no se degrade debido a las reacciones que puede haber con gases a muy altas temperaturas, es necesaria la presencia de un gas de protección que no reaccione con él, es decir, un gas inerte. De esta manera, para este procedimiento el gas debe proteger tanto el material fundido en la soldadura como el propio tungsteno del electrodo. Esto limita mucho la variedad de los gases que se pueden utilizar para este procedimiento, pudiendo ser éste únicamente Argón, Helio y, en pequeñas adiciones, Hidrógeno.

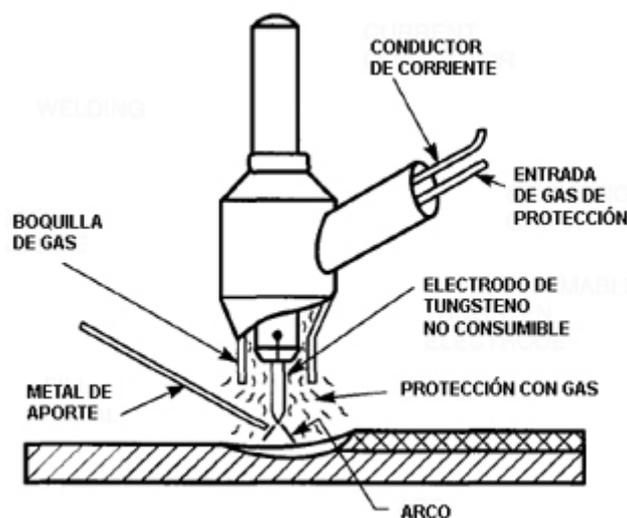
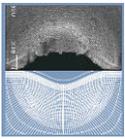


Figura 3: Soldeo TIG

Como se observa en la Figura 3, el electrodo se encuentra en el interior de un portaelectrodos que además, posee en el extremo una boquilla por la que se suministra el gas de protección. Se trata de un proceso que permite tanto el soldeo sin material de aporte como con él, suministrándose éste mediante una varilla independiente del grupo de soldar.



El soldeo TIG es apto para todo tipo de soldaduras y materiales, obteniéndose soldaduras de alta calidad, aunque no es recomendable para grandes espesores, ya que se trata de un proceso en que la deposición de material es baja y se necesitarían muchas pasadas.

2.1.2 Soldeo por plasma (PAW)

La soldadura por arco de plasma (PAW) se puede considerar un proceso TIG evolucionado. Básicamente, el proceso consiste en un arco cónico similar al TIG, pero que se inicia en el interior de la boquilla. Esta boquilla tiene un diseño especial que permite estrangular y constreñir fuertemente el arco saliendo de la boquilla en forma de columna, como se observa en la Figura 4, dando como resultado un arco más largo y enfocado que el del proceso TIG.

Dado que el arco está más concentrado, presenta un mayor voltaje y una gran cantidad de ionización del gas, produciendo un intenso plasma. El plasma generado presenta unas temperaturas muy elevadas, del orden de los 11.000°C, y su zona más caliente se alarga y dirige hacia la pieza, dando como resultado una alta velocidad de corte y soldadura

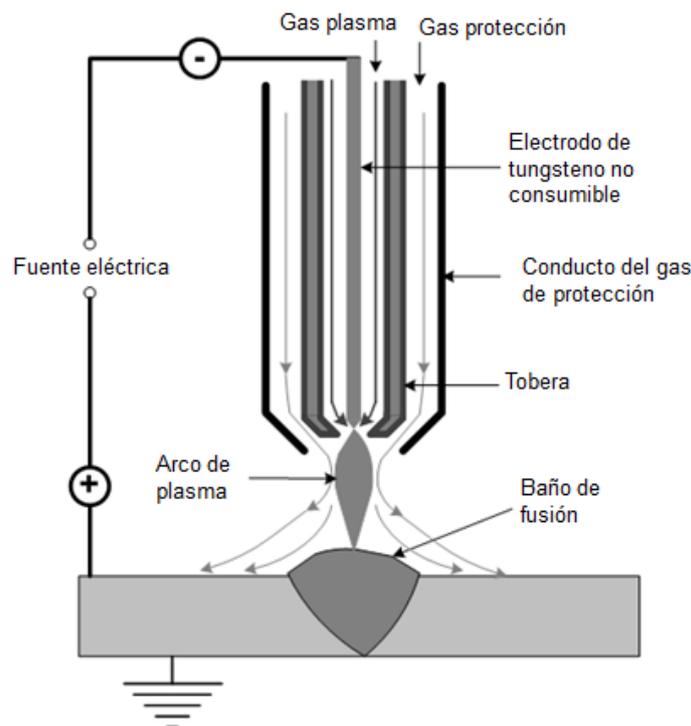
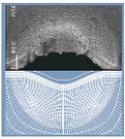


Figura 4: Soldeo por plasma

La configuración física del proceso plasma requiere el uso de dos gases, un gas "plasma" y un gas de protección que se suministra por un conducto exterior de la boquilla auxiliar. El rol principal del gas de plasma que sale del portaelectrodos por el orificio central, es controlar las características del arco y proteger el electrodo.

El soldeo por plasma se utiliza en los casos en los que el espesor del metal a soldar es muy grande, ya que proporciona mayores penetraciones que el soldeo por



TIG. Con la soldadura PAW se consigue una mayor estabilidad del arco, menor distorsión de la pieza, mayor velocidad de soldadura y unas mejores tolerancias en el cordón y en el corte. En función de la aplicación se puede utilizar el método Melt-in, con un arco más pequeño y concentrado, o el método Keyhole, más ancho y con penetración completa.

2.1.3 Soldeo MIG/MAG

También conocido como soldadura semiautomática o GMAW (Gas Metal Arc Welding), se trata de un proceso de soldadura por arco eléctrico en el que el arco se establece entre la pieza a soldar y un electrodo metálico consumible que se aporta de forma continua.

Se trata de un equipo de soldar más complejo que el TIG, como se aprecia en la Figura 5, ya que consta de un sistema de alimentación para el hilo metálico. Este sistema consta de una bobina de alambre del metal de aportación y de un sistema de rodillos que lo suministra a una velocidad constante. El alambre es de pequeño diámetro, entre 0,6 y 3,2 mm, macizo y desnudo.

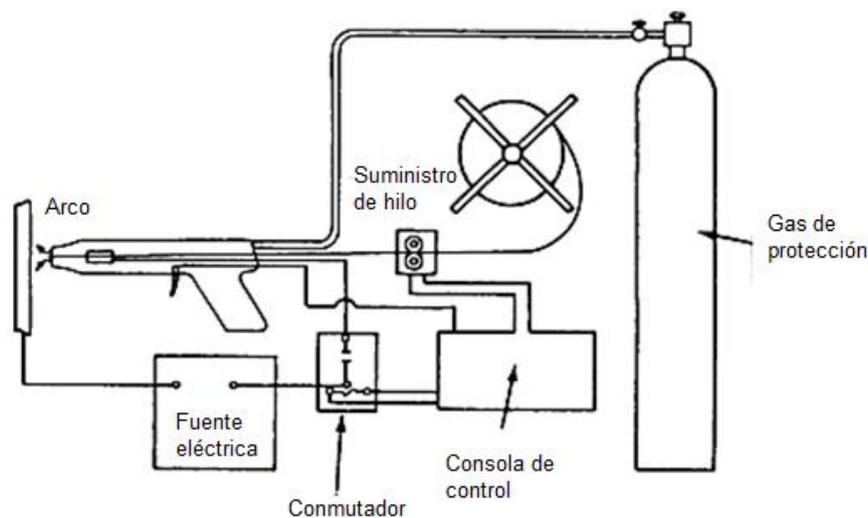
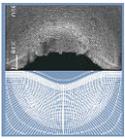


Figura 5: Soldeo MIG/MAG

Al igual que la soldadura TIG y PAW, en la soldadura semiautomática es necesario un gas de protección para evitar que la zona soldada entre en contacto con el oxígeno y los posibles contaminantes de la atmósfera, pero, al no tratarse de un electrodo de tungsteno que no debe deteriorarse, se permite la utilización de gases que reaccionen con los metales. Este tipo de gases se llaman activos y se refiere a todos los gases que reaccionan químicamente de alguna forma a la temperatura de arco. De esta manera se diferencia entre la soldadura MIG (Metal Inert Gas) que utiliza gases de protección inertes y el MAG (Metal Active Gas) que utiliza gases de protección activos. Una mezcla de gases es activa siempre que alguno de sus componentes lo sea y es inerte solo si todos sus componentes lo son.



2.2 Parámetros de soldeo

Para la correcta comprensión de cómo afectan los gases de protección al soldeo, es necesaria la explicación de los siguientes parámetros:

- Zonas características de una soldadura

En la Figura 6, se pueden identificar las partes más importantes en cuanto a terminología de una soldadura. En ella, podemos ver el metal base a soldar y el metal de aportación que se funden debido al arco formando el metal soldado. Este metal soldado se separa de la zona afectada térmicamente (ZAT) por la línea de fusión. La ZAT es la zona del metal base que se ve afectada por las temperaturas durante la operación de soldeo. En el metal soldado se distinguen la raíz, que es la parte más alejada del electrodo y la cara que es la más cercana. Cuando la soldadura no tiene una penetración completa, la penetración va desde el inicio del metal soldado en la cara hasta la parte más alejada en el metal soldado.

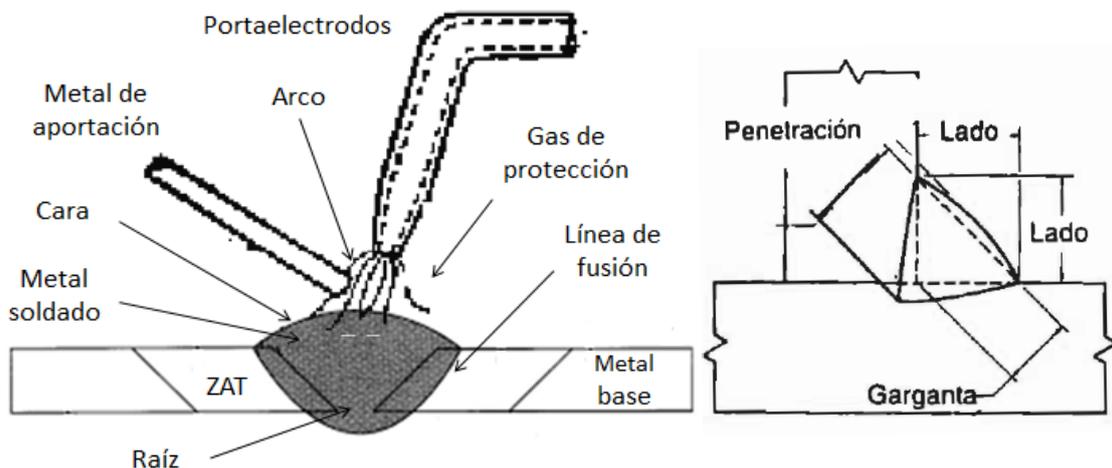


Figura 6: Zonas características de una soldadura

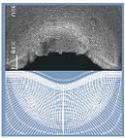
- Polaridad

Se refiere a la dirección del flujo de electrones en la soldadura por arco eléctrico. Dependiendo de la aplicación, sobretodo del metal a soldar, se aplicara una polaridad directa (cuando los electrones van del electrodo al metal base) o inversa (si los electrodos van del metal base al electrodo). Cuando se utilice una fuente de alimentación con corriente alterna este parámetro no tiene sentido.

- Tensión e intensidad

La intensidad se refiere al número de electrones que circulan por el circuito, y la tensión es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos del circuito.

El arco eléctrico se puede considerar como un material conductor gaseoso en el cual la relación entre su intensidad y voltaje se muestra en la Figura 7 y se



denomina “curva característica del arco”. Esta curva dependerá de la naturaleza del electrodo, metal base, gas de protección y de la longitud del arco.

Las fuentes de alimentación, típicamente tienen una curva característica con pendiente negativa. El punto donde se corta esta curva con la curva característica del arco es el punto de soldeo.

- Longitud del arco

La longitud del arco es la distancia entre el electrodo y la superficie del metal base. Esta longitud afecta a la posición de la curva característica del arco.

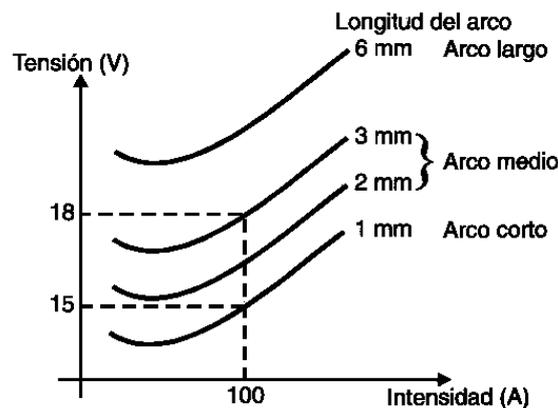


Figura 7: Curva característica del arco

- Stick out

El stick out es la longitud libre del electrodo desde el tubo de alimentación a la punta, es decir, es la porción de electrodo sin fundir que se extiende desde el arco hasta el tubo de contacto durante la soldadura. Esta variable es de especial importancia ya que de ser muy grande dificultaría la protección del gas. Además, el electrodo se calienta más, afectando a la intensidad de corriente, afectando también a la penetración y a la cantidad de proyecciones.

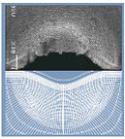
- Proyecciones

Las proyecciones son porciones del metal de aporte que no se han incorporado al baño de fusión, sino que han salido disparadas en direcciones aleatorias. El objetivo de una soldadura de calidad es disminuir estas proyecciones lo más posible ya que suponen un desperdicio de material.

- Velocidad de soldeo

La velocidad de soldeo es la cantidad de cordón de soldadura que se puede soldar en un tiempo determinado. Se suele medir en metros/hora.

La velocidad de soldeo depende, entre otros factores, de la tasa de deposición, que es la cantidad de material de aporte que se introduce en el baño



fundido dividido por unidad de tiempo (cm^3/hora) y de la velocidad de alimentación del alambre del material de aporte.

La intensidad está muy relacionada con la velocidad de alimentación del alambre, de forma que cuanto mayor es la velocidad de alimentación, mayor es la intensidad. La tasa de deposición también está muy relacionada con la intensidad: cuanto mayor es la intensidad, más rápidamente se producirá la fusión y, por tanto, la deposición.

- Heat input

El heat input es una fórmula muy utilizada para calcular la cantidad de calor transmitido a la pieza de trabajo.

$$\text{Aportación de calor} \left(\frac{\text{Julios}}{\text{cm}} \right) = \frac{\text{Amperios} \times \text{Voltios} \times 60}{\text{Velocidad de desplazamiento} \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right)}$$

Se refiere a la cantidad de calor que se le debe aportar a la pieza para soldar una unidad de longitud. Esta fórmula permite calcular la energía utilizada en el proceso y modificar las variables, por ejemplo, aumentando el voltaje cuando se disminuye la intensidad al cambiar el Stick out en un momento determinado.

La fórmula del heat input también puede ayudar a la elaboración de procedimientos de soldadura en los que se realizan configuraciones de unión y espesores similares, por ejemplo, en los procesos de soldadura automatizada.

- Distorsión térmica

Se refiere a la deformación del material base debido al calentamiento durante el proceso de soldeo. Es especialmente importante en materiales con alto coeficiente de dilatación térmico y se ve afectado por el heat input.

- Cebado y Estabilidad del arco

En la soldadura por arco eléctrico es importante mantener estabilidad en el arco cebándolo con el suficiente caudal de gas de protección.

- Posiciones de soldeo

Las 4 posiciones básicas de soldeo son las siguientes: en vertical, plana o sobremesa, horizontal o en cornisa y bajo techo y se muestran en la Figura 8.

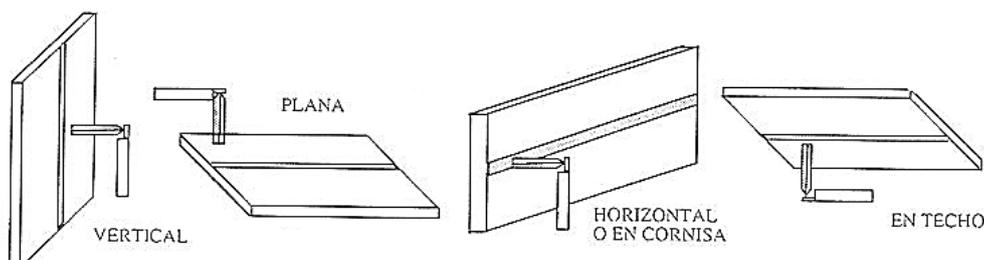
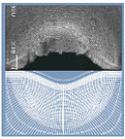


Figura 8: Posiciones de soldeo



Es importante conocer estas posiciones ya que, algunas técnicas de soldeo así como gases de protección son apropiadas para unas posiciones u otras.

2.2.1 Modos de transferencia

El modo de transferencia se refiere a la forma en la que el metal de aportación es depositado en el cordón. Es especialmente importante en la soldadura semiautomática ya que el gas de protección afecta al modo de transferencia que se va a conseguir, lo que dará como resultado una calidad del cordón u otra. En el proceso GMAW el modo de transferencia depende básicamente de la energía del proceso (V-I) y del gas de protección, pudiendo ocurrir la transferencia de las siguientes maneras:

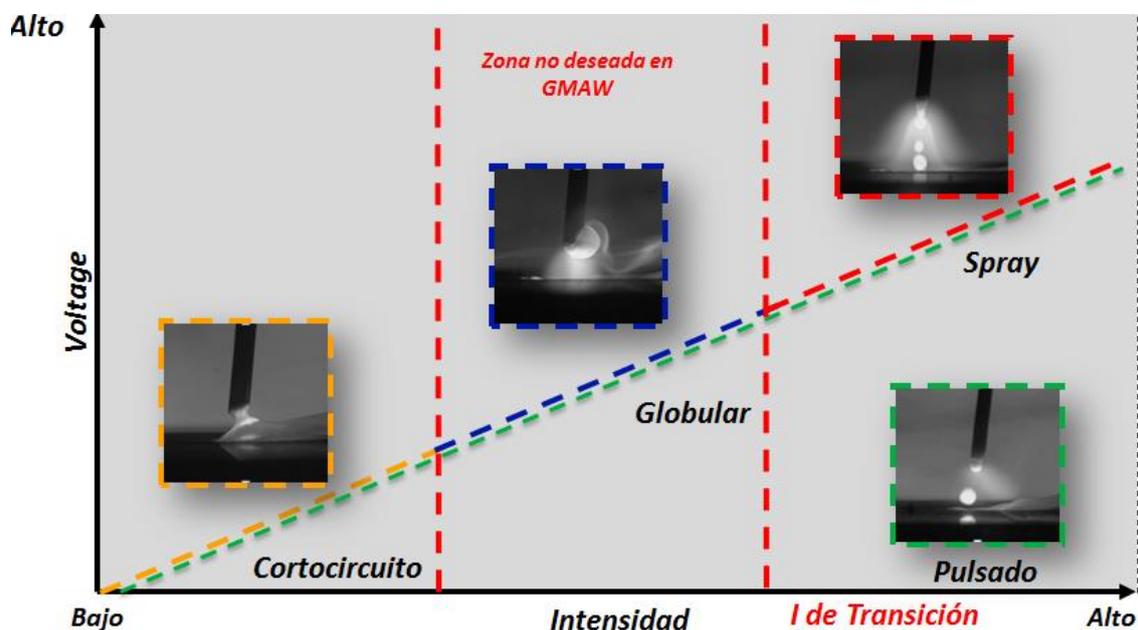


Figura 9: Modos de transferencia en función de la energía del proceso (V- I)

2.2.1.1 Arco corto o cortocircuito

El arco corto es el modo de transferencia en el que el electrodo consumible se deposita durante un número de cortocircuitos. En modo cortocircuito, la transferencia metálica ocurre cuando el hilo entra en contacto directo con el baño de fusión. Para este modo de transferencia, la velocidad de alimentación del hilo es mayor que la velocidad de fusión del mismo, de manera que el hilo penetra en el baño de fusión, momento en el que se apaga el arco y se genera un cortocircuito. Al producirse esto, la corriente sube de forma brusca, calentando el hilo, plastificándolo y desprendiéndose una gota de un diámetro inferior al hilo que se aporta al baño de fusión y en ese momento se reinicia el arco. Esta secuencia sucede entre 50 y 250 veces por segundo.

Dado que en este modo de transferencia el tiempo del arco es reducido, el heat input neto aportado en el proceso es bajo, y la profundidad de la zona fundida mínima.

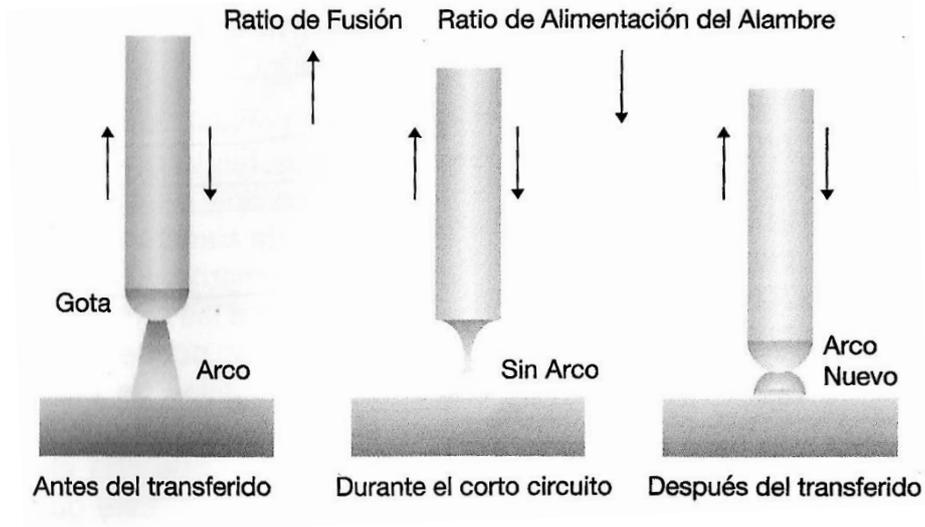
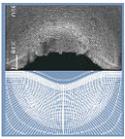


Figura 10: Transferencia por cortocircuito

Debido a las características de heat input bajo, el proceso produce un baño de fusión pequeño, que solidifica rápidamente, haciéndolo ideal para soldar en todas las posiciones. La transferencia por cortocircuito también es adecuada cuando se desea una baja distorsión térmica.

Como inconvenientes, destaca su baja productividad y el elevado nivel de proyecciones debido a la brusca transferencia que se produce en el momento del cortocircuito.

2.2.1.2 Transferencia globular

El modo globular se caracteriza porque las gotas transferidas son de gran tamaño, aproximadamente de 2 a 4 veces mayor que el diámetro del electrodo. Este modo de transferencia ocurre cuando la corriente y el voltaje del arco están en niveles intermedios entre el cortocircuito y el spray. La transferencia globular puede ocurrir con todo tipo de gases de protección, pero el dióxido de carbono CO_2 lo favorece de manera especial.

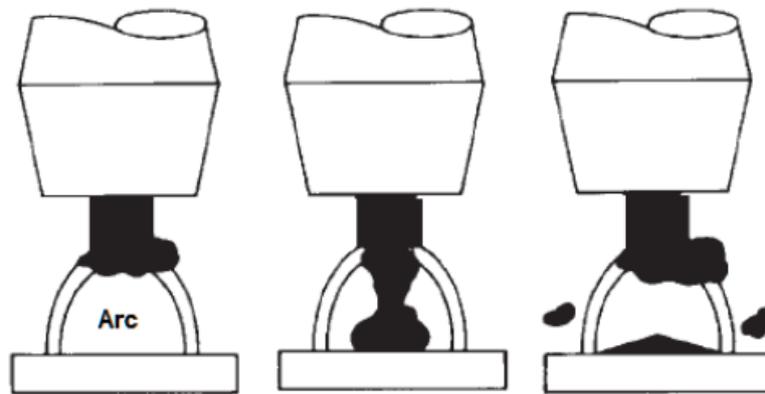
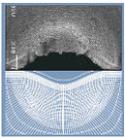


Figura 11: Transferencia globular



En la transferencia globular, debido a las fuerzas repelentes que actúan hacia arriba en la punta del hilo, la gota no cae a través del arco hasta que su peso es mayor a esta tensión superficial. Durante el tiempo que la gota permanece suspendida, va aumentando su tamaño, lo que hace que este modo de transferencia produzca un elevado nivel de proyecciones, con un arco muy inestable y con poca penetración, siendo un modo poco productivo y, por tanto, no es recomendable su empleo.

2.2.1.3 Transferencia Spray

En la transferencia por arco spray, el material de aportación es pulverizado y se propulsa axialmente a través del arco en pequeñas gotas de manera ininterrumpida.

Los niveles de intensidad y voltaje mínimos requeridos varían dependiendo del diámetro del electrodo, el material y el gas de protección empleado. La transición del modo de transferencia globular al spray se produce a un valor fijo llamado corriente de transición globular-spray.

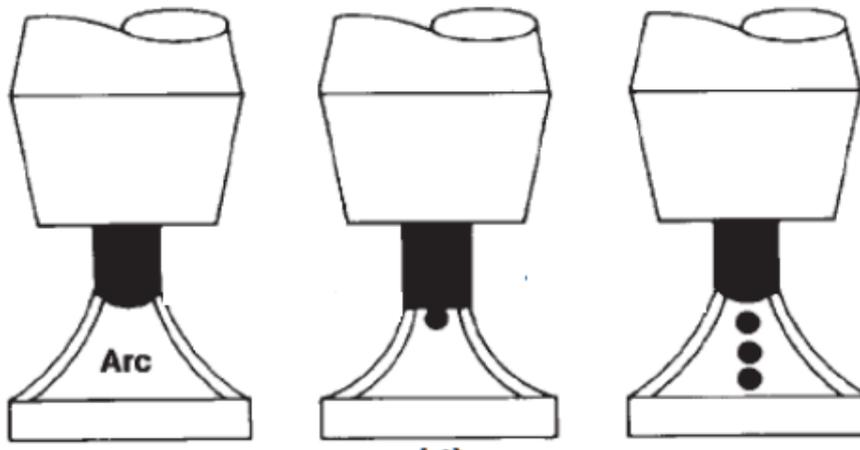
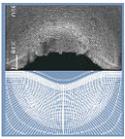


Figura 12: Transferencia en spray

La transferencia en spray se caracteriza por un arco estable y constreñido, con un electrodo con la punta afilada. Este método alcanza una alta deposición de material, haciéndolo muy rentable, y una buena penetración, por lo que se recomienda para piezas con grueso espesor. Dada la elevada fluidez del baño de fusión, sólo se recomienda este modo de transferencia en la posición plana.

2.2.1.4 Transferencia con arco pulsado

En esta variación del proceso MIG, la fuente de alimentación está equipada con un generador de frecuencias que pulsa con dos niveles de intensidad: un nivel de fondo demasiado bajo en magnitud para producir la fusión del metal de aporte y la transferencia, pero que mantiene el arco cebado y el hilo precalentado; y un nivel de intensidad alto llamado intensidad de pico, que causa la fusión de las gotas desde el electrodo que se transfiere a través del arco. Este ciclo ocurre en



intervalos regulares y controlados con una frecuencia de cientos de veces por segundo.

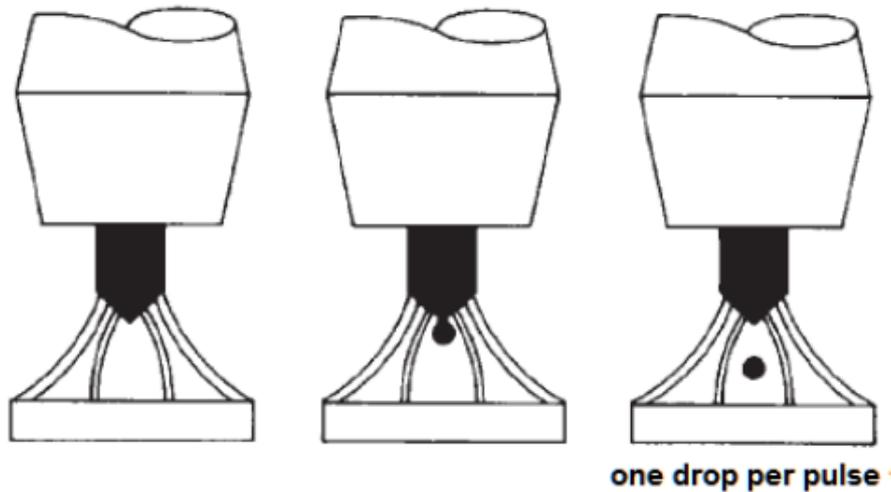


Figura 13: Transferencia con arco pulsado

El resultado es similar al arco spray con niveles bajos de corriente. En la soldadura pulsada el gas de protección debe sostener la transferencia en spray. El metal se transfiere a la pieza solo durante el pulso de alta corriente, aportando, idealmente, una gota por pulso.

El número de pulsaciones puede variar dependiendo del material base, el espesor, el diámetro del hilo, el gas de protección y la posición de soldadura. Dado que el nivel neto de energía aportado es bajo, con este proceso se pueden soldar espesores incluso de menos de 3 milímetros. Además, se puede utilizar en todas las posiciones, no produce proyecciones y presenta un bajo nivel de humos.

2.2.1.5 Transferencia con alta densidad de corriente o rotacional

Este modo de transferencia es consecuencia de una combinación de elevada intensidad con una alta velocidad de alimentación del hilo que da como consecuencia una extensión del hilo fuera de la tobera. Se trata de un modo de transferencia altamente productivo, ya que la tasa de deposición del metal de aportación esta entre 5 y 10 kg por hora, mientras que en GMAW Arco Spray esta entre 3 y 5 kg por hora.

Cuando se usa hilo macizo en combinación con una alta velocidad de alimentación y un gas de protección Argón / CO₂ / O₂ se crea un fenómeno de transferencia por arco rotacional. Esta elevada velocidad de alimentación hace que la extensión libre del hilo aumente la resistencia eléctrica y se caliente, produciéndose su plastificación y fusión de la punta. Las fuerzas electro-magnéticas generadas por el elevado flujo de corriente causan que el hilo plastificado se vaya fundiendo mientras gira de forma helicoidal.

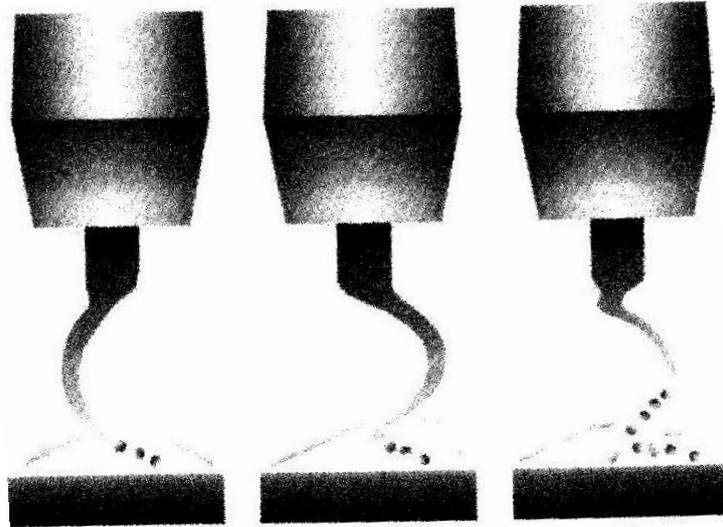
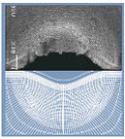


Figura 14: Transferencia por arco rotacional

El gas de rotación afecta a la transición rotacional ya que modifica la tensión superficial del hilo. Al incrementar la conductividad térmica, utilizando un gas de protección diferente con CO_2 o helio, cambia la tensión superficial y la rotación se suprime, pero también se aumenta el tamaño de las gotas transferidas y se disminuye el número de las mismas.

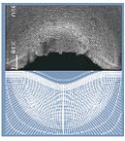
2.3 Gases de soldadura

En primer lugar, se van a explicar algunas de las propiedades o características de los gases a tener en cuenta ya que afectan, de manera considerable, a los parámetros de soldeo anteriormente explicados:

- Potencial de ionización

Como se ha explicado antes, cuando se establece un arco, el gas circulante se ioniza, es decir, se produce una separación reversible de los electrones del átomo formando iones y cationes. Para que esto ocurra, es necesario aportar una energía al gas. Esta energía la proporciona el propio arco eléctrico siendo, de esta manera, el potencial de ionización la energía necesaria para retirar un electrón de un átomo de gas medido en electronvoltios.

Cuando el gas ionizado entra en contacto con la pieza a soldar se enfría y el plasma se convierte de nuevo en gas, uniéndose los iones a los átomos y revirtiendo el proceso. Cuando los átomos se unen, se libera la energía de ionización, transmitiéndose a la pieza y calentándose ésta. Así, cuanto mayor es el potencial de ionización de un gas, más difícil resulta establecer el arco y mantenerlo cebado y estable, ya que hay que aportarle más energía, pero también, la energía que se le suministra a la pieza a soldar es mayor, de manera que se conseguirá una mayor temperatura de soldeo.



El potencial de ionización de un gas está relacionado con su masa molecular, de manera que cuanto mayor es la masa molecular, menor es el potencial de ionización. Esto se explica porque la fuerza de atracción que mantiene a los electrones orbitando es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al núcleo.

- Disociación y recombinación

Cuando dos o más átomos se combinan forman una molécula. Los gases protectores como el CO₂, el hidrógeno, el nitrógeno o el oxígeno en estado normal son moléculas, pero cuando se calientan a altas temperaturas, como las alcanzadas en el arco de plasma, se descomponen o disocian en sus respectivos átomos, quedando parcialmente ionizados, produciendo electrones libres y mejorando el flujo de corriente.

Cuando el gas disociado se pone en contacto con la superficie de trabajo se enfría y los átomos se recombinan liberándose la energía al metal base en forma de calor. Esto no pasa en gases como el argón o el helio que consisten en un sólo átomo. Por ello, a la misma temperatura del arco, el calor generado en la superficie de trabajo puede ser mayor con gases moleculares.

- Conductividad térmica

La conductividad térmica es la habilidad para conducir calor. Esta propiedad da información sobre la pérdida de calor que se produce en el arco desde el centro del mismo hacia el exterior.

Cuando se utiliza un gas protector con una baja conductividad térmica, se produce un arco con dos zonas, una central estrecha en la que se sitúa el núcleo del arco y que está muy caliente, y una exterior, considerablemente más fría. Sin embargo, para un gas con una alta conductividad térmica, el calor se conduce desde un núcleo más ancho hacia el exterior del arco, logrando una mayor distribución del calor y consiguiendo un arco más caliente y amplio.

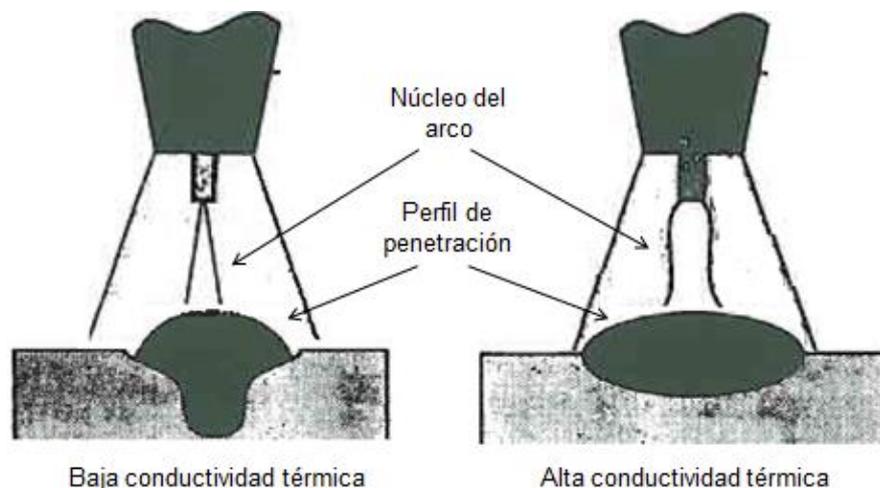
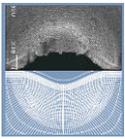


Figura 15: Perfiles de soldadura en función de la conductividad térmica



Esto se traduce en el tipo de perfil de la soldadura. En la Figura 15, se puede observar como para una soldadura utilizando un gas de protección con una baja conductividad térmica, se obtiene un perfil de la soldadura con un centro estrecho en la raíz y más ancho en la parte superior, típicamente llamado “perfil de copa”. En cambio, para un gas con una alta conductividad se consigue un perfil más amplio a lo largo de la zona de fusión, llamado “perfil de vaso”.

- Tensión superficial

En cualquier líquido hay una fuerza de atracción que se ejercen las moléculas bajo una superficie contra las moléculas de esa superficie, creándose una presión interna que restringe el flujo del líquido.

En soldadura, la tensión superficial entre el metal fundido y la atmósfera que lo rodea influencia la forma del cordón de soldadura. Si la tensión superficial es alta, se formará un cordón convexo e irregular, mientras que para una tensión superficial baja hará que se formen cordones más planos y menos propensos a defectos como las mordeduras. Los gases inertes producen una mayor tensión superficial, lo que se traduce en un baño de fusión más viscoso y con el efecto final de sobreespesores. Dado que el efecto de la tensión superficial depende en gran medida del metal, el efecto es especialmente notorio en el acero.

- Densidad gaseosa

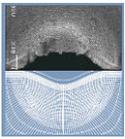
La densidad gaseosa es el peso del gas por unidad de volumen. La densidad del gas es uno de los factores que más influye en la efectividad de la protección. Cuanto mayor sea la densidad del gas, menor será el caudal necesario para obtener la misma protección, ya que cubrirá más fácilmente la zona de soldeo.

- Reactividad

La reactividad, aplicada a los gases protectores, es una medida comparativa sobre la facilidad que tiene un gas protector de reaccionar con el baño de fusión a las temperaturas del arco. Los gases pueden ser inertes a cualquier temperatura, inertes a temperatura ambiente pero reactivos a la temperatura del arco, reactivos a cualquier temperatura con el metal o reactivos con otros componentes de la mezcla de gases de protección.

- Pureza del gas

Algunos metales base, como el acero al carbono, tienen una tolerancia relativamente alta a los contaminantes en el gas de protección. Otros, como el aluminio, cobre o el magnesio, son bastante sensibles a las impurezas. Otros ejemplos como el titanio o el circonio tienen una tolerancia extremadamente baja a la presencia de cualquier impureza en el gas protector. Dependiendo del metal que se suelda y del proceso de soldadura que se utilice, incluso las impurezas más minúsculas pueden tener un impacto perjudicial en la velocidad de la soldadura, la apariencia de la superficie a soldar, la fusión del cordón y el nivel de la porosidad. Estas impurezas pueden aparecer de diferentes maneras. En la Tabla 1 se



muestran los estándares mínimos de pureza en la industria de los gases de soldadura, según la norma ANSI/AWS A5.32:2011 "Welding Consumables: Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes" Tabla 1 "Minimum requirements on purities and moisture contents of gases and gas mixtures"

- Gas de respaldo

El gas de respaldo es suministrado por la raíz de la soldadura para protegerla durante el soldeo de los posibles contaminantes presentes en la atmósfera que podrían reaccionar con el metal caliente de la parte inferior de la soldadura. Es necesario en algunos materiales, como el acero inoxidable, y en la mayoría de los materiales no féreos. Sin embargo, no suele ser preciso para soldar acero al carbono o de baja aleación.

Para realizar el suministro del gas de respaldo en soldaduras planas se utiliza un dispositivo como el que se muestra en la Figura 16 (izquierda). En tuberías, se deben emplear cartones rígidos como se ve en la Figura 16 (derecha) con obturadores de goma para conseguir la máxima estanqueidad posible de forma que se asegure una atmósfera protectora sin malgastar el gas de respaldo.

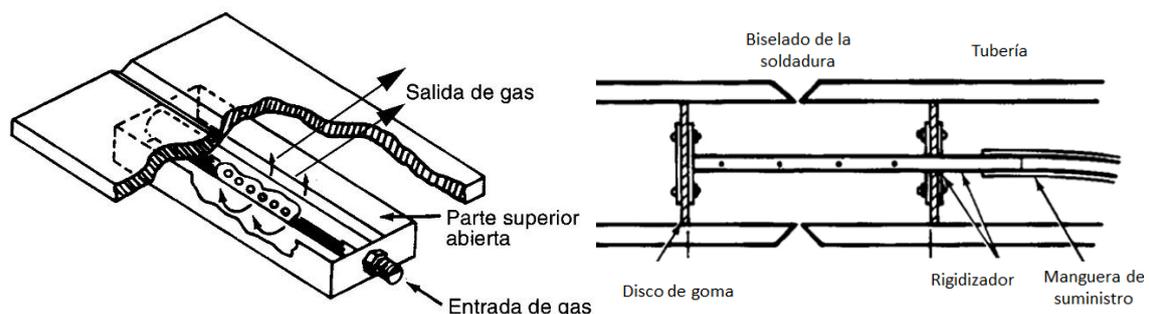


Figura 16: Gas de respaldo soldadura plana (izquierda) y tubería (derecha)

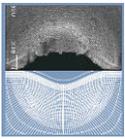
A continuación, se van a enumerar los gases utilizados en soldadura con sus propiedades y características para saber cómo afectan a los parámetros de soldeo y así seleccionar el más adecuado en cada aplicación:

2.3.1 Argón

El argón es un gas incoloro, inodoro, insípido y no tóxico presente en la atmósfera terrestre aproximadamente con una concentración de un 1%.

El argón tiene una masa molecular relativamente alta, lo que le hace tener un bajo potencial de ionización, que facilita el cebado del arco y origina arcos estables con un buen control y con pocas proyecciones. Al tener buena conductividad eléctrica en estado de plasma permite que las variaciones en la longitud del arco no supongan grandes cambios de voltaje que afecten a la calidad del cordón.

Este gas de protección tiene una baja conductividad térmica, lo que hace que el arco tenga un núcleo concentrado y muy caliente en comparación con el exterior



del arco, por lo que los perfiles de las penetraciones típicas de las soldaduras con argón son de tipo “perfil de copa”.

La densidad del argón es alta, aproximadamente 1,4 veces más pesado que el aire, lo que significa que tiende a cubrir bien el área de soldadura, con un caudal menor. El argón es un gas inerte y por ello no tiene ningún efecto químico en el metal soldado o en el electrodo.

En cuanto a los modos de transferencia, el argón no aumenta la Intensidad de transición de globular a Spray, con lo que se puede utilizar esta técnica más fácilmente.

En general se utiliza el argón en aplicaciones de soldeo TIG, sobretodo en aceros inoxidables y con pequeños espesores, ejerciendo una excelente acción limpiadora cuando se utiliza con corriente alterna. Se prefiere su utilización al helio siempre que sea posible debido a su menor coste. También es apropiado para el soldeo PAW, tanto de gas de plasma, como de protección y como gas de respaldo en caso de ser necesario. En GMAW se utiliza argón en metales base no-férreos como el aluminio, níquel, cobre, aleaciones de magnesio y en metales reactivos como el circonio y el titanio. Para utilizarlo con metales férreos se suele utilizar mezclado con otros gases para estabilizar más el arco.

2.3.2 Helio

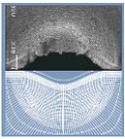
El helio es el segundo elemento más ligero de la tabla periódica y se obtiene a partir de la destilación fraccionada del gas natural.

Tiene una masa molecular muy baja, lo que hace que su potencial de ionización sea muy alto. Esto hace que el cebado y la estabilidad del arco no sean muy buenos, pero en cambio el aporte de calor es muy alto, consiguiendo una alta temperatura en el baño de fusión que hace que el baño sea más fluido, lo que produce soldaduras con mejor aspecto y geometrías con menores sobreespesores. Para conseguir este alto heat input se requiere mayor voltaje en el arco.

La buena conductividad térmica del helio produce un arco más ancho y caliente, obteniendo un perfil de penetración más ancho y profundo. Además, gracias al gran aporte térmico se consigue soldar a gran velocidad.

El helio es un gas con muy poca densidad por lo que se requiere que el caudal de suministro sea muy elevado para una correcta protección. En general, el caudal debe ser de 2 a 2,5 veces el requerido con argón. Al igual que el argón, el helio es un gas inerte y por lo que no tiene ningún efecto químico en el metal soldado o en el electrodo.

El helio se suele utilizar para soldar piezas con grandes espesores, debido a que favorece la penetración de la soldadura, y para procesos automatizados por la velocidad de soldeo. Se suele preferir también al argón para soldar materiales con alta conductividad térmica y elevado punto de fusión. Se utiliza helio especialmente para soldar aluminio, magnesio y aleaciones de cobre, siendo frecuente también las



adiciones de helio en mezclas con argón tanto en TIG como en GMAW para aumentar el aporte térmico y la penetración.

2.3.3 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas molecular compuesto por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Es un gas inodoro, incoloro y tóxico en altas concentraciones.

Es un gas activo y de naturaleza oxidante. A las temperaturas del arco se disocian monóxido de carbono y oxígeno libre. El oxígeno se combina con los elementos de aleación transferidos a través del arco para formar óxidos en forma de escoria y elevando el nivel de humos tóxicos. Aunque el dióxido de carbono es un gas altamente activo y produce oxidación del metal soldado, mediante la correcta selección del material de aporte se pueden conseguir soldaduras con calidades aceptables.

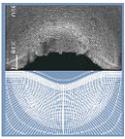
La masa molecular del dióxido de carbono es ligeramente superior a la del argón, pero al tratarse de una molécula, en el proceso de ionización, los átomos se disocian y por ello, se aumenta la temperatura en la superficie de trabajo, consiguiendo mejores penetraciones y velocidades de soldeo.

La conductividad térmica del CO₂ es baja, por lo que los cordones de soldadura tendrán gran penetración pero serán más estrechos desde la cara a la raíz de la soldadura. La densidad del dióxido de carbono es aproximadamente 1,55 veces la del aire por lo que se produce una buena protección de la soldadura con un bajo caudal de suministro.

El dióxido de carbono tiene su aplicación restringida a la soldadura GMAW debido a su reactividad. Se utiliza para soldar acero al carbono porque es fácil de conseguir y produce unas buenas soldaduras con bajo coste. Aún así, el bajo coste por unidad de gas no siempre se traduce en menor coste global de la soldadura. Debido a su baja eficiencia de deposición, producida por su alto nivel de proyecciones, un elevado ratio de humos, un deficiente perfil en el cordón y pérdida de propiedades mecánicas, el CO₂ puede influenciar de manera considerable en el coste final de la soldadura.

En cuanto al modo de transferencia, el dióxido de carbono no permite la transferencia con arco spray ya que no tiene intensidad de transición, restringiendo su uso a la transferencia por cortocircuito o arco globular. El dióxido de carbono típicamente se utiliza con arco globular, lo que resulta una gran desventaja por el elevado nivel de proyecciones.

La superficie del cordón resultante cuando se suelda con dióxido de carbono presenta un elevado nivel de oxidación. Se hacen necesarios materiales de aporte con mayor contenido en elementos desoxidantes para compensar la pérdida de elementos de aleación a través del arco. Además, es frecuente que las superficies soldadas con dióxido de carbono se deban limpiar después del soldeo, encareciendo, aún más, el coste global de la soldadura.



2.3.4 Oxígeno

El oxígeno se encuentra en la atmósfera terrestre aproximadamente en un 21% y se obtiene mediante la destilación del aire. Se combina con casi todos los elementos conocidos excepto raros o inertes, y potencia altamente la combustión elevando la temperatura de la llama, por ello, se utiliza para mejorar el rendimiento de los procesos de soldadura.

Debido a su reactividad, el oxígeno en soldadura solo se utiliza en GMAW, utilizándose siempre en mezclas con adiciones inferiores al 8% ya que produciría la oxidación del metal fundido.

La adición en pequeñas cantidades de oxígeno en las mezclas de gases estabiliza el arco y disminuye mucho la intensidad de transición, permitiendo la transferencia en spray para unas intensidades más bajas. Con el oxígeno se aumenta la temperatura de la soldadura, consiguiendo un baño de fusión más fluido, con un aumento de la cantidad de gotas de metal de aportación y con un mejor aspecto del cordón. Además, también se reducen los humos producidos durante el proceso de soldeo.

2.3.5 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más ligero de la tabla periódica y es un gas inflamable que produce grandes explosiones cuando se mezcla con oxígeno en ciertas concentraciones. Típicamente, el hidrógeno se obtiene del refinado de hidrocarburos.

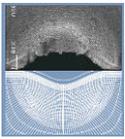
El hidrógeno se utiliza en soldadura en pequeñas adiciones a mezclas con base argón. Es un gas con una masa molecular muy pequeña, incluso más que el helio y con una conductividad térmica muy alta, de manera que la presencia de hidrógeno en las mezclas potencia de manera considerable las propiedades térmicas, aumentando mucho el heat input y por ello la productividad. Además, la característica del hidrógeno como gas reductor mejora el baño de fusión y produce una superficie soldada más limpia, reduciendo los óxidos superficiales.

El hidrógeno se debe utilizar con concentraciones bajas, entre un 5% para soldadura manual y un 15% para soldadura automatizada, ya que con mayores porosidades puede causar porosidad y pérdida de propiedades mecánicas.

Se utiliza en PAW tanto como gas de plasma, como para protección de la soldadura en concentraciones incluso del 35%, ya que, como gas plasmógeno favorece la formación de un arco estable. En TIG es comúnmente utilizado en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos de la serie 300, tanto como gas de protección como gas de respaldo.

2.3.6 Nitrógeno

El nitrógeno es un gas inodoro, insípido e incoloro y forma el 78% de la atmósfera de la tierra. Se obtiene mediante la destilación del aire. No es inflamable ni ayuda a la combustión y es inerte excepto a altas temperaturas, como las del



arco, donde puede reaccionar con algunos metales como el aluminio, el magnesio o el titanio.

El nitrógeno se utiliza en pequeñas adiciones en soldeo TIG y en MAG y no se utiliza nunca como gas principal de protección, aunque es común utilizarlo como gas de respaldo mediante una purga, debido a que en la raíz de la soldadura no se alcanza la temperatura suficiente para que el nitrógeno reaccione con alguno de los metales aleantes. El uso de nitrógeno incrementa la estabilidad del arco, la penetración y la anchura del cordón.

El nitrógeno se utiliza en adiciones para soldar aceros inoxidable, siendo especialmente útil en aceros dúplex, ya que es un elemento que aumenta el campo de estabilidad de la austenita a altas temperaturas (a altas temperaturas en aceros dúplex aumenta el campo de ferrita en condiciones normales), manteniendo el balance metalúrgico austenita-ferrita.

2.3.7 Mezclas de gases

Para aprovechar las ventajas de los gases en cada aplicación, se van a exponer las mezclas de gases más utilizadas con su campo de aplicación y cómo afectarán al producto final. Por su característica de buen cebado y estabilidad del arco, el argón es siempre el gas base de las mezclas para soldadura:

2.3.7.1 Mezclas argón y helio

La adición de helio en argón se utiliza para incrementar el input térmico del arco manteniendo la buena estabilidad y cebado del arco. A medida que se va incrementando el contenido en helio, se aumenta la penetración, pudiendo soldar mayores espesores y aumentando la velocidad de soldadura.

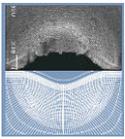
Estas mezclas se utilizan en TIG para soldar metales no ferrosos como el aluminio, magnesio o cobre con concentraciones entre el 30 y el 70%. En PAW se añade helio al argón para producir un arco más energético. El GMAW se utiliza para aleaciones no férreas, aumentando la cantidad de helio para mayores espesores. Al aumentar el contenido en helio en la mezcla, el voltaje del arco se incrementa, así como el nivel de proyecciones y el ratio de anchura/profundidad del cordón, disminuyéndose también la porosidad. El porcentaje de argón debe ser al menos del 20% para permitir un arco con una transferencia spray estable.

2.3.7.2 Mezclas argón e hidrógeno

Es frecuente añadir hidrógeno al argón para potenciar las propiedades térmicas. El hidrógeno actúa como gas reductor con un mejor baño de fusión y superficie sin óxidos. Se emplean en TIG, en soldadura de aceros inoxidable austeníticos y en PAW, en técnicas que requieren un gran input térmico.

2.3.7.3 Mezclas de argón y oxígeno

El añadido de pequeñas dosis de oxígeno al argón mejora la estabilidad del arco, incrementa el ratio de transferencia, disminuye la corriente de transición a



spray y mejora la geometría del cordón. El baño es más líquido y se mantiene fundido más tiempo, dejando que el metal fluya hacia los bordes de la soldadura. Con esta mezcla también se reducen los humos en la soldadura.

A medida que se aumenta el porcentaje de oxígeno en la mezcla, el baño se va haciendo más fluido y con una mayor velocidad de soldadura, siendo muy común en aceros al carbono añadir un 5% de oxígeno para conseguir las óptimas condiciones, disminuyendo la intensidad de transición, obteniendo así modos de transferencias rotacionales de alto rendimiento.

Debido a la reactividad del oxígeno, estas mezclas se utilizan solo en soldadura GMAW.

2.3.7.4 Mezclas de argón y dióxido de carbono

Las mezclas de argón y dióxido de carbono se usan sobretodo en soldadura de acero al carbono, aceros de baja aleación y algunos aceros inoxidable. A medida que se aumenta el porcentaje de CO₂ en la mezcla aumenta su nivel de proyecciones.

En soldadura GMAW convencional, con porcentajes mayores del 20% de CO₂ el modo de transferencia en spray se vuelve inestable y se producen cortocircuitos de forma periódica, pasando a un modo de transferencia globular.

El aumento de porcentaje de dióxido de carbono en la mezcla se justifica para conseguir mayores penetraciones en fuertes espesores y por el precio más económico del gas.

2.3.7.5 Mezclas argón, dióxido de carbono y helio

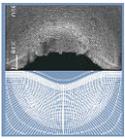
Al añadir helio a las mezclas con argón y dióxido de carbono se incrementa el input térmico del proceso de soldadura, mejorando la fluidez, geometría del cordón y la productividad del proceso. Sólo se utiliza en MAG por la reactividad del CO₂.

Las mezclas con altos contenidos en CO₂ son más utilizadas en el acero al carbono, mientras que mezclas con menor CO₂ se utilizan en acero inoxidable. Estas mezclas se pueden utilizar en cualquier posición y añadiendo mayor cantidad de helio para mayores espesores. Se utilizan tanto en arco corto, como spray, como pulsado.

Con estas mezclas se incrementa la velocidad de soldadura, obteniendo un cordón más ancho, plano, con mayor penetración y con un excelente aspecto, reduciendo la porosidad y minimizando la pérdida de elementos de aleación en el caso de optar por mezclas con bajos contenidos en CO₂.

2.3.7.6 Mezclas argón, dióxido de carbono y oxígeno

Se utilizan estas mezclas para aumentar la productividad en todos los modos de transferencia. La presencia de oxígeno permite disminuir la intensidad de transición favoreciendo la transferencia en spray o pulsada estable.



Estas mezclas son ideales para aplicaciones robotizadas con aceros al carbono o de baja aleación, especialmente en arco spray o pulsado. Permite obtener excelentes propiedades mecánicas, y permite que haya buena estabilidad del arco incluso para niveles muy bajos de intensidad debido a la presencia del oxígeno. Esto ayuda a minimizar la excesiva fusión y la distorsión al disminuir el input térmico al material base.

La alta fluidez del baño produce cordones con aguas uniformes y baja tendencia a la mordedura o sobrecordones en soldaduras en posición plana, permitiendo unas buenas propiedades mecánicas de la unión, además de mejorar la resistencia a fatiga debido a la disminución de defectos concentradores de tensión.

2.3.7.7 Mezclas argón, dióxido de carbono y nitrógeno

Adiciones de nitrógeno a las mezclas de argón y CO₂ en GMAW de aceros inoxidable, incrementan la penetración y mejoran la estabilidad del arco. Se adaptan perfectamente a la soldadura en arco corto, spray o pulsado con soldaduras con buena geometría, reducida oxidación superficial y con una excelente apariencia.

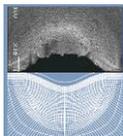
Se utilizan en concentraciones alrededor del 2% para soldadura de acero dúplex para ayudar a mantener el balance 50% ferrita – 50% austenita en las temperaturas del arco.

2.4 Selección del gas de protección

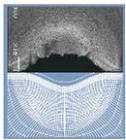
Con el objetivo de servir como guía para la selección del correcto gas de protección para la mayoría de los procesos de la industria, a continuación se muestran unas tablas de selección de los gases en función del metal base, el tipo de soldadura, el espesor y otros factores.

	Argón	CO ₂	Helio	Hidrógeno	Nitrógeno	Oxígeno
Número atómico	12	-	2	1	7	8
Masa molecular	39,95	44,01	4	2,016	28,01	32
Densidad rel. aire	1,38	1,53	0,137	0,0695	0,967	1,105
Densidad (kg/m³)	1,784	1,842	0,178	0,0899	1,2506	1,429
Pot. Ionización (ev)	15,7	14,4	24,5	13,5	14,5	13,2
Conduct. térmica	9,69	8,62	85,78	97,22	13,93	14,05
Pureza min. Gas	99,995	99,5	99,95	99,95	99,97	99,5
Pureza min. líquido	99,997	99,8	99,995	99,995	99,997	99,5

Tabla 1: Propiedades de los gases protectores



Material	Tipo de soldadura	Gas recomendado	Razón
Acero al carbono	Por puntos	Argón	Alarga la vida del electrodo; mejor área de soldad; mejor cebado del arco
	Manual	Argón	Buen control del baño, especialmente fuera de posición
	Mecanizado	Argón / Helio	Mayor input térmico apto para medios y altos espesores; más velocidad y fluidez del baño
		Helio	Para mayores velocidades y penetraciones que con el argón
Aluminio y magnesio	Manual	Argón	Altas velocidades; economía frente al helio puro
		Argón / Helio	Altas velocidades de soldadura; mayor penetración
	Mecanizado	Argón / Helio	Buena calidad de soldadura; mejor input térmico, velocidad y penetración
		Helio	Penetración más profunda y mayor velocidad. Buena acción limpiadora.
Acero inoxidable	Por puntos	Argón	Buen control de la penetración en bajos espesores
		Argón / Helio	Mayor input térmico para medios y altos espesores. Velocidad y fluidez de baño
	Manual	Argón	Control excelente del baño y penetración
		Argón	Penetración controlada en materiales de bajo espesor
		Argón / Helio	Mayor heat input; incremento de velocidad
		Argón / Hidrógeno	Mejora el aspecto del cordón (brillante planos y con aguas suaves). Permite soldar con bajas intensidades. Ideal como purga para aceros inox. serie 300
		H ₂ / N ₂	Ideal para purga en aceros inoxidables de la serie 300. Más económico que el argón / hidrógeno pero no se puede utilizar como gas de soldadura.
Cobre, níquel y aleaciones Cu-Ni	Todas	Argón	Control del baño y la penetración con bajos espesores
		Argón / Helio	Más heat input para la elevada conductividad térmica del material en medios y altos espesores. Elevados espesores
		Helio	Fuerte input para secciones gruesas

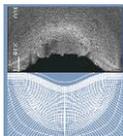


Titanio	Todas	Argón	Alta densidad del gas para mejorar la protección
		Argón / Helio	Mejor penetración en secciones gruesas. Se necesita gas de respaldo
Bronce al silicio	Todas	Argón	Reduce los fenómenos de agrietamiento en caliente
Bronce al aluminio	todas	Argón	Penetración controlada en el metal base

Tabla 2: Guía de selección de gases de protección para TIG

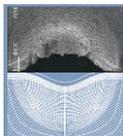
Material	Grosor (mm)	Keyhole	Melt-in
Aluminio	>6	Argón	Argón o Argón+30% Helio
	<6	Helio	Helio o Argón+30% Helio
Acero al carbono	>3	Argón	Argón
	<3	Argón	Argón+30% Helio
Acero baja aleación	>3	Argón	Argón
	<3	Argón	Argón+30% Helio
Acero inoxidable	>3	Argón o Argón+5% H_2	Argón
	<3	Argón o Argón+5% H_2	Argón+30% Helio
Cobre	>2	Argón	Helio o Argón+30% Helio
	<2	No recomendado	Helio
Aleaciones de Níquel	>3	Argón+5% H_2	Argón
	<3	Argón+5% H_2	Argón+30% Helio
Metales reactivos	>1,5	Argón	Argón
	<1,5	Argón o Argón / Helio	Argón+30% Helio

Tabla 3: Guía de selección de gases para soldadura de arco de plasma



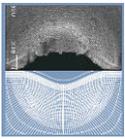
INFLUENCIA DEL GAS DE PROTECCIÓN EN LA SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA DE ACEROS INOXIDABLES
PARA USO A ALTAS TEMPERATURAS

Material	Grosor	Modo transferencia	Gas recomendado	Razón
Acero al carbono	< 2 mm	Corto circuito	Ar + 8-18%CO ₂ o Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂	Buena penetración y control de la distorsión. Para puntear huecos y absorber tolerancias
	2 – 4 mm	Corto circuito	Ar + 8-18%CO ₂ o Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂	Mayor deposición, mínima distorsión y proyecciones. Buen control del baño en todas las posiciones
	> 4 mm	Corto circuito	Ar + 15-18%CO ₂ , CO ₂ o Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂	Altas velocidades y buena penetración y control baño en todas posiciones.
		Globular	Ar +18%CO ₂ o CO ₂	Para altas corrientes y velocidades
		Corto circuito y globular	CO ₂	Buena penetración y velocidad alta. Riesgo de perforación y altas proyecciones. Precio más económico
		Arco spray	Ar+0-8%CO ₂ +1-5%O ₂	Buena estabilidad del arco y aumento de la fluidez con el O ₂ . Buen aspecto, geometría y control del baño en soldadura plana.
		Corto circuito y spray	Ar + 8-15%CO ₂ o Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂	Amplio rango de corrientes con buen comportamiento del arco, control del baño y aspecto del cordón.
		Rotacional	Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂ o	Muy altos ratio de deposición.
	Automa.	Spray y pulsado	Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂ o Ar +26% He+8% CO ₂	Para bajos y medios espesores en todas las posiciones con arco muy estable y sin proyecciones
		Corto circuito	Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂ o Ar +26% He+8% CO ₂	Buena geometría y propiedades mecánicas
Acero aleado	< 3 mm	Corto circuito	Ar + 8-15%CO ₂ o Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂	Alta velocidad, buena penetración y control del baño. Todas posiciones para altas intensidades
	> 3 mm	Spray y rotacional	Ar +5% O ₂ ; Ar +8% CO ₂ + 2%O ₂ o Ar +26% He+8% CO ₂	Menor riesgo de mordeduras. Buena penetración y fluidez del baño. Buena penetración y propiedades mecánicas excelentes.



Acero inoxidable	< 2 mm	Corto circuito	Ar+5-10%CO ₂ +1-5%N ₂ o Ar+2% CO ₂	Buen control del heat input y minimiza la distorsión térmica.
	>2 mm	Corto circuito	Ar+5-10%CO ₂ +1-5%N ₂ Ar+33%He+1%CO ₂	Con bajos niveles de CO ₂ en mezclas con Helio reduce la cantidad aportada de carbono y la pérdida de Cromo (sensibilización)
		Spray y pulsado	Ar+5-10%CO ₂ +1-5%N ₂ Ar+33%He+1%CO ₂ Ar+2%O ₂ o Ar+4%CO ₂ +1%H ₂	Buena estabilidad del arco con baño fundido y controlable. Buen aspecto y geometría del cordón. Bajo riesgo de mordeduras con alto voltaje.
Cobre, Níquel y aleaciones	< 3 mm	Corto circuito	Ar o Ar+0-30%He	Buena estabilidad del arco y control de la fluidez
	> 3 mm	Corto circuito	Ar + 30-70%He Ar+33%He+1%CO ₂	Aumentando el helio se aumenta el heat input para minimizar el efecto de la alta conductividad del metal base.
		Spray y pulsado	Ar+0-70%He;Ar+2%O ₂ Ar+33%He+1%CO ₂	Para espesores medios en todas las posiciones. Buena estabilidad del arco con buena calidad soldadura y bajas proyecciones.
Aluminio	< 4 mm	Spray	Ar	Buena transferencia, arco estable y buen efecto decapante. Bajas proyecciones
		Spray	Ar + 30-70%He	Al aumentar el %He aumenta el heat input. Baño fluido y cordón y geometría plana. Minimiza la porosidad
		Spray	Ar + 200ppm NO	Aumenta el Heat input sin Helio. Mejor penetración y velocidad. Elimina la mancha lateral de oxido
		Pulsado	Ar	Buen control del baño y estabilidad
Titanio, Magnesio y reactivos	Todos	Spray	Ar	Limpieza del cordón con arco más estable
		Spray	Ar + 30-70%He	Alto input de calor y baja porosidad

Tabla 4: Guía de selección de gas de protección para MIG/MAG



3 Selección del gas de protección para soldadura semiautomática de acero inoxidable para uso a altas temperaturas

Como ejemplo de aplicación, a continuación se va a exponer un problema real de selección de gas de protección para la reparación de un equipo, propiedad de Praxair España S.L.U., que posee en su planta de Gijón. El equipo en cuestión es un horno de regeneración cuyo diagrama de proceso se muestra en la Figura 17.

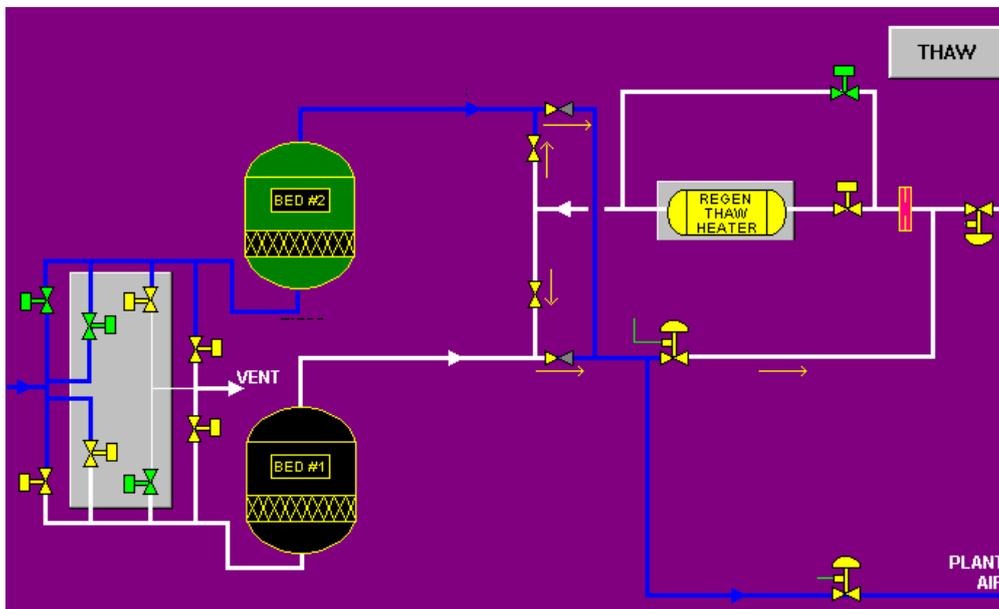
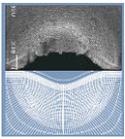


Figura 17: Diagrama de proceso del horno de regeneración

Una planta de separación de aire basa su funcionamiento en la destilación fraccionada del aire, enfriándolo hasta temperaturas criogénicas en las que sus componentes (nitrógeno, oxígeno y argón) son licuados a diferentes temperaturas y separados para su utilización. Antes del enfriamiento del aire hasta dichas temperaturas criogénicas, éste debe ser acondicionado, de manera que todos sus contaminantes, humedad y demás sustancias no deseadas, sean eliminados. Para conseguir esto, se hace pasar el aire a presión por unos prepurificadores que utilizan dos lechos adsorbentes, uno de alúmina y otro de tamiz molecular, para eliminar las sustancias no deseadas. Los tamices moleculares y la alúmina de los prepurificadores se saturan transcurridos un tiempo de funcionamiento. Es por ello que, en todo momento, se encuentra un prepurificador en estado de funcionamiento y el otro en proceso de regeneración. Durante la regeneración se hace pasar aire o nitrógeno de desecho caliente por el prepurificador a contracorriente y, posteriormente, se ventea a la atmósfera. El aire o el nitrógeno de desecho se calientan en el horno de regeneración, el cual tiene dos carcavas, una exterior de protección y una interior en la que se quema gas propano. Dentro de esta cámara



interior se encuentra un haz tubular con el nitrógeno o el aire circulando por su interior. En este proceso de calentamiento, la carcasa del horno alcanza los 500 °C. Es por ello que el interior de la carcasa lleva un cerámico refractario recubierto por un acero inoxidable resistente a altas temperaturas.

Durante el mantenimiento de la planta, se observó que el horno de regeneración instalado se encontraba en mal estado, teniendo quemada la parte superior de la carcasa interior de acero inoxidable. Por ello, se decide durante la siguiente parada desinstalar el horno de regeneración para sanear la parte quemada, cortando la chapa inservible y remplazándola por una nueva que se soldaría a la carcasa interior. El resultado del horno de regeneración cortado se observa en la Figura 18.



Figura 18: Horno de regeneración cortado

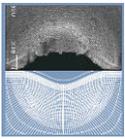
Para la reparación de la carcasa interior del horno se utilizara un acero inoxidable AISI 321. Se trata de un acero inoxidable austenítico, cuya composición se muestra en la Tabla 5.

En cuanto al metal de aportación, se utilizará una bobina para hilio MIG de Praxair, modelo M-347 222487, según norma AWS 5.9: ER347 Si, cuyo material es acero inoxidable AISI 347 con la composición mostrada en la Tabla 5.

	% C	%Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Ni	%Nb	% Ti	% N
321	0,08	2	0,045	0,03	0,75	17-19	9-12	--	5x(C+N)	0,1
347	0,08	2	0,045	0,03	0,75	17-19	9-12	10xC	--	--

Tabla 5: Composición del acero AISI 321 y 347

Las aleaciones 321 y 347 son aceros inoxidables austeníticos estabilizados con Titanio o Niobio, que ofrecen una excelente ventaja a la corrosión intergranular



producida por la exposición durante largos periodos de tiempo a la temperatura de precipitación de los carburos de cromo, desde los 427 a los 816 °C. Durante la exposición a dichas temperaturas, en lugar de formarse carburos de cromo en las juntas de grano, que empobrecen las zonas colindantes en cromo y lo sensibilizan a la corrosión, se forman carburos de los aleantes estabilizadores en su lugar, ya que tienen mayor afinidad con el carbono y porque además, son muy estables.

Estas aleaciones también son ventajosas para el servicio a altas temperaturas, ya que tienen buenas propiedades mecánicas comparándolas con el 304 que es el inoxidable austenítico más utilizado. Esto se traduce en mayores tensiones permitidas en temperaturas elevadas, siendo idóneo para la fabricación de calderas y recipientes a presión.

Una vez presentado el proceso de soldadura para la reparación, las características del metal base y del metal de aportación, sólo queda por definir el gas adecuado para la protección de la soldadura.

Dado que se trata de un acero inoxidable austenítico muy aleado, se decide utilizar el gas de Praxair Helistar SS, cuya composición es 66,1% Ar, 33% He y 0,9% CO₂, de manera que se consiga una buena penetración, con un cordón más ancho y con el calor mejor repartido. Además, al tener un muy bajo contenido en CO₂, se reduce la pérdida de cromo y la sensibilización del metal base. Todo esto concuerda con lo mostrado en los apartados 2.3 y 2.4.

Con el objetivo de demostrar que el gas de protección seleccionado es correcto, a continuación se exponen una serie de ensayos realizados a soldaduras protegidas con Helistar SS, comparándolos con soldaduras protegidas con un gas menos apropiado, como sería el Argón puro.

4 Procedimiento experimental

Para la realización del experimento, se van a efectuar 4 soldaduras con diferentes características de posición, espesor y tipo de soldadura, de manera que se puedan englobar los resultados.

En la Figura 19 se muestran las soldaduras que se van a efectuar con cada gas de protección de la soldadura. Primero, un cordón de recargue sobre una chapa de 200x100x12. La segunda es una soldadura en ángulo, con 2 chapas de 150x300x12. Se efectuará mediante un cordón de 5 mm. La tercera se trata de la unión entre dos chapas de 100x300x5 en posición horizontal, con una penetración parcial y un bisel como el mostrado en la Figura. Y la última soldadura se trata de la unión de dos chapas de 100x300x5 a las que se les mecanizará un bisel como el que se muestra en la Figura. Esta unión se efectuará con penetración total y con el número de pasadas necesario.

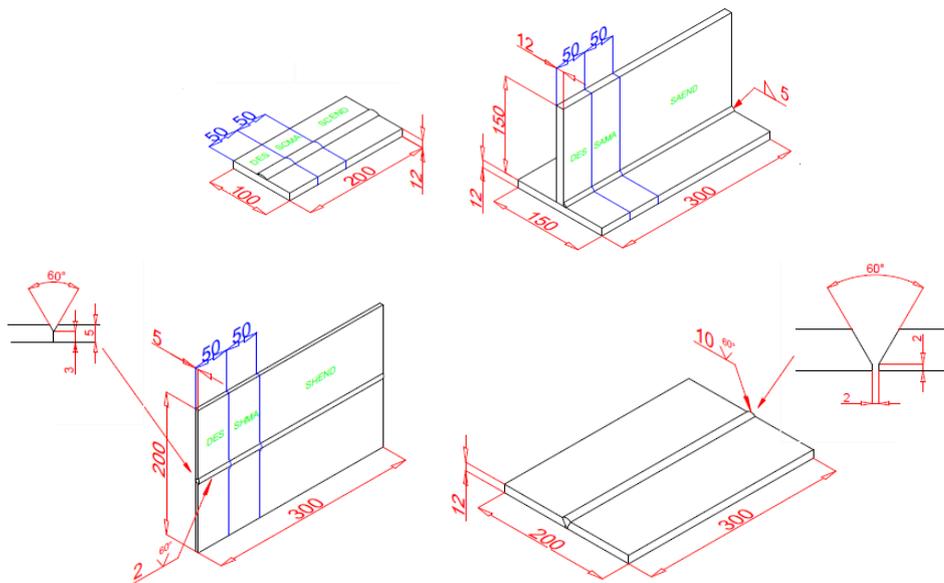
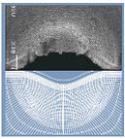


Figura 19: Soldaduras a efectuar para el experimento

A partir de estas soldaduras se fabrican las probetas necesarias para realizar los siguientes ensayos:

4.1 Ensayos de soldaduras protegidas con Argón

Todas las soldaduras se realizan con los mismos parámetros para poder comparar los resultados. En todos los casos, se soldará con una intensidad de 22,8 A, 120 V y sin gas de respaldo. Todas las soldaduras serán realizadas por un soldador cualificado y experimentado y con un equipo de soldadura MIG COMPACT-300 de Praxair, de manera que las soldaduras sean de buena calidad, pudiendo comparar correctamente los resultados obtenidos con los dos gases.

4.1.1 Cordón de recargue

En esta soldadura se realizará el ensayo de líquidos penetrantes para observar si existen poros superficiales y una macrografía para observar el aspecto del perfil de la soldadura, la geometría, penetración... Para ello se realizan los cortes que se muestran en la Figura 20 en color azul. A partir de ella, se cortarán los 50 primeros mm del cordón para descartarlo, los segundos 50 mm son para la macrografía y los 100 mm restantes para realizar los ensayos no destructivos.

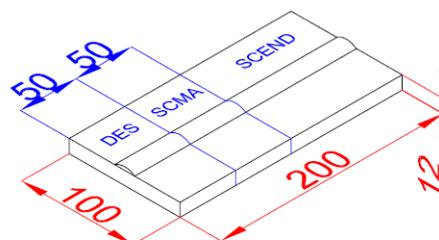
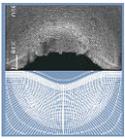


Figura 20: Probetas sobre soldadura de cordón de recargue



En el proceso de soldeo se obtuvo un buen cebado del arco con pocas proyecciones, con un baño bastante rugoso, difícil de controlar y poco uniforme.

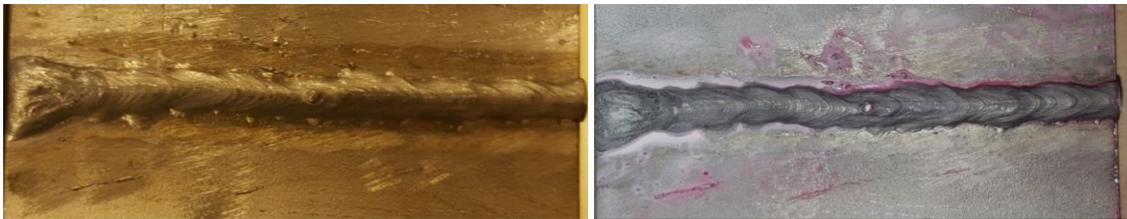


Figura 21: Soldadura de cordón de recargue con Argón y líquidos penetrantes

En la Figura 21 se observa el resultado de la soldadura y el del ensayo de líquidos penetrantes. Se puede ver un cordón con unas aguas muy marcadas y con un alto sobreespesor indicando que la fluidez del baño no era muy buena. Esto se puede ver aún mejor en la macrografía de la Figura 22, donde además se aprecia que la penetración no es muy buena, llegando a penetrar unos 2 milímetros, quedando una altura del cordón de aproximadamente 5 milímetros.

En el ensayo de líquidos penetrantes no se observa ninguna porosidad superficial ni defectos reseñables, además del sobreespesor ya mencionado.

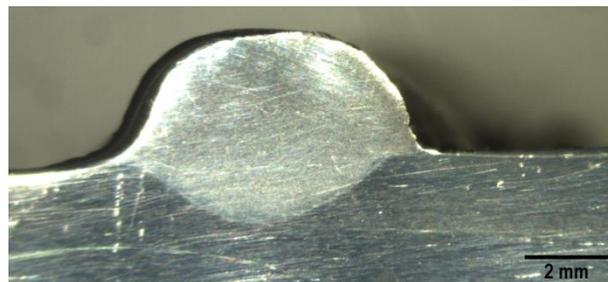


Figura 22: Macrografía soldadura cordón de recargue con Argón

4.1.2 Soldadura en ángulo

Se realizará una soldadura con una geometría como la mostrada en la Figura 23, a partir de la cual, se cortarán los 50 primeros milímetros por descarte, otros 50 para realizar una macrografía y los últimos 200 mm para realizar los ensayos no destructivos en busca de posibles defectos superficiales.

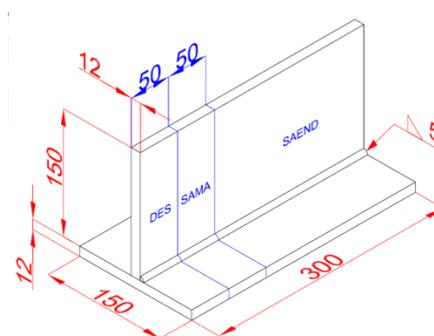
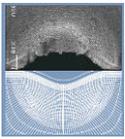


Figura 23: Probetas sobre soldadura en ángulo



En este caso, el resultado de la soldadura fue bastante negativo, con un mal cebado, lo que propicia muchos defectos en la superficie, como se puede ver en la Figura 24. Conseguir un correcto cebado del arco fue complicado para el soldador y el resultado es una soldadura con grandes poros superficiales, algo que se observa fácilmente a simple vista y que revelan aún mejor los líquidos penetrantes. En cuanto al aspecto, se aprecia que el metal soldado y la zona afectada térmicamente están muy quemados, con un cordón muy poco uniforme y lleno de defectos.

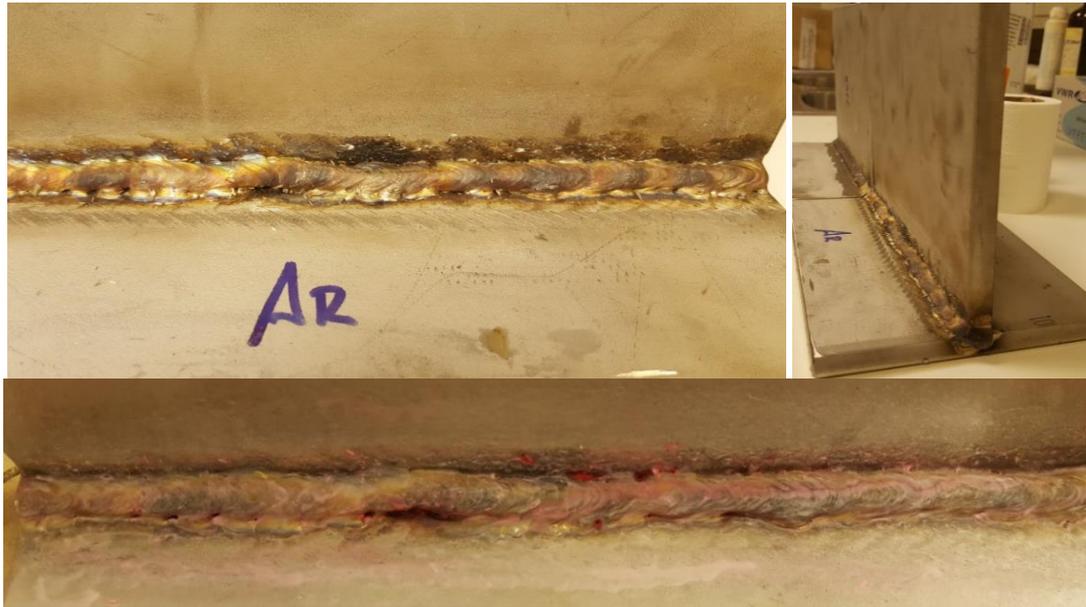


Figura 24: Soldadura en ángulo con Argón y líquidos penetrantes

En la Figura 25 de la macrografía de la unión se observa un cordón sin una cabeza diferenciada y ancho, aunque con cierto sobreespesor y poca penetración, mostrando poca dilución con el metal base. En la punta se ve la zona de separación entre las dos chapas, que va aumentando al separarse de la soldadura, síntoma de haber tenido una fuerte distorsión térmica.

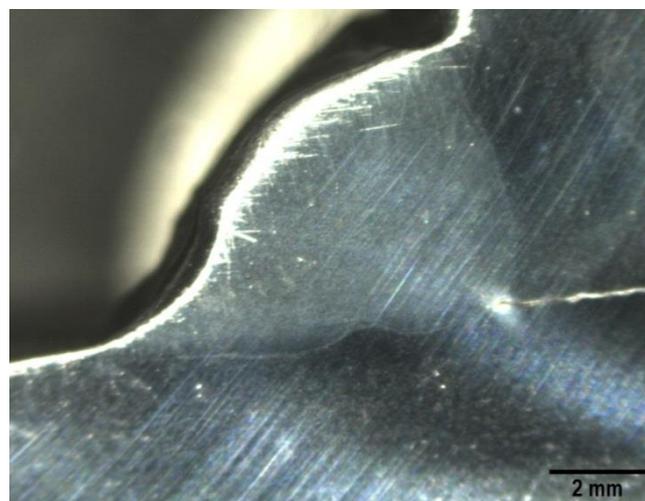
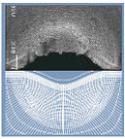


Figura 25: Macrografía soldadura en ángulo con Argón



4.1.3 Soldadura horizontal

La geometría de la soldadura se muestra en la Figura 26, cortándose, a partir de la pieza, los 50 mm del inicio del cordón como descarte, los segundos 50 mm para realizar una macrografía, y los últimos 200 mm para realizar los ensayos no destructivos.

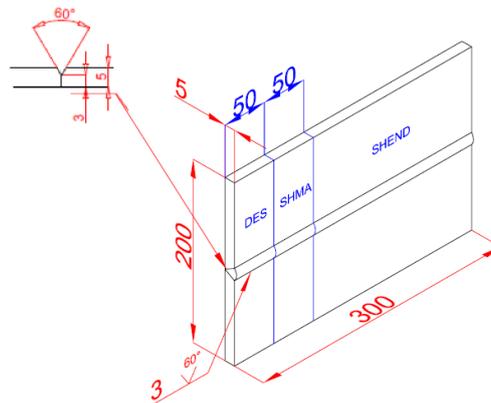


Figura 26: Probetas sobre soldadura en horizontal

En la Figura 27 se observa el resultado de la soldadura en horizontal protegida con argón. Al tratarse de un metal base con un espesor de solo 5 mm, se puede ver como la soldadura tiene un aspecto mucho más quemado, con una fuerte degradación en los bordes de la soldadura y una distorsión del ángulo formado entre las chapas muy fuerte, aunque no se muestran defectos superficiales considerables en el ensayo de líquidos penetrantes. Este aspecto quemado y la distorsión térmica, son debidos a que el argón no tiene buena conductividad y, aunque la temperatura conseguida en el arco es menor, su distribución es más concentrada en la parte central del arco, produciéndose una mala conductividad del calor que se ve claramente amplificada al disminuir el espesor de la chapa, ya que el calor se dispersa con mayor dificultad.



Figura 27: Soldadura en horizontal con Argón y líquidos penetrantes

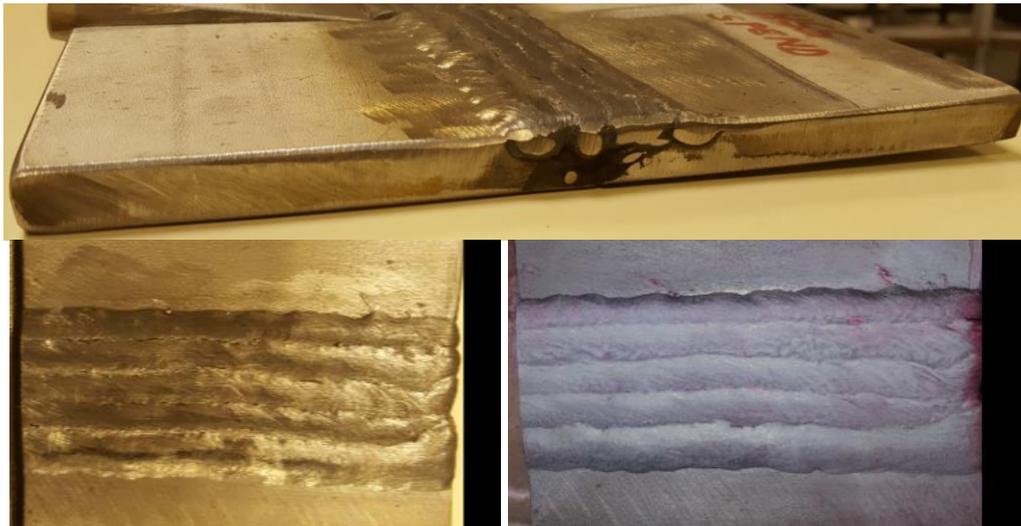
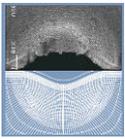


Figura 30: Soldadura plana con Argón y líquidos penetrantes

A partir de la segunda y la tercera sección de la pieza soldada, se mecanizaron dos probetas para realizar ensayos de impacto, uno de la zona soldada y otro de la zona afectada térmicamente, configurándose como se observa en la Figura 31. La probeta de la zona soldada tiene la entalla en la dirección transversal a la soldadura, mientras que la probeta para la zona afectada térmicamente la tiene paralela a la soldadura, con la punta de la entalla situada en la línea de fusión, de manera que se producirá la rotura en la parte del metal base más cercana a la línea de fusión. El ensayo se realizó utilizando un péndulo de Charpy a temperatura ambiente, siendo la energía necesaria para romper la probeta de la zona fundida 102 Julios y para la zona afectada térmicamente 140 Julios. Esta diferencia de resistencia al impacto se observa en la Figura 31, donde se aprecia una mayor deformación en la probeta derecha con la sección de rotura frágil más pequeña, lo que es indicativo de que la zona fundida tiene una menor resistencia al impacto. De todas formas, los valores obtenidos en el ensayo son mayores de 40 Julios, por lo que son aceptables.

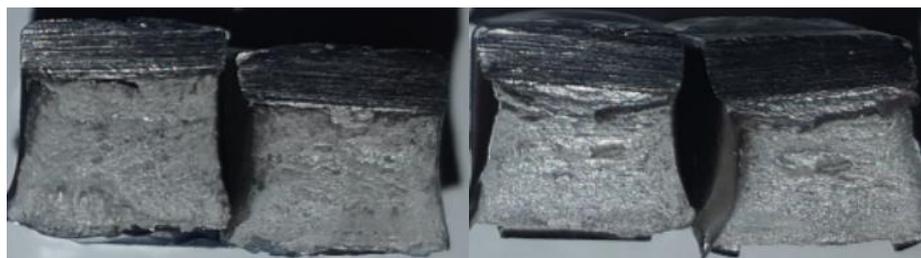
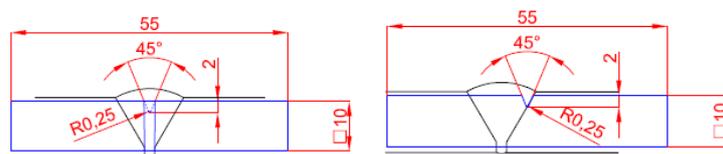
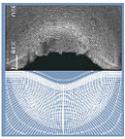


Figura 31: Ensayo de Charpy en probetas de soldadura protegida con Argón: izquierda (zona fundida), derecha (zona afectada térmicamente)



Para la medición de las durezas, se realizó un perfil de durezas para comprobarla en todas las zonas características de la soldadura. En la Figura 32 se muestran los puntos donde se realizó la medición de las durezas con un ensayo Vickers. Se observa que la dureza es menor en el metal base que en el metal soldado, produciéndose picos de dureza con los mayores valores en la zona cercana a la línea de fusión, especialmente en la zona afectada térmicamente, debido al mayor tamaño de grano producido por alcanzar la temperatura de recristalización.

Mientras en la zona alejada de la soldadura en el metal base se obtuvieron valores de unos 165 HV, en la zona fundida la dureza media es de 185 HV y en la zona cercana a la línea de fusión la dureza aumenta hasta los 265 HV.

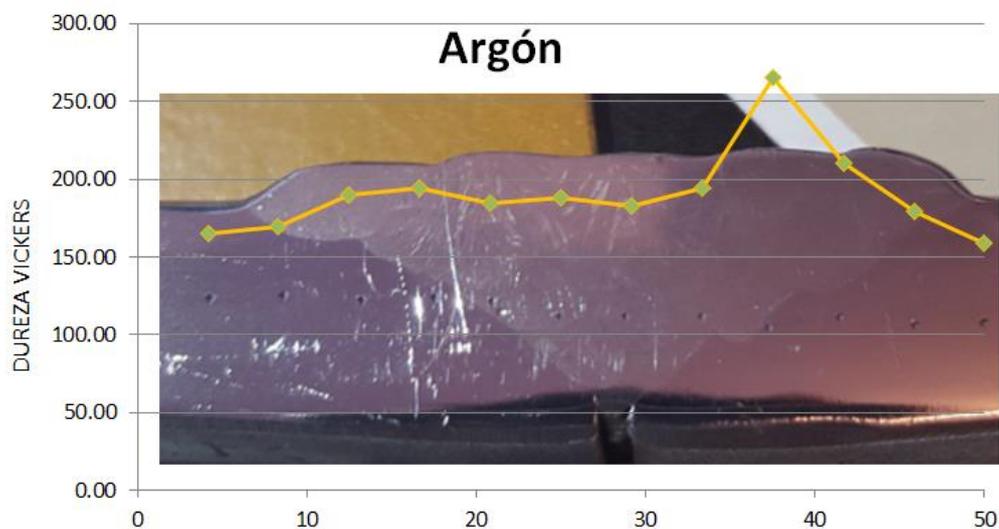
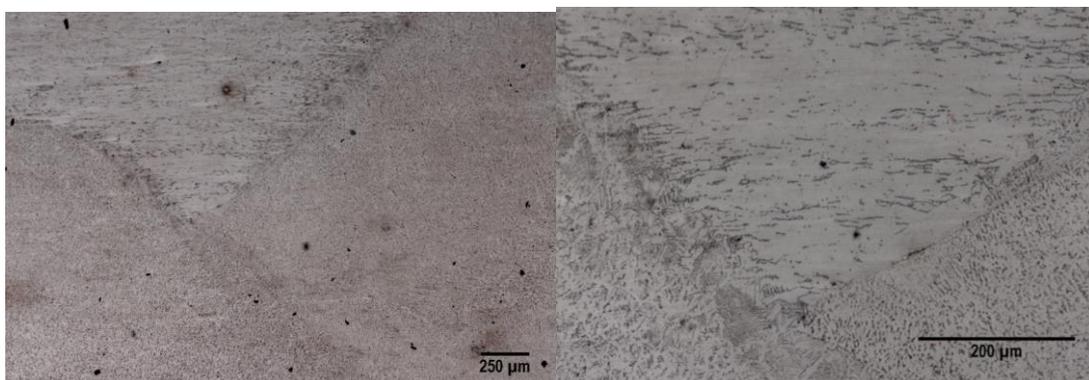


Figura 32: Medición de las durezas en soldadura con Argón

En la Figura 33 se puede ver la microestructura de la soldadura. Las dos imágenes de la parte superior corresponden a la línea de fusión a diferentes aumentos, mientras que las de la parte inferior corresponden a la zona fundida (izquierda) y a la zona afectada térmicamente (derecha) a 500 aumentos.



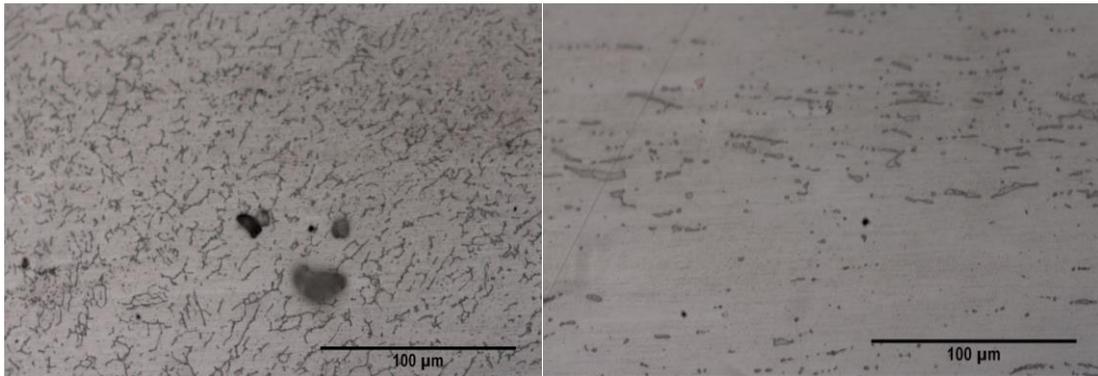
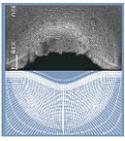


Figura 33: Micrografías soldadura con Argón, 50xLF, 200xLF, 500xZF, 500xZAT

En las imágenes se observa una clara diferencia entre los dos metales, con una geometría más orientada en la dirección de laminación en el metal base y más caótica en el metal soldado. Se ve como aumenta el tamaño de grano en el metal base en la zona cercana a la línea de fusión. Los puntos negros en ambas zonas, especialmente en la zona soldada, posiblemente sean precipitaciones de carburos de titanio, lo que supone una pérdida de material aleante, algo que es indeseable. En las imágenes de la línea de fusión con más aumentos, se aprecia que no se ha producido una correcta fusión del metal de aportación con el metal base. Comparando la microestructura de la zona fundida con la del metal base, se ve un claro cambio, ya que la zona fundida tiene mayor cantidad de ferrita (fase oscura).

4.2 Ensayos de soldadura protegida con Helistar SS

Para obtener unos resultados comparativos, se realizarán las mismas soldaduras con el gas Helistar SS que las que se realizaron con Argón, utilizando el mismo equipo de soldar y los parámetros de soldeo utilizados anteriormente.

4.2.1 Cordón de recargue

La geometría de esta soldadura es la misma que la de la Figura 20. En el proceso de soldeo se obtuvo un buen cebado del arco, con pocas proyecciones y con un baño fácil de controlar, además de uniforme.

En la Figura 34 se puede observar el resultado de la soldadura y del ensayo de líquidos penetrantes. Se aprecia una soldadura con un cordón ancho, con las aguas poco marcadas y con poco sobreespesor, indicando una buena fluidez del baño. En el ensayo de líquidos penetrantes no se observa ningún defecto superficial considerable.



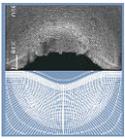


Figura 34: Soldadura de cordón de recargue con Helistar SS y líquidos penetrantes

En la macrografía de la Figura 35, se observa un cordón de unos 10 milímetros de anchura, con un sobreespesor bajo, aproximadamente de 3 milímetros y con una buena penetración, con forma de cabeza en la punta y una longitud de 4,5 milímetros.

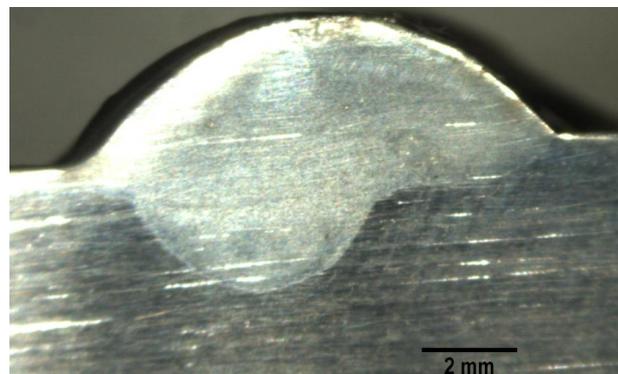


Figura 35: Macrografía soldadura cordón de recargue con Helistar SS

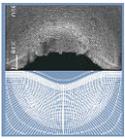
4.2.2 Soldadura en ángulo

La geometría de la soldadura en ángulo realizada se puede apreciar en la Figura 23, a partir de la cual se cortan probetas para realizar macrografía y ensayos no destructivos, al igual que con Argón.

Durante la soldadura se obtuvo un buen cebado del arco, con buen recubrimiento de la zona, como se aprecia en la Figura 36. El resultado es una soldadura con buen aspecto, buena uniformidad del cordón y sin defectos superficiales apreciables en el ensayo de líquidos penetrantes.



Figura 36: Soldadura en ángulo con Helistar SS y líquidos penetrantes



En la macrografía de la Figura 37, se observa un cordón con un sobreespesor casi despreciable y con buena penetración en la cabeza. La separación de las chapas en la punta del cordón de soldadura no es muy fuerte debido a que no ha habido una fuerte distorsión producida por la temperatura.

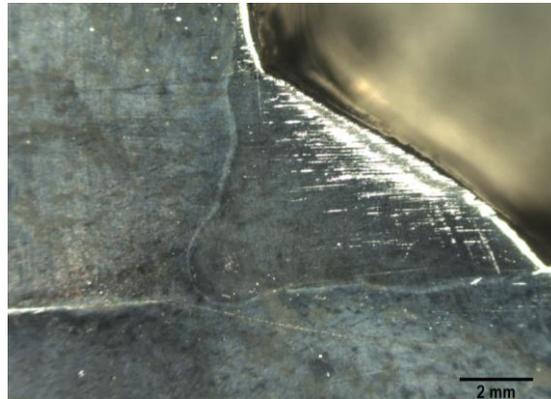


Figura 37: Macrografía soldadura en ángulo con Helistar SS

4.2.3 Soldadura en horizontal

A partir de la unión soldada con la geometría mostrada en la Figura 26, se obtienen dos probetas para realizar ensayos de líquidos penetrantes y macrografía.

En la Figura 38 se aprecia un cordón con buen aspecto, con las aguas poco marcadas y, a pesar de ser una chapa de pequeño espesor, la zona quemada es muy reducida y se ha producido una distorsión térmica leve. Esto es indicativo de que el gas tiene una buena conductividad térmica, lo que resulta muy positivo en las chapas de poco espesor con poca capacidad de dispersión del calor. En el ensayo de líquidos penetrantes no se observa ningún defecto superficial importante.

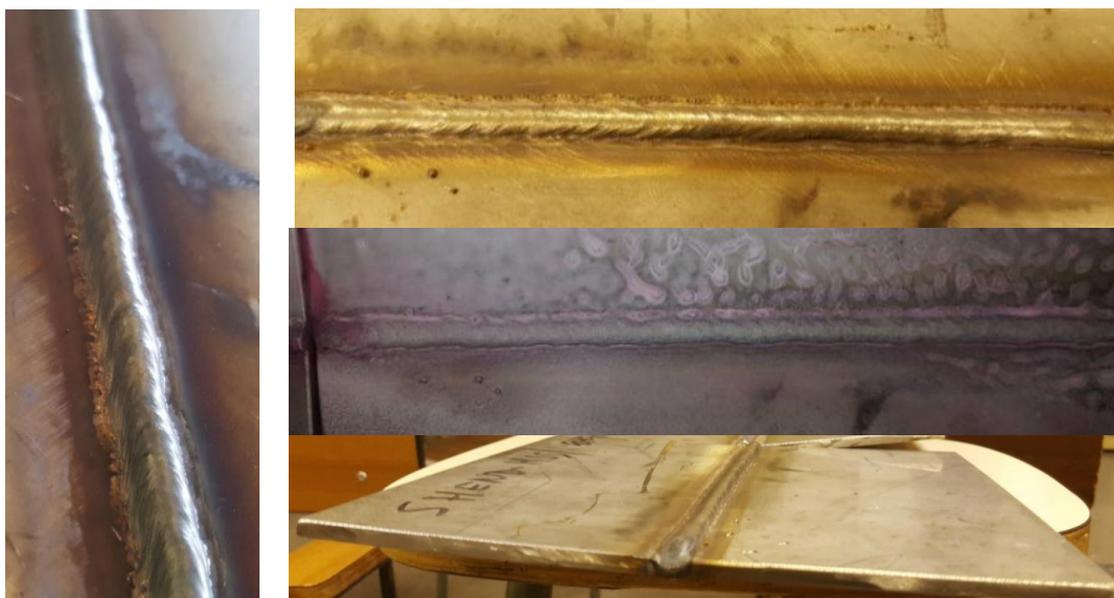
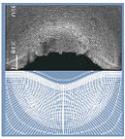


Figura 38: Soldadura en horizontal con Helistar SS y líquidos penetrantes



En la macrografía de la Figura 39 se observa un cordón ancho, con buena penetración, aproximadamente de unos 4 milímetros y se puede apreciar una cierta caída del baño hacia la izquierda, que durante el proceso de soldeo era el lado inferior. Esto indica que el baño tenía buena fluidez.

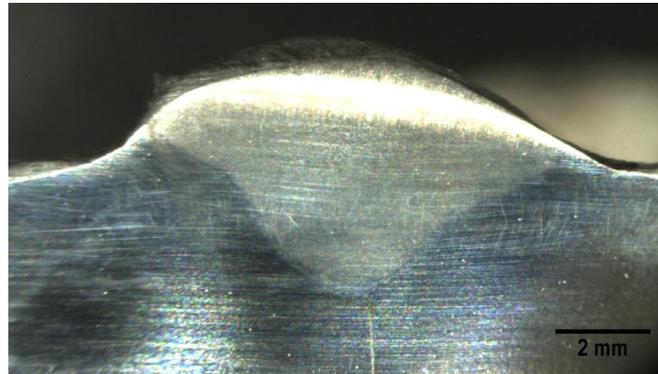


Figura 39: Macrografía soldadura en horizontal con Helistar SS

4.2.4 Soldadura plana

La geometría de la soldadura es la misma que la realizada en la soldadura plana con protección de Argón. A partir de la pieza soldada se mecanizan probetas para realizar ensayos de impacto en la zona fundida y en la zona afectada térmicamente, macrografía, durezas, micrografías y ensayos no destructivos.

Al igual que con Argón, fue necesario realizar varias pasadas para el completo relleno de la soldadura. En este caso, se realizó una pasada de raíz, siete de relleno y cinco de peinado. Se obtiene una soldadura limpia, horizontal, con poco sobreespesor en las pasadas de los bordes y con poca distorsión térmica, sin observarse ningún defecto importante en el ensayo de líquidos penetrantes de la Figura 40.

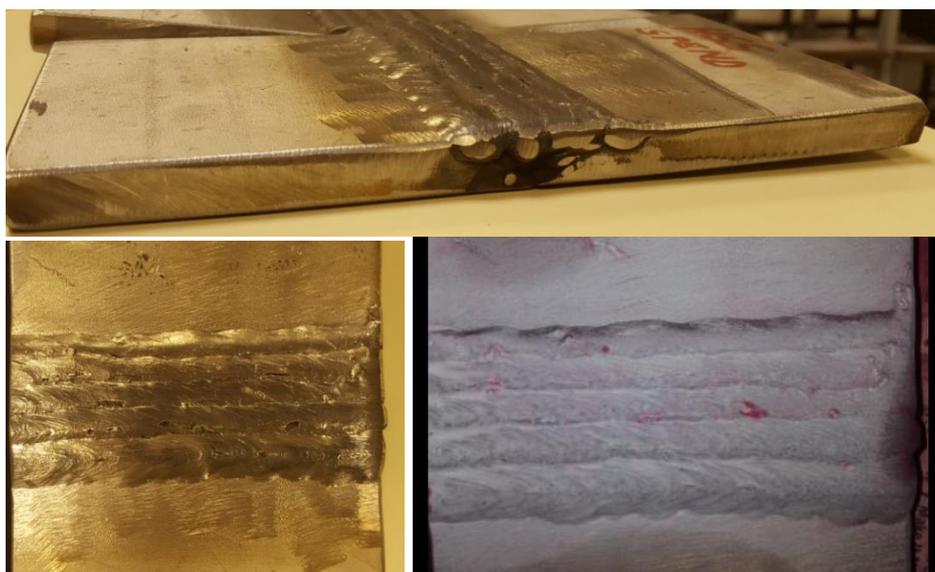


Figura 40: Soldadura plana con Helistar SS y líquidos penetrantes

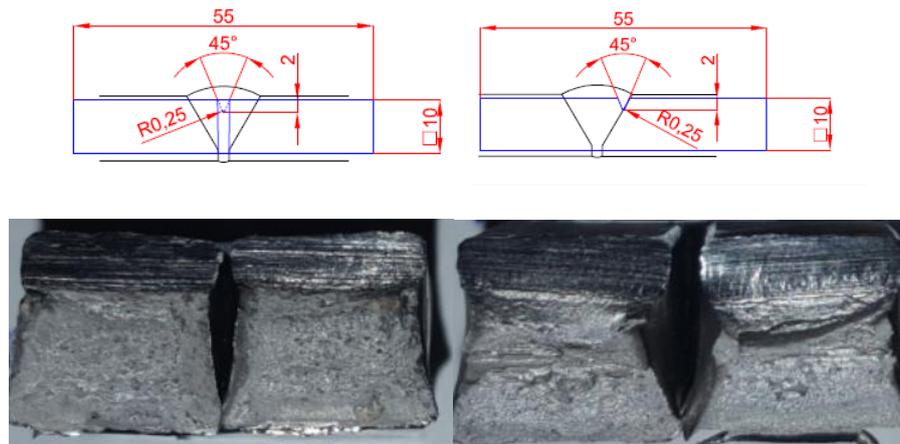
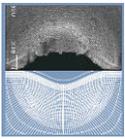


Figura 41: Ensayo de Charpy en probetas de soldadura protegida con Helistar SS: izquierda (zona fundida), derecha (zona afectada térmicamente)

Las probetas mecanizadas para el ensayo de Charpy serán iguales y obtenidas de la misma zona que las utilizadas para el ensayo con el gas Argón. El resultado del ensayo fue de 148 Julios para la zona afectada térmicamente y de 104 Julios para la zona fundida. En la Figura 41, se puede apreciar como la rotura es más dúctil en la zona afectada térmicamente que en la zona fundida, gracias a la deformación de la sección de rotura. Los valores obtenidos son buenos, ya que son superiores a 40 Julios.

Para la medición de las durezas se realiza un perfil de durezas y se mide la dureza en los diferentes puntos del perfil, obteniéndose los valores de la Figura 42. En ella se puede observar que se produce un incremento de la dureza en la zona fundida con respecto al metal base. Asimismo, los valores más altos de dureza se encuentran en la zona afectada térmicamente, más cercana a la línea de fusión. El valor de la dureza en el metal base es de unos 170 HV, mientras que en la zona fundida aumenta hasta los 200 HV. Sin embargo, en la zona más cercana a la línea de fusión se obtienen valores de hasta 279 HV, un valor que resulta considerablemente alto.

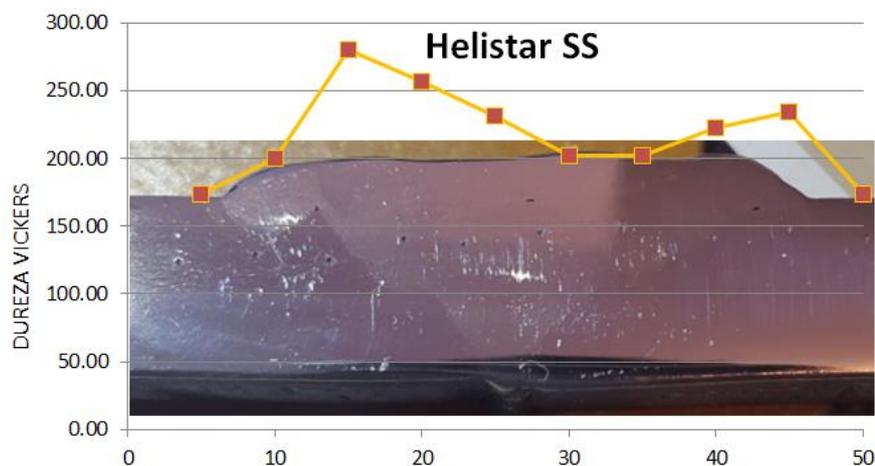
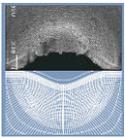


Figura 42: Medición de las durezas en la soldadura con Helistar SS



En cuanto a las micrografías realizadas, en la Figura 43 se puede observar la línea de fusión con 50 y 200 aumentos en la parte superior, mientras que las de la parte inferior corresponden a la zona fundida (izquierda) y a la zona afectada térmicamente (derecha) a 500 aumentos.

Se aprecia un bajo número de puntos negros de carburos de titanio, así como una buena dilución entre el metal base y el de aportación. Cuanto más cerca se sitúa de la línea de fusión, mejor se puede ver el mayor tamaño del grano y la desorientación de los granos en el metal base. En las imágenes inferiores se aprecia claramente la diferencia entre las microestructuras de las dos zonas de la soldadura, con la orientación de los granos en la dirección de laminación en el metal base y una orientación aleatoria en el metal fundido, con un pequeño aumento de ferrita (fase oscura) en el metal soldado.

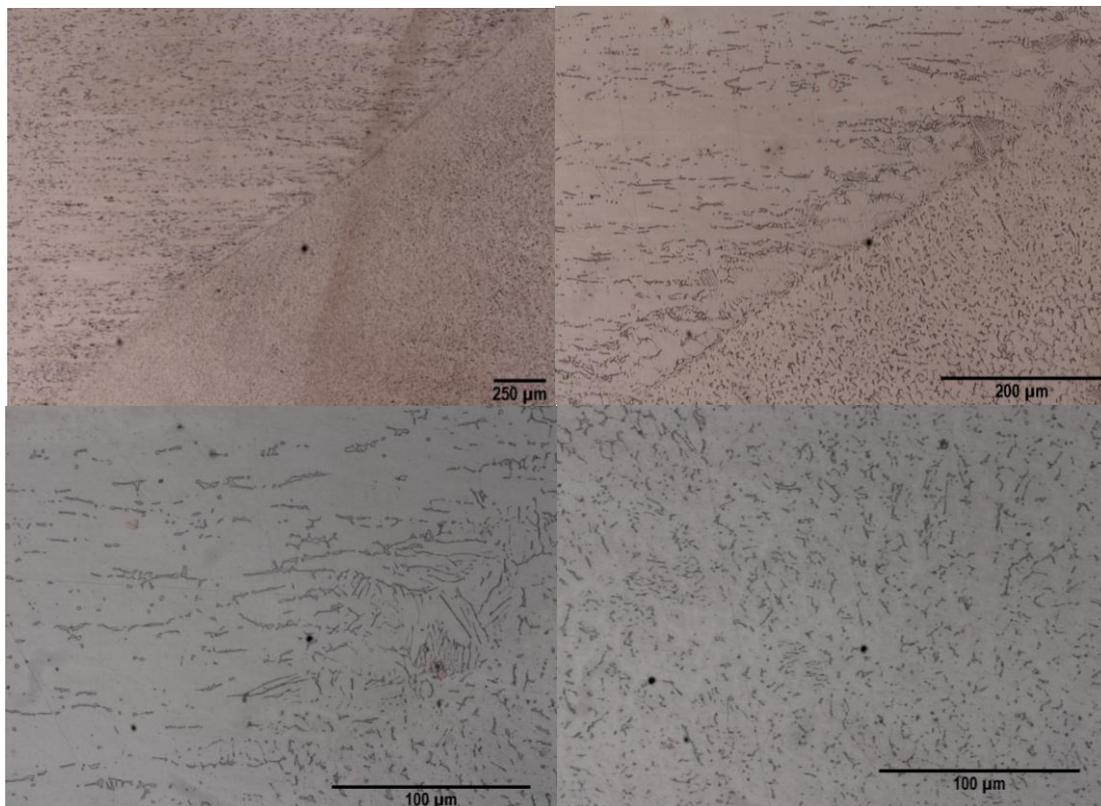
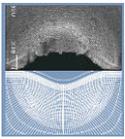


Figura 43: Micrografías soldadura con Helistar SS, 50xLF, 200xLF, 500xZF y 500xZAT

4.3 Comparativa y conclusiones

A continuación, se estudiará una comparativa entre las soldaduras analizadas en los apartados 4.1 y 4.2 realizadas con los diferentes gases de protección de la soldadura.

Como rasgos generales del proceso de soldeo, decir que las soldaduras protegidas con argón tuvieron un mejor cebado del arco y el nivel de proyecciones era ligeramente inferior. Por otro lado, la velocidad de soldadura era aproximadamente un 20% menor, con unos baños menos fluidos, unas aguas muy



marcadas y las soldaduras generalmente más quemadas, con peor aspecto y menor deposición de material, en la soldadura plana se realizó una pasada menos.

En las imágenes de la Figura 44, se muestran enfrentadas diferentes soldaduras de las analizadas anteriormente. En las imágenes superiores y las del centro, se comparan las soldaduras realizadas en horizontal en las que se sueldan chapas de 5 mm. La imagen superior corresponde a la soldadura protegida con argón y la inferior a la protegida con Helistar SS. Se puede ver como la soldadura realizada con argón está mucho más quemada que la realizada con Helistar SS, especialmente en la zona del metal base más cercana a la línea de fusión, donde se puede observar una zona de unos 3-4 milímetros fuertemente oxidada. Además, el cordón tiene un color mucho más oscuro y con las aguas muy marcadas. Este quemado de la soldadura se ha producido debido a la poca conductividad térmica que tiene el argón en comparación con el Helio. Recordemos que el gas Helistar SS tiene un 33% de Helio que, aunque aumenta el input térmico, al tener una mejor conductividad térmica reparte mejor el calor, reduciendo el sobrecalentamiento en la parte central. Esta conclusión también se demuestra viendo la comparativa central en la que la soldadura protegida con Helistar SS tiene muy poca distorsión térmica en comparación con la protegida con Argón.

En la última de las comparativas, se muestran las soldaduras realizadas en ángulo. En ellas se puede ver una gran porosidad en la soldadura protegida con argón y una geometría y aspecto del cordón mucho peor que la soldadura realizada con Helistar SS.



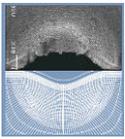


Figura 44: Comparativa visual entre: 1° soldadura en horizontal, 2° soldadura en horizontal vista lateral, 3° soldadura en ángulo

En la Figura 45 se comparan las microfografías de las soldaduras. En general se puede ver que las soldaduras protegidas con argón tienen un mayor sobreespesor, con un cordón más estrecho y alto. Las soldaduras con Helistar SS tienen mayor penetración, con un perfil de penetración de 'copa', debido al contenido de CO₂ del gas, y un sobreespesor mucho menor, indicativo de que la soldadura era mucho más fluida y con una mejor dispersión del calor.

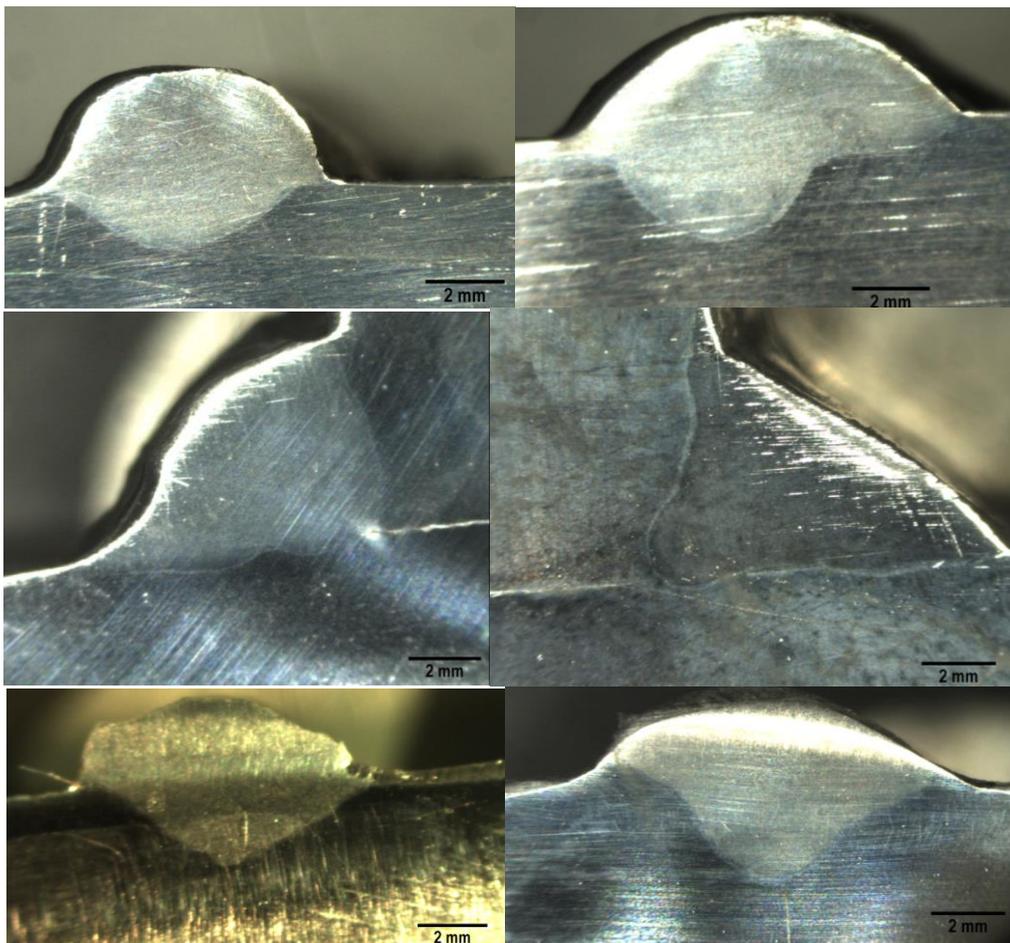
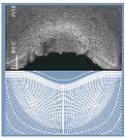


Figura 45: Comparativa de las microfografías 1°cordon de recargue, 2° soldadura en ángulo y 3° soldadura en horizontal.



En los ensayos de Charpy los resultados fueron muy similares, siendo muy ligeramente superior la energía necesaria para romper las probetas de Helistar SS, y donde sus secciones de rotura eran casi idénticas, tanto en la probeta rota por la zona fundida como en la rota por la zona afectada térmicamente.

Sin embargo, la diferencia es más notoria en la comparativa de las durezas mostradas en la Figura 45, donde se obtuvieron unos valores considerablemente mayores en la soldadura con Helistar SS, posiblemente debido a la mayor permanencia a altas temperaturas.

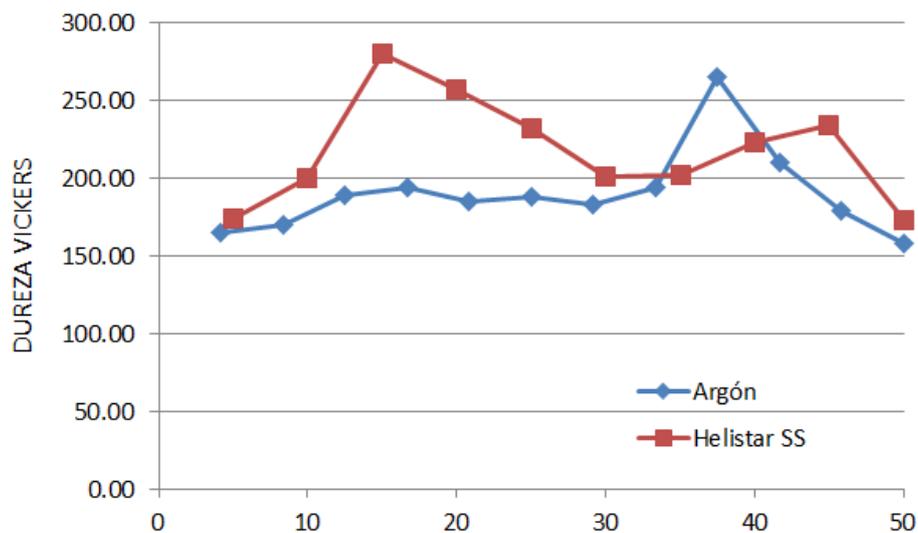


Figura 46: Comparativa durezas Vickers

En la Figura 47 se observa la micrografía de las líneas de fusión. Se puede ver como en la soldadura protegida con argón la cantidad de carburo aumenta, especialmente en la zona soldada, lo que disminuye las propiedades mecánicas del metal, además de producirse una disminución del metal aleante necesario para la aplicación en servicio del mismo a altas temperaturas.

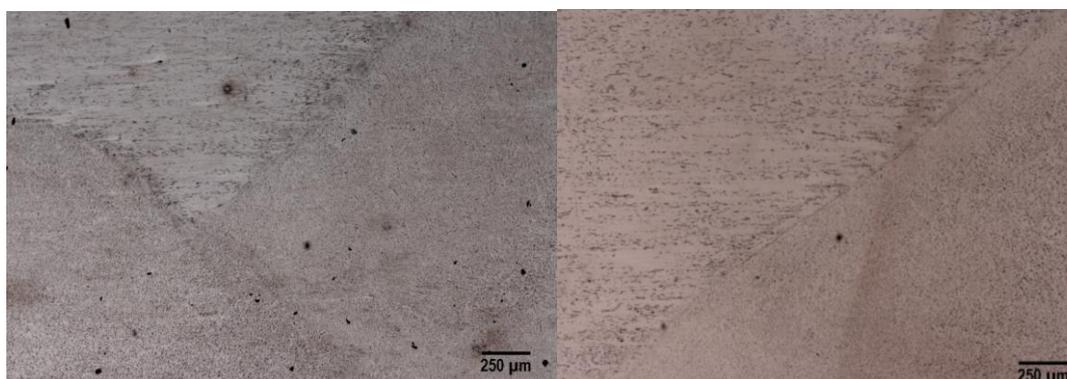
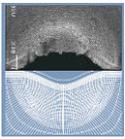


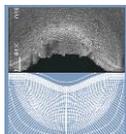
Figura 47: Comparativa microestructura: izquierda (Argón) derecha (Helistar SS)



4.3.1 Conclusiones

Como conclusión al estudio comparativo de la soldadura semiautomática realizada a un acero inoxidable resistente a altas temperaturas con dos gases de protección de la soldadura, Argón y Helistar SS, se puede decir lo siguiente:

- En la soldadura realizada con argón se obtiene una ligera disminución del nivel de proyecciones y un cebado del arco algo mejor.
- En la soldadura con Helistar SS se obtienen mejores penetraciones, con un cordón más ancho y un baño más fluido que disminuye los sobreespesores y consigue unas mejores geometrías del cordón, con unas aguas menos marcadas y cordones más brillantes.
- En la soldadura con argón, el gradiente térmico en la soldadura debido a la baja conductividad térmica del gas hace que se produzcan grandes distorsiones térmicas, siendo complicado mantener las tolerancias geométricas en las piezas.
- En piezas de menor espesor, además de aumentar la distorsión térmica producida utilizando argón, al tener el metal base menor capacidad para disipar el calor, la zona afectada térmicamente es de un tamaño mucho mayor, además de sufrir un quemado muy claro, algo que es realmente perjudicial para el metal. Además, se disminuye la velocidad de enfriamiento, lo que favorece la formación de carburos que se combinan con los aleantes del metal.
- La baja conductividad del argón hace que se dificulte la disipación del calor, de manera que la permanencia del metal a altas temperaturas es mayor. Esto favorece la formación de carburos de titanio, algo que es indeseable, ya que disminuye las características mecánicas del material, además de producirse una pérdida del aleante necesario para la aplicación a altas temperaturas del metal.
- En las soldaduras multipasada, las características son más similares debido al precalentamiento entre las pasadas, aunque las características mecánicas son algo mejores utilizando Helistar SS. Además, el mayor heat input hace que la velocidad de soldadura sea menor y se consiga un mayor aporte de material.
- Con Helistar SS se consigue un aumento en la velocidad de soldeo aproximadamente de un 20%. Esto no sólo beneficia a la productividad, sino que al aumentar la velocidad de soldeo, se invierte la mayor parte del aporte térmico en fundir el metal en lugar de calentar la zona afectada térmicamente, disminuyendo así su tamaño y aumentando la penetración de la soldadura.
- En cuanto a los costes, decir que la botella de Helistar SS es un 40% más cara que la botella de Argón y que el caudal necesario de gas para proteger la soldadura también es mayor. Sin embargo, con Helistar SS se mejoran las características de la soldadura y se disminuyen los tiempos de soldeo.



5 Presupuesto

5.1 Coste de material

- Chapa de acero A321 2000x1000x12..... **681,6 €**
- Pletina acero A321 100x5x6000 **94,8 €**
- Bobina hilo MIG Praxair modelo M-347 222487 de 1 mm según AWS
5.9:ER347 Si **224,7 €**
- Botella Argón gas 10,5 m³ 200 bar **257,2 €**
- Botella Helistar SS 10,5 m³ 200 bar..... **370,7 €**

Total coste material 1629 €

5.2 Coste mano de obra directa

Se estima el coste de la mano de obra de un oficial de 1^a según convenio por hora trabajada en 13,7 €/hora.

- Corte y biselado (2 horas) **27,4 €**
- Soldadura (2 horas) **27,4 €**
- Corte final y mecanizado (8 horas) **109,6 €**

Total coste mano de obra directa 164,4 €

5.3 Coste de puesto de trabajo y mano obra indirecta

El coste del puesto de trabajo se refiere al coste de la luz, agua, electricidad... y supone un incremento de 3 € por hora trabajada. La mano de obra indirecta es la que no está directamente relacionada con el trabajo, y supone un 20% de la mano de obra directa.

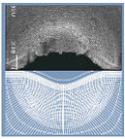
Total coste puesto de trabajo (3€ x 12 horas) 36 €

Total coste mano de obra indirecta (20% directa) 32,9 €

TOTAL COSTE FABRICACIÓN PROBETAS 1862,3 €

5.4 Coste ensayos

- 8 x líquidos penetrantes (20 €/ud)..... **160 €**
- 6 x macroestructuras (40 €/ud) **240 €**
- 4 x ensayo tenacidad Charpy (10 €/ud) **40 €**
- 2 x dureza vickers (25 €/ud)..... **50 €**
- 2 x microestructuras (40 €/ud) **40 €**



Total coste ensayos 530 €

5.5 Coste ingeniería

El coste de un titulado superior según convenio estimado por hora trabajada es de 21,27 €

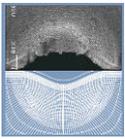
Total coste ingeniería (21,27 € x 140 horas)..... 2977,8 €

5.6 Coste total del proyecto

- Coste fabricación de probetas **1862,3 €**
- Coste ensayos..... **530 €**
- Coste ingeniería **2977,8 €**

TOTAL COSTE DE PROYECTO 5370,1 €

**EL COSTE TOTAL DEL PROYECTO ASCIENDE A CINCOMIL
TRESCIENTOS SETENTA EUROS Y 10 CÉNTIMOS DE EURO**



6 Bibliografía

6.1 Libros

- Manual del soldador de Cesol, Segunda edición.
- Introducción a la metalurgia de la soldadura. L.A.Vedia
- Catálogo de gases de protección de la soldadura Praxair
- Catálogo gases Linde de protección para la soldadura
- Catálogo ARCAL gases de protección de soldadura de Air Liquide

6.2 Apuntes

- Apuntes de la asignatura Soldadura y Otras Tecnologías de Unión del Master Intrauniversitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras
- Apuntes de la asignatura Materiales Estructurales del Master Intrauniversitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras
- Apuntes de la asignatura Técnicas de Inspección y Análisis no Destructivo del Master Intrauniversitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras

6.3 Normativa

- ANSI/AWS A5.32:2011 "Welding Consumables: Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes"
- ASTM E23:2007 "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials"
- AWS B2.1-8-023-94, "Standard WPS for SMAW of Austenitic Steel. 1/8 through 1-1/2 inch Tick, As welded condition "
- ASTM E92-16 "Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials"
- AWS B4.0:2007 "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds"