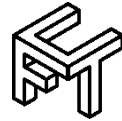




Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



OPIFEX SPARK/SMAW: SOFTWARE PARA DISEÑO DE TECNOLOGÍAS DE SOLDADURA MANUAL POR ARCO ELÉCTRICO

Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Alexey Laguardia Ibáñez

Tutor: Dr.C. Ramón Quiza Sardiñas

Matanzas, 2017

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Alexey Laguardia Ibáñez, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada OPIFEX SPARK/SMAW: SOFTWARE PARA DISEÑO DE TECNOLOGÍAS DE SOLDADURA MANUAL POR ARCO ELÉCTRICO y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 25 de noviembre de 2017.

Alexey Laguardia Ibáñez

RESUMEN

La soldadura manual con electrodo revestido es una de los procesos de unión más utilizados, debido a sus ventajas tecnológicas y económicas. La siguiente tesis presenta el diseño y la implementación de una aplicación informática para el diseño de tecnologías de soldadura manual con electrodo revestido de aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, de acuerdo con los avances más recientes en este campo. La aplicación también incluye las normativas de soldadura actualmente en vigor. El trabajo presenta la formalización de los algoritmos de diseño de la tecnología, incluyendo todos los datos requeridos y las expresiones de cálculos y recomendaciones. La aplicación fue desarrollada utilizando Qt, con el objetivo de garantizar la portabilidad y compatibilidad con diferentes sistemas operativos. Con ese mismo propósito, se evitó el uso de herramientas de terceros, tales como los motores de bases de datos. La interfaz gráfica de usuario implementada, fue diseñada para proporcionar facilidades de trabajo para la entrada de datos, el cálculo y selección de parámetros, la visualización de los resultados y la impresión de la carta tecnológica obtenida. Varios casos de estudios fueron llevados a cabo para comprobar el funcionamiento de la aplicación, mostrando la misma estabilidad y resultados correctos.

Palabras claves: Soldadura manual con electrodo revestido; Software; Diseño de tecnologías.

ABSTRACT

Shielded metal arc welding is one of the most widely used joining processes, because of their technological and economic advantages. The following thesis presents the design and implementation of a software for designing shielded metal arc welding of carbon, low-alloy and stainless steels, according to the most recent advances in this field. The software also include the currently approved welding standards. The work presents the formalization of the technology design algorithms, including all the required data and the computing expressions and recommendations. The software was developed by using Qt, in order to warranty the portability and compatibility to different operative systems. From this point of view, the use of third-part tools, such as database engines, was also avoided. The implemented user graphical interface was designing for providing work facilities for entering data, computing and selecting parameters, visualizing outcomes and printing the obtained welding specification. Several case of study were carried out for testing the software performance, showing stability a proper outcomes.

Keywords: Shielded metal arc welding; Software; Technology design.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1. Estado del Arte	3
1.1 Fundamento de los procesos de soldadura.....	3
1.2 Tecnología de soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido.	6
<i>1.2.1 Datos necesarios para la tecnología.</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2 Preparación de bordes.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.3 Selección de electrodos.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.4 Cálculo de la intensidad de corriente.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.5 Cálculo de área de la sección y de la cantidad de pasadas.</i>	<i>21</i>
<i>1.2.6 Pre calentamiento y tratamiento térmico posterior.....</i>	<i>22</i>
<i>1.2.7 Cálculo de los tiempos y costos del proceso.....</i>	<i>25</i>
<i>1.2.8 Selección del equipamiento complementario.....</i>	<i>27</i>
1.3 Conclusiones parciales del capítulo	29
Capítulo 2. Formalización de la Tecnología de SMAW	30
2.1 Descripción general	30
2.2 Entrada de datos	31
<i>2.2.1 Geometría de la unión</i>	<i>31</i>
<i>2.2.2 Metal base.....</i>	<i>33</i>
<i>2.2.3 Máquina de soldadura</i>	<i>34</i>
2.3 Selección de la preparación de bordes y cantidad de pasadas	34
2.4 Selección de electrodos.....	38
<i>2.4.1 Electrodos para aceros al carbono y bajoaleados</i>	<i>38</i>

2.4.2 <i>Electrodos para aceros inoxidable</i>	41
2.5 Cálculo de la intensidad de corriente	43
2.6 Selección de precalentamiento y tratamiento térmico posterior	44
2.6.1 <i>Precalentamiento y tratamiento térmico posterior para aceros al carbono y bajoaleados</i>	44
2.6.2 <i>Precalentamiento y tratamiento térmico posterior para aceros inoxidable</i>	45
2.7 Cálculo de los tiempos y costos del proceso.....	45
2.8 Selección del equipamiento auxiliar	47
2.9 Conclusiones parciales del capítulo	49
Capítulo 3. Descripción de la Aplicación	50
3.1 Características generales	50
3.2 Ventana principal	50
3.2.1 <i>Descripción de la interfaz</i>	50
3.2.2 <i>Menú principal</i>	51
3.2.2 <i>Barra de herramientas</i>	54
3.3 Cuadros de diálogo	55
3.3.1 <i>Contenido del cajetín</i>	55
3.3.2 <i>Geometría de la unión</i>	56
3.3.3 <i>Material base</i>	57
3.3.4 <i>Cargar material</i>	58
3.3.5 <i>Máquina</i>	59
3.3.6 <i>Cargar máquina</i>	60

3.3.7 Preparación de bordes.....	61
3.3.8 Selección de electrodos (aceros al carbono y bajoaleados).....	62
3.3.9 Cargar electrodo (acero al carbono y bajoaleado).....	63
3.3.10 Selección de electrodos (aceros inoxidables).....	64
3.3.11 Equipamiento auxiliar	66
3.3.12 Requerimientos tecnológicos	67
3.3.13 Edición de materiales	68
3.3.14 Edición de máquinas.....	69
3.3.15 Edición de electrodos para aceros al carbono y bajoaleados.....	70
3.3.16 Edición de electrodos para aceros inoxidables	72
3.3.17 Opciones	74
3.4 Estudio de casos	77
3.4.1 Caso 1: Unión a tope, plana, de acero al carbono.....	77
3.4.2 Caso 2: Unión de tubo a tope, horizontal, de acero al carbono	78
3.4.2 Caso 3: Unión en T, plana, de acero inoxidable	79
3.5 Conclusiones parciales del capítulo	80
Conclusiones	81
Recomendaciones	82
Referencias Bibliográficas.....	83
Anexos	86
Anexo 1 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte.....	86

INTRODUCCIÓN

La soldadura manual por arco eléctrico (*shielded metal arc welding*, SMAW) es uno de los procesos tecnológicos más difundidos para la unión de piezas y componentes metálicos, especialmente, de aceros. Esto se debe a una notable combinación de ventajas que incluyen la simplicidad, portabilidad y bajo costo del equipamiento, la calidad de las uniones obtenidas y el ahorro de metal durante el proceso.

Aunque el diseño de tecnologías de SMAW no es excesivamente complejo (especialmente si se compara con otros procesos, como el maquinado), al tener que aplicarse, normalmente, a un grupo grande de costuras, se vuelve una tarea tediosa y repetitiva, propensa a errores humanos.

Hay que adicionar, a lo anterior, que, dada la alta responsabilidad de los resultados de los procesos de soldadura en la seguridad industrial y humana, es importante contar con cartas tecnológicas que describan y guíen la ejecución de los mismos, tanto para garantizar la calidad de la unión como para garantizar la trazabilidad del proceso con vistas a certificaciones y auditorías.

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta muy conveniente la automatización del diseño de tecnologías de SMAW utilizando técnicas informáticas. Aunque existen productos de software con este propósito, su costo es elevado y no siempre se adaptan a los requerimientos de la industria cubana. Por otro lado, otros productos desarrollados en Cuba, tales como Soldasoft, se han quedado obsoletos tanto por los algoritmos y datos que utiliza como por su compatibilidad con los sistemas operativos contemporáneos.

Se puede identificar, como **problema** a tratar en la tesis, *la no disponibilidad de un software para el cálculo de regímenes de SMAW, a precios asequibles y compatibles con los sistemas operativos utilizados actualmente.*

Para dar respuesta al problema anterior, se propone como **hipótesis** del presente trabajo que, *mediante la utilización de las herramientas computacionales modernas, es posible la implementación de una aplicación informática que permita desarrollar tecnologías de*

SMAW, según los más modernos avances y regulaciones en este campo, garantizando la compatibilidad con los sistemas operativos actuales.

Para la solución de este problema, se impone, entonces, la recopilación y organización de esta información, por lo cual se define como **objetivo general** de este trabajo, *diseñar e implementar una aplicación informática para diseñar tecnologías de SMAW para aceros.*

Como **objetivos específicos** se establecen los siguientes:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre el diseño de tecnologías de SMAW para aceros, identificando tanto los más recientes avances en este campo, como las normativas cubanas e internacionales aplicables.
2. Formalizar el algoritmo de diseño de tecnologías de SMAW para aceros, definiendo todos los elementos a calcular o establecer, así como los datos requeridos en cada etapa del mismo.
3. Implementar la metodología de diseño de tecnologías de SMAW para aceros en forma de código, que permita su aplicación automatizada.
4. Diseñar e implementar la interfaz gráfica de usuario de la aplicación, garantizado la facilidad de la interacción para la entrada de datos y el manejo de los resultados.
5. Comprobar el funcionamiento de la aplicación con varios casos de estudio.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo tiene como objetivo describir los aspectos principales de la soldadura manual con electrodos revestido y del diseño de sus tecnologías, según los más recientes avances en dicho campo y las normativas legales vigentes, tanto cubanas como internacionales.

1.1 Fundamento de los procesos de soldadura

La soldadura es un proceso de unión entre metales por la acción del calor, con o sin aportación de material metálico nuevo. Una de las principales ventajas en el empleo de la soldadura es que esta puede adaptarse a la forma de los cuerpos que requieren ser unidos y dentro de los factores importantes de su empleo destacan el ahorro en pernos o sujetadores y en el tiempo de ensamblado de estos (Welman 2012; API 2009). Al soldar, se requiere que las piezas se encuentren firmemente unidas por sujetadores o abrazaderas, dejando un espacio libre entre éstas para la aplicación de la soldadura. El calor debido a la aplicación de la soldadura genera distintos cambios metalúrgicos en los elementos a unir y esta unión causa esfuerzos residuales en los materiales, lográndose eliminar con un tratamiento térmico. Si se van a soldar piezas de un grosor considerable, es recomendable someterlas a un precalentamiento para beneficiar su unión (Yan *et al.* 2017).

Dentro de los procesos de soldadura más utilizados están:

- Soldadura manual por arco con electrodo revestido (*shielded metal arc welding*, SMAW). Es un proceso de soldadura con un arco entre un electrodo cubierto y el baño de soldadura. El proceso se usa con la protección de la descomposición del recubrimiento del electrodo, sin la aplicación de presión, y con el metal de aporte del electrodo (AWS D1.1 2015).
- Soldadura con arco sumergido (*submerged arc welding*, SAW). Soldadura por arco sumergido. Este es un proceso de soldadura al arco que usa un o varios arcos entre un electrodo de metal no protegido y el baño de soldadura. El arco y el metal fundido se protegen por un manto de fundente granular sobre las piezas que

van a trabajarse. El proceso se utiliza sin presión y con metal de aporte del electrodo y a veces de una fuente suplementaria (electrodos de soldaduras, fundente o gránulos de metal) (La Fé *et al.* 2017).

- Soldadura oxiacetilénica (con gases al soplete). Este método emplea el calor generado para fundir las dos piezas de metal base en una. El calor aportado en este tipo de soldadura se debe a la reacción de combustión del acetileno, que resulta ser fuertemente exotérmica, pues se alcanzan temperaturas del orden de los 3500 °C (AWS A5.12M/A5.12 2009).
- Soldadura protegida por gas inerte y con electrodo de tungsteno (*tungsten inert gas*, TIG). Este proceso se caracteriza por emplear el intenso calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a soldar, donde puede o no utilizarse metal de aporte. Se utiliza gas de protección inerte (argón o helio, a veces mezclados con hidrógeno) cuyo objetivo es desplazar el aire, para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presente en la atmósfera (Miller Electric 2013).
- Soldadura protegida por gas inerte y con electrodo metálico (*metal inert gas*, MIG). Es un proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible. El arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo continuo (sirve como material de relleno para la soldadura) y las piezas a unir, el gas inerte el cual no participa en la reacción de soldadura, protege la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores (AWS A5.12M/A5.12 2009).
- Soldadura protegida por gas activo y con electrodo metálico (*metal active gas*, MAG). Proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible. El arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo continuo (sirve como material de relleno para la soldadura) y las piezas a unir. El gas utilizado participa de forma activa en la soldadura. Su zona de influencia puede ser oxidante o reductora (Miller Electric 2012).

Dentro de las ventajas de los procesos de soldadura, se destacan las siguientes (Burgos Sola 1987):

- Economía de metal, como resultado de la utilización total de la sección de trabajo de los elementos en la construcciones soldadas, que permiten soluciones constructivas más racionales en correspondencia con las cargas actuales, así como una disminución del peso de los elementos en las uniones soldadas.
- Reducción de tiempos de trabajo y disminución de los costos de fabricación de la construcción debido a la disminución de gastos de metal y de las dificultades de trabajo.
- Posibilidad de fabricación de piezas de forma complejas mediante soldadura de electrodos aislados fundidos o forjados en sustitución de piezas totalmente fundidas o forjadas.
- Pueden ser soldados metales disimiles: aceros inoxidable con aceros al carbono, cobre con aceros y otros. La utilización en construcciones de forma compleja, como sustitución de las obtenidas por forja y fundición, permite que la productividad del trabajo durante la elaboración de la construcción soldada es dos veces mayor que las fundidas y las condiciones de trabajo sean significativamente mejores.
- Reducción de costos en los equipos tecnológicos.
- Disminución de la complejidad de la mecanización de la producción masiva de piezas soldadas de un mismo tipo.
- Elaboración de componentes miniaturizados y de piezas en la producción de varios tipos de artículos.
- Hermeticidad y confiabilidad de las uniones soldadas.
- Disminución de los ruidos organizados por la producción y el mejoramiento de las condiciones de trabajo en los talleres. Con la soldadura se obtiene uniones soldadas que tienen una resistencia mayor que la de del metal base.

A pesar de todo esto, emplear soldaduras requiere de precauciones a la hora de su ejecución en obra; llevarlas a cabo exige personal cualificado, los encargados de realizar estos trabajos deben llevar protección y deben cuidarse las soldaduras a la intemperie sobre todo en tiempos inclementes; toda su ejecución requiere de control de calidad.

1.2 Tecnología de soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido.

1.2.1 Datos necesarios para la tecnología.

1.2.1.1 Geometría de la unión soldada.

Le geometría de la unión soldada determina una parte importante de la tecnología con que se elaborará y está dada por varios parámetros. En primer lugar, se tienen el tipo de junta y el tipo de costura. El primero se caracteriza por la posición mutua de las piezas que se han de soldar, en el lugar de su unión. La Fig. 1.1 muestra los tipos de juntas más comunes (Schimpke et al. 1985).

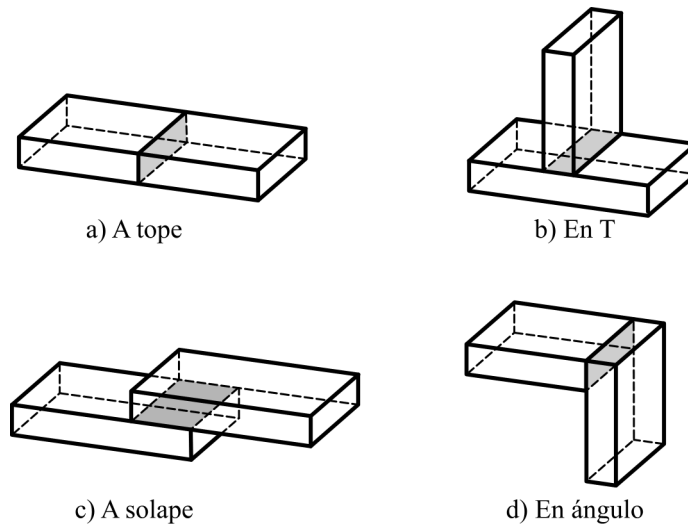


Figura 1.1 Tipos de juntas en las uniones soldadas

Por su parte, el tipo de costura tiene en cuenta, además, la clase y la preparación del perfil del borde de las piezas a soldar (Schimpke et al. 1985). Los dos tipos de costura más utilizados son a tope y en esquina (ver Fig. 1.2).

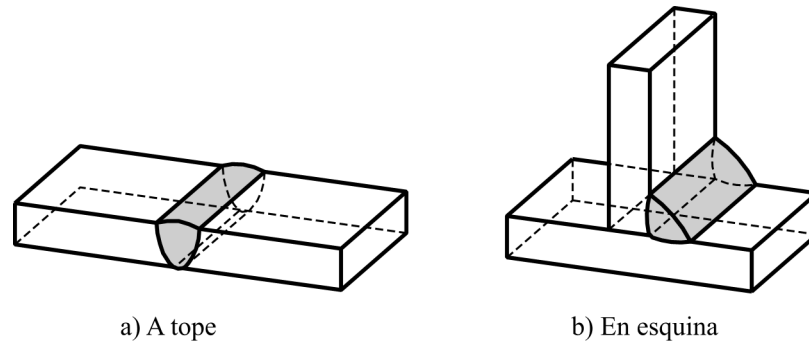


Figura 1.2 Tipos de costuras en las uniones soldadas

Otro aspecto importante a considerar es la posición espacial de la costura. Para costuras rectas, la misma está caracterizada por dos parámetros (NC-ISO 6947: 2004): el ángulo de la pendiente, S , y el de la rotación, R (Fig. 1.3). En el sistema de coordenadas considerado, el eje de la costura pasa por el origen y está situado sobre el plano vertical xz .

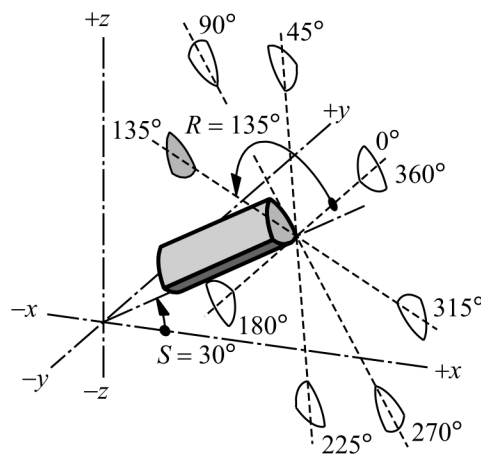


Figura 1.3 Definición de la pendiente y la rotación de una costura recta (NC-ISO 6947: 2004)

A partir de los ángulos anteriores, la NC-ISO 6947: 2004 define siete posiciones principales, las cuales se resumen en la Tabla 1.1 y se muestran, gráficamente, en la Fig. 1.4.

Tabla 1.1 Posiciones principales de soldadura (NC-ISO 6947: 2004)

<i>Símbolo</i>	<i>Denominación, R</i>	<i>Pendiente, S</i>	<i>Rotación, R</i>
PA	Plana	0° 180°	90° 90°
PB	Horizontal vertical	0° 0° 180° 180°	45° 135° 45° 135°
PC	Horizontal	0° 0° 180° 180°	0° 180° 45° 180°
PD	Horizontal bajo techo	0° 0° 180° 180°	225° 315° 225° 315°
PE	Bajo techo	0° 180°	270° 270°
PF	Vertical ascendente	90°	-
PG	Vertical descendente	270°	-

La ASME (BPVC.IX 2015, QW-120 y QW-130) utiliza una designación diferente para las posiciones principales, diferenciando entre juntas a tope (Fig. 1.5) y en esquina (Fig. 1.6), pero sin distinguir entre vertical ascendente y descendente. Hace énfasis, también, entre soldaduras de planchas y de tuberías.

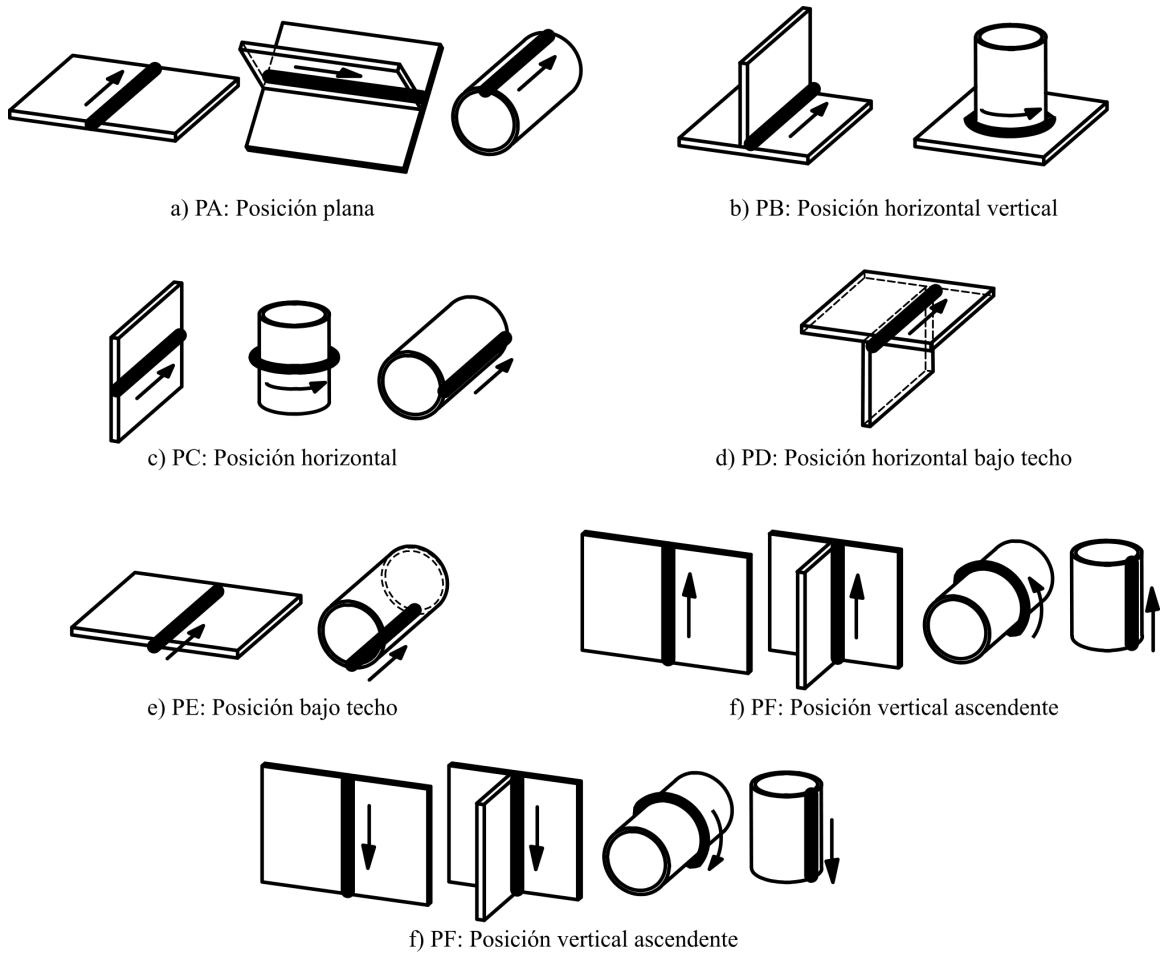


Figura 1.4 Ejemplos de posiciones principales de soldadura (NC-ISO 6947: 2004)

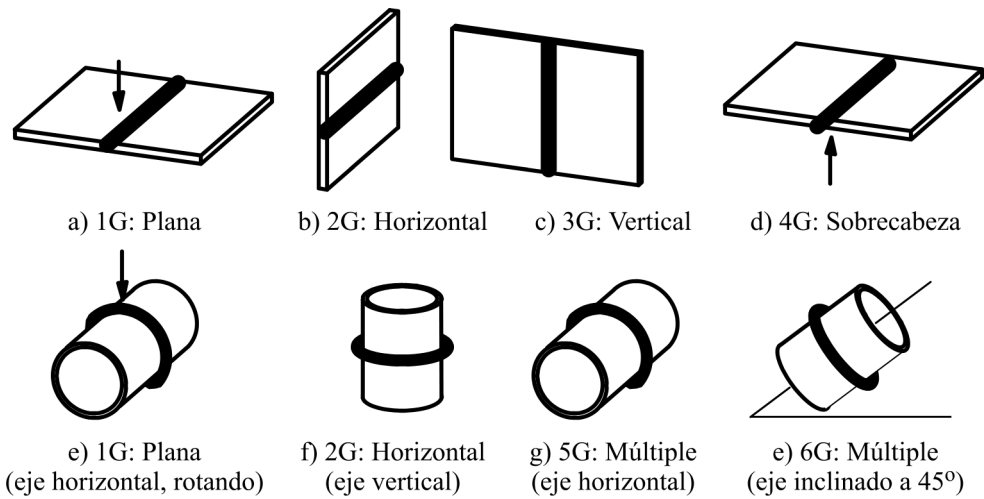


Figura 1.5 Posiciones principales para costuras a tope (ASME BRVC.IX 2015)

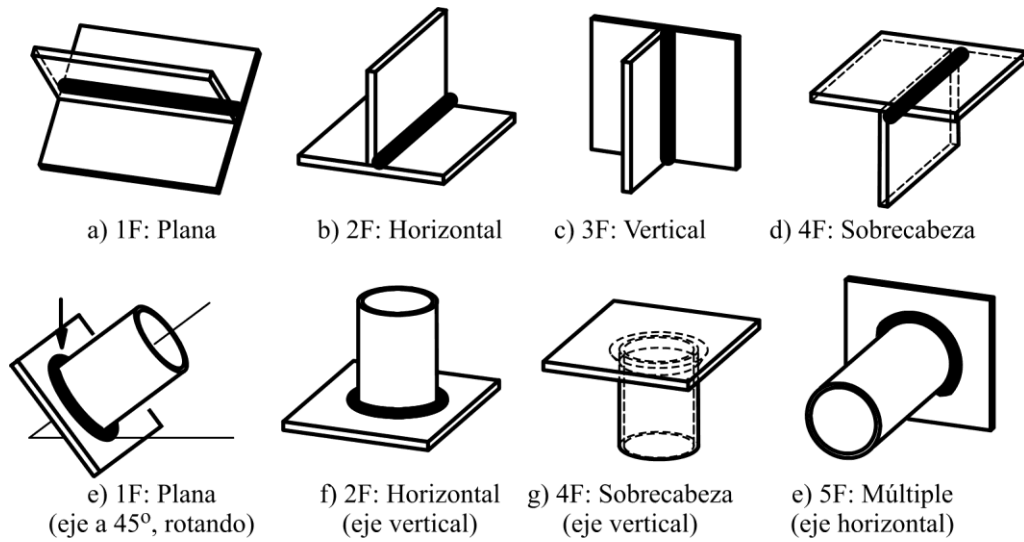


Figura 1.6 Posiciones principales para costuras en esquina (ASME BRVC.IX 2015)

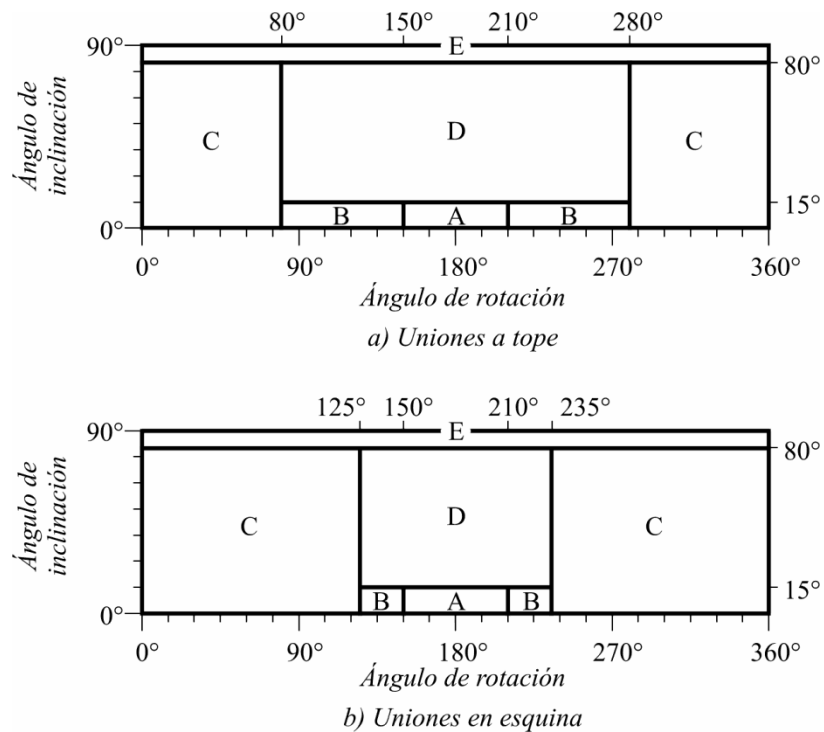


Figura 1.7 Rangos para las posiciones de soldadura (ASME BRVC.IX 2015, QW-461)

Esta propia normativa, a diferencia de la NC-ISO 6947: 2004, establece rangos para las posiciones principales, de forma que cualquier combinación de pendiente (inclinación) y rotación corresponde a una posición principal (Fig. 1.7).

1.2.1.2 Material base

Los materiales bases más utilizados en la soldadura son los aceros y, dentro de ellos, los aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables.

En la composición química de los aceros al carbono, además de hierro y carbono que generalmente no supera el 1%, hay otros elementos necesarios para su producción, como silicio y manganeso, y otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente, tales como azufre, fósforo, oxígeno e hidrógeno. Estas impurezas existen en porcentajes máximos admisibles. Los aceros con mucho azufre y fósforo son más frágiles y sometidos a choque pueden colapsar. Cuando el porcentaje de azufre es alto puede causar poros en la soldadura (Callister y Rethwisch 2010).

El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia mecánica y dureza, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Por tanto, los de bajo carbono son relativamente blandos y poco resistentes pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables y baratos (Ashby 2005).

Los aceros bajoaleados (o de baja aleación), contienen hasta un 5% de elementos de aleación. Dentro de ellos, los más comunes son (Degarmo et al. 2007):

- Cromo: Incrementa la dureza
- Cobre: Mejora la resistencia a la corrosión
- Manganeso: Disminuye la fragilidad y contribuye a la desoxidación del acero.
- Molibdeno: Estabiliza los carburos e inhibe el crecimiento de los granos. Mejora la tenacidad.
- Níquel: Mejora la tenacidad.
- Titanio: Fija el carbono en partículas inertes. Reduce el endurecimiento martensítico en aceros al cromo.
- Tungsteno: Incrementa la temperatura de fusión.
- Vanadio: Estabiliza los carburos. Incrementa la dureza y reduce la ductilidad. Favorece la estructura de grano fina y mejora la tenacidad a altas temperaturas.

Los aceros inoxidables contienen cromo en una proporción no menor del 11%, lo cual garantiza la formación de un recubrimiento granular de óxido de cromo que actúa como protector frente a la corrosión. Además, pueden contener níquel y otros elementos de aleación.

Los aceros inoxidables se clasifican en (Meyers y Chawla 2009):

- Austeníticos: Contienen un máximo de 0.15% de carbono y un mínimo de 16% de cromo y 7% de níquel. No son ferromagnéticos. Constituyen más del 70% de la producción mundial de aceros inoxidables.
- Ferríticos: Contienen cromo y un bajo porcentaje de carbono. Son más baratos que los austeníticos y tienen mejores propiedades mecánicas pero menos resistencia a la corrosión. Son ferromagnéticos.
- Martensíticos: Contienen un mayor porcentaje de carbono lo que incrementa su dureza y los hace susceptibles al tratamiento térmico. Son ferromagnéticos.
- Dúplex: Tienen una microestructura formada por ferrita y austenita. Tienen mejores propiedades mecánicas que los aceros austeníticos y también mejor resistencia a la corrosión localizada. Se caracterizan por sus altos contenidos de cromo (19...23%) y de molibdeno (hasta un 5%) y por tener menos níquel que los aceros austeníticos.

1.2.1.3 Máquina de soldadura

Las máquinas de soldadura son las encargadas de suministrar la corriente eléctrica necesaria para llevar a cabo el proceso. Las más utilizadas en aplicaciones prácticas son los transformadores y los rectificadores.

Los transformadores de soldadura se usan para cambiar la corriente alterna desde la línea de energía a una corriente de bajo voltaje y alto amperaje para la alimentación del arco de soldadura. Se usa comúnmente una combinación de tomas de corrientes principales y/o secundarias en el transformador de soldadura para proporcionar un ajuste de la corriente de soldado, además de un ajuste del voltaje secundario. Suministran corriente alterna.

Los rectificadores constan de dos partes principales: el transformador reductor y el bloque de rectificadores. Suministran corriente continua lo cual hace que se produzca un arco más estable (Burgos Sola 1987).

1.2.2 Preparación de bordes

La preparación de bordes se lleva a cabo con el fin de garantizar la penetración de la costura en las piezas a soldar. La selección de la preparación de bordes es un problema fundamentalmente económico; no obstante, un grupo de normativas han sido elaboradas con el fin de regular esta selección. Dentro de ellas, las más empleadas en nuestro país son:

- NC-ISO 9692-1: 2011. Es una norma cubana adoptada a partir de una ISO de 2003, una parte de la norma ISO 9692, tiene como objetivo especificar los tipos de preparaciones de las uniones para soldadura por arco con electrodos revestidos, soldadura por arco protegido con gas y electrodo de aporte, soldadura por llama, soldadura por arco con gas inerte y electrodo de wolframio y soldadura por haz de alta energía de aceros; y la recogida de los datos y configuraciones frecuentemente utilizadas. Posee un total de treinta y seis recomendaciones de preparaciones de bordes. Las recomendaciones dadas han sido recopiladas en base a la experiencia y contienen dimensiones para los tipos de preparaciones de uniones que se consideran, generalmente, aptas para la consecución de las condiciones de soldadura adecuadas.
- AWS D1.1: 2015. Este código cubre los requerimientos de soldadura para todos los tipos de estructuras soldadas creadas normalmente por aceros al carbono y baja aleación de acero construccional. Contiene especificaciones, recomendaciones prácticas, métodos, clasificaciones y guías para la soldadura; dadas por la Sociedad Americana de Soldadura.

Además de las dimensiones de la preparación, son importantes el ancho y la altura del refuerzo (Fig. 1.8). Para uniones a tope (Cary 2012, p. 126), la relación entre la abertura de la preparación, p' , y el ancho del refuerzo, p , está dada por la relación:

$$p = p' + 4 \text{ mm} \quad (1.1)$$

mientras que la altura máxima del refuerzo, q , se puede calcular según:

$$q = \begin{cases} 1 \text{ mm} : & p \leq 10 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} : & 10 \text{ mm} < p \leq 25 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} : & p > 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (1.2)$$

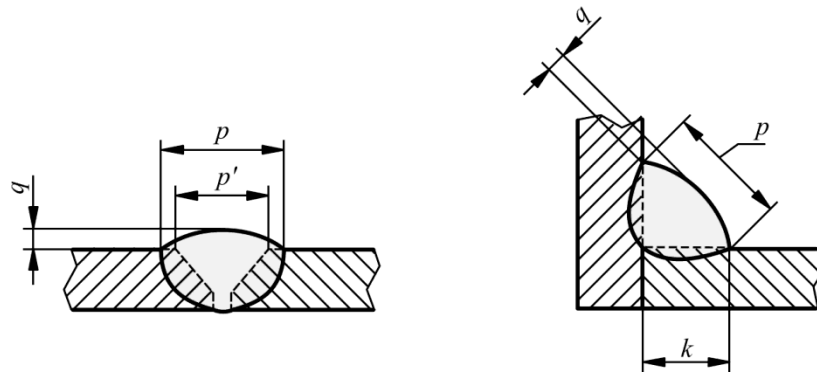


Figura 1.8 Dimensiones del refuerzo de las costuras

Por su parte, para las uniones en esquina (AWS D1.1. 2015, p. 198), la altura máxima del refuerzo, q , se determina según la expresión:

$$q = \begin{cases} 2 \text{ mm} : & p \leq 8 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} : & 8 \text{ mm} < p \leq 25 \text{ mm} \\ 5 \text{ mm} : & p > 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (1.3)$$

1.2.3 Selección de electrodos

La especificación AWS A5.1 (2004), de uso universal, establece una clasificación para los electrodos revestidos para acero al carbono y bajoaleados. En la misma, se establece una designación en la forma siguiente:

E XXYZ-A

donde:

E, indica que se trata de un electrodo para soldadura eléctrica manual;

XX, son dos dígitos (o tres si se trata de un número de electrodo de cinco dígitos) que designan la mínima resistencia a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura, del metal depositado, en ksi (kilo libras por pulgada cuadrada).

Y, indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con el electrodo en cuestión. Dentro de ésta: 1 significa que el electrodo es apto para soldar en todas posiciones plana, vertical, techo y horizontal; 2 si sólo es aplicable para posiciones planas y horizontales; 4 indica que el electrodo es conveniente para posición plana, pero especialmente apto para vertical descendente.

Z, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo, e identifica a su vez el tipo de revestimiento.

Tabla 1.2 Significado de las dos (o tres) primeras cifras del código AWS

Clasificación	Tensión de rotura, TS [MPa]	Tensión de fluencia, YS [MPa]
E60xx	430	330
E70xx	450	390
E80xx	550	460
E90xx	620	530
E100xx	690	600
E110xx	760	670
E120xx	830	740

Tabla 1.3 Significado de la tercera (o cuarta) cifra del código AWS

AWS	Posición de soldadura			
	Plana	Horizontal	Vertical	Bajo techo
Exx1x	Sí	Sí	Sí	Sí
Exx2x	Sí	En esquina	No	No
Exx4x	Sí	Sí	Descendente	Sí

Tabla 1.4 Significado de la cuarta (o quinta) cifra del código AWS

AWS	Revestimiento		Posición
6010	Celuloso	DCEP	Todos
6011	Celuloso	AC y DCEP	Todos
6012	Rutílico	AC y DCEP	Todos
6013	Rutílico	AC y DC	Todos
6019	Rutílico	AC y DC	Todos
7015	Básico	DCEP	Todos
7016	Básico	AC y DCEP	Todos
7018	Básico + Fe	AC y DCEP	Todos
7048	Básico + Fe	AC y DCEP	Todos

Los electrodos utilizados para la soldadura por arco eléctrico empleado en la soldadura de aceros al carbono deben garantizar una unión con las propiedades mecánicas deseadas,

Según su empleo, los electrodos se clasifican en cuatro grupos (ASME BRVC.IX 2015), tal como se muestra en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Clasificación de los electrodos según su aplicación

Grupo	Característica principal	Revestimiento	Clasificación AWS
F1	Alta velocidad de deposición	Con polvo de hierro	E6020, E6022, E6027, E7024, E7027, E7028
F2	Penetración media	Rutílicos	E6012, E6013, E6019, E7014
F3	Alta penetración	Celulósicos	E6010, E6011
F4	Buenas propiedades mecánicas	Básicos	E7015, E7016, E7018, E7048

Las recomendaciones para cada tipo de electrodo, están dadas por sus características y en función de la unión que se desea obtener. Las Tablas 1.6 y 1.7 resumen estas recomendaciones para las aplicaciones generales.

Tabla 1.6 Recomendaciones para el empleo de electrodos en uniones en esquina (Cary 1998, p. 130)














Posición de la unión		Espesor de la plancha [mm]			
		<2	2-6	6-19	≥19
Plana (1)		F2	F2	F1	F1/F4
Plana en esquina (1A)		F2	F3	F1	F1/F4
Horizontal (2)		F2	F3	F3/F4	F3/F4
Vertical ascendente (3)		F2	F3	F4	F4
Vertical descendente (3A)		F2	F3	-	-
Sobrecabeza (4)		F2	F3	F3/F4	F3/F4

Tabla 1.7 Recomendaciones para el empleo de electrodos en uniones a tope y de tuberías (Cary 1998, p. 130)

Posición de la unión		Espesor de la plancha [mm]					
		Sin preparac.		En V		En U	
		<2	2-6	6-19	≥19	6-9	≥19
Plana (1)		F2	F3	F3	F3/F4	F4	F4
Horizontal (2)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Vertical ascendente (3)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Vertical descendente (3A)		F2	F2/F3	F3	F3	F3	F3
Sobrecabeza (4)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Tuberías descendente (5)		F2	F2	F3	F3	F3	F3
Tubería ascendente (5A)		F2	F2	F3/F4	F3/F4	F4	F4

El diámetro de los electrodos, en las costuras a tope, se selecciona en dependencia del espesor de las planchas a soldar (Burgos Sola 1987, p. 66), tal como se muestra en la Tabla 1.8.

La AWS D1.1 (2015) establece como diámetros máximos de electrodos para posición plana los siguientes: 8 mm para pasadas de relleno en costuras en ángulo; 6,4 mm para pasadas de relleno en costuras a tope; y 4,8 mm para pasadas de raíz en ambos tipos de

costura. Para posición horizontal, estos valores son: 6,4 mm para costuras en ángulo y 4,8 mm para costuras a tope. Finalmente, en posición vertical o sobrecabeza, se utilizarán diámetros no mayores de 4,8 mm.

Tabla 1.8 Diámetro del electrodo recomendado en las costuras a tope

Espesor, t [mm]	0,5	1,5	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0
Diámetro, d [mm]	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4

Otras recomendaciones dadas por fabricantes (BOC 2007), coinciden, en general, con las anteriores (Tabla 1.9).

Tabla 1.9 Recomendaciones de fabricantes para diámetro de electrodos en costuras a tope

Espesor, t [mm]	1,5...2,0	2,0...5,0	5,0...8,0	> 8,0
Diámetro, d [mm]	2,5	3,2	4,0	5,0

Esta misma fuente (BOC 2007) recomienda, para las costuras en esquina, las dimensiones de la costura y el diámetro de electrodo que se muestran en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10 Recomendaciones de fabricantes para dimensiones de la costura y diámetro del electrodo en costuras en esquina.

Espesor, t [mm]	Dimensión de la costura, p [mm]	Cateto de la costura, k [mm]	Diámetro, d [mm]
5,0...6,3	5,0	3,5	3,2
6,3...8	6,3	4,5	4,0
8,0...12	8,0	5,5	5,0
10 y más	10,0	7,0	4,0

La designación de los electrodos para aceros inoxidable se basa en su composición química (AWS A5.4/A5.4M: 2006). La misma se realiza a través de dos grupos de dígitos, en la forma:

E-XXX-XX.

Los primeros tres dígitos (que, a veces, están acompañados de letras), indica la composición química del metal depositado por el electrodo, correspondientes a la

clasificación de aceros inoxidable según la AISI. Los dos últimos dígitos, especifican las posiciones de soldadura admisibles, el revestimiento y el tipo de corriente que puede emplear.

Para los electrodos para soldar aceros inoxidable, la selección se basa en criterios diferentes. Algunas de las recomendaciones para la selección de electrodos se muestran en la Tabla 1.11.

Tabla 1.11 Electrodos recomendados para aceros inoxidable

Material	Electrodo	Material	Electrodo	Material	Electrodo
AISI 410	E309/E410	AISI 309	E309	AISI 316L	E316L
AISI 301	E308	AISI 309S	E309	AISI 317	E317
AISI 302	E308	AISI 310	E310	AISI 321	E321/E347
AISI 304	E308	AISI 310S	E310	AISI 347	E347
AISI 304L	E308L	AISI 316	E316	AISI 348	E348

Si las recomendaciones anteriores no pueden ser utilizadas, entonces se selecciona un metal que deposite una composición química similar a la del metal base. Es importante que se garantice una adecuada microestructura en la costura. Para determinar dicha microestructura, se utiliza el diagrama de Schaeffer-De Long (Fig. 1.8). Según recomendaciones de la API (API RP 582: 2009) la cantidad de ferrita en el metal depositado debe estar en el intervalo 5%...10%. Algunos problemas relacionados con la soldadura de aceros inoxidable austeníticos son la precipitación de carburos y la aparición de fase sigma. Esta última alcanza sus menores valores cuando la cantidad de ferrita está en el intervalo 2%...3% (Rodríguez Pérez 1988).

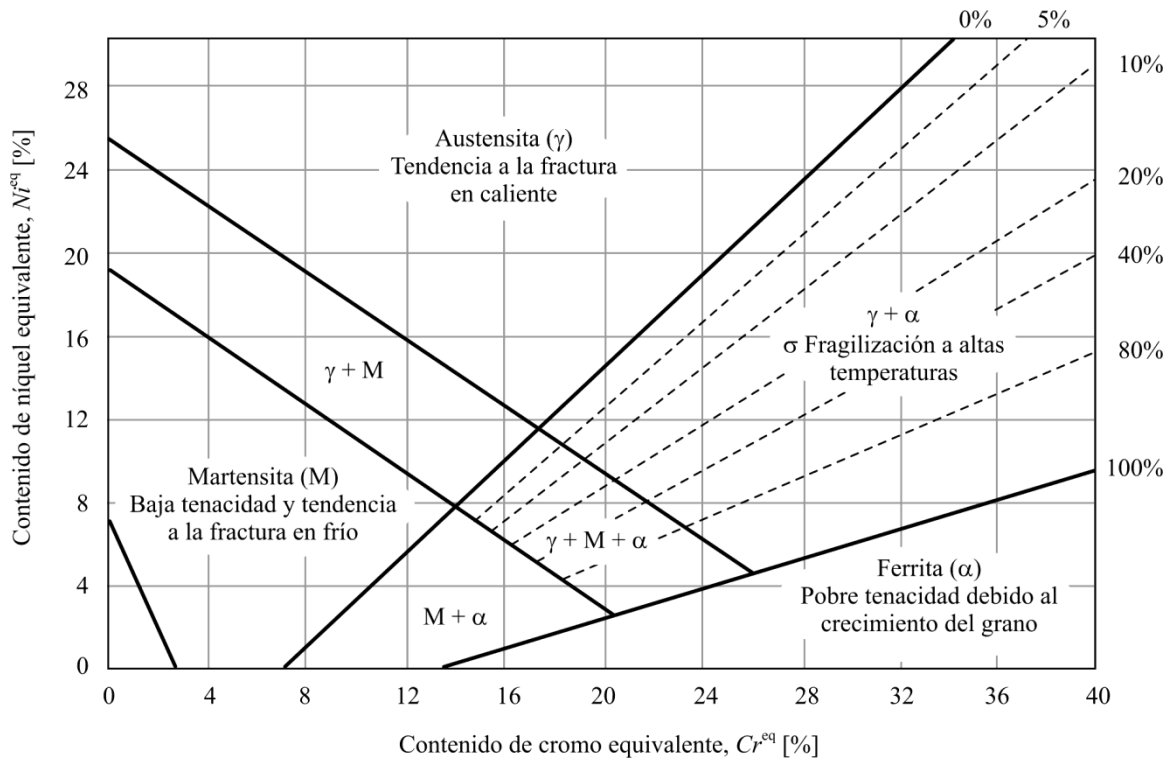


Figura 1.8 Diagrama de Schaeffer-De Long

1.2.4 Cálculo de la intensidad de corriente

La intensidad de la corriente de soldadura depende, fundamentalmente, del diámetro del electrodo utilizado, según la siguiente expresión empírica (Burgos Sola 1987, p. 66):

$$I = (20 + 6d)d ; \tag{1.4}$$

donde la intensidad, I , está dada en amperes [A] y d es el diámetro del electrodo, dado en milímetros [mm].

Cuando el espesor de la plancha es menor o igual que una vez y media el diámetro del electrodo ($t \leq 1,5d$), la intensidad debe disminuirse en un (10...15)%, mientras que si es mayor que tres veces el diámetro del electrodo ($t > 3d$), debe incrementarse en un (10...15)%.

Para costuras verticales, la intensidad debe incrementarse en un (10...15)% y para las sobrecabeza, en un (10...13)%.

1.2.5 Cálculo de área de la sección y de la cantidad de pasadas.

El área de la sección transversal, A , es de gran importancia ya que permite determinar otros parámetros del proceso como el gasto de electrodo, el consumo de electricidad y el tiempo tecnológico. Desde el punto de vista geométrico, la sección transversal de la costura se divide convencionalmente en una zona formada por el metal base y otra por el metal de aporte, con áreas A_B y A_A , respectivamente (ver Fig. 1.9 a), aunque debe tenerse en cuenta que, en realidad, el metal de la costura está formado por una mezcla de ambos componentes.

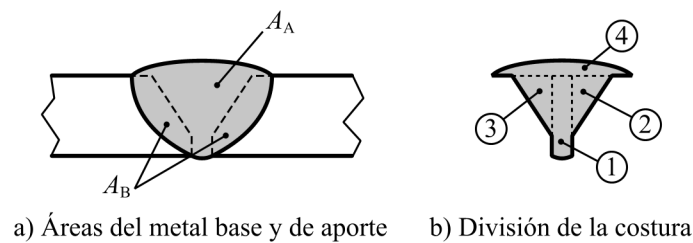


Figura 1.9 Áreas de la costura

El área de la zona del metal de aporte se calcula dividiéndola en sectores de geometría simple y sumando las respectivas áreas.

La determinación del número de pasadas es una de las tareas más complejas en el diseño de tecnologías de SMAW, ya que depende de muchos factores, incluyendo la habilidad del operador que ejecute la costura.

Un enfoque, es dividir el espesor a soldar en una cantidad de pasadas, cada una con un espesor dado. Este espesor, para pasadas de raíz en costuras a tope (AWS D1.1: 2015) no debe ser superior a 10 mm para posición plana; 12 mm para posición vertical y 8 mm para posiciones horizontal o sobrecabeza. Esos mismos valores corresponden a los anchos máximos que pueden obtenerse en una única pasada en costuras en ángulo. Por otra parte, para pasadas de relleno, el valor máximo del espesor será de 5 mm, en todas las posiciones.

El ancho máximo de cada cordón de soldadura es de 2,5...3,0 veces el diámetro del electrodo utilizado (Burgos Sola 1987).

1.2.6 Precalentamiento y tratamiento térmico posterior

Se denomina precalentamiento al calentamiento que, inmediatamente antes del proceso de soldadura, se aplica a la pieza a soldar, con el objetivo de disminuir la diferencia de temperatura entre la zona calentada por el arco y el metal base frío, lo cual es fuente de tensiones que pueden crear agrietamiento e, incluso, roturas (Cary 1998).

El precalentamiento de los aceros al carbono y bajoaleados se determina a partir del carbono equivalente (Rodríguez Pérez 1988):

$$C^{eq} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}; \quad (1.5a)$$

el cual se corrige para el espesor de la plancha:

$$C'_{eq} = C_{eq} (1 + t / 200 \text{ mm}). \quad (1.5b)$$

La temperatura de precalentamiento se determina por la expresión:

$$T_{PH} = 350^{\circ}\text{C} \sqrt{C'_{eq} - 0.25}. \quad (1.6)$$

La AWS D1.1/D1.1M: 2015 recomienda, para calcular el precalentamiento de aceros al carbono y aleados el método basado en el control del hidrógeno. Para ello, se calcula el parámetro de la composición química, P_{cm} :

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B. \quad (1.7)$$

El contenido de hidrógeno introducido por el electrodo, H^{el} , se determina de uno de los siguientes grupos:

- Extrabajo ($H^{el} \leq 5 \text{ mL}/100 \text{ g}$): Electrodo de bajo hidrógeno tomados de paquetes sellados y secados a (370...430) C durante 1 h, y utilizados en las 2 h posteriores al secado.

- Bajo ($H^{el} \leq 10$ mL/100 g): Electrodo de bajo hidrógeno tomados de paquetes sellados y utilizados en las 4 h posteriores a la apertura del paquete.
- No controlado ($H^{el} \approx 30$ mL/100 g): Otros electrodos que no satisfacen los requerimientos anteriores.

Tabla 1.12 Determinación del índice de susceptibilidad, SI

Parámetro de composición química	Nivel de hidrógeno		
	Extrabajo	Bajo	No controlado
$P_{cm} \leq 0.18$	A	B	C
$0.18 < P_{cm} \leq 0.23$	B	C	D
$0.23 < P_{cm} \leq 0.28$	C	D	E
$0.28 < P_{cm} \leq 0.33$	D	E	F
$0.33 < P_{cm} \leq 0.38$	E	F	G

Tabla 1.13 Temperatura mínima de precalentamiento

Nivel de restricción	Espesor t [mm]	Índice de susceptibilidad, SI						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	$t \leq 10$	-	-	-	-	60	140	150
	$10 < t \leq 20$	-	-	-	60	100	140	150
	$20 < t \leq 38$	-	-	-	80	110	140	150
	$38 < t \leq 75$	-	-	40	95	120	140	150
	$t \geq 75$	-	-	40	95	120	140	150
Medio	$t \leq 10$	-	-	-	-	70	140	160
	$10 < t \leq 20$	-	-	-	80	115	145	160
	$20 < t \leq 38$	-	-	75	110	140	150	160
	$38 < t \leq 75$	-	80	110	130	150	150	160
	$t \geq 75$	95	120	140	150	160	160	160
Alto	$t \leq 10$	-	-	-	40	110	150	160
	$10 < t \leq 20$	-	-	65	105	140	160	160
	$20 < t \leq 38$	-	85	115	140	150	160	160
	$38 < t \leq 75$	115	130	150	150	160	160	160
	$t \geq 75$	115	130	150	150	160	160	160

Con los dos parámetros anteriores, se determina el índice de susceptibilidad, SI, tal como se muestra en la Tabla 1.12.

Finalmente, la temperatura mínima de precalentamiento e interpasada, se determina de la Tabla 1.13, para las condiciones de restricción de las deformaciones de la pieza, el cual se clasifica en tres niveles:

- Bajo: Uniones soldadas para las cuales existe una razonable libertad de movimiento.
- Medio: Uniones soldadas en las cuales, por estar unidas a una estructura, la libertad de movimiento está limitada.
- Alta: Uniones soldadas que no tiene, prácticamente, libertad de movimiento (tales como las reparaciones, especialmente en espesores gruesos).

Otras expresiones para el cálculo del precalentamiento han sido propuestas por el Instituto Internacional de Soldadura (*International Institute of Welding, IIW*) (Hinton, y Wiswesser, 2008):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}; \text{ y} \quad (1.8)$$

$$T_{PH} = 450 \text{ } ^\circ\text{C} \sqrt{C_{eq} - 0,42}. \quad (1.9)$$

Para los aceros inoxidable austeníticos, se puede aplicar un precalentamiento de 150 °C, pero se debe garantizar siempre una temperatura interpasada de 316 °C (ASME B31-3 2014, tabla 330.1.1).

Para el tratamiento térmico posterior de las uniones soldadas en aceros, se tienen las recomendaciones mostradas en la Tabla 1.14:

*Tabla 1.14 Recomendaciones para el tratamiento térmico posterior
(ASME B31-3 2014, Tabla 331.1.1)*

Material	Condicion	Temperatura [°C]	Tiempo de permanencia
Aceros al carbono	Excepto para: $t \leq 19$ mm	593...649	2,4 min/mm (min: 1 h)
Ac. aleados ($Cr \leq 0,5\%$)	Excepto para: ($t \leq 19$ mm) y ($TS \leq 490$ MPa)	704...746	2,4 min/mm (min: 1 h)
Ac. aleados ($0,5\% < Cr \leq 2\%$)	Excepto para: ($t \leq 13$ mm) y ($TS \leq 490$ MPa)	704...746	2,4 min/mm (min: 2 h)
Ac. aleados ($2\% < Cr \leq 10\%$)	Excepto para: ($t \leq 13$ mm) y ($Cr \leq 3\%$) y ($C \leq 0,15\%$)	704...746	2,4 min/mm (min: 2 h)
Ac. aleados ($1\% < Ni \leq 3,5\%$)	Excepto para: $t \leq 19$ mm	593...635	1,2 min/mm (min: 1 h)
Ac. inoxidable martensíticos	---	732...788	2,4 min/mm (min: 2 h)

1.2.7 Cálculo de los tiempos y costos del proceso

El tiempo tecnológico, t_T , se calcula a partir de la densidad del material de aporte, ρ ; de la longitud de la costura, L ; y de las áreas de la sección transversal, A_i ; y las velocidades de depósito, α_i , en cada uno de los cordones de la costura (Burgos Sola 1987, p. 273):

$$t_T = \rho L \sum_i \frac{A_i}{\alpha_i} \quad (1.10)$$

Para las costuras verticales, horizontales y sobrecabeza, el tiempo tecnológico debe aumentarse en un 25%, 30% y 60%, respectivamente, debido al incremento de la complejidad de la ejecución.

La velocidad de depósito, α , depende de la intensidad de la corriente y varía de un electrodo a otro. La Fig. 1.10 muestra algunos valores para electrodos típicos.

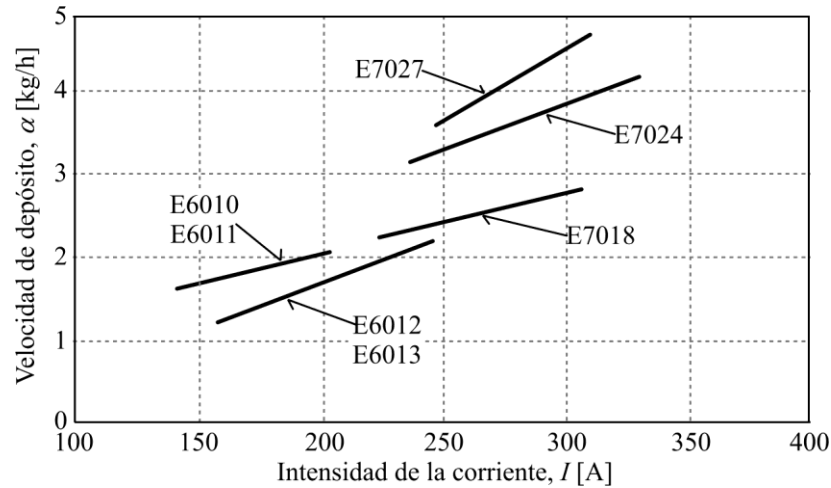


Figura 1.10 Valores del coeficiente de depósito (Cary 1998, p. 130)

El tiempo auxiliar, t_A , dedicado a las operaciones complementarias del proceso, se considera como un 30% del tiempo tecnológico (Burgos Sola 1987, p. 273):

$$t_A = 0,3t_T; \tag{1.11}$$

mientras que el tiempo de servicio, t_s , y el tiempo de descanso, t_D , están en los intervalos:

$$t_s = (0,03 \dots 0,05)(t_T + t_A); \tag{1.12}$$

$$t_D = (0,05 \dots 0,15)(t_T + t_A). \tag{1.13}$$

El tiempo total, t_{TOT} , se calcula por la expresión:

$$t_{TOT} = t_T + t_A + t_s + t_D. \tag{1.14}$$

El consumo de electrodo, G_{el} , se calcula a partir del peso del metal depositado, G , mediante las ecuaciones (Burgos Sola 1987, p. 276):

$$G_{el} = (1,4 \dots 1,6)G; \tag{1.15}$$

$$G = \rho AL; \tag{1.16}$$

donde ρ es la densidad del metal de aporte; A , el área de la sección transversal de la parte de la costura ocupada por el metal de aporte; y L , la longitud de la costura.

El consumo de energía eléctrica, E , se determina a partir del peso del metal depositado, mediante la relación:

$$E = \varepsilon G; \quad (1.17)$$

siendo ε el consumo específico que se toma, $\varepsilon = (3 \dots 4)$ kW/(kg·h), para máquinas de corriente continua y $\varepsilon = (4 \dots 6)$ kW/(kg·h), para máquinas de corriente alterna.

El valor de costo total, Z_{TOT} , se determina mediante la suma de costos de electrodo, Z_{el} ; de energía eléctrica, Z_{en} ; y de mano de obra, Z_{lab} :

$$Z_{TOT} = Z_{el} + Z_{en} + Z_{lab}. \quad (1.18)$$

A su vez, éstos se calculan a partir de las expresiones:

$$Z_{el} = G_{el} z_{el}; \quad (1.19)$$

$$Z_{en} = E z_{en}; \quad (1.20)$$

$$Z_{lab} = t_{TOT} z_{lab}; \quad (1.21)$$

donde z_{el} , z_{en} y z_{lab} son los costos unitarios de electrodo, de energía eléctrica y de mano de obra, respectivamente.

1.2.8 Selección del equipamiento complementario

La tenaza debe mantener fuertemente apretado el electrodo, garantizar el contacto eléctrico y permitir el cambio rápido de los electrodos, sin que el soldador toque las partes metálicas, conductor de corriente y las partes calientes. El tamaño y el tipo de tenaza deben seleccionarse de acuerdo con el trabajo que se designe. Es por ello que deben seleccionarse según el rango adecuado de trabajo.

Con el fin de prevenir el calentamiento excesivo de los cables que unen el portaelectrodo (tenaza) con la máquina de soldadura, debe seleccionarse el calibre adecuado para ellos. Éste depende tanto de la intensidad que circulará por él, como de la longitud de los mismos, tal como se muestra en la Tabla 1.12 (Justel Ramos 2012).

Tabla 1.12 Sección mínima de los cables (Justel Ramos 2012 p. 152)

Intensidad [A]	Longitud de los cables [m]									
	15	25	30	40	50	60	70	80	90	100
100	25	25	35	35	35	35	50	50	50	50
150	35	35	50	50	50	50	70	70	-	-
200	35	50	50	70	70	70	-	-	-	-
250	35	50	70	70	70	-	-	-	-	-
300	50	70	95	95	-	-	-	-	-	-
400	50	70	95	-	-	-	-	-	-	-
500	70	95	-	-	-	-	-	-	-	-
600	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Es uso común, en América, utilizar los calibres AWG para designar los diámetros de los cables eléctricos. En la Tabla 1.13 se muestran las áreas de las secciones transversales de los calibres correspondientes al rango de intensidades utilizadas en soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos.

Tabla 1.13 Calibres WAG (WSS 2013)

Calibre AWG	3	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0
Área [mm ²]	26,7	33,6	42,4	53,5	67,4	85,0	107,2

Una parte importante de la seguridad en la tecnología de soldadura, consiste en seleccionar el filtro adecuado para la protección visual, tal como se recomienda en la Tabla 1.14. Se debe seleccionar, preferentemente, el valor mínimo, ya que valores mayores (más oscuros), dificultan la visión innecesariamente (Justel Ramos 2012).

Tabla 1.14 Selección de filtros para protección visual (Justel Ramos 2012 p. 150)

Intensidad [A]	No. de cristal (mínimo)	No. de cristal (adecuado)
< 60	7	-
60 ... 160	8	10
160 ... 250	10	12
250 ... 500	10	14

1.3 Conclusiones parciales del capítulo

Al concluir el presente capítulo se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. La SMAW presenta un grupo importante de ventajas tecnológicas y económicas que hacen que sea un proceso ampliamente utilizado en el sector industrial y de la construcción.
2. La literatura reporta un grupo importante de expresiones de cálculos, datos y recomendaciones que permiten diseñar las tecnologías de SMAW de forma tal que se garantice su efectividad y eficiencia.
3. Existe un grupo de normativas que regulan varios aspectos del proceso de SMAW. Algunas de ellas son normas cubanas, de obligatorio cumplimiento en nuestro país, mientras otras son normas internacionales o extranjeras, también de amplio uso.

CAPÍTULO 2. FORMALIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SMAW

En el siguiente capítulo se lleva a cabo una formalización de la metodología de diseño de tecnologías de SMAW, a partir de la revisión bibliográfica realizada con anterioridad.

2.1 Descripción general

El algoritmo general del diseño de tecnología de SMAW, consiste en cinco etapas fundamentales. La primera etapa (Código 2.1, líneas 02...04) consiste en la entrada de los datos requeridos para diseñar la tecnología: la geometría de la unión, las propiedades del metal base y las características de la máquina de soldadura a utilizar.

Código 2.1 Diseño de tecnología de SMAW

```
01: INICIO ALGORITMO
02:   ENTRAR: Datos de la unión
03:   ENTRAR: Datos del metal base
04:   ENTRAR: Datos de la máquina de soldadura
05:   SELECCIONAR: Preparación de bordes
06:   DETERMINAR: Esquema de soldadura
07:   PARA Cada tipo de pasada (raíz, relleno y sellado)
08:     SELECCIONAR: Electrodo
09:   FIN PARA
10:   CALCULAR: Número de pasadas
11:   PARA Cada pasada
12:     CALCULAR: Intensidad de la corriente
13:     CALCULAR: Consumo de electrodo
14:     CALCULAR: Consumo de energía eléctrica
15:     CALCULAR: Tiempo tecnológico
16:   FIN PARA
17:   CALCULAR: Temperatura de precalentamiento
18:   CALCULAR: Tratamiento térmico posterior
19:   CALCULAR: Tiempo total
20:   CALCULAR: Costos
21:   SELECCIONAR: Equipamiento auxiliar
22: FIN ALGORITMO
```

En la segunda etapa (Código 2.1, líneas 05...06), se selecciona la preparación de bordes a utilizar y se determina el esquema de soldadura para la costura (es decir, si se utilizarán pasadas de raíz, de relleno y de sellado). En la tercera etapa (Código 2.1, líneas 07...10), se seleccionarán los electrodos a utilizar en cada una de las etapas y se calculará el número de pasadas. En la cuarta etapa (Código 2.1, líneas 11...16), para cada uno de los cordones a realizar, se selecciona el electrodo a utilizar y se calculan los parámetros

tecnológicos (intensidad de la corriente, consumo de electrodos y de energía eléctrica, y costos del proceso). Finalmente, en la quinta etapa (Código 2.1, líneas 17...21), se determinan los parámetros tecnológicos comunes para toda la costura y se selecciona el equipamiento auxiliar.

2.2 Entrada de datos

2.2.1 Geometría de la unión

La geometría de la unión soldada determina una parte importante de la tecnología con que se elaborará y está dada por varios parámetros. En primer lugar, se debe establecer el tipo de junta, que se caracteriza por la posición mutua de las piezas que se han de soldar, en el lugar de su unión. La Fig. 2.1 muestra los tipos de juntas más comunes (Schimpke et al. 1985).

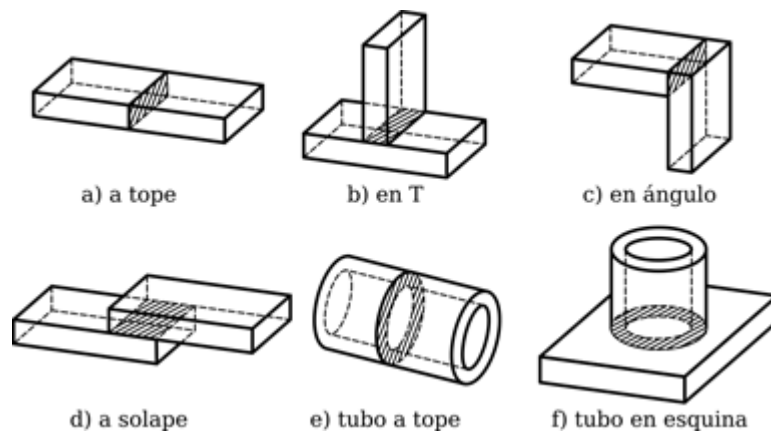


Figura 2.1 Tipos de juntas en las uniones soldadas

Otro aspecto importante a considerar es la posición espacial de la costura. La norma NC-ISO 6947 (2004) define siete posiciones principales, las cuales se muestran en la Fig. 2.2. Como no todas las juntas admiten las ocho posiciones, en el Código 2.2 se definen cuáles pueden seleccionarse en cada caso.

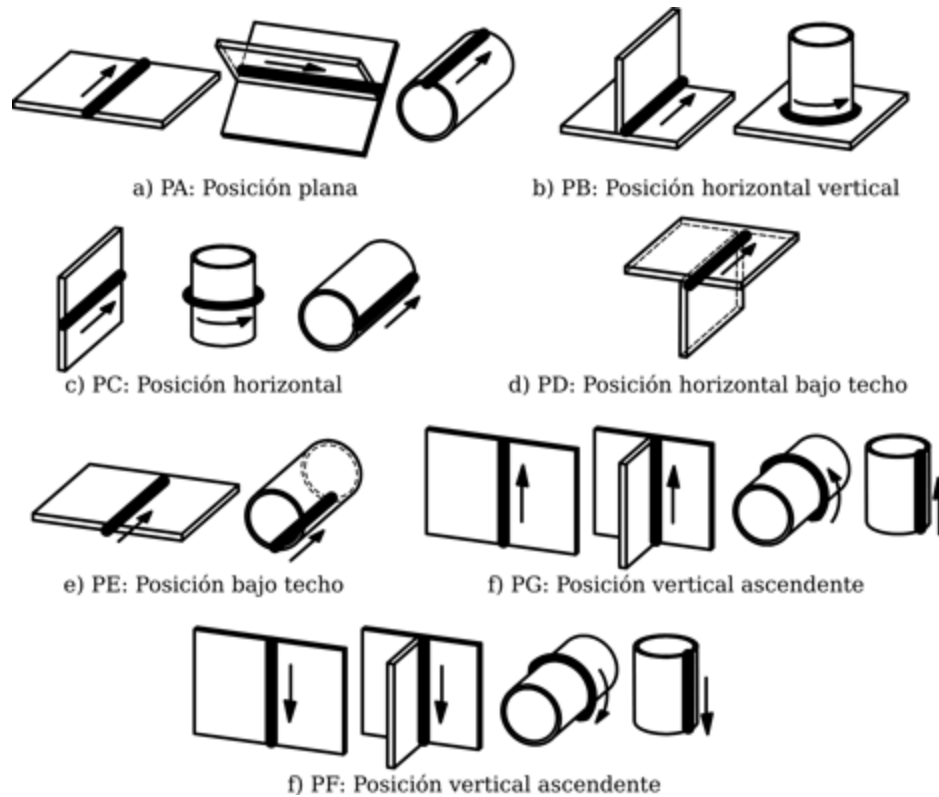


Figura 2.2 Posiciones principales de soldadura (NC-ISO 6947: 2004)

También se entra, como parte del proceso, el valor del espesor de las planchas a soldar y de la longitud de la placa a soldar. En el caso de soldaduras de chapas o longitudinales de tubos se introduce directamente la longitud de la costura, L , mientras que, para las soldaduras ecuatoriales de tubos, se introduce el diámetro, D , y la longitud se determina a partir de éste, mediante la relación:

$$L = \pi D. \quad (2.1)$$

Código 2.2 Entrada de la geometría de la unión

```

01: INICIO
02:   ENTRAR: Junta {A_tope, En_ángulo, En_T, A_solape, ...
                Tubo_a_tope, Tubo_en_esquina }
03:   SI ((Junta = A_Tope) O (Junta = En_ángulo))
04:     ENTRAR: Posición {PA, PC, PE, PF}
05:     ENTRAR: T [Espesor]
06:     ENTRAR: L [Longitud]
07:   SINO SI ((Junta = En_T) O (Junta = A_solape))
08:     ENTRAR: Posición {PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG}
09:     ENTRAR: T [Espesor], T1 [Espesor_1]
10:     ENTRAR: L [Longitud]
11:   SINO SI (Junta = Tubo_a_tope)

```

```

12:      ENTRAR: Posición {PC, PF, PG}
13:      ENTRAR: T [Espesor]
14:      ENTRAR: D [Diámetro]
15:      L = 3.1416*D [Longitud]
16:      SINO SI (Junta = Tubo_en_esquina)
17:      ENTRAR: Posición {PB, PD, PF, PG}
18:      ENTRAR: T [Espesor], T1 [Espesor_1]
19:      ENTRAR: D [Diámetro]
20:      L = 3.1416*D [Longitud]
21:      FIN SI
22: FIN

```

2.2.2 Metal base

Dentro de la metodología propuesta se considerarán, como metal base, sólo los aceros, al formar estas aleaciones la inmensa mayoría de las piezas soldadas por tecnología SMAW. Al establecer las características del metal base (Código 2.3), el primer paso es especificar el tipo de acero (al carbono, de baja aleación o inoxidable). También se requiere la norma que ampara el acero y el grado (marca) del mismo.

Para todos los aceros, se requiere entrar el valor de la tensión de rotura, *TS*. Con respecto a la composición química, para los aceros al carbono se establecen los valores de carbono y manganeso, mientras que para los bajoaleados e inoxidables, además, se indican los de titanio, cromo, níquel, y molibdeno, al ser estos elementos los que influyen (significativamente) en el proceso de soldadura.

Código 2.3 Entrada del metal base

```

01: INICIO
02:      ENTRAR: Tipo_Material {Al_carbono, Aleado, Inoxidable}
03:      ENTRAR: Norma, Marca
04:      ENTRAR: TS [Tensión de rotura]
05:      SI (Tipo_Material = Al_Carbono)
06:          ENTRAR C, Mn
07:      SINO
08:          ENTRAR C, Mn, Ti, Cr, Ni, Mo
09:      FIN SI
10: FIN

```


2.2.3 Máquina de soldadura

Los datos de la máquina de soldadura que se requieren (Código 2.4) son, en primer lugar, la marca (fabricante) y el modelo de la misma. Aunque esta información no es relevante para establecer la tecnología, debe quedar reflejada en la especificación del proceso.

Código 2.4 Entrada de la máquina de soldadura

```
01: INICIO
02:   ENTRAR: Marca, Modelo
03:   ENTRAR: Tipo_Corriente {CD, CA}
04:   ENTRAR: Imin [Corriente_Mínima] y Imax [Corriente_Máxima]
05: FIN
```

También debe establecerse el tipo de corriente que suministra la máquina de soldadura (corriente directa [CD] o alterna [CA]) y los valores mínimo y máximo de la intensidad de la corriente suministrada, I_{\min} e I_{\max} .

2.3 Selección de la preparación de bordes y cantidad de pasadas

La preparación de bordes se selecciona (Código 2.5) a partir de una base de datos correspondiente a las especificaciones de la NC-ISO 9692-1: 2011 (Tabla 2.1). En ella se guardan, para cada preparación, el código de referencia, la designación de la preparación, el tipo de junta para la que se aplica, el rango de espesores (mínimo y máximo) para los que se puede utilizar, y la cantidad de pasadas de raíz y de sellado que requiere.

Código 2.5 Selección de la preparación de bordes

```
01: INICIO
02:   Lista = []
02:   PARA CADA Preparación EN [Base_de_Datos]
03:     SI ((Junta == Preparación->Junta) Y ...
           (T >= Preparación->Espesor_Mínimo) Y ...
           (T <= Preparación->Espesor_Máximo))
04:       ADICIONAR Preparación A Lista
05:     FIN SI
06:   FIN PARA
07:   SELECCIONAR: Preparación DE Lista
08:   DETERMINAR: Dimensiones
08:   CALCULAR: A [Área de la sección del metal de aporte]
08: FIN
```

Tabla 2.1 Datos generales de las preparaciones de bordes

Ref.	Designación	Junta	Espesor [mm]		Pasadas	
			Mínimo	Máximo	Raíz	Sellado
Costuras a tope unilaterales						
1.1	Bordes levantados	A tope	0	2	0	0
1.2.1	Sin preparación	A tope	0	4	0	0
1.3	V simple	A tope	3	10	1	0
1.4	V simple con respaldo	A tope	16	∞	1	0
1.5	V simple con talón amplio	A tope	5	40	1	0
1.6	U simple con raíz en V	A tope	12	∞	1	0
1.7	V simple con raíz en V	A tope	12	∞	1	0
1.8	U simple	A tope	12	∞	1	0
1.9.1	Bisel simple	En T	3	10	1	0
1.9.2	Bisel simple	A tope	3	10	1	0
1.10	Bisel simple con respaldo	En T	16	∞	1	0
1.11	J simple	En T	16	∞	1	0
Costuras a tope bilaterales						
2.1	Sin preparación	A tope	0	8	0	0
2.2	V simple	A tope	3	40	1	1
2.3	V simple con talón amplio	A tope	10	∞	1	1
2.4	V doble con talón amplio	A tope	10	∞	2	0
2.5.1	V doble	A tope	10	∞	2	0
2.5.2	V doble asimétrica	A tope	10	∞	2	0
2.6	U simple	A tope	12	∞	1	1
2.7	U doble	A tope	30	∞	2	0
2.8	Bisel simple	A tope	3	30	1	1
2.9.1	Bisel doble	En T	10	∞	2	0
2.9.2	Bisel doble	A tope	10	∞	2	0
2.10	J simple	En T	16	∞	1	1
2.11	J doble	En T	30	∞	2	0
Costuras en esquina unilaterales						
3.1.1	Sin preparación	En T	2	∞	1	0

Ref.	Designación	Junta	Espesor [mm]		Pasadas	
			Mínimo	Máximo	Raíz	Sellado
3.1.2	Sin preparación	Solape	2	∞	1	0
3.1.3	Sin preparación	Ángulo	2	∞	1	0
Costuras en esquina bilaterales						
4.1.1	Sin preparación	Angulo	3	∞	1	1
4.1.3	Sin preparación	En T	2	∞	2	0

Para la selección, primero se determina cuáles de las preparaciones de la base de datos se pueden emplear para el caso dado. Los criterios de selección son que corresponda al tipo de junta establecido y que el espesor de la plancha sea admitido por la preparación. Una vez determinados cuáles preparaciones son admisibles, se selecciona una de ellas y se extraen las dimensiones de la tabla correspondiente (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Dimensiones de las preparaciones de bordes [mínimo | recomendado / máximo]

Referencia	Ángulo del bisel, α [°]	Ángulo del bisel, β [°]	Separación, b [mm]	Espesor del talón, c [mm]	Profundidad, h [mm]	Radio, r [mm]
1.1	-	-	-	-	$t t t+1$	$t t t$
1.2.1	-	-	$t t t$	-	-	-
1.3	40 45 60	-	0 2 4	0 1 2	-	-
1.4	-	5 15 20	5 10 15	-	-	-
1.5	60 60 60	-	1 2 4	2 3 4	-	-
1.6	60 75 90	8 10 12	1 2 3	-	4 4 4	6 6 6
1.7	60 75 90	10 12 15	2 3 4	2 2 6	-	-
1.8	-	8 10 12	0 2 4	0 2 3	-	6 6 6
1.9.1	-	35 45 60	2 3 4	1 1.5 2	-	-
1.9.2	-	35 45 60	2 3 4	1 1.5 2	-	-
1.10	-	15 45 60	6 9 12	-	-	-
1.11	-	10 15 20	2 3 4	1 1.5 2	-	6 6 6
2.1	-	-	$0 t/2 t/2$	-	-	-
2.2	60 60 60	-	0 1 3	0 1 2	-	-

Referencia	Ángulo del bisel, α [°]	Ángulo del bisel, β [°]	Separación, b [mm]	Espesor del talón, c [mm]	Profundidad, h [mm]	Radio, r [mm]
2.3	60 60 60	-	1 2 3	2 3 4		-
2.4	60 60 60	40 45 60	1 2 4	2 4 6	-	-
2.5.1	60 60 60	40 45 60	1 2 3	0 1 2	$(t-c)/2$ $(t-c)/2 (t-c)/2$	-
2.5.2	60 60 60	40 45 60	1 2 3	0 1 2	$t/3 t/3 t/3$	-
2.6	-	8 10 12	1 2 3	5 5 5	-	6 6 6
2.7	-	8 10 12	0 1 3	3 3 3	$(t-c)/2$ $(t-c)/2 (t-c)/2$	6 6 6
2.8	-	35 45 60	1 2 4	0 1 2	-	-
2.9.1	-	35 45 60	1 2 4	0 1 2	$t/3 (t-c)/2$ $(t-c)/2$	-
2.9.2	-	35 45 60	1 2 4	0 1 2	$t/3 (t-c)/2$ $(t-c)/2$	-
2.10	-	10 15 20	1 2 3	2 2 $t/3$	-	8 8 8
2.11		10 15 20	0 2 3	2 2 $t/5$	$(t-c)/2$ $(t-c)/2 (t-c)/2$	6 6 6
3.1.1	-	-	0 1 2	-	0 $t \infty$	-
3.1.2	-	-	0 1 2	-	0 $t t$	-
3.1.3	-	-	0 1 2	-	0 $t t$	-
4.1.1	-	-	0 1 2	-	0 $t t$	-
4.1.3	-	-	0 1 2	-	0 $t \infty$	-

Para el cálculo del área de la sección transversal, se divide la misma en figuras geométricas elementales. En el anexo 1 se muestran las ecuaciones para cada una de las preparaciones.

Para uniones a tope (Cary 1998, p. 126), la altura máxima del refuerzo, q , se puede calcular según:

$$q = \begin{cases} 1 \text{ mm} : & p \leq 10 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} : & 10 \text{ mm} < p \leq 25 \text{ mm} . \\ 3 \text{ mm} : & p > 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.2a)$$

Por su parte, para las uniones en esquina (AWS D.1.1 2015, p. 198), la altura máxima del refuerzo, q , se determina según la expresión:

$$q = \begin{cases} 2 \text{ mm} : & p \leq 8 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} : & 8 \text{ mm} < p \leq 25 \text{ mm} . \\ 5 \text{ mm} : & p > 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.2b)$$

La determinación del número de pasadas es una de las tareas más complejas en el diseño de tecnologías de SMAW, ya que depende de muchos factores, incluyendo la habilidad del operador que ejecute la costura.

El programa utiliza un enfoque heurístico, basado en calcular el área de la pasada de raíz, A_R , si esta existe ($N_R > 0$):

$$A_R = 7d_R ; \quad (2.3a)$$

a partir del diámetro del electrodo usado para esta pasada, d_R . Luego, si es necesario ($N_B > 0$), se calcula el área de la pasada de sellado:

$$A_B = 0,75p'q' + 3b ; \quad (2.3b)$$

donde p' y q' son el ancho y la altura del refuerzo de la pasada de sellado y b es la holgura entre planchas.

2.4 Selección de electrodos

2.4.1 Electrodo para aceros al carbono y bajoaleados

La selección de los electrodos para aceros al carbono y bajoaleados se lleva a cabo por el usuario, de una lista tomada de la base de datos existente, que incluye aquellos que cumplen cinco criterios: diámetro recomendado, resistencia mecánica, posiciones recomendadas, tipo de pasada, y corriente admisible.

2.4.1.1 Diámetro recomendado

El diámetro de los electrodos, en las costuras a tope, se selecciona en dependencia del espesor de las planchas a soldar (Burgos Sola 1987, p. 66), tal como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Diámetro del electrodo recomendado en las costuras a tope

Espesor, t [mm]	0,5	1,5	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0
Diámetro, d [mm]	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4

Según recomendaciones de fabricantes (BOC 2007), para las costuras en esquina, las dimensiones de la costura y el diámetro de electrodo que se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Dimensiones de la costura y diámetro del electrodo en costuras en esquina

Espesor, t [mm]	Dimensión de la costura, p [mm]	Cateto de la costura, k [mm]	Diámetro, d [mm]
5,0...6,3	5,0	3,5	3,2
6,3...12	6,3	4,5	4,0
8,0...12	8,0	5,5	5,0
10 y más	10,0	7,0	4,0

La norma AWS D1.1 (2015, tabla3.7), por su parte, establece como diámetros máximos de electrodos para posición plana los siguientes: 8 mm para pasadas de relleno en costuras en ángulo; 6,4 mm para pasadas de relleno en costuras a tope; y 4,8 mm para pasadas de raíz en ambos tipos de costura. Para posición horizontal, estos valores son: 6,4 mm para costuras en ángulo y 4,8 mm para costuras a tope. Finalmente, en posición vertical o sobrecabeza, se utilizarán diámetros no mayores de 4,8 mm.

2.4.1.2 Resistencia mecánica

Se garantiza cuando la resistencia a la rotura del metal depositado por el electrodo, $\sigma_U^{(dep)}$ es mayor o igual que la del metal base, $\sigma_U^{(met)}$:

$$\sigma_U^{(dep)} \geq \sigma_U^{(met)}. \quad (2.4)$$

2.4.1.3 Posiciones de soldadura

Se garantiza cuando el electrodo permite soldar en la posición en que se encuentra la costura (ver subsección 2.2.1).

2.4.1.4 Tipo de pasada

Según su empleo, los electrodos se clasifican en cuatro grupos (ASME BRVC.IX 2015), tal como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Clasificación de los electrodos según su aplicación

Grupo	Característica principal	Revestimiento	Clasificación AWS
F1	Alta velocidad de deposición	Con polvo de hierro	E6020, E6022, E6027, E7024, E7027, E7028
F2	Penetración media	Rútílicos	E6012, E6013, E6019, E7014
F3	Alta penetración	Celulósicos	E6010, E6011
F4	Buenas propiedades mecánicas	Básicos	E7015, E7016, E7018, E7048

Tabla 2.7 Selección de electrodos en uniones en esquina (Cary 1998, p. 130)

Posición de la unión	Espesor de la plancha [mm]			
	<2	2-6	6-19	≥19
Plana (PA)	F2	F2	F1	F1/F4
Horizontal vertical (PB)	F2	F3	F1	F1/F4
Horizontal (PC)	F2	F3	F3/F4	F3/F4
Vertical ascendente (PG)	F2	F3	F4	F4
Vertical descendente (PF)	F2	F3	-	-
Bajo techo (PE)	F2	F3	F3/F4	F3/F4

Las recomendaciones para cada tipo de electrodo, están dadas por sus características y en función de la unión que se desea obtener. Las Tablas 2.7 y 2.8 resumen estas recomendaciones para las aplicaciones generales.

Tabla 2.8 Selección de electrodos en uniones a tope y de tuberías (Cary 1998, p. 130)

Posición de la unión		Espesor de la plancha [mm]					
		Sin preparac.		En V		En U	
		<2	2-6	6-19	≥19	6-19	≥19
Plana (PA)		F2	F3	F3	F3/F4	F4	F4
Horizontal (PC)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Vertical ascendente (PG)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Vertical descendente (PF)		F2	F2/F3	F3	F3	F3	F3
Bajo techo (PD)		F2	F2/F3	F3/F4	F3/F4	F4	F4
Equatorial descendente (PF)		F2	F2	F3	F3	F3	F3
Equatorial ascendente (PG)		F2	F2	F3/F4	F3/F4	F4	F4

2.4.1.5 Tipo e intensidad de la corriente

Se garantiza cuando la polaridad e intensidad de la corriente que requiere el electrodo puede ser suministrada por la máquina de soldadura disponible:

$$I_{\min}^{(\text{maq})} \leq I \leq I_{\max}^{(\text{maq})} . \quad (2.5)$$

2.4.2 Electrodo para aceros inoxidables

Para los aceros inoxidables, se observan los siguientes criterios para la selección del electrodo: diámetro recomendado, posiciones de soldadura; tipo e intensidad de la corriente y composición química.

2.4.2.1 Diámetro recomendado

Se analiza igual que para los aceros al carbono y bajoaleados (ver subsección 2.4.1.1).

2.4.2.2 Posiciones de soldadura

Se analiza igual que para los aceros al carbono y bajoaleados (ver subsección 2.4.1.3).

2.4.2.3 Tipo e intensidad de la corriente

Se analiza igual que para los aceros al carbono y bajoaleados (ver subsección 2.4.1.5).

2.4.2.4 Composición química

En el caso de los aceros inoxidable austeníticos, la selección se puede hacer en función de garantizar la resistencia mecánica o la resistencia a la corrosión.

En el primer caso (resistencia mecánica), se busca que la composición química del metal depositado no tenga tendencia al agrietamiento, lo cual se logra con una composición de ferrita, δ , en el intervalo (API RP 582: 2009):

$$5\% \leq \delta \leq 10\% . \quad (2.6)$$

La cantidad de ferrita se calcula a partir de la expresión:

$$\delta = \begin{cases} 3(Cr_{eq} - Cr_{max}), & Cr_{eq} > Cr_{max} \\ 0, & Cr_{eq} \leq Cr_{max} \end{cases} ; \quad (2.7)$$

donde el cromo equivalente, Cr_{eq} , y el cromo máximo, Cr_{max} , se determinan como:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Ti ; \quad (2.8a)$$

$$Cr_{max} = 6,7 + 0,93(Ni + 30C + 0,5Mn) ; \quad (2.8b)$$

siendo Cr , Mo , Si , Ti , Ni , C y Mn , la composición de cromo, molibdeno, silicio, titanio, níquel, carbono y manganeso, respectivamente.

En el segundo caso (resistencia a la corrosión), se persigue que la cantidad de cromo sea lo suficientemente alta como para que la precipitación de carburos no afecte la inoxidable del acero, lo cual se logra cuando:

$$Cr \geq 80C + 16,8 ; \quad (2.9a)$$

o exista una cantidad de niobio, Nb , o titanio, Ti , que, por su mayor afinidad con el carbono, contrarresten la formación de carburos de cromo, lo cual ocurre si:

$$Ti + Nb \geq 6C . \quad (2.9b)$$

Para los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos, este criterio se puede analizar en función de garantizar la similitud con el metal base o de la soldabilidad.

La similitud del metal base se garantiza si no existe más de un 25% de diferencia entre la composición de carbono, cromo y níquel, entre en metal base y el metal depositado:

$$\frac{|C^{\text{met}} - C|}{C^{\text{met}}} \leq 0,25 ; \quad (2.10a)$$

$$\frac{|Cr^{\text{met}} - Cr|}{Cr^{\text{met}}} \leq 0,25 ; \quad (2.10a)$$

$$\frac{|Ni^{\text{met}} - Ni|}{Ni^{\text{met}}} \leq 0,25 . \quad (2.10a)$$

La soldabilidad, por su parte, se garantiza si el metal depositado contiene una cantidad de ferrita:

$$5\% \leq \delta \leq 20\% . \quad (2.11)$$

2.5 Cálculo de la intensidad de corriente

La intensidad de la corriente de soldadura depende, fundamentalmente, del diámetro del electrodo utilizado, según la siguiente expresión empírica (Burgos Sola 1987, p. 66):

$$I = (20 + 6d)d ; \quad (2.12)$$

donde la intensidad, I , está dada en amperes [A] y d es el diámetro del electrodo, dado en milímetros [mm].

Cuando el espesor de la plancha es menor o igual que una vez y media el diámetro del electrodo ($t \leq 1,5d$), la intensidad debe disminuirse en un (10...15)%, mientras que si es mayor que tres veces el diámetro del electrodo ($t > 3d$), debe incrementarse en un (10...15)%.

Para costuras verticales, la intensidad debe incrementarse en un (10...15)% y para las bajo techo, en un (10...13)%.

2.6 Selección de precalentamiento y tratamiento térmico posterior

2.6.1 Precalentamiento y tratamiento térmico posterior para aceros al carbono y bajoaleados

La temperatura de precalentamiento, T_{PH} , para aceros al carbono y bajoaleados, se calcula por la expresión (Rodríguez Pérez 1988):

$$T_{PH} = 350 [^{\circ}\text{C}] \sqrt{C_{eq} - 0,25}; \quad (2.13a)$$

a partir del carbono equivalente del metal base:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}; \quad (2.13b)$$

corregido para el espesor de la plancha, t :

$$C'_{eq} = C_{eq} (1 + t / 200). \quad (2.13c)$$

Por su parte, el tratamiento térmico posterior se determina según la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Recomendaciones para el tratamiento térmico posterior en aceros al carbono y bajoaleados (ASME B31-3 2014, tabla 331.1.1)

Material	Condicion	Temperatura [°C]	Tiempo de permanencia
Aceros al carbono	Excepto para: $t \leq 19$ mm	593...649	2,4 min/mm (min: 1 h)

Ac. aleados ($Cr \leq 0,5\%$)	Excepto para: ($t \leq 19$ mm) y ($TS \leq 490$ MPa)	704...746	2,4 min/mm (min: 1 h)
Ac. aleados ($0,5\% < Cr \leq 2\%$)	Excepto para: ($t \leq 13$ mm) y ($TS \leq 490$ MPa)	704...746	2,4 min/mm (min: 2 h)
Ac. aleados ($2\% < Cr \leq 10\%$)	Excepto para: ($t \leq 13$ mm) y ($Cr \leq 3\%$) y ($C \leq 0,15\%$)	704...746	2,4 min/mm (min: 2 h)
Ac. aleados ($1\% < Ni \leq 3,5\%$)	Excepto para: $t \leq 19$ mm	593...635	1,2 min/mm (min: 1 h)
Ac. inoxidables martensíticos	---	732...788	2,4 min/mm (min: 2 h)

2.6.2 Pre calentamiento y tratamiento térmico posterior para aceros inoxidables

Para los aceros inoxidables austeníticos, no se aplica pre calentamiento ni tratamiento térmicos posterior.

Para los aceros inoxidables ferríticos, se aplica un pre calentamiento de 200°C sólo para espesores mayores de 6 mm. Siempre, se aplica un tratamiento térmico posterior a 600 °C, con un tiempo de permanencia de 2,4 °C/mm de espesor (pero, en ningún caso, inferior a 2 h).

Para los aceros inoxidables martensíticos, se aplica pre calentamiento si el contenido de carbono es $C > 0,1\%$. En este caso, la temperatura sería de 260°C. En cuanto al tratamiento térmico posterior, se aplica sólo si $C > 0,2\%$, y sería de 800 °C, con un tiempo de permanencia de 2,4 °C/mm de espesor (pero, en ningún caso, inferior a 2 h).

2.7 Cálculo de los tiempos y costos del proceso

El tiempo tecnológico, t_T , se calcula a partir de la densidad del material de aporte, ρ ; de la longitud de la costura, L ; y de las áreas de la sección transversal, A_i ; y las velocidades de depósito, α_i , en cada uno de los cordones de la costura (Burgos Sola 1987, p. 273):

$$t_T = \rho L \sum_i \frac{A_i}{\alpha_i} \quad (2.14)$$

Para las costuras verticales, horizontales y bajo techo, el tiempo tecnológico debe aumentarse en un 25%, 30% y 60%, respectivamente, debido al incremento de la complejidad de la ejecución.

La velocidad de depósito, α , depende de la intensidad de la corriente y varía de un electrodo a otro. La Fig. 1.10 muestra algunos valores para electrodos típicos.

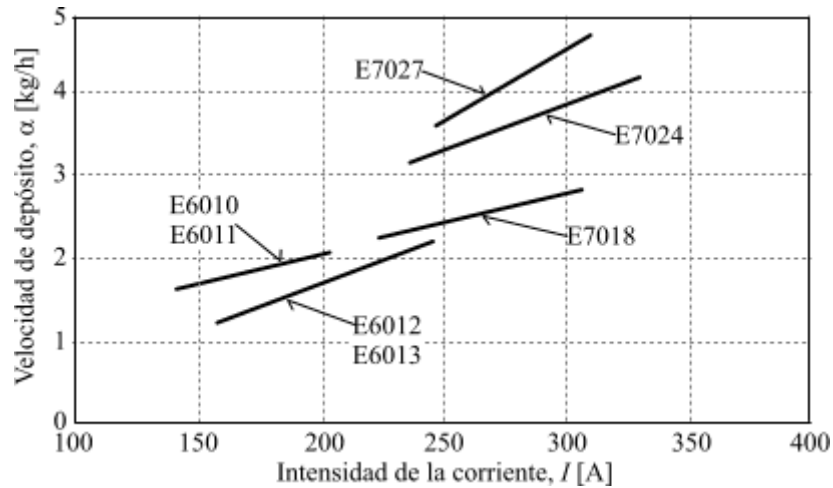


Figura 2.3 Valores del coeficiente de depósito (Cary 1998, p. 130)

El tiempo auxiliar, t_A , dedicado a las operaciones complementarias del proceso, se considera como un 30% del tiempo tecnológico (Burgos Sola 1987, p. 273):

$$t_A = 0,3t_T; \quad (2.15a)$$

mientras que el tiempo de servicio, t_S , y el tiempo de descanso, t_D , están en los intervalos:

$$t_S = (0,03 \dots 0,05)(t_T + t_A); \quad (2.15b)$$

$$t_D = (0,05 \dots 0,15)(t_T + t_A). \quad (2.15c)$$

El tiempo total, t_{TOT} , se calcula por la expresión:

$$t_{TOT} = t_T + t_A + t_S + t_D. \quad (2.16)$$

El consumo de electrodo, G_{el} , se calcula a partir del peso del metal depositado, G , mediante las ecuaciones (Burgos Sola 1987, p. 276):

$$G_{el} = (1,4 \dots 1,6)G; \quad (2.17a)$$

$$G = \rho AL; \quad (2.17b)$$

donde ρ es la densidad del metal de aporte; A , el área de la sección transversal de la parte de la costura ocupada por el metal de aporte; y L , la longitud de la costura.

El consumo de energía eléctrica, E , se determina a partir del peso del metal depositado, mediante la relación:

$$E = \varepsilon G; \quad (2.18)$$

siendo ε el consumo específico que se toma, $\varepsilon = (3 \dots 4)$ kW/(kg·h), para máquinas de corriente continua y $\varepsilon = (4 \dots 6)$ kW/(kg·h), para máquinas de corriente alterna.

El valor de costo total, Z_{TOT} , se determina mediante la suma de costos de electrodo, Z_{el} ; de energía eléctrica, Z_{en} ; y de mano de obra, Z_{lab} :

$$Z_{TOT} = Z_{el} + Z_{en} + Z_{lab}. \quad (2.19a)$$

A su vez, éstos se calculan a partir de las expresiones:

$$Z_{el} = G_{el} z_{el}; \quad (2.19b)$$

$$Z_{en} = E z_{en}; \quad (2.19c)$$

$$Z_{lab} = t_{TOT} z_{lab}; \quad (2.19d)$$

donde z_{el} , z_{en} y z_{lab} son los costos unitarios de electrodo, de energía eléctrica y de mano de obra, respectivamente.

2.8 Selección del equipamiento auxiliar

El equipamiento auxiliar incluye el portaelectrodo, los cables y el filtro visual para la soldadura.

El tipo de portaelectrodo debe seleccionarse de acuerdo con el trabajo que se designe (Tabla 2.10).

Tabla 2.10 Selección del portaelectrodo

Intensidad de corriente, I [A]	Tipo de portaelectrodo
Hasta 200	Pequeño
200 ... 300	Medio
300 ... 400	Grande
400 ... 500	Extra Grande
500 ... 600	Súper Extra Grande

Con el fin de prevenir el calentamiento excesivo de los cables que unen el portaelectrodo (tenaza) con la máquina de soldadura, debe seleccionarse el calibre adecuado para ellos. Éste depende tanto de la intensidad que circulará por él, como de la longitud de los mismos, tal como se muestra en la Tabla 2.11 (Justel Ramos 2012).

Tabla 2.11 Sección mínima de los cables (Justel Ramos 2012 p. 152)

Intensidad [A]	Longitud de los cables [m]									
	15	25	30	40	50	60	70	80	90	100
100	25	25	35	35	35	35	50	50	50	50
150	35	35	50	50	50	50	70	70	-	-
200	35	50	50	70	70	70	-	-	-	-
250	35	50	70	70	70	-	-	-	-	-
300	50	70	95	95	-	-	-	-	-	-
400	50	70	95	-	-	-	-	-	-	-
500	70	95	-	-	-	-	-	-	-	-
600	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Es uso común, en América, utilizar los calibres AWG para designar los diámetros de los cables eléctricos. En la Tabla 2.12 se muestran las áreas de las secciones transversales de los calibres correspondientes al rango de intensidades utilizadas en soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos.

Tabla 2.12 Calibres AWG (WSS 2013)

Calibre AWG	3	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0
Área [mm ²]	26,7	33,6	42,4	53,5	67,4	85,0	107,2

Una parte importante de la seguridad en la tecnología de soldadura, consiste en seleccionar el filtro adecuado para la protección visual, tal como se recomienda en la Tabla 2.13. Se debe seleccionar, preferentemente, el valor mínimo, ya que valores mayores (más oscuros), dificultan la visión innecesariamente (Justel Ramos 2012).

Tabla 2.13 Selección de filtros para protección visual (Justel Ramos 2012 p. 150)

Intensidad [A]	No. de cristal (mínimo)	No. de cristal (adecuado)
< 60	7	-
60 ... 160	8	10
160 ... 250	10	12
250 ... 500	10	14

2.9 Conclusiones parciales del capítulo

Al finalizar el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se ha formalizado la metodología para el diseño de tecnologías de SMAW para aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, definiendo los algoritmos y expresiones de cálculo a utilizar en cada caso.
2. La metodología formalizada, incluye la identificación de los datos requeridos en cada etapa del diseño así como los datos necesarios para los cálculos.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

El siguiente capítulo describe la aplicación desarrollada, reflejando las particularidades de la interfaz gráfica de usuario y sus principales funcionalidades.

3.1 Características generales

OpifexSpark/SMAW ha sido implementada en lenguaje C++, utilizando el entorno de desarrollo y las librerías de Qt. Aprovechando las funcionalidades de Qt, la aplicación se concibió como multiplataforma, pudiendo funcionar en MS Windows o en Linux.

La aplicación es portable, por lo cual no requiere ser instalada. Para su ejecución sólo es necesario copiarla en una carpeta (que puede ser en un dispositivo extraíble).

3.2 Ventana principal

3.2.1 Descripción de la interfaz

La ventana principal (ver Fig. 3.1) cuenta con los siguientes elementos:

- 1- Barra de título: Muestra el nombre del programa y del archivo sobre el que se está trabajando.
- 2- Barra de menú: Ofrece el menú principal de la aplicación, a través del cual se puede acceder a las diferentes opciones que brinda el programa (ver subsección 3.2.2).
- 3- Barra de herramientas: Ofrece un grupo de botones a través de los cuales se puede acceder con rapidez, a las opciones más utilizadas del programa (ver subsección 3.2.3).
- 4- Especificación del proceso: Muestra la especificación (carta tecnológica) del proceso de soldadura. El mismo ha sido elaborado siguiendo las recomendaciones de la ASME BPVC.IX (2015) y se va llenando según se entran los datos

correspondientes y realizan los cálculos necesarios para determinar los parámetros del régimen de soldadura y los costos del proceso.

- 5- Barra de estado: Muestra información útil para el usuario sobre el estado del programa o sobre las diferentes opciones del mismo.

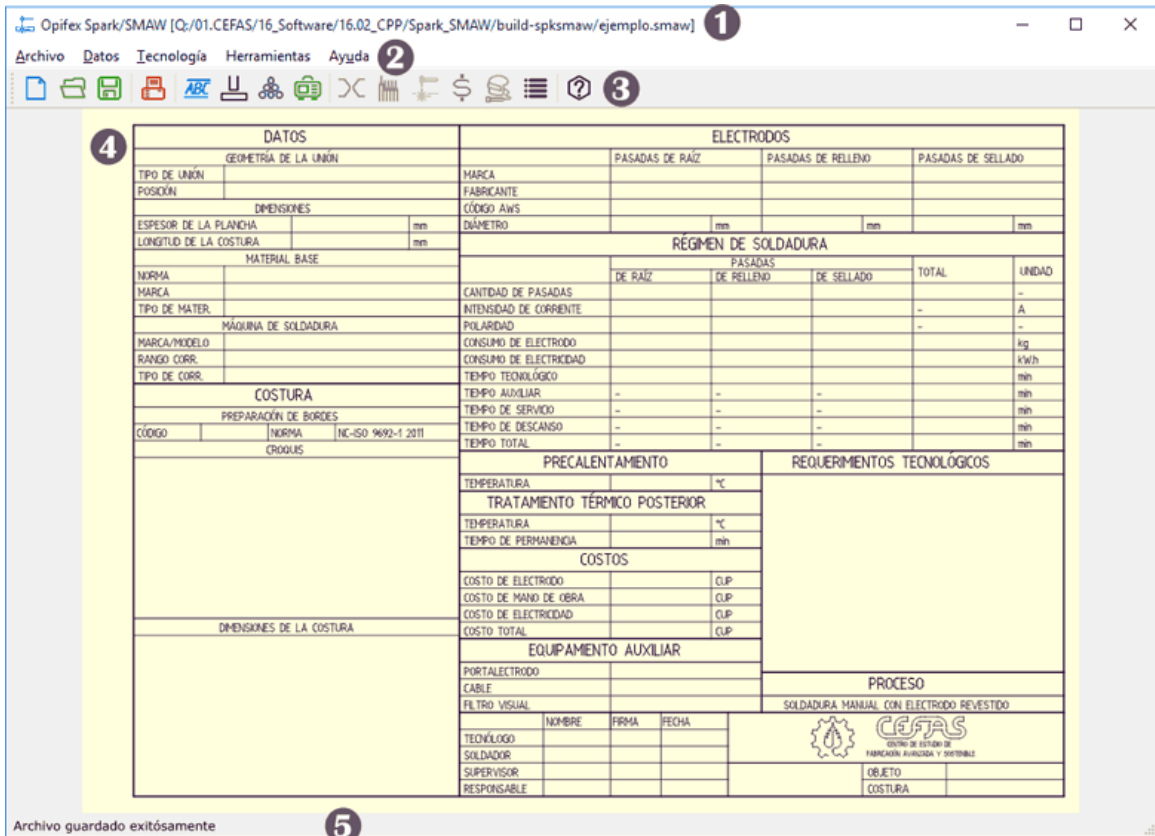


Figura 3.1 Ventana principal de la aplicación

3.2.2 Menú principal

El menú principal de la aplicación cuenta con las siguientes opciones, distribuidas en submenús. Las más utilizadas entre ellas cuentan con combinaciones de teclas a través de las cuales se puede acelerar el acceso a las mismas.

Submenú Archivo

Nuevo (Ctrl+N): Permite crear una nueva tecnología, desde cero. Limpia todo el contenido de la especificación y borra de memoria toda la información

previamente introducida. Si existen algunos datos sin guardar, lo notifica y ofrece la opción de guardarlo antes de proceder.

Abrir... (Ctrl+A): Permite abrir una tecnología previamente guardada en un archivo.

Guardar (Ctrl+G): Permite guardar los cambios realizados en la tecnología actual. Si ésta aún no ha sido guardada en un archivo, se pide que se haga en ese momento.

Guardar como... (Ctrl+Alt+G): Permite guardar la tecnología actual en archivo diferente al utilizado hasta ese momento, para lo cual se pide que se especifique el nombre para el nuevo archivo.

Imprimir (Ctrl+P): Permite imprimir el contenido de la especificación, con el estado de llenado que tenga en ese momento.

Exportar como DXF...: Permite exportar la especificación, en su estado actual, como un archivo de formato de intercambio de dibujo (*drawingexchangeformat*, DXF), en su versión AC1015 (AutoCAD 2000).

Cerrar (Ctrl+F4): Permite cerrar la aplicación. Si hay cambios sin guardar, lo notifica, dando la opción de guardarlos antes del cierre.

Submenú *Datos*

Contenido del cajetín... (Ctrl+Shift+C): Muestra el cuadro de diálogo donde se establece el contenido del mismo (códigos del documento y de la costura, nombre del personal que interviene en el proceso, etc.) (ver subsección 3.3.1).

Geometría de la unión... (Ctrl+Shift+G): Muestra el cuadro de diálogo donde se establecen las características geométricas de la misma. Esto incluye no solo las dimensiones de la plancha y la costura, sino también la posición de la misma (ver subsección 3.3.2).

Material base... (Ctrl+Shift+M): Muestra el cuadro de diálogo donde se establecen la composición química y las propiedades mecánicas del metal base (ver subsección 3.3.3).

Máquina... (Ctrl+Shift+Q): Muestra el cuadro de diálogo donde se establecen las características técnicas de la máquina de soldadura a utilizar en el proceso (ver subsección 3.3.5).

Submenú Tecnología

Preparación de bordes... (F5): Muestra el cuadro de diálogo donde se selecciona la preparación de bordes a utilizar (ver subsección 3.3.7). Esta opción sólo se habilita cuando se han introducido ya la geometría de la unión, el metal base y la máquina de soldadura.

Electrodos... (F6): Permite seleccionar los electrodos a utilizar en el proceso. Si el metal base es un acero al carbono o de baja aleación, se muestra un cuadro de diálogo (ver subsección 3.3.8) donde se seleccionan los electrodos para la raíz, el relleno y el sellado (respaldo). En el caso de la raíz y el sellado, dependen de la preparación seleccionada, por lo que no siempre se utilizan. En la soldadura de aceros inoxidables, se selecciona un único electrodo (ver subsección 3.3.10). Esta opción sólo se habilita cuando se ha seleccionado la preparación de borde.

Régimen de soldadura (F7): permite calcular los parámetros del régimen de soldadura (cantidad de pasadas, intensidad de corriente y tipo de corriente y polaridad), los consumos (electrodo y energía eléctrica) y los tiempos (tecnológico, auxiliar, de servicio y de descanso). También permite determinar el precalentamiento y del tratamiento térmico posterior. Esta opción sólo se habilita cuando se han seleccionado los electrodos a utilizar.

Costos (F8): Calcula los costos (de mano de obra, de electrodo, de energía eléctrica y total) en que se incurre durante el proceso de soldadura. Esta opción sólo se habilita cuando se han calculado los parámetros del régimen de soldadura.

Equipamiento auxiliar... (F9): Muestra el cuadro de diálogo para la selección del equipamiento auxiliar de la soldadura (portaelectrodo, cable y filtro visual) (ver subsección 3.3.11).

Requerimientos tecnológicos... (F10): Muestra el cuadro de diálogo para la introducción de los requerimientos tecnológicos literales que deseen incluirse en la especificación (ver subsección 3.3.12).

Submenú Herramientas

Base de datos ⇒ Materiales...: Muestra el cuadro de diálogo para la edición de la base de datos de materiales (ver subsección 3.3.13).

Base de datos ⇒ Máquinas...: Muestra el cuadro de diálogo para la edición de la base de datos de máquinas (ver subsección 3.3.14).

Base de datos ⇒ Electrodo para aceros al carbono y bajoaleados...: Muestra el cuadro de diálogo para la edición de la base de datos de electrodos para aceros al carbono y bajoaleados (ver subsección 3.3.15).

Base de datos ⇒ Electrodo para aceros inoxidables...: Muestra el cuadro de diálogo para la edición de la base de datos de electrodos para aceros inoxidables (ver subsección 3.3.16).

Opciones...: Muestra el cuadro de diálogo donde se pueden establecer las opciones de configuración del programa (ver subsección 3.3.17).

Submenú *Ayuda*

Contenido... (F1): Muestra el contenido de la ayuda de la aplicación.

Acerca de...: Muestra el cuadro de diálogos de créditos de la aplicación.

3.2.2 Barra de herramientas

La barra de herramientas pone a disposición del usuario botones para acceder a las principales opciones del programa, con el objetivo de acelerar el proceso de trabajo con el mismo.



Nuevo (crea una nueva tecnología)



Abrir... (abre una tecnología previamente guardada)



Guardar (guarda los cambios realizados en la tecnología actual)












Imprimir... (imprime la especificación de la tecnología actual)



Contenido del cajetín... (entrada de los datos para el llenado del cajetín)



Geometría de la unión... (entrada de los datos geométricos de la unión soldada)

	Material base... (entrada de las características del metal base)
	Máquina... (entrada de las características de la máquina de soldadura)
	Preparación de bordes... (selección de la preparación de bordes)
	Electrodos... (selección de los electrodos a utilizar)
	Régimen de soldadura (cálculo de los parámetros del régimen de soldadura)
	Costos (cálculos de los costos del proceso de soldadura)
	Equipamiento auxiliar... (selección del equipamiento)
	Requerimientos tecnológicos... (entrada de los requerimientos tecnológicos literales)
	Contenido de la ayuda (acceso al contenido de la ayuda del programa)

3.3 Cuadros de diálogo

3.3.1 Contenido del cajetín

El cuadro de dialogo *Contenido del cajetín* permite establecer los datos para su llenado, en la especificación del proceso. El mismo (ver Fig. 3.2) incluye los siguientes elementos:

1. Cuadro de texto para la entrada del código del documento.
2. Cuadro de texto para la entrada del nombre del artículo donde está la costura.
3. Cuadro de texto para la entrada del código de identificación de la costura.
4. Cuadro de texto para la entrada del nombre tecnólogo que diseña el proceso.
5. Cuadro de selección de la fecha del diseño de la tecnología. Si se desmarca el cuadro de chequeo adyacente, esta opción se deshabilita y la fecha no se incluirá en el cajetín.
6. Cuadro de texto para la entrada del nombre del soldador que ejecutará la costura.

7. Cuadro de selección de la fecha de la ejecución de la soldadura. Si se desmarca el cuadro de chequeo adyacente, esta opción se deshabilita y la fecha no se incluirá en el cajetín.
8. Cuadro de texto para la entrada del supervisor que controlará la ejecución del proceso.
9. Cuadro de selección de la fecha del control a los resultados de la soldadura. Si se desmarca el cuadro de chequeo adyacente, esta opción se deshabilita y la fecha no se incluirá en el cajetín.
10. Cuadro de texto para la entrada del nombre del responsable administrativo.
11. Cuadro de selección de la fecha de la emisión de la conformidad con el proceso. Si se desmarca el cuadro de chequeo adyacente, esta opción se deshabilita y la fecha no se incluirá en el cajetín.
12. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
13. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
14. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

Nombre	Fecha
Tecnólogo: A LAGUARDIA	2017.09.03
Soldador: R PÉREZ	2017.09.03
Supervisor: R QUIZA	2017.09.03
Responsable: M RIVAS	2017.09.03

Figura 3.2 Cuadro de diálogo Contenido del cajetín

3.3.2 Geometría de la unión

El cuadro de diálogo *Geometría de la unión*, permite establecer los datos concernientes a la posición y dimensiones de las planchas a soldar. El mismo (ver Fig. 3.3) cuenta con los siguientes elementos:

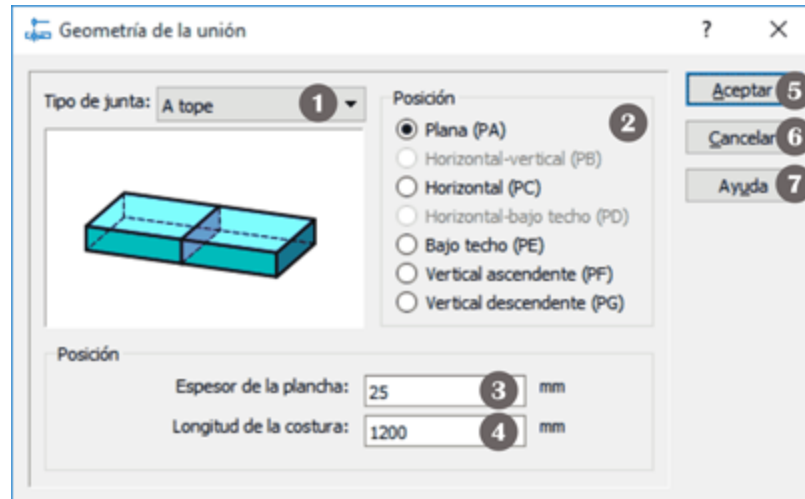


Figura 3.3 Cuadro de diálogo de geometría de la unión

1. Lista desplegable para la selección del tipo de junta. Ofrece los seis valores posibles (ver Fig. 2.1).
2. Grupo de botones de opción para la selección de la posición de la costura. Las mismas están codificadas según la NC-ISO 6947 (2004) (ver Tabla 2.1).
3. Cuadro de texto para la entrada del espesor de las planchas a soldar.
4. Cuadro de texto para la entrada de la longitud de la costura. En el caso de las juntas de tubos, se introduce el diámetro del tubo a partir del cual el programa determina la longitud.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
7. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.3 Material base

El cuadro de diálogo *Material base* permite especificar de las características del metal del que están fabricadas las partes a soldar. Estas características incluyen la designación, las propiedades mecánicas y la composición química.

Dicho cuadro de diálogo (Fig. 3.4) cuenta con los siguientes elementos:

1. Lista desplegable para la selección del tipo de material. Ofrece tres opciones: acero al carbono, acero bajoaleado y acero inoxidable. En el caso de seleccionar la primera, se inhabilitan los cuadros de texto para la entrada de la composición química, excepto para el carbono y el manganeso. En cualquiera de los otros dos casos, todas las entradas de habilitan.
2. Cuadro de texto para la entrada de la marca (grado) del material.
3. Cuadro de texto para la entrada de la norma (estándar) que especifica las características del material.
4. Cuadro de texto para la entrada de la tensión de rotura del material.
5. Cuadros de texto para la entrada de la composición química del material, dada por los siguientes elementos: carbono, manganeso, titanio, cromo, níquel y molibdeno.
6. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
7. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
8. Botón para mostrar el cuadro de diálogo para cargar un material desde la base de datos.
9. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.



Figura 3.4 Cuadro de diálogo de material base

3.3.4 Cargar material

El cuadro de diálogo *Cargar material* permite tomar las propiedades de un material de la base de datos que la aplicación tiene para con ese propósito. El mismo (Fig. 3.5) tiene los siguientes elementos:

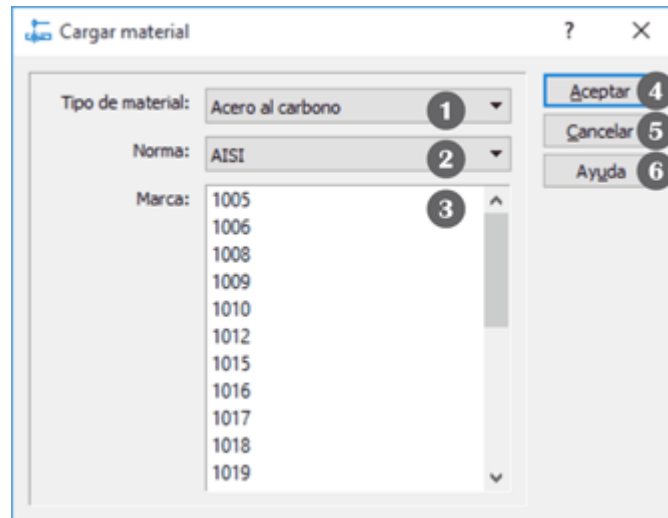


Figura 3.5 Cuadro de diálogo de cargar material

1. Lista desplegable para la selección del tipo de material. Ofrece tres opciones: acero al carbono, acero bajoaleado y acero inoxidable.
2. Lista desplegable para la selección de la norma del material, dentro de todas las contenidas en la base de datos, para el tipo de material especificado.
3. Lista para la selección de la marca del material. La misma muestra todas las marcas, contenidas dentro de la base de datos, que corresponden al tipo de material y a la norma seleccionadas.
4. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.5 Máquina

El cuadro de diálogo *Máquina* permite establecer las características de la máquina a utilizar en el proceso de soldadura. El mismo (Fig. 3.6) cuenta con los siguientes elementos.

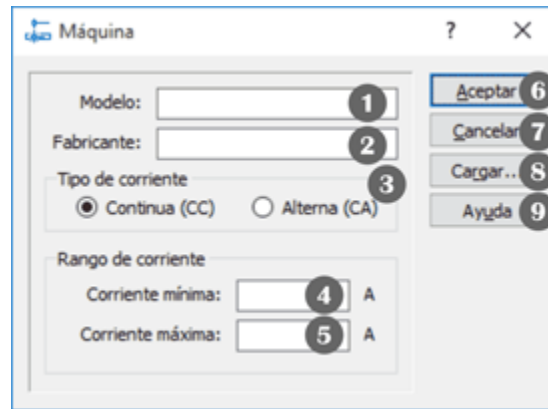


Figura 3.6 Cuadro de diálogo de máquina

1. Cuadro de texto para la entrada del modelo de la máquina.
2. Cuadro de texto para la entrada del fabricante de la máquina.
3. Grupo de botones de opción para la especificación del tipo de corriente que suministra la máquina (continua o alterna).
4. Cuadro de texto para la entrada del valor mínimo de la corriente que puede suministrar la máquina.
5. Cuadro de texto para la entrada del valor máximo de la corriente que puede suministrar la máquina.
6. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
7. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
8. Botón para mostrar el cuadro de diálogo para cargar una máquina desde la base de datos.
9. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.6 Cargar máquina

El cuadro de diálogo *Cargar máquina* permite tomar las características de una máquina de soldadura de la base de datos que el programa tiene con ese propósito. El mismo (Fig. 3.7) cuenta con los siguientes elementos:

1. Lista para la selección de la máquina. Muestra todas las máquinas de soldadura contenidas en la base de datos.
2. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.

3. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
4. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

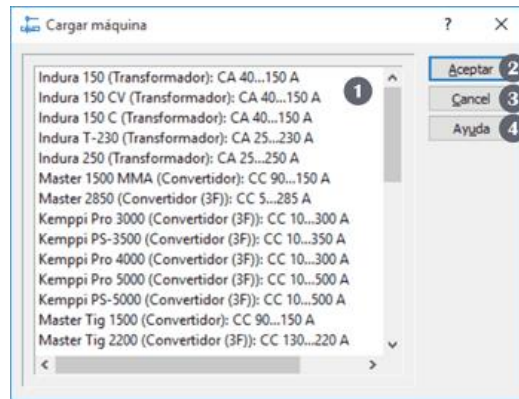


Figura 3.7 Cuadro de diálogo de cargar máquina

3.3.7 Preparación de bordes

El cuadro de diálogo *Preparación de bordes* permite seleccionar la preparación que recibirán las partes a soldar. La misma se lleva a cabo según lo establecido en la NC-ISO 9692-1 (2011) y teniendo en cuenta el espesor de las planchas a unir.

El cuadro de diálogo *Preparación de bordes* (Fig. 3.8) cuenta con los siguientes elementos:

1. Lista para la selección de la preparación. La misma muestra todas las preparaciones de borde, de las establecidas en la norma, que son aplicables al espesor de plancha y al tipo de junta especificados previamente.
2. Imagen para la visualización del croquis de la preparación de bordes seleccionada.
3. Cuadros de entrada numérica para especificar los valores de las dimensiones (lineales y angulares) de la preparación de borde seleccionada. Los mismos permiten seleccionar los valores dentro de los respectivos intervalos, tal como se establece en la norma.
4. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

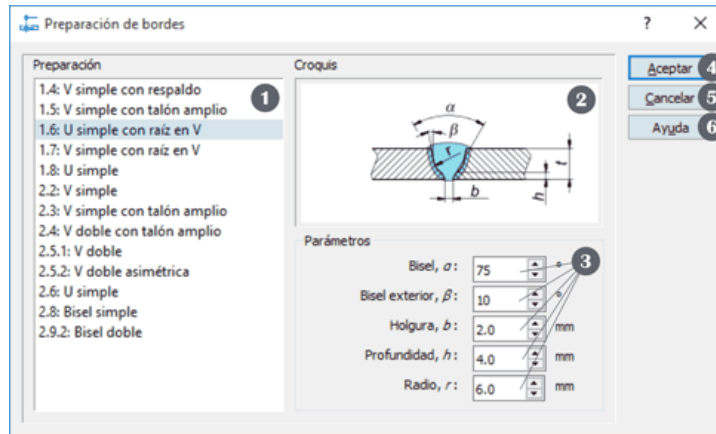


Figura 3.8 Cuadro de diálogo de preparación de bordes

3.3.8 Selección de electrodos (aceros al carbono y bajoaleados)

El cuadro de diálogo *Selección de electrodos* permite especificar los tipos de electrodos que se utilizarán en el proceso de soldadura para aceros al carbono y bajoaleados. El mismo (Fig. 3.9) cuenta con los siguientes elementos:

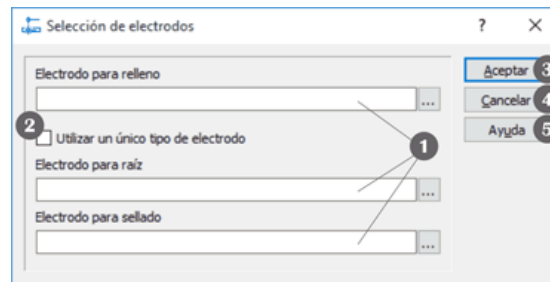


Figura 3.9 Cuadro de dialogo de electrodos

1. Cuadros de texto, con botón de comando asociado, para la selección del electrodo que se utilizará en cada tipo de pasada (de relleno, de raíz y de sellado). Los mismos muestran en cuadro de diálogo *Cargar electrodo* (ver subsección 3.3.9) que permite llevar a cabo la selección. Los cuadros correspondientes al electrodo de raíz y de sellado sólo se habilitan si el tipo de preparación de bordes seleccionada requiere estos tipos de pasada.
2. Cuadro de chequeo para especificar si se utilizará el mismo tipo de electrodo para todas las pasadas. En caso se chequearse, se inhabilitarán las entradas correspondientes a las pasadas de raíz y sellado.

3. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
4. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
5. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.9 Cargar electrodo (acero al carbono y bajoaleado)

El cuadro de diálogo *Cargar electrodo* permite tomar las características de un electrodo de la base de datos existente en la aplicación, para aceros al carbono y bajoaleados. Este diálogo (Fig. 3.10) cuenta con los siguientes elementos:

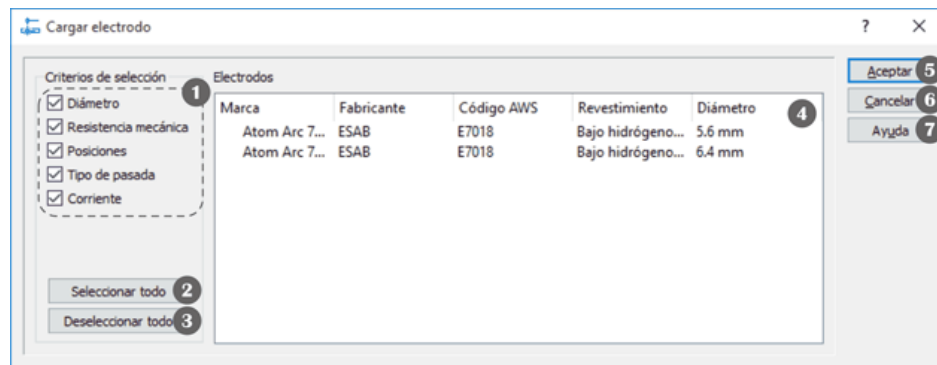


Figura 3.10 Cuadro de diálogo de cargar electrodo

1. Cuadros de chequeo que permiten especificar los criterios que se tendrán en cuenta para incluir electrodos en la lista de electrodos admisibles (elemento 4). Los criterios posibles son:
 - i. la correspondencia del diámetro del electrodo con el espesor de la plancha a soldar;
 - ii. la garantía de la resistencia mecánica de la unión a partir de la tensión admisible por el metal depositado;
 - iii. la posibilidad de utilizar el electrodo en la posición de la soldadura;
 - iv. la conveniencia del electrodo para el tipo de pasada (raíz o relleno) dada; y

- v. la correspondencia de la corriente recomendada para el electrodo, con la que es capaz de suministrar la máquina de soldadura.
2. Botón para marcar todos los criterios de selección de electrodos.
3. Botón para desmarcar todos los criterios de selección de electrodos.
4. Lista donde se selecciona el electrodo a utilizar para el tipo de pasadas dado. La misma contiene todos los electrodos contenidos en la base de datos y que cumplen con los criterios marcados. Para ayudar en la selección, muestra la marca, el fabricante, el código AWS, el revestimiento y el diámetro de cada electrodo.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
7. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.10 Selección de electrodos (aceros inoxidables)

El cuadro de diálogo *Selección de electrodos (aceros inoxidables)* permite especificar el electrodo que se utilizará en la soldadura de aceros inoxidables. En estos casos, se emplea el mismo tipo de electrodo para todas las pasadas. El cuadro de diálogo (Fig. 3.11) cuenta con los siguientes elementos:

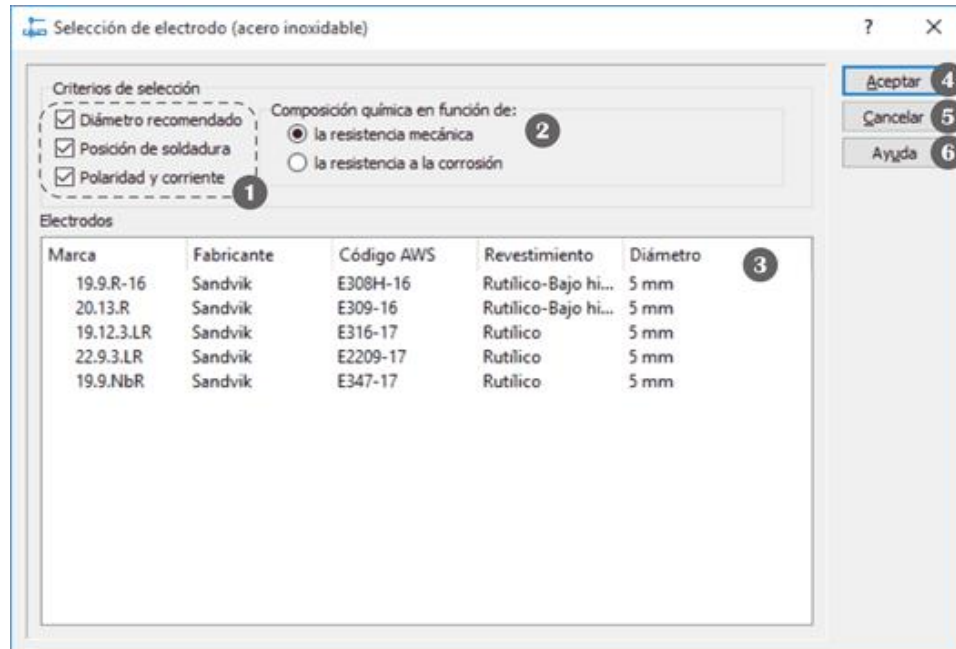


Figura 3.11 Cuadro de diálogo de electrodos para aceros inoxidables

1. Cuadros de chequeo que permiten especificar los criterios que se tendrán en cuenta para incluir electrodos en la lista de electrodos admisibles (elemento 3). Los criterios posibles son:
 - i. la correspondencia del diámetro del electrodo con el espesor de la plancha a soldar;
 - ii. la posibilidad de utilizar el electrodo en la posición de la soldadura;
 - iii. la correspondencia de la corriente recomendada para el electrodo, con la que es capaz de suministrar la máquina de soldadura.

2. Opciones para especificar si la inclusión de los electrodos en la lista se hará priorizando:
 - i. la resistencia mecánica o la resistencia a la corrosión, para aceros inoxidables austeníticos; o

- ii. la similitud con el metal base o la soldabilidad, para aceros inoxidable ferríticos y martensíticos.
3. Lista donde se selecciona el electrodo a utilizar. La misma contiene todos los electrodos contenidos en la base de datos y que cumplen con los criterios marcados. Para ayudar en la selección, muestra la marca, el fabricante, el código AWS, el revestimiento y el diámetro de cada electrodo.
4. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.11 Equipamiento auxiliar

El cuadro de diálogo Equipamiento auxiliar permite establecer el portaelectrodo, el filtro visual y el cable que se utilizará en el proceso de soldadura. El mismo (Fig. 3.12) consta de los siguientes elementos:

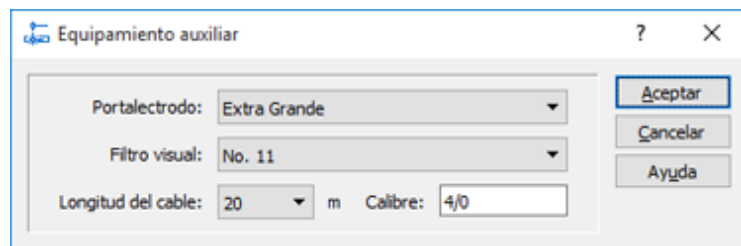


Figura 3.12 Cuadro de diálogo de equipamiento auxiliar

1. Lista desplegable que permite la selección de los portaelectrodos (tenazas). El mismo muestra los valores admisibles para la corriente máxima calculada.
2. Cuadro de diálogo que permite la selección del filtro visual. El mismo muestra los valores admisibles para la corriente máxima calculada.

3. Cuadro de diálogo para la especificación de la longitud del cable. Muestra valores en el rango de 15 a 100 m, a intervalos de 5 m.
4. Cuadro de texto no editable, que muestra el calibre de cable a utilizar, para la intensidad calculada y la longitud especificada.
5. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
6. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
7. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.12 Requerimientos tecnológicos

El cuadro de diálogo *Requerimientos tecnológicos* permite especificar las indicaciones tecnológicas literales adicionales que aparecerán en la carta tecnológica. El mismo (Fig. 3.13) incluye los siguientes elementos:

1. Cuadro de texto de múltiples líneas para la entrada de las especificaciones. En la misma, hay que indicar, explícitamente, los saltos de línea.
2. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.
3. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
4. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

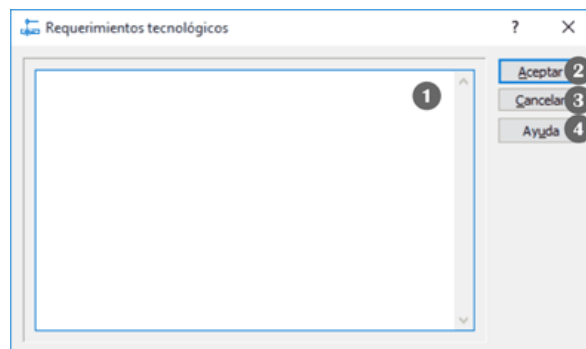


Figura 3.13 Cuadro de diálogo de requerimientos tecnológicos

3.3.13 Edición de materiales

El cuadro de diálogo *Edición de base de datos (Materiales)* permite agregar, modificar o eliminar elementos de la base de datos de materiales del programa. El mismo (Fig. 3.14) consta de los siguientes elementos:

1. Botón para ir al inicio (primer elemento) de la base de datos.
2. Botón para ir al elemento anterior de la base de datos.
3. Cuadro de texto (no editable) que muestra el número del elemento visualizado y el total de elementos en la base de datos.
4. Botón para ir al elemento siguiente de la base de datos.
5. Botón para ir al final (último elemento) de la base de datos.
6. Botón para agregar el contenido del cuadro de diálogo a la base de datos, como un nuevo elemento.
7. Botón para adoptar los cambios del contenido del cuadro de diálogo al elemento visualizado.
8. Botón para eliminar el elemento visualizado de la base de datos.
9. Lista desplegable para la selección del tipo de material.
10. Cuadro de texto para la entrada de la marca (grado) del material.
11. Cuadro de texto para la entrada de la norma (estándar) que ampara al material.
12. Cuadro de texto para entrar en valor de la tensión de rotura del material.
13. Cuadros de texto para entrar los valores de la composición química del material. Incluye carbono, manganeso, titanio, cromo, níquel y molibdeno.
14. Botón para cerrar el cuadro de diálogo. Al hacerlo, pregunta si se desean guardar o descartar los cambios realizados. En el primer caso, la base de datos es actualizada para reflejar los cambios realizados. En el segundo, los cambios son desechados y la base de datos se mantiene sin modificaciones.
15. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

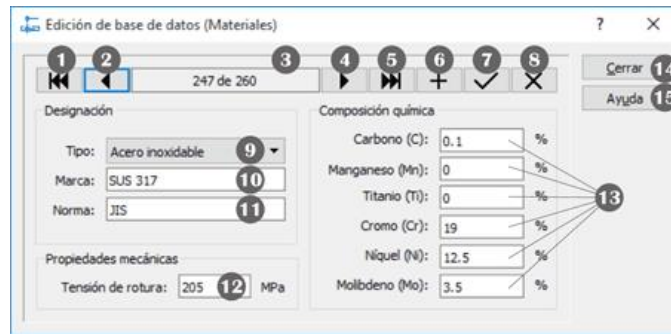


Figura 3.14 Cuadro de diálogo de edición de materiales

3.3.14 Edición de máquinas

El cuadro de diálogo *Edición de base de datos (Máquinas)* permite agregar, modificar o eliminar elementos de la base de datos de máquinas de soldadura del programa. El mismo (Fig. 3.15) consta de los siguientes elementos:

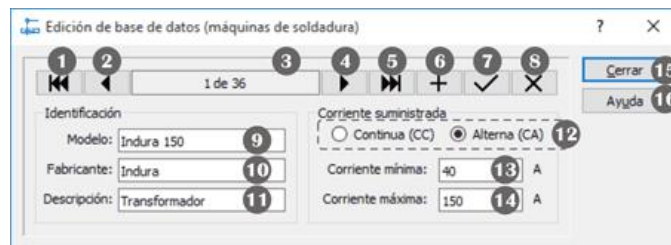


Figura 3.15 Cuadro de diálogo de edición de máquinas

1. Botón para ir al inicio (primer elemento) de la base de datos.
2. Botón para ir al elemento anterior de la base de datos.
3. Cuadro de texto (no editable) que muestra el número del elemento visualizado y el total de elementos en la base de datos.
4. Botón para ir al elemento siguiente de la base de datos.
5. Botón para ir al final (último elemento) de la base de datos.
6. Botón para agregar el contenido del cuadro de diálogo a la base de datos, como un nuevo elemento.
7. Botón para adoptar los cambios del contenido del cuadro de diálogo al elemento visualizado.
8. Botón para eliminar el elemento visualizado de la base de datos.

9. Cuadro de texto para la entrada del modelo de la máquina.
10. Cuadro de texto para la entrada del fabricante de la máquina.
11. Cuadro de texto para la entrada de la descripción de la máquina.
12. Grupo de botones de opción para la selección del tipo de corriente suministrada por la máquina (continua o alterna).
13. Cuadro de texto para la entrada del valor mínimo de la corriente que suministra la máquina.
14. Cuadro de texto para la entrada del valor máximo de la corriente que suministra la máquina.
15. Botón para cerrar el cuadro de diálogo. Al hacerlo, pregunta si se desean guardar o descartar los cambios realizados. En el primer caso, la base de datos es actualizada para reflejar los cambios realizados. En el segundo, los cambios son desechados y la base de datos se mantiene sin modificaciones.
16. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.15 Edición de electrodos para aceros al carbono y bajoaleados

El cuadro de diálogo *Edición de base de datos (Electrodos para aceros al carbono y bajoaleados)* permite agregar, modificar o eliminar elementos de la base de datos de electrodos utilizados para soldar aceros al carbono o bajoaleados. El mismo (Fig. 3.16) consta de los siguientes elementos:

1. Botón para ir al inicio (primer elemento) de la base de datos.
2. Botón para ir al elemento anterior de la base de datos.
3. Cuadro de texto (no editable) que muestra el número del elemento visualizado y el total de elementos en la base de datos.
4. Botón para ir al elemento siguiente de la base de datos.
5. Botón para ir al final (último elemento) de la base de datos.
6. Botón para agregar el contenido del cuadro de diálogo a la base de datos, como un nuevo elemento.

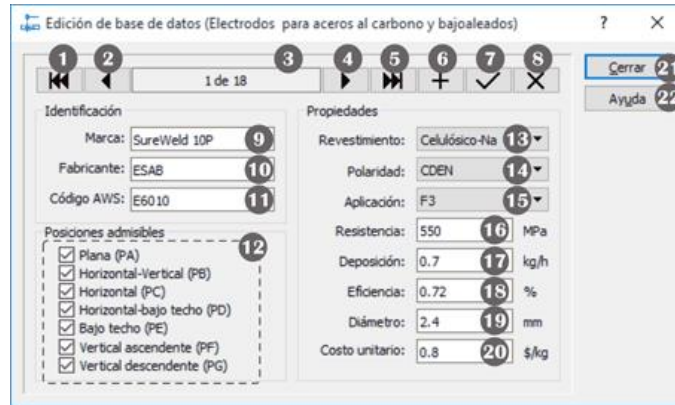


Figura 3.16 Cuadro de diálogo para la edición de electrodos para aceros al carbono y bajoaleados

7. Botón para adoptar los cambios del contenido del cuadro de diálogo al elemento visualizado.
8. Botón para eliminar el elemento visualizado de la base de datos.
9. Cuadro de texto para la entrada de la marca del electrodo.
10. Cuadro de texto para la entrada del fabricante del electrodo.
11. Cuadro de texto para la entrada de la clasificación del electrodo según la AWS.
12. Grupo de botones de chequeo para la especificación de las posiciones de soldadura admisibles por el electrodo. Las mismas están codificadas según la NC-ISO 6947 (2004).
13. Lista desplegable para la selección del tipo de revestimiento del electrodo. Incluye los siguientes valores: (i) Celulósico-Na; (ii) Celulósico-K; (iii) Rutílico-Na; (iv) Rutílico-K; (v) Rutílico-Fe; (vi) Bajo hidrógeno-Na; (vii) Bajo hidrógeno-K; (viii) Bajo hidrógeno-Fe; (ix) Óxido de Fe-Na; (x) Óxido de Fe-Fe; (xi) Rutílico; (xii) Bajo hidrógeno; y (xiii) Rutílico-Bajo hidrógeno.
14. Lista desplegable para la selección de la polaridad recomendada para el electrodo. Incluye los siguientes valores: (i) CDEN (corriente directa con electrodo negativo); (ii) CD o CA (corriente directa, cualquier polaridad o corriente alterna); (iii) CDEN o CA (corriente directa con electrodo negativo o corriente alterna); (iv) CDEP o CA (corriente directa con electrodo positivo o corriente alterna); y (v) CDEP (corriente directa con electrodo positivo).

15. Lista desplegable para la selección del grupo de aplicación del electrodo. Incluye los siguientes valores: (i) F1 (alta velocidad de deposición); (ii) F2 (penetración media); (iii) F3 (penetración profunda); y (iv) F4 (metal depositado con bajo hidrógeno).
16. Cuadro de texto para la entrada de la resistencia (tensión de rotura) del metal depositado por el electrodo.
17. Cuadro de texto para la entrada de la velocidad de deposición del electrodo.
18. Cuadro de texto para la entrada de la eficiencia de la deposición del electrodo.
19. Cuadro de texto para la entrada del diámetro del electrodo.
20. Cuadro de texto para la entrada del costo unitario (costo por kilogramo) del electrodo.
21. Botón para cerrar el cuadro de diálogo. Al hacerlo, pregunta si se desean guardar o descartar los cambios realizados. En el primer caso, la base de datos es actualizada para reflejar los cambios realizados. En el segundo, los cambios son desechados y la base de datos se mantiene sin modificaciones.
22. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.16 Edición de electrodos para aceros inoxidables

El cuadro de diálogo *Edición de base de datos (Electrodos para aceros al inoxidables)* permite agregar, modificar o eliminar elementos de la base de datos de electrodos utilizados para soldar aceros inoxidables. El mismo (Fig. 3.17) consta de los siguientes elementos:

1. Botón para ir al inicio (primer elemento) de la base de datos.
2. Botón para ir al elemento anterior de la base de datos.
3. Cuadro de texto (no editable) que muestra el número del elemento visualizado y el total de elementos en la base de datos.
4. Botón para ir al elemento siguiente de la base de datos.
5. Botón para ir al final (último elemento) de la base de datos.
6. Botón para agregar el contenido del cuadro de diálogo a la base de datos, como un nuevo elemento.
7. Botón para adoptar los cambios del contenido del cuadro de diálogo al elemento visualizado.

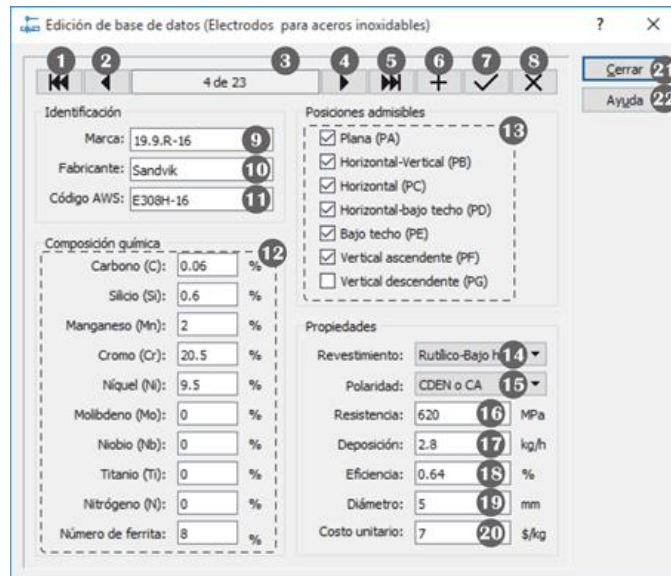


Figura 3.17 Cuadro de diálogo para la edición de electrodos para aceros inoxidable

8. Botón para eliminar el elemento visualizado de la base de datos.
9. Botón para adoptar los cambios del contenido del cuadro de diálogo al elemento visualizado.
10. Botón para eliminar el elemento visualizado de la base de datos.
11. Cuadro de texto para la entrada de la marca del electrodo.
12. Cuadro de texto para la entrada del fabricante del electrodo.
13. Cuadro de texto para la entrada de la clasificación del electrodo según la AWS.
14. Grupo de cuadros de texto para la entrada de la composición química del metal depositado por el electrodo.
15. Grupo de botones de chequeo para la especificación de las posiciones de soldadura admisibles por el electrodo. Las mismas están codificadas según la NC-ISO 6947 (2004).
16. Lista desplegable para la selección del tipo de revestimiento del electrodo. Incluye los siguientes valores: (i) Celulósico-Na; (ii) Celulósico-K; (iii) Rutílico-Na; (iv) Rutílico-K; (v) Rutílico-Fe; (vi) Bajo hidrógeno-Na; (vii) Bajo hidrógeno-K; (viii) Bajo hidrógeno-Fe; (ix) Óxido de Fe-Na; (x) Óxido de Fe-Fe; (xi) Rutílico; (xii) Bajo hidrógeno; y (xiii) Rutílico-Bajo hidrógeno.
17. Lista desplegable para la selección de la polaridad recomendada para el electrodo. Incluye los siguientes valores: (i) CDEN (corriente directa con electrodo negativo);

- (ii) CD o CA (corriente directa, cualquier polaridad o corriente alterna); (iii) CDEN o CA (corriente directa con electrodo negativo o corriente alterna); (iv) CDEP o CA (corriente directa con electrodo positivo o corriente alterna); y (v) CDEP (corriente directa con electrodo positivo).
18. Cuadro de texto para la entrada de la resistencia (tensión de rotura) del metal depositado por el electrodo.
 19. Cuadro de texto para la entrada de la velocidad de deposición del electrodo.
 20. Cuadro de texto para la entrada de la eficiencia de la deposición del electrodo.
 21. Cuadro de texto para la entrada del diámetro del electrodo.
 22. Cuadro de texto para la entrada del costo unitario (costo por kilogramo) del electrodo.
 23. Botón para cerrar el cuadro de diálogo. Al hacerlo, pregunta si se desean guardar o descartar los cambios realizados. En el primer caso, la base de datos es actualizada para reflejar los cambios realizados. En el segundo, los cambios son desechados y la base de datos se mantiene sin modificaciones.
 24. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.3.17 Opciones

El cuadro de diálogo *Opciones* permite establecer los parámetros de configuración de la aplicación. El mismo tiene dos pestañas. La primera, denominada *Visualización* (Fig. 3.18), permite establecer los parámetros que determinan la forma en se mostrará, en la pantalla, la carta tecnológica del proceso de soldadura. Incluye los siguientes elementos:

1. Lista desplegable para la selección del esquema de colores a utilizar en la visualización de la carta tecnológica. Contiene los siguientes elementos:
 - i. DIN (fondo negro): Fondo negro con los colores de las líneas representando su espesor (según la DIN);
 - ii. Monocromático (fondo negro): Fondo negro y líneas blancas;
 - iii. Monocromático (fondo blanco): Fondo blanco y líneas negras;

- iv. Contraste suave (fondo claro): Fondo amarillo claro y líneas azul oscuro;
 - v. Contraste suave (fondo oscuro): Fondo azul oscuro y líneas amarillo claro; y
 - vi. Personalizado: El usuario establece los colores de su preferencia, utilizando los botones correspondientes (elementos 2).
2. Botones para la selección del color de cada uno de los componentes de la carta tecnológica. Sólo se activa si está seleccionada la opción Personalizado, en la lista desplegable (elemento 1).
 3. Cuadro de texto numérico discreto para la entrada del valor del factor de escala de la visualización del espesor de las líneas.

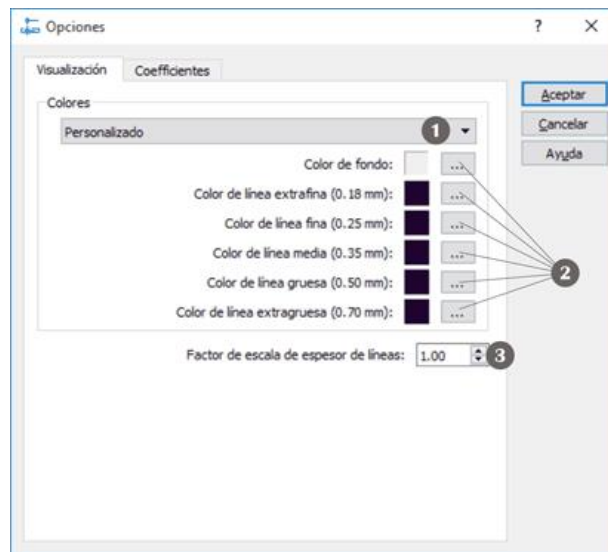


Figura 3.18 Cuadro de diálogo de opciones (visualización)

La segunda pestaña, denominada *Coefficientes* (Fig. 3.19), permite establecer el valor de los coeficientes que se utilizan en el diseño de la tecnología. La misma incluye:

4. Cuadro de texto para la entrada del valor predeterminado de la eficiencia de depósito de los electrodos.
5. Cuadro de texto para la entrada del valor predeterminado del factor de consumo eléctrico para máquina de corriente alterna.
6. Cuadro de texto para la entrada del valor predeterminado del factor de consumo eléctrico para máquina de corriente directa.

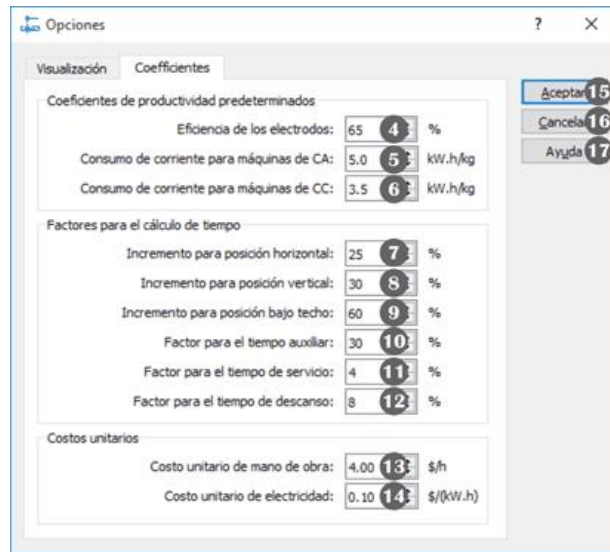


Figura 3.19 Cuadro de diálogo de opciones (coeficiencites)

7. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual del incremento del tiempo tecnológico de la soldadura para costuras horizontales.
8. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual del incremento del tiempo tecnológico de la soldadura para costuras verticales.
9. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual del incremento del tiempo tecnológico de la soldadura para costuras bajo techo.
10. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual de la razón entre el tiempo auxiliar y el tiempo tecnológico.
11. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual de la razón entre el tiempo de servicio y el tiempo tecnológico.
12. Cuadro de texto para la entrada del valor porcentual de la razón entre el tiempo de descanso y el tiempo tecnológico.
13. Cuadro de texto para la entrada del valor del costo unitario (por hora) de mano de obra.
14. Cuadro de texto para la entrada del valor del costo unitario (por kW·h) de la electricidad.

Además, el cuadro de diálogo dispone de los siguientes botones:

15. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, aceptando los datos entrados en el mismo.

- 16. Botón para cerrar el cuadro de diálogo, cancelando los datos entrados en el mismo.
- 17. Botón para acceder a la ayuda del cuadro de diálogo.

3.4 Estudio de casos

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento del programa, se ejecutaron tres casos de estudio, correspondiendo a distintas posiciones, grosores de plancha y materiales bases. Los mismos se describen a continuación.

3.4.1 Caso 1: Unión a tope, plana, de acero al carbono

Se desea determinar la tecnología para soldar dos planchas de acero AISI 1015, de espesor 25 mm, a tope. La costura tendrá una longitud de 1 200 mm y estará en posición plana. La máquina de soldadura a emplear será un rectificador trifásico Excel Arc 8065 CC/CV (Hobart) y la longitud de los cables, de 20 m.

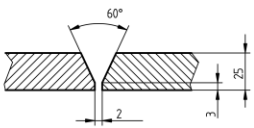
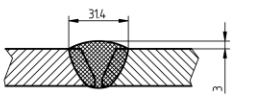
DATOS				ELECTRODOS					
GEOMETRÍA DE LA UNIÓN				PASADAS DE RAÍZ		PASADAS DE RELLENO		PASADAS DE SELLADO	
TIPO DE UNIÓN	A TOPE			MARCA	SureWeld 10P		Atom Arc 7018		-
POSICIÓN	PLANA (PA)			FABRICANTE	ESAB		ESAB		-
DIMENSIONES				CÓDIGO AWS	E6010		E7018		-
ESPESOR DE LA PLANCHA	25		mm	DIÁMETRO	4.8		6.4		mm
LONGITUD DE LA COSTURA	1200		mm	RÉGIMEN DE SOLDADURA					
MATERIAL BASE				PASADAS					
NORMA	AISI 1015			DE RAÍZ	DE RELLENO	DE SELLADO	TOTAL	UNIDAD	
MARCA	ACERO AL CARBONO			CANTIDAD DE PASADAS	1	6	-	7	-
TIPO DE MATER.	ACERO AL CARBONO			INTENSIDAD DE CORRIENTE	260	420	-	-	A
MÁQUINA DE SOLDADURA				POLARIDAD	CC+ (CCEN)	CC- (CCEP)	-	-	-
MARCA/MODELO	Hobart/Excel Arc 8065 CC/CV			CONSUMO DE ELECTRODO	0.49	4.48	-	4.97	kg
RANGO CORR.	(75 ... 750) A			CONSUMO DE ELECTRICIDAD	1.7	15.69	-	17.39	kWh
TIPO DE CORR.	CC (CONTINUA)			TIEMPO TECNOLÓGICO	19.6	72.6	-	92.2	min
COSTURA				TIEMPO AUXILIAR	-	-	-	27.7	min
PREPARACIÓN DE BORDES				TIEMPO DE SERVICIO	-	-	-	3.7	min
CÓDIGO	15	NORMA	NC-ISO 9692-1 2011	TIEMPO DE DESCANSO	-	-	-	7.4	min
CROQUIS				TIEMPO TOTAL	-	-	-	131	min
				PRECALENTAMIENTO		REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS			
				TEMPERATURA	-	°C	1. ELIMINAR ESCORIA ENTRE PASADAS POR MEDIOS MECÁNICOS. 2. REALIZAR CONTROL DE LA COSTURA POR RAYOS-X.		
				TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR					
				TEMPERATURA	620	°C			
				TIEMPO DE PERMANENCIA	60	min			
				COSTOS					
				COSTO DE ELECTRODO	3.98	CUP			
				COSTO DE MANO DE OBRA	8.73	CUP			
				COSTO DE ELECTRICIDAD	1.74	CUP			
				COSTO TOTAL	14.45	CUP			
				EQUIPAMIENTO AUXILIAR					
				PORTAELECTRODO	Extra Grande				
				CABLE	4/0 x 20 m				
				FILTRO VISUAL	No. 11		PROCESO		
						SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO			
				TECNÓLOGO	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
				SOLDADOR	A. LAGUARDIA		2017.12.15		
				SUPERVISOR	R. PÉREZ				
				RESPONSABLE	R. QUIZA				
				RESPONSABLE	M. RIVAS				
						PTK-01-411		OBJETO	TANQUE 1000 M3
								COSTURA	4-11-16

Figura 3.20 Carta tecnológica correspondiente al caso de estudio 1

La figura 3.20 muestra la carta tecnológica correspondiente a la tecnología diseñada. Tal como se puede ver, la soldadura se realizará en 7 pasadas, de las cuales la de raíz será con electrodo ESAB Sureweld 10P (E6010) Ø4,8 mm, mientras que las de relleno, con electrodo ESAN AtomArc 7018 (E7018) Ø6,4 mm. La preparación seleccionada fue con bisel en V (1.5 NC-ISO 9692-1: 2011). El tiempo total del proceso fue calculado para 131 min y el costo de la costura, 14,45 CUP.

3.4.2 Caso 2: Unión de tubo a tope, horizontal, de acero al carbono

Se desea determinar la tecnología para soldar dos tubos de Ø450 mm de acero AISI 1015, de espesor 12 mm, a tope. La costura estará en posición horizontal. La máquina de soldadura a emplear será un rectificador trifásico Excel Arc 8065 CC/CV (Hobart) y la longitud de los cables, de 15 m.

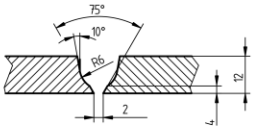
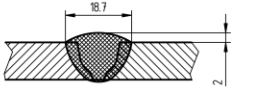

DATOS				ELECTRODOS								
GEOMETRÍA DE LA UNIÓN				PASADAS DE RAÍZ		PASADAS DE RELLENO		PASADAS DE SELLADO				
TIPO DE UNIÓN	TUBO A TOPE			MARCA	Atom Arc 7018		Atom Arc 7018		-			
POSICIÓN	HORIZONTAL (PC)			FABRICANTE	ESAB		ESAB		-			
DIMENSIONES				CÓDIGO AWS	E7018		E7018		-			
ESPESOR DE LA PLANCHA	12 mm			DIÁMETRO	5,6 mm		5,6 mm		-			
LONGITUD DE LA COSTURA	1413,72 mm											
MATERIAL BASE				RÉGIMEN DE SOLDADURA								
NORMA	AISI 1015			DE RAÍZ		DE RELLENO		DE SELLADO		TOTAL		
MARCA	1015			CANTIDAD DE PASADAS	1		2		-		3	
TIPO DE MATER	ACERO AL CARBONO			INTENSIDAD DE CORRIENTE	300		300		-		-	
MÁQUINA DE SOLDADURA				POLARIDAD	CC- (CCEP)		CC- (CCEP)		-		-	
MARCA/MODELO	Hobart/Excel Arc 8065 CC/CV			CONSUMO DE ELECTRODO	0,67		157		-		224	
RANGO CORR.	175 - 750 A			CONSUMO DE ELECTRICIDAD	2,34		5,51		-		7,85	
TIPO DE CORR.	CC (CONTINUA)			TIEMPO TECNOLÓGICO	16,25		38		-		54,25	
COSTURA				TIEMPO AUXILIAR	-		-		-		16,3	
PREPARACIÓN DE BORDES				TIEMPO DE SERVICIO	-		-		-		2,2	
CÓDIGO	16		NORMA	NC-ISO 9692-1 2011		TIEMPO DE DESCANSO		-		4,3		
			CROQUIS			TIEMPO TOTAL		-		77,05		
				PRECALENTAMIENTO				REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS				
				TEMPERATURA	-		°C		1. ELIMINAR ESCORIA ENTRE PASADAS POR MEDIOS MECÁNICOS. 2. REALIZAR CONTROL DE LA COSTURA POR RAYOS-X.			
				TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR								
				TEMPERATURA	-		°C					
DIMENSIONES DE LA COSTURA				COSTOS								
				TIEMPO DE PERMANENCIA	-		min					
				COSTO DE ELECTRODO	1,79		CUP					
				COSTO DE MANO DE OBRA	5,14		CUP					
				COSTO DE ELECTRICIDAD	0,79		CUP					
				COSTO TOTAL	7,72		CUP					
				EQUIPAMIENTO AUXILIAR								
				PORTAELECTRODO	Medio							
				CABLE	1/0 x 15 m							
				FILTRO VISUAL	No. 11							
				PROCESO				SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO				
				TECNÓLOGO	NOMBRE	FIRMA	FECHA					
				SOLDADOR	R. PÉREZ		2017.12.15					
				SUPERVISOR	R. QUIZA							
				RESPONSABLE	M. RIVAS							
				PTK-01-411				OBJETO	TANQUE 1000 M3			
								COSTURA	4.11-16			

Figura 3.21 Carta tecnológica correspondiente al caso de estudio 2

La figura 3.21 muestra la carta tecnológica correspondiente a la tecnología diseñada. La unión se realizará con preparación en U simple con bisel en V (1.6 NC-ISO 9692-1: 2011). Se ejecutarán 3 pasadas, con electrodo ESAN AtomArc 7018 (E7018) Ø5,6 mm. El tiempo total del proceso fue calculado para 77 min y el costo de la costura, 7,72 CUP.

3.4.2 Caso 3: Unión en T, plana, de acero inoxidable

Se desea determinar la tecnología para soldar dos planchas de acero inoxidable AISI 316, de espesor 6 mm, en T, con longitud 300 mm. La costura estará en posición plana. La máquina de soldadura a emplear será un rectificador trifásico Excel Arc 8065 CC/CV (Hobart) y la longitud de los cables, de 15 m.

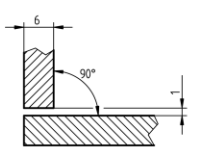
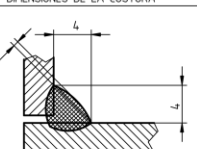
DATOS				ELECTRODOS						
GEOMETRÍA DE LA UNIÓN				PASADAS DE RAÍZ		PASADAS DE RELLENO		PASADAS DE SELLADO		
TIPO DE UNIÓN	EN T			MARCA	-		19.123LR		-	
POSICIÓN	PLANA (PA)			FABRICANTE	-		Sandvik		-	
DIMENSIONES				CÓDIGO AWS	-		E316-17		-	
ESPESOR DE LA PLANCHA	6		mm	DIÁMETRO	-		3.2		mm	
LONGITUD DE LA COSTURA	300		mm							
MATERIAL BASE				RÉGIMEN DE SOLDADURA						
NORMA	AISI			PASADAS		DE SELLADO		TOTAL	UNIDAD	
MARCA	316			CANTIDAD DE PASADAS	DE RAÍZ	DE RELLENO	DE SELLADO	1	-	
TIPO DE MATER.	ACERO INOXIDABLE			INTENSIDAD DE CORRIENTE	-	125	-	-	A	
MÁQUINA DE SOLDADURA				POLARIDAD	-		CC+ (CCEN)		-	
MARCA/MODELO	Hobart/Excel Arc 8065 CC/CV			CONSUMO DE ELECTRODO	-	0.07	-	0.07	kg	
RANGO CORR.	(75 - 750) A			CONSUMO DE ELECTRICIDAD	-	0.24	-	0.24	kWh	
TIPO DE CORR.	CC (CONTINUA)			TIEMPO TECNOLÓGICO	-	2.8	-	2.8	min	
COSTURA				TIEMPO AUXILIAR	-	-	-	0.8	min	
PREPARACIÓN DE BORDES				TIEMPO DE SERVICIO	-	-	-	0.1	min	
CÓDIGO	311	NORMA	NC-ISO 9692-1 2011	TIEMPO DE DESCANSO	-	-	-	0.2	min	
CROQUIS				TIEMPO TOTAL	-	-	-	3.9	min	
				PRECALENTAMIENTO		REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS				
				TEMPERATURA	-		1 ELIMINAR ESCORIA ENTRE PASADAS POR MEDIOS MECÁNICOS. 2 REALIZAR CONTROL DE LA COSTURA POR RAYOS-X.			
				TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR						
				TEMPERATURA	-					
DIMENSIONES DE LA COSTURA				TIEMPO DE PERMANENCIA						
				TIEMPO DE PERMANENCIA	-					
				COSTOS						
				COSTO DE ELECTRODO	0.56	CUP				
				COSTO DE MANO DE OBRA	0.26	CUP				
				COSTO DE ELECTRICIDAD	0.02	CUP				
				COSTO TOTAL	0.84	CUP				
				EQUIPAMIENTO AUXILIAR						
				PORTAELECTRODO	Pequeño					
				CABLE	1 x 15 m					
				FILTRO VISUAL	No. 8					
				NOMBRE		FIRMA	FECHA	PROCESO		
				TECNÓLOGO	A. LAGUARDIA		2017.12.15	SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO		
				SOLDADOR	R. PÉREZ			PTK-01-411		
				SUPERVISOR	R. QUIZA			OBJETO	TANQUE 1000 M3	
				RESPONSABLE	M. RIVAS			COSTURA	4T1-16	

Figura 3.22 Carta tecnológica correspondiente al caso de estudio 3

La figura 3.22 muestra la carta tecnológica correspondiente a la tecnología diseñada. La unión se realizará unilateralmente (3.1.1 NC-ISO 9692-1: 2011). Se ejecutará una única

pasada, con electrodo Sandvik 19.12.3LR (316-17) Ø3,2 mm. El tiempo total del proceso fue calculado para 3,9 min y el costo de la costura, 0,84 CUP.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo

Al finalizar el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se implementó una aplicación informática para llevar a cabo el diseño de tecnologías de SMAW, para aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, a partir de la metodología formalizada en el capítulo anterior.
2. La aplicación dispone de una interfaz gráfica de usuario amigable que permite la entrada de datos, la realización de los cálculos y selección de parámetros, así como la visualización e impresión de los resultados.
3. La aplicación es portable y puede utilizarse en los sistemas operativos MS Windows y Linux, tanto en ordenadores de 32 bits como de 64 bits.

CONCLUSIONES

Como resultado final de la tesis se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se formalizó la metodología para el diseño de tecnologías de SMAW para aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, definiendo los algoritmos y expresiones de cálculo a utilizar en cada caso.
2. Se implementó una aplicación informática para llevar a cabo el diseño de tecnologías de SMAW, para aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, con una interfaz gráfica de usuario amigable, y con portabilidad para sistemas operativos MS Windows y Linux.
3. Se llevaron a cabo tres casos de estudio que permitieron validar el uso del software, comprobando su estabilidad y la corrección de los resultados obtenidos.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de esta tesis, se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

1. Realizar pruebas del software en condiciones prácticas de producción, para validar su funcionamiento.
2. Extender las bases de datos de electrodos, máquinas de soldadura y materiales base para incluir los de uso más frecuente en el territorio y el país.
3. Extender la aplicación desarrollada para incluir otros materiales (aleaciones de aluminio, de cobre, etc.) y procesos de soldadura (SAW, MAG, etc.).
4. Incorporar la posibilidad de diseñar costuras con penetración parcial, tal como lo establece la norma AWS D1.1/D1.1M (2015).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API RP 582 (2009). *Recommended practice welding guidelines for the chemical, oil, and gas industries*. Washington, DC (USA): American Petroleum Institute.

Ashby, M.F. (2005). *Materials selection in mechanical design* (3rd ed.). Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-6168-2.

ASME BPVC.IX (2015). *Boiler and pressure vessel code. Section IX: Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators*. New York (USA): The American Society of Mechanical Engineers.

ASME B31.3 (2014). *Process piping*. New York (USA): The American Society of Mechanical Engineering.

AWS A5.1/A5.1M (2004). *Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding*. Miami, FL (USA): American Welding Society.

AWS A5.4/A5.4M (2006). *Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding*. Miami, FL (USA): American Welding Society.

AWS A5.12/A5.12M (2009). *Specification for tungsten and oxide dispersed tungsten electrodes for arc welding and cutting*, 7th ed. Miami, FL (USA): American Welding Society.

AWS D1.1/D1.1M (2015): *Structural welding code – Steel*. Miami, FL (USA): American Welding Society.

BOC (2007). *Fundamentals of manual metal arc (MMA) welding* [online]. Sidney (Australia): BOC Word of Welding. [Acceso: 12-03/2016]. Disponible en: <<http://www.bocworldofwelding.com.au/media/pdf/file/library/WOWLibrary-Fundamentals%20MMA%20welding.pdf>>

- Burgos Sola, J. (1987). *Tecnología de soldadura*. La Habana (Cuba): Pueblo y Educación.
- Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. (2010). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). ISBN 978-0470556733
- Cary, H.B. (1998). *Modern welding technology*. 4th Ed. Upper Saddle River, NJ (USA): Prentice-Hall, ISBN 0-13-241803-7
- Degarmo, E.P; Black, J.T.; Kohser, R.A. (2007), *Materials and processes in manufacturing* (10th ed.), New York (USA): Wiley, ISBN 978-0-470-05512-0.
- Hinton, R.W.; Wiswesser, R.K. (2008). “Estimating welding preheat requirements for unknown grades of carbon and low-alloy steels”, *Welding Journal* 87 pp. 273-278.
- Justel Ramos, M.A. (2012). *Soldadura: Manual para operarios y técnicos*. La Habana (Cuba): Editorial Científico-Técnica, ISBN 978-959-05-0654-3.
- La Fé, I., Rivas, M., Quiza, R., & Zambrano-Robledo, P. (2017). “Optimización multiobjetivo de la soldadura automática bajo fundente del acero JIS 3116”. *Ingeniería Mecánica*, 20(2), 77.
- Meyers, M.A.; Chawla, K.K. (2009). *Mechanical behavior of materials*. Cambridge (UK): Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-86675-0
- Miller Electric Mfg Co (2013). *Guidelines for gas tungsten arc welding (GTAW)*. Appleton, WI (USA): Miller Electric Mfg Co.
- Miller Electric Mfg Co (2012). *Guidelines for gas metal arc welding (GMAW)*. Appleton, WI (USA): Miller Electric Mfg Co.
- NC-ISO 6947 (2004). *Soldaduras – Posiciones de trabajo – Definición de los ángulos de pendiente y de rotación*. La Habana (Cuba): Oficina Nacional de Normalización.

NC-ISO 9692-1 (2011). *Soldadura y procesos afines – Recomendaciones para la preparación de la unión. Parte 1: Soldadura por arco con electrodos revestidos, soldadura por arco protegido con gas y electrodo de aporte, soldadura por llama, soldadura por arco con gas inerte y electrodo de wolframio y soldadura por haz de alta energía de aceros*. La Habana (Cuba): Oficina Nacional de Normalización.

Olson, D.L.; Siewert, T.A.; Liu, S.; Edwards, G.R. (eds.) (1993). *ASM Handbook. Volume 6: Welding, brazing and soldering*. Materials Park, OH (USA): ASM International. ISBN 0-87170-377-7

Rodríguez Pérez, H. (1988). *Metalurgia de la soldadura*. La Habana (Cuba): Pueblo y Educación.

Schimpke, P.; Horn, H.A.; Ruge, J (1985). *Tratado general de soldadura/ Parte III: Proyecto y cálculo de las uniones soldadas*. La Habana (Cuba): Ediciones Revolucionarias.

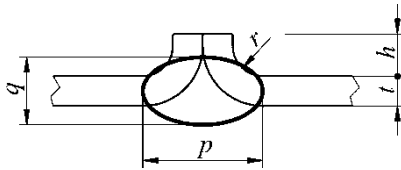
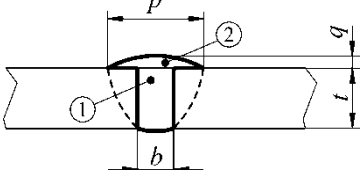
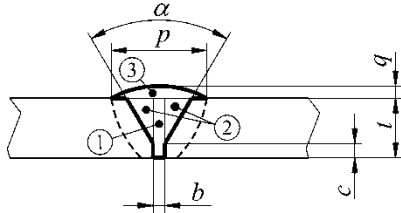
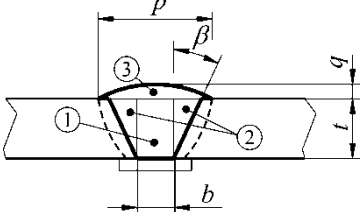
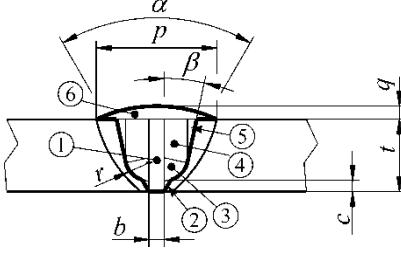
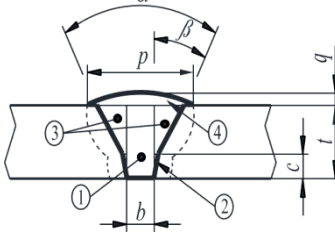
Weman, K. (2012). *Welding processes handbook* (2nd ed.). Cambridge (UK): Woodhead Publishing.

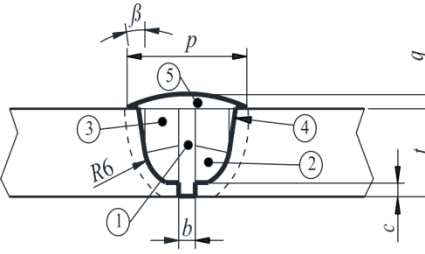
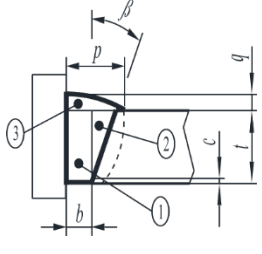
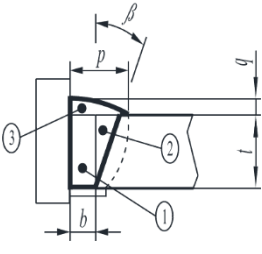
WSS (2013) *The Welding handbook for maritime welders*. 11th Ed. Lysaker (Noruega): Wilhelmsen Ships Service.

Yan, W., Zhang, H., Jiang, Z.-G., & Hon, K. K. B. (2017). “Multi-objective optimization of arc welding parameters: the trade-offs between energy and thermal efficiency”. *Journal of Cleaner Production*, 14 (3) pp. 842-1849. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.171

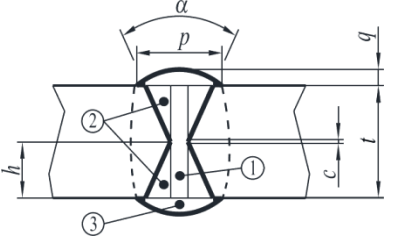
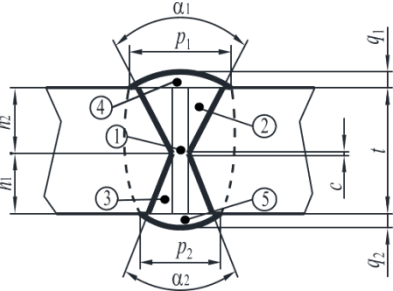
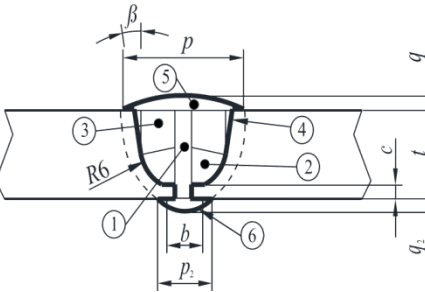
ANEXOS

Anexo 1 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte

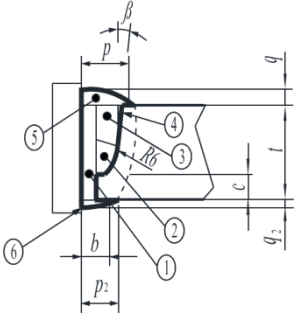
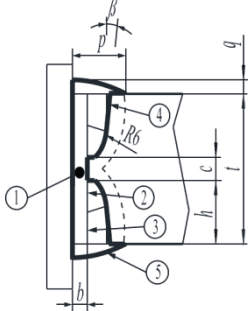
Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.1		$A = \frac{22}{5} t^2 - 2ht$
1.2.1		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + A_2$
1.3 1.5		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c)^2 \tan(\alpha / 2)$ $A_3 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3$
1.4		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3$
1.6		$A_1 = bt$ $A_2 = 0,5t^2 \tan \beta$ $A_3 = 0,75pq$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3$
1.7		$A_1 = bt$ $A_2 = 0,5(t/3 - c)^2 \tan(\alpha / 2)$ $A_3 = 0,5(2t/3 - c)[2(t/3 - c) \tan(\alpha / 2) + (2t/3 - c) \tan \beta]$

Ref.	Croquis	Ecuaciones
		$A_4 = 0,7 \left[4 + 2 \left(\left(\left(\frac{1}{3}t \right) - c \right) \tan \frac{\alpha}{2} \dots \right) + b \right] \cdot q \dots$ $\dots \left[4 + 2 \left(\left(\left(\frac{1}{3}t \right) - c \right) \tan \frac{\alpha}{2} + \left(\left(\frac{2}{3}t \right) - c \right) \tan \beta \right) + b \right]$ $A = 2(A_1 + A_2 + A_3) + A_4$
1.8		$A_1 = b \cdot t$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2} (x_B - x_C) [(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2} (y_D - y_B) (x_D - x_B)$ $A_5 = 0,7 \left(2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta \right) + 4 \right) \cdot q \dots$ $\dots \left[2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta \right) + 4 \right]$ $A = A_1 + 2(A_2 + A_3 + A_4) + A_5$
1.9.1		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c)^2 \tan \beta$ $A_3 = 0,7 (2 + (t - c) \tan \beta + b) \cdot q [2 + (t - c) \tan \beta + b]$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
1.10		$A_1 = b \cdot t$ $A_2 = \frac{1}{2} t^2 \tan \beta$ $A_3 = 0,7 (2 + t \tan \beta + b) \cdot q [2 + t \tan \beta + b]$ $A = A_1 + A_2 + A_3$

Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.11		$A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2}(x_B - x_C)[(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2}(y_D - y_B)(x_D - x_B)$ $A_5 = 0,7(b + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta + 2) \cdot q \dots$ $\dots [b + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta + 2]$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$
2.1		$A_1 = bt$ $A_2 = 0,7(4 + b) \cdot q [4 + b]$ $A = A_1 + 2A_2$
2.2 2.3		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}(t - c)^2 \tan \frac{\alpha}{2}$ $A_3 = 0,7 \left(4 + 2 \left((t - c) \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right) \cdot q_1 \dots$ $\dots \left[4 + 2 \left((t - c) \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right]$ $A_4 = 0,7(4 + b) \cdot q_2 [4 + b]$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3 + A_4$
2.4		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{t - c}{2} \right)^2 \tan \frac{\alpha}{2}$ $A_3 = 0,7 \left(4 + 2 \left(\frac{t - c}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right) \cdot q \dots$ $\dots \left[4 + 2 \left(\frac{t - c}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right]$

Ref.	Croquis	Ecuaciones
		$A = A_1 + 4A_2 + 2A_3$
2.5.1		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{t-c}{2} \right)^2 \tan \frac{\alpha}{2}$ $A_3 = 0,7 \left(4 + 2 \left(\frac{t-c}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right) \cdot q \left[4 + 2 \left(\frac{t-c}{2} \tan \frac{\alpha}{2} \right) + b \right]$ $A = A_1 + 4A_2 + 2A_3$
2.5.2		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} \left[t - \left(\frac{t}{3} + c \right) \right]^2 \tan \frac{\alpha_1}{2}$ $A_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{3} \right)^2 \tan \frac{\alpha_2}{2}$ $A_4 = 0,7 \left(4 + 2 \left(\left(t - \left(\frac{t}{3} + c \right) \right) \tan \frac{\alpha_1}{2} \right) + b \right) \cdot q_1 \dots$ $\dots \left[4 + 2 \left(\left(t - \left(\frac{t}{3} + c \right) \right) \tan \frac{\alpha_1}{2} \right) + b \right]$ $A_5 = 0,7 \left(4 + 2 \left(\frac{t}{3} \tan \frac{\alpha_2}{2} \right) + b \right) \cdot q_2 \dots$ $\dots \left[4 + 2 \left(\frac{t}{3} \tan \frac{\alpha_2}{2} \right) + b \right]$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4 + A_5$
2.6		$A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2} (x_B - x_C) [(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2} (y_D - y_B) (x_D - x_B)$

Ref.	Croquis	Ecuaciones
		$A_5 = 0,7 \left(2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta \right) + 4 \right) \cdot q_1 \dots$ $\dots \left[2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta \right) + 4 \right]$ $A_6 = 0,7(4 + b) \cdot q_2 [4 + b]$ $A = A_1 + 2(A_2 + A_3 + A_4) + A_5 + A_6$
2.7		$A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2} (x_B - x_C) [(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2} (y_D - y_B) (x_D - x_B)$ $A_5 = 0,7 \left(2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + \left(\frac{t}{2} - \frac{c}{2} - R + R \sin \beta \right) \tan \beta \right) + 4 \right) \cdot q \dots$ $\dots \left[2 \left(\frac{b}{2} + R \cos \beta + \left(\frac{t}{2} - \frac{c}{2} - R + R \sin \beta \right) \tan \beta \right) + 4 \right]$ $A = A_1 + 4(A_2 + A_3 + A_4) + 2A_5$
2.8		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c)^2 \tan \beta$ $A_3 = 0,7(2 + (t - c) \tan \beta + b) \cdot q_1 [(t - c) \tan \beta]$ $A_4 = 0,7(2 + b) \cdot q [2 + b]$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$
2.9		$A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{t - c}{2} \right)^2 \tan \beta$ $A_3 = 0,7 \left(\frac{t - c}{2} \tan \beta \right) \cdot q \left[\frac{t - c}{2} \tan \beta \right]$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3$

Ref.	Croquis	Ecuaciones
2.10		$A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2}(x_B - x_C) [(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2}(y_D - y_B)(x_D - x_B)$ $A_5 = 0,7(b + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta + 2) \cdot q_1 \dots$ $\dots [b + R \cos \beta + (t - c - R + R \sin \beta) \tan \beta + 2]$ $A_6 = 0,7(b + 2) \cdot q_2 [b + 2]$ $A = A_1 + 2(A_2 + A_3 + A_4) + A_5 + A_6$
2.11		$A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) R^2$ $A_3 = \frac{1}{2}(x_B - x_C) [(y_D - y_B) + (y_D - y_C)]$ $A_4 = \frac{1}{2}(y_D - y_B)(x_D - x_B)$ $A_5 = 0,7 \left(b + R \cos \beta + \left(\frac{t}{2} - \frac{c}{2} - R + R \sin \beta \right) \tan \beta + 2 \right) \cdot q \dots$ $\dots \left[b + R \cos \beta + \left(\frac{t}{2} - \frac{c}{2} - R + R \sin \beta \right) \tan \beta + 2 \right]$ $A = A_1 + 2(A_2 + A_3 + A_4 + A_5)$