

ALGORITMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE TECNOLOGÍAS DE SOLDADURA MANUAL POR ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO DE ACEROS

**Ing. Alexey Laguardia Ibáñez¹, M.Sc. Omar López Armas²,
Ing. Jorge Ernesto Pérez Pedroso³, Dr.C. Ramón Quiza Sardiñas⁴**

*1. EMPET División Matanzas, Zona Industrial km 4½, Matanzas,
Cuba. EMail: alexey@divmtzas.empet.cupet.cu*

*2. Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible
(GIFAS), Universidad de Matanzas.
Autopista a Varadero km 3½, Matanzas 44740, Cuba.
Teléfono: +(53)45261432. Web: <http://gifas.umcc.cu>,
EMail: omar.lopez@umcc.cu, ramon.quiza@umcc.cu*

*3. Empresa Industrial Ferroviaria «José Valdés Reyes»,
Carretera a Máximo Gómez, km 1½, Cárdenas, Matanza, EMail: jorge@jvr.cu*

Monografías



Resumen

La soldadura de metal por arco eléctrico con electrodos revestidos es un proceso popular para uniones de piezas y componentes mecánicos. La selección de los parámetros apropiados para el proceso es un aspecto importante con vistas a obtener uniones soldadas de calidad. Con el objetivo de desarrollar una aplicación informática con este propósito, en este trabajo se llevó a cabo la formalización y algoritmización de la metodología para diseñar tecnologías de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos de aceros. La metodología propuesta tiene en cuenta las normas actualmente vigentes en Cuba, así como otras de amplio uso internacional. Así mismo, incorpora los avances del estado del arte en este campo. La metodología incluye la selección de preparaciones de bordes, de electrodos y de los parámetros del proceso. También permite calcular el tiempo y los costos del proceso.

Palabras claves: Soldadura manual por arco eléctrico; Metodología; Algoritmo

1 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. 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.

Teniendo en cuenta lo anterior, el diseño de tecnologías de SMAW es susceptible de ser automatizado 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, tal como Soldasoft se han quedado obsoletos tanto por los algoritmos y datos que utiliza como por su compatibilidad con los sistemas operativos contemporáneos.

El desarrollo de una aplicación con este propósito está lejos de ser trivial, ya que no sólo reviste alta complejidad desde el punto de vista computacional, sino que los propios algoritmos y expresiones de cálculos están dispersas en las diversas normativas vigentes en Cuba o de uso común a nivel internacional y en la literatura especializada.

Como primer paso 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, formalizar y algoritmizar la metodología del diseño de tecnologías de SMAW para aceros.



2 Metodología de Diseño de Tecnologías SMAW

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 determina 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

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. 2.1 muestra los tipos de juntas más comunes (Schimpke et al. 1985).

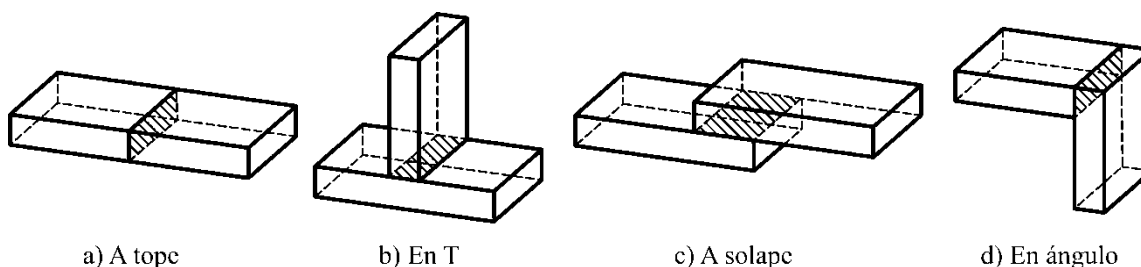
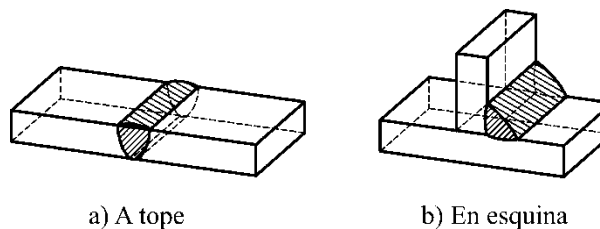


Figura 2.1 Tipos de juntas en las uniones soldadas

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 (Fig. 2.2).

Figura 2.2 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. 2.3). En el sistema de coordenadas considerado, el eje de la costura pasa por el origen y está situado sobre el plano vertical xz .

A partir de los ángulos anteriores, esta norma define siete posiciones principales, las cuales se resumen en la Tabla 2.1.

Para la entrada de datos de la geometría de la unión (Código 2.2), se comienza por establecer el tipo de junta. Para ello, se selecciona de seis tipos posibles: a tope, en ángulo, en T, a solape, tubo a tope y tubo en esquina.



Figura 2.3 Definición de la pendiente y la rotación de una costura (NC-ISO 6947: 2004)

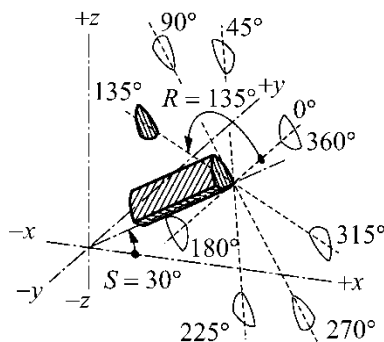


Tabla 2.1 Posiciones principales de soldadura (NC-ISO 6947: 2004)

Símbolo	Denominación, R	Pendiente, S	Rotación, R	Esquema
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°	-	



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_Top) 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

```

Posteriormente, se establece la posición, en correspondencia de una de las ocho posiciones principales: PA (plana), PB (horizontal vertical), PC (horizontal), PD (horizontal bajo techo), PE (bajo techo), PF (vertical ascendente) y PG (vertical descendente). Como no todas las juntas admiten las ocho posiciones, en el Código 2.2 se definen cuáles pueden seleccionarse en cada caso.

Igualmente, 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 del espesor, éste es el mismo para ambas planchas en las juntas a tope (planchas o tubos), pero puede ser diferente en las juntas en ángulo (planchas y tubo), en T y a solape.

Finalmente, para las soldaduras de chapas o longitudinales de tubos se introduce 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 este, mediante la relación:

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



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, silicio y manganeso, mientras que para los bajoaleados e inoxidables, además, se indican los de cromo, níquel, molibdeno, vanadio, niobio, titanio, tungsteno, cobre y aluminio, 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 y Grado
04:   ENTRAR: TS [Tensión de rotura]
05:   SI (Tipo_Material = Al_Carbono)
06:     ENTRAR C, Si, Mn
07:   SINO
08:     ENTRAR C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti, W, Cu, Al
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 y Modelo
03:   ENTRAR: Tipo_Corriente {CC, 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 continua [CC] 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 2.2). 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 2.2 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

Tabla 2.2 Datos generales de las preparaciones de bordes (cont.)

Ref.	Designación	Junta	Espesor [mm]		Pasadas	
			Mínimo	Máximo	Raíz	Sellado



Ref.	Designación	Junta	Espesor [mm]		Pasadas	
			Mínimo	Máximo	Raíz	Sellado
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
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 2.3).

Tabla 2.3 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 (o cateto), h (k) [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	0 0.5t t	-
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	-	-
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	$t/3 (t-c)/2 (t-c)/2$	-



Tabla 2.3 Dimensiones de las preparaciones de bordes (cont.)

Referencia	Ángulo del bisel, α [°]	Ángulo del bisel, β [°]	Separación, b [mm]	Espesor del talón, c [mm]	Profundidad (o cateto), h (k) [mm]	Radio, r [mm]
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 ∞	-
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 ∞	-

Para el cálculo del área de la sección transversal, se divide la misma en figuras geométricas elementales. En la Tabla 2.4 se muestran las ecuaciones para cada una de las preparaciones.

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte

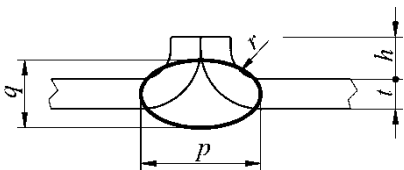
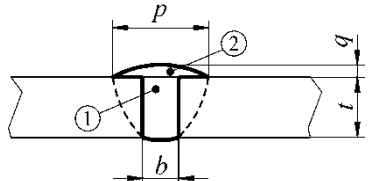
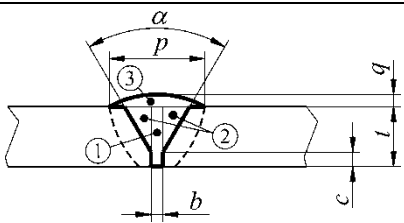
Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.1		$A = \frac{22}{5} t^2 - 2ht$
1.2.1		$p = b + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + A_2$
1.3 1.5		$p = b + 2(t - c) \tan\left(\frac{1}{2} \alpha\right) + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c)^2 \tan\left(\frac{1}{2} \alpha\right)$ $A_3 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3$



Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

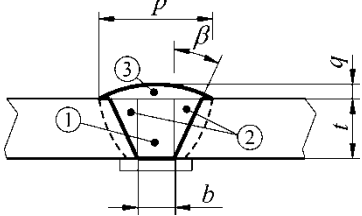
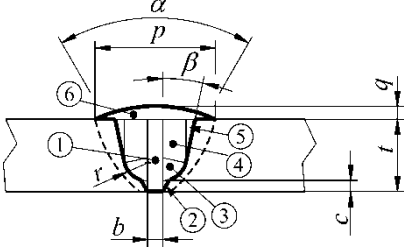
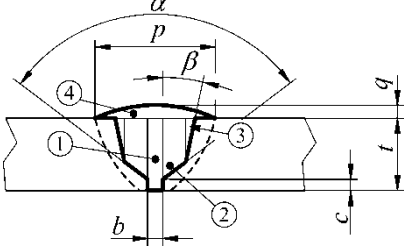
Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.4		$p = b + 2t \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3$
1.6		$p = b + 2r \cos \beta + \dots$ $\dots + 2[t - c - \sqrt{r^2 - c^2 - \tan^2(\frac{1}{2}\alpha)} + \dots$ $\dots + r \sin \beta] \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} c^2 \tan(\frac{1}{2}\alpha)$ $A_3 = (\frac{1}{4}\pi - \beta)r^2$ $A_4 = \frac{1}{2}[2t - 2c - 2\sqrt{r^2 - c^2 \tan^2(\frac{1}{2}\alpha)} + \dots$ $\dots + r \sin \beta] \cos \beta$ $A_5 = \frac{1}{2}[t - c - \sqrt{r^2 - c^2 \tan^2(\frac{1}{2}\alpha)}]^2 \tan \beta$ $A_6 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4 + 2A_5 + A_6$
1.7		$p = b + (t - c)[\tan(\frac{1}{2}\alpha) + \tan \beta] + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{3}{8}(t - c)^2 \tan(\frac{1}{2}\alpha)$ $A_3 = \frac{1}{8}(t - c)^2 \tan \beta$ $A_4 = \frac{3}{4} pq$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

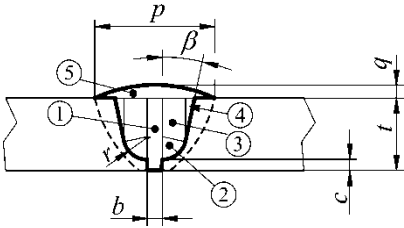
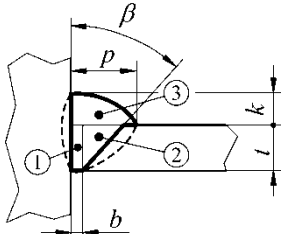
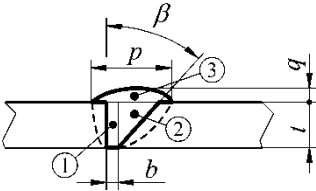
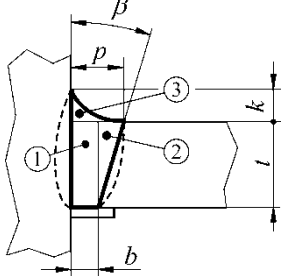
Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.8		$p = b + 2r \cos \beta + \dots$ $\dots + 2(t - c - r + r \sin \beta) \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{1}{4}\pi - \beta\right)r^2$ $A_3 = \frac{1}{2}[2(t - c - r) + r \sin \beta]r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{2}(t - c - r + r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{3}{4}pq$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4 + A_5$
1.9.1		$p = b + t \tan \beta + 2 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{3}{4}pk$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
1.9.2		$p = b + t \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{3}{4}pq$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
1.10		$p = b + t \tan \beta$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{1}{3}pk$ $A = A_1 + A_2 + A_3$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

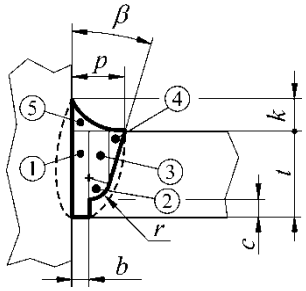
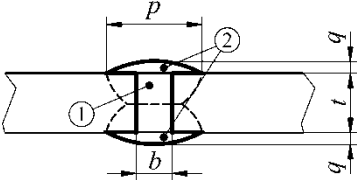
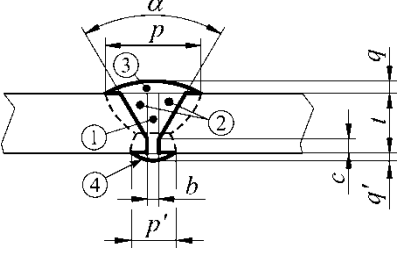
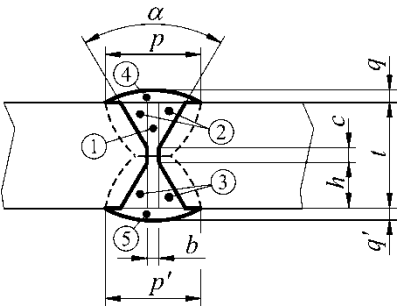
Ref.	Croquis	Ecuaciones
1.11		$p = b + r \cos \beta + (t - c - r + r \sin \beta) \tan \beta$ $A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{1}{4}\pi - \beta\right)r^2$ $A_3 = \frac{1}{2}[2(t - c - r) + r \sin \beta]r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{2}(t - c - r + r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{1}{3}pk$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$
2.1		$p = b + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{3}{4}pq$ $A = A_1 + 2A_2$
2.2 2.3		$p = b + 2(t - c) \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) + 4 \text{ mm}$ $p' = b + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}(t - c)^2 \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right)$ $A_3 = \frac{3}{4}pq$ $A_4 = \frac{3}{4}p'q'$ $A = A_1 + 2A_2 + A_3 + A_4$
2.4 2.5.1 2.5.2		$p = b + 2(t - c - h) \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) + 4 \text{ mm}$ $p' = b + h \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}(t - c - h)^2 \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right)$ $A_3 = \frac{1}{2}h^2 \tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right)$ $A_4 = \frac{3}{4}pq$ $A_5 = \frac{3}{4}p'q'$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4 + A_5$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

Ref.	Croquis	Ecuaciones
2.6		$p = b + 2r \cos \beta + \dots$ $\dots + 2(t - c - r + r \sin \beta) \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $p' = b + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{1}{4}\pi - \beta\right)r^2$ $A_3 = \frac{1}{2}[2(t - c - r) + r \sin \beta]r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{2}(t - c - r + r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{3}{4}pq$ $A_6 = \frac{3}{4}p'q'$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4 + A_5 + A_6$
2.7		$p = b + 2r \cos \beta + \dots$ $\dots + (t - c - 2r + 2r \sin \beta) \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{1}{4}\pi - \beta\right)r^2$ $A_3 = \frac{1}{2}(t - c - 2r + r \sin \beta)r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{8}(t - c - 2r + 2r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{3}{4}pq$ $A = A_1 + 4A_2 + 4A_3 + 4A_4 + 2A_5$
2.8		$p = b + t \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $p' = b + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2}t^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{3}{4}pq$ $A_4 = \frac{3}{4}p'q'$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

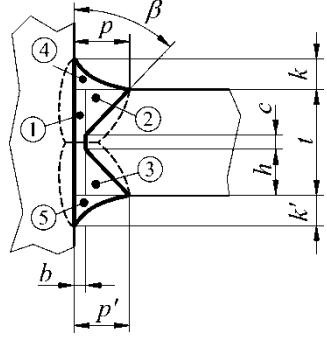
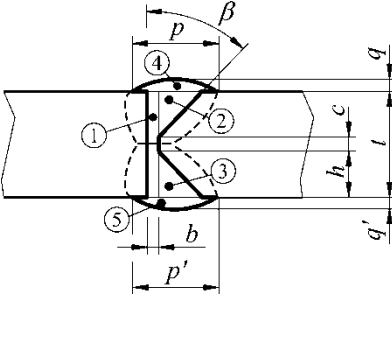
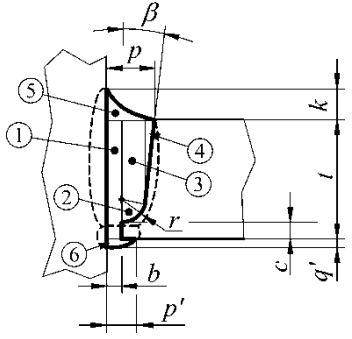
Ref.	Croquis	Ecuaciones
2.9.1		$p = b + (t - c - h) \tan \beta$ $p' = b + h \tan \beta$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c - h)^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{1}{2} h^2 \tan \beta$ $A_4 = \frac{1}{3} pk$ $A_5 = \frac{1}{3} p'k'$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$
2.9.2		$p = b + (t - c - h) \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $p' = b + h \tan \beta + 4 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = \frac{1}{2} (t - c - h)^2 \tan \beta$ $A_3 = \frac{1}{2} h^2 \tan \beta$ $A_4 = \frac{3}{4} pq$ $A_5 = \frac{3}{4} p'q'$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$
2.10		$p = b + r \cos \beta + \dots$ $\dots + (t - c - r + r \sin \beta) \tan \beta$ $p' = b + 2 \text{ mm}$ $A_1 = bt$ $A_2 = (\frac{1}{4} \pi - \beta) r^2$ $A_3 = \frac{1}{2} [2(t - c - r) + r \sin \beta] r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{2} (t - c - r + r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{1}{3} pk$ $A_6 = \frac{3}{4} p'q'$ $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

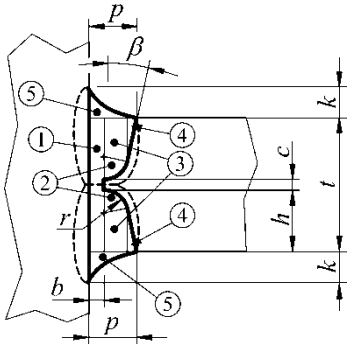
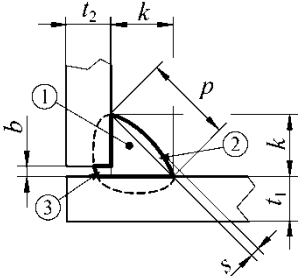
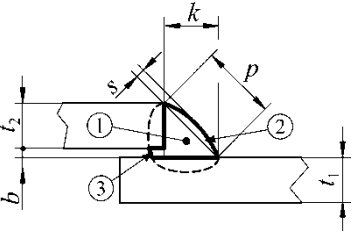
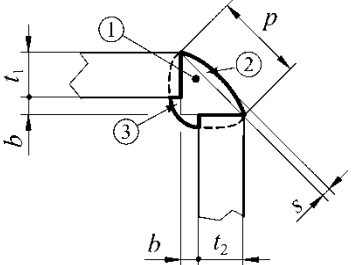
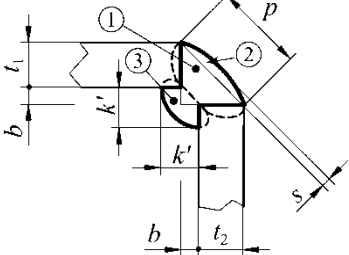
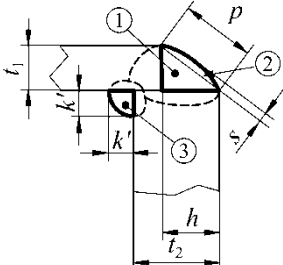
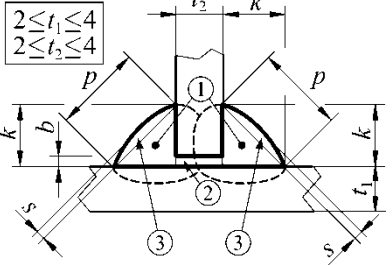
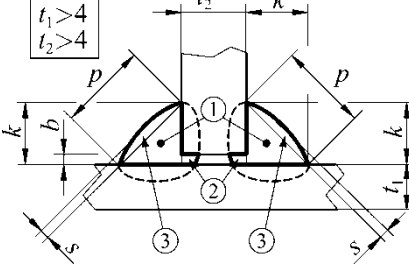
Ref.	Croquis	Ecuaciones
2.11		$p = b + r \cos \beta + \dots$ $\dots + \left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{2}c - r + r \sin \beta\right) \tan \beta$ $A_1 = bt$ $A_2 = \left(\frac{1}{4}\pi - \beta\right)r^2$ $A_3 = \frac{1}{2}(t - c - 2r + r \sin \beta)r \cos \beta$ $A_4 = \frac{1}{8}(t - c - 2r + 2r \sin \beta)^2 \tan \beta$ $A_5 = \frac{1}{3}pk$ $A = A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4 + 2A_5$
3.1.1		$p = \frac{\sqrt{2}}{2}k$ $A_1 = \frac{1}{2}k^2$ $A_2 = \frac{1}{3}ps$ $A_3 = \frac{1}{3}kb$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
3.1.2		$p = \sqrt{(t_2 + b)^2 + k^2}$ $A_1 = \frac{1}{2}k(t_2 + b)$ $A_2 = \frac{1}{3}ps$ $A_3 = \frac{1}{3}kb$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
3.1.3		$p = \sqrt{(t_1 + b)^2 + (t_2 + b)^2}$ $A_1 = \frac{1}{2}(t_1 + b)(t_2 + b)$ $A_2 = \frac{1}{3}ps$ $A_3 = \frac{1}{4}\pi\left(b + \frac{1}{3}t_1\right)\left(b + \frac{1}{3}t_2\right) - b^2$ $A = A_1 + A_2 + A_3$

Tabla 2.4 Ecuaciones para el cálculo del área de la sección del metal de aporte (cont.)

Ref.	Croquis	Ecuaciones
4.1.1		$p = \sqrt{(t_1 + b)^2 + (t_2 + b)^2}$ $A_1 = \frac{1}{2}(t_1 + b)(t_2 + b)$ $A_2 = \frac{1}{3}ps$ $A_3 = \frac{1}{4}\pi k'^2 - b^2$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
4.1.2		$p = \sqrt{t_1^2 + h^2}$ $A_1 = \frac{1}{2}t_1h$ $A_2 = \frac{1}{3}ps$ $A_3 = \frac{1}{4}\pi k'^2$ $A = A_1 + A_2 + A_3$
4.1.3		$p = \frac{\sqrt{2}}{2}k$ $A_1 = \frac{1}{2}k^2$ $A_2 = bt_2$ $A_3 = \frac{1}{3}ps$ $A = 2A_1 + A_2 + 2A_3$
		$p = \frac{\sqrt{2}}{2}k$ $A_1 = \frac{1}{2}k^2$ $A_2 = \frac{1}{4}kb$ $A_3 = \frac{1}{3}ps$ $A = 2A_1 + 2A_2 + 2A_3$

Para uniones a tope (Cary 2012, p. 126), la altura máxima del refuerzo, q , se puede calcular según:

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



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:

$$q = \begin{cases} 2 \text{ mm} : & p \leq 8 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} : & 8 \text{ mm} < p \leq 25 \text{ mm} . \\ 5 \text{ mm} : & p > 25 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.3)$$

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

2.4 Selección de electrodos

2.4.1 Características generales de los electrodos para SMAW

Según su empleo, los electrodos se clasifican en cuatro grupos (ASME BRVC.IX 2015), tal como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de los electrodos según su aplicación

<i>Grupo</i>	<i>Característica principal</i>	<i>Revestimiento</i>	<i>Clasificación AWS</i>
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 2.6 y 2.7 resumen estas recomendaciones para las aplicaciones generales.

Tabla 1.6 Selección de electrodos en uniones en esquina (Cary 1998, p. 130)














<i>Posición de la unión</i>		<i>Espesor de la plancha [mm]</i>			
		<i><2</i>	<i>2-6</i>	<i>6-19</i>	<i>≥19</i>
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 2.7 Selección de electrodos en uniones a tope y de tuberías (Cary 1998, p. 130)

<i>Posición de la unión</i>		<i>Espesor de la plancha [mm]</i>					
		<i>Sin preparac.</i>		<i>En V</i>		<i>En U</i>	
		<i><2</i>	<i>2-6</i>	<i>6-19</i>	<i>≥19</i>	<i>6-9</i>	<i>≥19</i>
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 2.8.

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 2.8 Diámetro del electrodo recomendado en las costuras a tope

<i>Espesor, t [mm]</i>	0,5	1,5	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0
<i>Diámetro, d [mm]</i>	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 2.9.

Tabla 2.9 Dimensiones de la costura y diámetro del electrodo en costuras en esquina

<i>Espesor, t [mm]</i>	<i>Dimensión de la costura, p [mm]</i>	<i>Cateto de la costura, k [mm]</i>	<i>Diámetro, d [mm]</i>
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

Tabla 2.10 Electrodo recomendados para aceros inoxidables

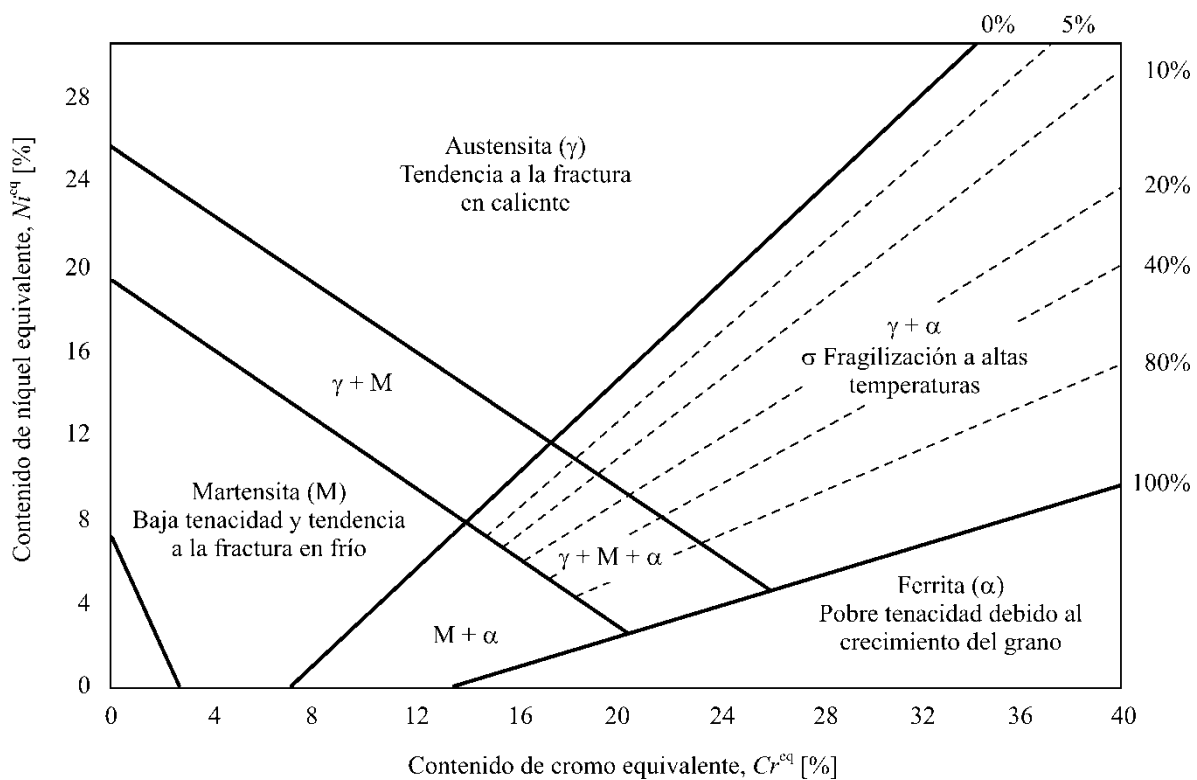
<i>Material</i>	<i>Electrodo</i>	<i>Material</i>	<i>Electrodo</i>	<i>Material</i>	<i>Electrodo</i>
AISI 410	E309/E410	AISI 309	E309	AISI 316L	E316L
AISI 301	E308	AISI 309S	E309	AISI 317	E317
AISI 302	E308	AISI 310	E310	AISI 321	E321/E347
AISI 304	E308	AISI 310S	E310	AISI 347	E347
AISI 304L	E308L	AISI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



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 2.10.

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. 2.4). 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 2.4 Diagrama de Schaeffer-De Long



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):



$$I = (20 + 6d)d; \quad (2.4)$$

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)%.

2.6 Selección de 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).

La AWS D1.1 (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} :

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2.5)$$

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

- Extrabajo ($H^{el} \leq 5$ mL/100 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 electrodo que no satisfacen los requerimientos anteriores.



Tabla 2.5 Determinación del índice de susceptibilidad, *SI*

<i>Parámetro de composición química</i>	<i>Nivel de hidrógeno</i>		
	<i>Extrabajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>No controlado</i>
$P_{cm} \leq 0.18$	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

Con los dos parámetros anteriores, se determina el índice de susceptibilidad, *SI*, tal como se muestra en la Tabla 2.5.

Finalmente, la temperatura mínima de precalentamiento e interpasada, se determina de la Tabla 2.6, 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).

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 2.7.



Tabla 2.6 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
	$t > 38$	-	-	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
	$t > 75$	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
	$t > 38$	115	130	150	150	160	160	160

Tabla 2.7 Recomendaciones para el tratamiento térmico posterior (ASME B31-3 2014)

Material	Condicion	Temperatura [$^{\circ}C$]	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 ($C \leq 015\%$)	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)



2.7 Cálculos de tiempos y costos

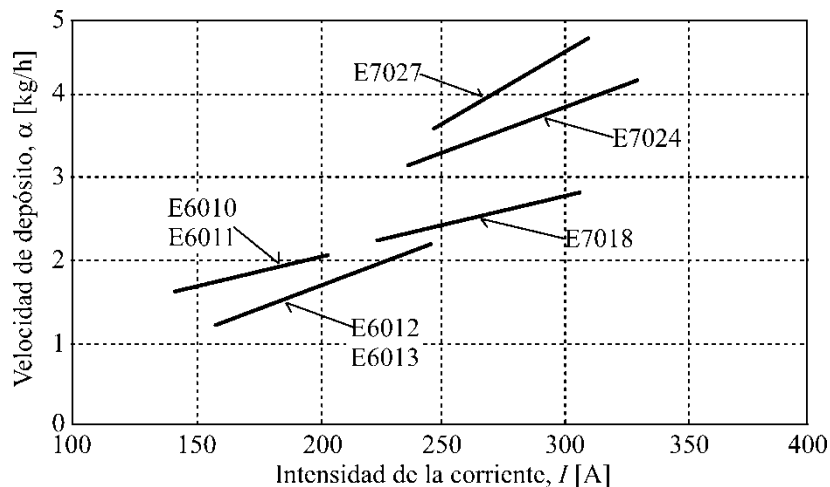
El tiempo tecnológico, t_T , se calcula a partir de la densidad del material de aporte, ρ ; de la longitud de la costura, L ; y de las áreas de la sección transversal, A_i ; y las velocidades de depósito, α_i , en cada uno de los cordones de la costura (Burgos Sola 1987, p. 273):

$$t_T = \rho L \sum_i \frac{A_i}{\alpha_i}. \quad (2.6)$$

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. 2.5 muestra algunos valores para electrodos típicos.

Figura 2.5 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):

$$t_A = 0,3t_T; \quad (2.7)$$

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

$$t_S = (0,03 \dots 0,05)(t_T + t_A); \quad (2.8)$$

$$t_D = (0,05 \dots 0,15)(t_T + t_A). \quad (2.9)$$



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

$$t_{TOT} = t_T + t_A + t_S + t_D. \quad (2.10)$$

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

$$G_{el} = (1,4 \dots 1,6)G; \quad (2.11)$$

$$G = \rho AL; \quad (2.12)$$

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:

$$E = \varepsilon G; \quad (2.13)$$

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} :

$$Z_{TOT} = Z_{el} + Z_{en} + Z_{lab}. \quad (2.14)$$

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

$$Z_{el} = G_{el} z_{el}; \quad (2.15)$$

$$Z_{en} = E z_{en}; \quad (2.16)$$

$$Z_{lab} = t_{TOT} z_{lab}; \quad (2.17)$$

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

3 Conclusiones

Al concluir el presente trabajo se puede arribar a las siguientes conclusiones:

1. El algoritmo formalizado permite la selección de tecnologías de SMAW para aceros al carbono, bajoaleados e inoxidables, lo cual ha sido validado a través de tres ejemplos de aplicación.



2. El algoritmo formalizado cumple con lo establecido por las normativas cubanas vigentes, así como por otras de uso común a nivel internacional, como las AWS o las ASTM.
3. El algoritmo formalizado incluye los conocimientos y recomendaciones del estado del arte sobre diseño de tecnologías de SMAW.

Bibliografía

- API RP 582 (2009). *Recommended practice welding guidelines for the chemical, oil, and gas industries*. Washington, DC (USA): American Petroleum Institute.
- 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.
- AWS D1.1/D1.1M (2015): *Structural welding code – Steel*. Miami, FL (USA): American Welding Society.
- BURGOS SOLA, J. (1987). *Tecnología de soldadura*. La Habana (Cuba): Pueblo y Educación.
- CARY, H.B. (1998). *Modern welding technology*. 4th Ed. Upper Saddle River, NJ (USA): Prentice-Hall, ISBN 0-13-241803-7
- JUSTEL RAMOS, M.A. (2012). *Soldadura: Manual para operarios y técnicos*. La Habana (Cuba): Editorial Científico-Técnica, ISBN 978-959-05-0654-3.
- 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 volframio y soldadura por haz de alta energía de aceros*. La Habana (Cuba): Oficina Nacional de Normalización.
- 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.

