

Consumibles para soldadura por arco eléctrico: algunos desarrollos recientes

(Consumíveis para soldagem por arco elétrico: alguns desenvolvimentos recentes)
(Consumables for electric arc welding: some recent developments)

Estela Silvia Surian

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora,
Lomas de Zamora, Provincia de Buenos Aires, Argentina
Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional,
San Nicolás, Provincia de Buenos Aires, Argentina
esurianster@gmail.com*

Resumen

En este trabajo se comentan algunos de los últimos desarrollos en consumibles para soldadura por arco eléctrico. No es intención de la autora presentar un estado del arte sobre el tema sino remarcar las tendencias en algunas áreas del desarrollo de consumibles, como ser: la cuestión del hidrógeno difusible, los mejoramientos de alambres de unión del sistema C-Mn y la soldadura de aceros de alta resistencia y para servicio a alta temperatura 9Cr. También se mencionan las actividades actuales en estandarización de consumibles. La autora considera que el desarrollo está muy activo y en una etapa de generación de nuevos consumibles para hacer posible la soldadura de nuevos materiales y de sofisticación de los ya existentes, con el objetivo de generar cada vez mayor eficiencia y calidad en la construcción soldada junto con una actitud más amigable con el medio ambiente.

Palabras-clave: *consumibles, soldadura por arco eléctrico, desarrollos recientes.*

Resumo: *Em este trabalho se comentam alguns dos últimos desenvolvimentos em consumíveis para soldagem por arco elétrico. Não é a intenção de a autora apresentar um estado da arte sobre o tema, mas remarcar as tendências em algumas áreas do desenvolvimento de consumíveis, como são: a questão do hidrogênio, os melhoramentos de arames de união do sistema C-Mn e a soldagem de aços de alta resistência e para serviço a alta temperatura 9Cr. Também são mencionadas as atividades em estandardização de consumíveis. O autor considera que o desenvolvimento está muito ativo e em uma etapa de geração de novos consumíveis para fazer possível a soldagem de novos materiais e de sofisticação dos já existentes, com o objetivo de aumentar a eficiência e a qualidade na construção soldada junto com uma atitude mais amigável com o meio ambiente.*

Palavras-chave: *consumíveis, soldagem por arco elétrico, desenvolvimentos recentes.*

Abstract: *In this work some of the last developments in consumables for electric arc welding are commented. It is not the intention of the author to present a state of the art on this subject but to remark some areas of consumable development as: the question of diffusible hydrogen, the improvements in C-Mn steel wires and the welding of both high strength and high temperature service 9Cr steels. Activities in standardization of consumables are also mentioned. The author considers that the development of consumables is very active and in a stage of both generation of new products to make possible the new materials welding and sophistication of the existing ones with the objective of improving efficiency and quality in the welded construction together with a more friendly attitude with the environment.*

Key-words: *consumables, electric arc welding, recent developments.*

1. Introducción

En 2008, en el XXXIV CONSOLDA e IIW International Congress que se realizó en San Pablo, fue presentado un gráfico en el que se mostraba la evolución del desarrollo de consumibles

(Recebido em 11/12/2012; Texto final em 11/12/2012).

para soldadura por arco eléctrico y la de los procesos de soldadura (Figura 1). Se puede observar que la evolución de los primeros fue enorme a partir de mediados de la década del 70 y durante las de los 80 y 90 mientras que la de los procesos aumentó fuertemente a partir de los 90. Sin embargo, se entiende que más bien que de los consumibles, el fuerte desarrollo fue sobre el conocimiento de la metalurgia de la soldadura que recibió un impulso definitorio con los trabajos de Glyn Evans [1] que cambiaron la mirada sobre ella y/o generaron una nueva.

Este conocimiento sobre la metalurgia de la soldadura es clave para el desarrollo de consumibles.

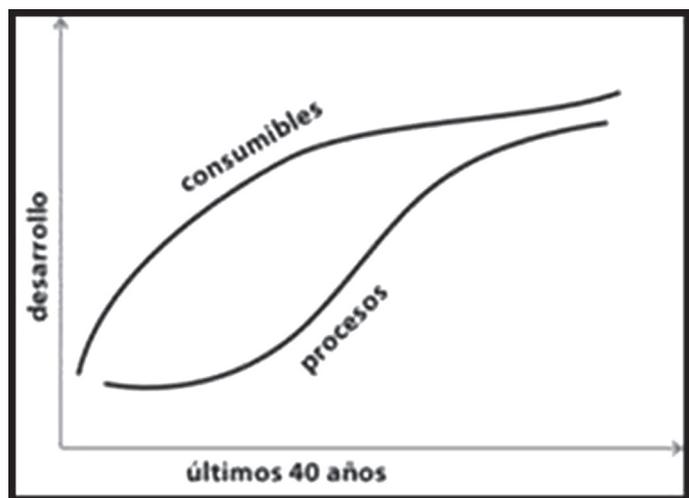


Figura 1. Desarrollo de consumibles y procesos durante los últimos 40 años.

Este trabajo no tiene la intención de ser un estado del arte del desarrollo de consumibles, sino la de comentar algunos desarrollos relevantes de los últimos tiempos, considerando que si de desarrollo de consumibles se trata, se está hablando de los últimos cinco a diez años.

Entre los temas de trabajo que están activos en la literatura internacional, se discuten la cuestión del hidrógeno difusible, los mejoramientos de alambres tubulares de unión del sistema C-Mn y la soldadura de aceros de última generación de alta resistencia para la soldadura estructural y para servicio a alta temperatura 9 Cr.

2. La cuestión del hidrógeno difusible.

En este tema se viene trabajando desde hace muchos años y es enorme el conocimiento que se ha generado pero dados los altos costos que la fisuración asistida por hidrógeno (o fisuración en frío) puede generar además del aspecto catastrófico que implica, se continua haciéndolo. Teniendo en cuenta que si no hay hidrógeno no hay fisuración en frío, en consumibles se intenta bajar el contenido de hidrógeno potencial de los mismos a fin de contribuir a un menor contenido de hidrógeno difusible en la junta soldada. Un acercamiento interesante a este objetivo es el propuesto por Hobart Brothers [2] con la incorporación de tetrafluoruro de carbono (CF_4) al gas de protección en la soldadura semiautomática con alambres tubulares y macizos. El trabajo presenta los estudios realizados con el agregado de 0; 0,5; 2 y 5 % de CF_4 a las mezclas de gases Ar/25% CO_2 y Ar/8% CO_2 . La Tabla 1 presenta los resultados de hidrógeno difusible medidos según [3] para algunos de los consumibles ensayados.

Los autores ensayaron este agregado a la protección de la soldadura realizada con alambres tubulares con relleno de fundente (FCAW) y de metales (MCAW) así como con alambres macizos. Es notable cómo el H difusible decrece con el aumento de CF_4 en el gas de protección. Además informan no detectar

problemas operativos con el agregado de hasta 5 % para alambres tubulares para FCAW y hasta 2 % para alambres tubulares para MCAW y macizos para GMAW. Respecto de la composición química del metal depositado (Tabla 2) en cada caso la única variación detectada al adicionar el CF_4 fue la disminución del % C con lo cual se obtuvo un aumento de la tenacidad medida mediante el ensayo de impacto Charpy-V; las propiedades de tracción no se modificaron (Tabla 3).

El efecto de este agregado sobre la salud y la seguridad, así como posibles efectos corrosivos en los equipos, deben ser estudiados. Este “approach” es realmente innovador ya que según los autores va acompañado de una solución práctica para el abastecimiento de las mezclas de gases con el agregado. Esta mirada certifica algo que muchas veces es olvidado cuando se habla de consumibles para soldadura por arco eléctrico: el gas de protección es también un consumible para dicho proceso de soldadura.

Otra buena noticia en esta área es la aparición de un “electrodo manual revestido no resecable”, presentado en el mercado brasileño por Bracarense et al. Se trata de un electrodo tipo AWS A5.1/A5.1M:2004 E7018-1 HR4 [4], elaborado con un polímero en lugar de la suspensión acuosa de silicatos usada habitualmente, que presenta muy bajo nivel de H difusible (< de 3 ml de H dif. / 100 g de metal depositado) Tabla 4 y que además tiene muy baja higroscopicidad, con lo cual puede ser utilizado directamente sin resecar y sin colocarse en los conocidos termos de mantenimiento durante el proceso de la soldadura, lo que evidentemente es una muy atractiva propuesta desde el punto de vista económico. Los autores, en sucesivos trabajos [5-9], presentaron las características del metal de soldadura y su metalurgia como así también el proceso que llevó a obtener este interesante consumible. Este desarrollo no solamente generó un producto que ya está siendo comercializado sino que abre muchas posibilidades en el campo de los electrodos manuales de alta resistencia y de los alambres tubulares para soldadura semiautomática con protección gaseosa o sin ella.

Este último caso es particularmente interesante si se toman en cuenta los resultados del Round Robin test llevado a cabo en el seno de la Subcomisión II-A del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) [10] sobre la absorción de humedad de los alambres tubulares flux cored y metal cored, con costura y sin ella, sometidos a un ambiente húmedo a 80 % de HR a 27 °C (método de 1999). Dichos resultados informan que los alambres tubulares con escoria rutilica (hasta ahora los que mejor operan en toda posición de soldadura) absorben humedad en las mencionadas condiciones; los metal cored también lo hacen pero en menor proporción.

Estos dos desarrollos presentados no sólo significan una disminución del H difusible del metal depositado sino que abren la posibilidad de posibles reducciones en las temperaturas de pre calentamiento y entrepasadas, con el consecuente abaratamiento del procedimiento de soldadura.

En el área de la fisuración por H se continúa trabajando en los aceros para servicio a alta temperatura 9Cr, aceros dúplex y aceros para alta resistencia en materiales base níquel, entre otros. Desde el punto de vista de los métodos de medición del H difusible se está estudiando la posibilidad de disminuir los tiempos de ensayo en la extracción del H aumentando la

Tabla 1. Valores de hidrógeno difusible obtenidos con algunos de los consumibles ensayados, con el agregado de CF₄ al gas de protección [2].

Consumible	0 % CF ₄	0,5 % CF ₄	2% CF ₄	5 % CF ₄
	ml de H difusible/100 g de metal depositado			
E71T-1M/-12MJ FCAW	5,33	3,39	2,73	2,04
MIL-101TM FCAW	4,73	3,54	1,60	1,29
E80C-Ni1 MCAW	1,87		0,39	
ER70S-6 macizo	1,87		0,66	

Tabla 2. Composición química del metal depositado por el MIL-101T (valores en % en peso) [2].

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	B	N	O
0% CF ₄	0,034	1,67	0,28	0,19	3,44	0,18	0,033	0,0043	0,0039	0,030
5% CF ₄	0,024	1,65	0,30	0,17	3,31	0,17	0,038	0,0047	0,0039	0,030

Tabla 3. Propiedades mecánicas del metal de aporte puro del MIL-101TM [2].

	RT (ksi)	LF (ksi)	A (%)	Ch-V a 0°C (J)	Ch-V a -40°C (J)
5 % CF ₄	81,0	75,7	29,4	131	101
0 % CF ₄	80,0	72,0	27,0	120	98
AWS req.	70-95	58 m	22 m	20 m	

RT: resistencia a la tracción; LF: límite de fluencia; A: alargamiento; Ch-V: impacto Charpy-V; m: mínimo

Tabla 4. Propiedades mecánicas e hidrógeno difusible [5-9].

	RT (MPa)	LF (MPa)	A (%)	Ch-V (J)	Hd CR mlH/100g MD	Hd Exp mlH/100g MD
E7018-1 AWS req.	490 m	400 m	22 m	27 m	4 para H4	4 para H4
E7018 NR 3,2 mm	605 / 610	510 / 525	34 / 34	40 / 33	1,2 / 1,8	1,6 / 2,3
E7018 NR 4 mm	585 / 565	488 / 472	28 / 32	49 / 56	1,3 / 1,1	1,8 / 1,1

m: mínimo; RT: resistencia a la tracción; LF: límite de fluencia; A: alargamiento; Ch-V: impacto Charpy-V a -45°C; Hd: hidrógeno difusible; MD: metal depositado; CR: como recibido; Exp: expuesto a 80% HR y 27 °C.

Tabla 5. Requerimientos AWS de propiedades mecánicas para el metal de aporte puro de los electrodos E10018M, E11018M, E12018M [18].

Proceso	Clasificación	RT (MPa)	LF (MPa)	A (%)	Ch-V a -50 °C (J)
SMAW	E10018M	690 m	610-690	20 m	27 m
SMAW	E11018M	760 m	680-760	20 m	27 m
SMAW	E12018M	830 m	745-830	18 m	27 m

m: mínimo; RT: resistencia a la tracción; LF: límite de fluencia; A: alargamiento; Ch-V: impacto Charpy-V.

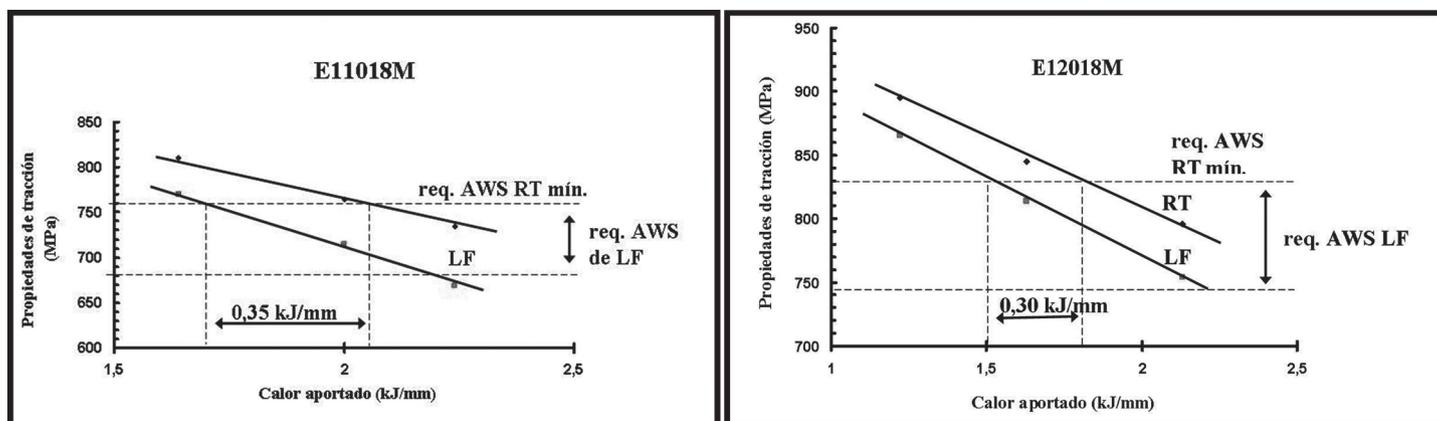


Figura 2. Propiedades de tracción vs. calor aportado para metal de aporte puro de los electrodos E11018M y E12018M [19-20].

temperatura a la cual se realiza dicha extracción, dado que a 25 °C lleva 3 semanas y a 400 °C sólo una hora, utilizando distintos métodos [11-13].

3. Consumibles para aceros de alta resistencia

La necesidad de disponer de materiales que impliquen el uso de menores espesores a fin de reducir el peso ha llevado al desarrollo de nuevos aceros que aúnen alta resistencia y buena tenacidad a bajas temperaturas, lo que constituye todo un desafío.

Los consumibles ya tradicionales para aceros de alta resistencia del tipo Mn-Ni 2,5-Cr-Mo han sido ampliamente estudiados [14-17] en metal de aporte puro por lo que los fabricantes de consumibles disponen de una amplia gama de productos para SMAW, SAW, FCAW y MCAW. Pero el problema no se acaba aquí. La aplicación de estos consumibles en la junta soldada todavía presenta inconvenientes, lo que obliga al desarrollo cuidadoso de procedimientos de soldadura estrictos para cada tipo de acero base.

Si se toma, por ejemplo, el metal de aporte puro de electrodos manuales AWS A5.5/A5.5M:2006 E11018M y E12018M [18], cuyos requerimientos se presentan en la Tabla 5, puede observarse que no es sencillo satisfacer los valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia, dado que los requerimientos para esta última plantean un rango muy estrecho. Como estos materiales son sensibles al calor aportado utilizado en la soldadura de los cupones de aporte puro, siempre dentro de los requerimientos de la norma, es necesario seguir muy rígidos procedimientos para obtenerlos y así será en la junta soldada. De acuerdo con Vercesi et al. [19-20] la variación de calor aportado posible para la confección de la probeta es muy estrecha, casi dentro de las variaciones de calibración de los equipos. En la Figura 2 puede observarse la variación de los valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia en el metal de aporte puro para los electrodos E11018M y E12018M, cuando se varió el calor aportado, esencialmente modificando la intensidad de corriente utilizada. Se ve que sólo se podrá variar el calor aportado en 0,35 kJ/mm y 0,30 kJ/mm respectivamente.

Tabla 6. Composición química y propiedades mecánicas de metal de aporte puro y junta soldada de aceros de alta resistencia [24].

	MB	AWM 3,2 mm	AWM 4 mm	JS cap	JS raiz	AWM 4 mm	JS cap	JS raiz
C	0,123	0,056	0,056	0,080	0,077	0,064	0,074	0,067
Si	0,29	0,37	0,38	0,41	0,30	0,38	0,42	0,34
Mn	0,81	1,43	1,30	1,35	1,27	1,31	1,36	1,32
Cr	0,64	0,27	0,26	0,28	0,30	0,27	0,27	0,33
Mo	0,42	0,39	0,42	0,43	0,41	0,43	0,41	0,39
Ni	0,96	2,34	2,56	2,71	2,17	2,67	2,63	2,08
V	0,051	0,010	0,01	0,011	0,015	0,010	0,013	0,015
RT (MPa)		811	788	814		784	801	
LE (MPa)		779	732	749		719	732	
E (%)		17,4	18,4	16,2		20	18,6	
Ch -40 (J)		114	96	61	47	98	66	54
Ch -60 (J)		91	53	44	37	76	34	37
Ch -40 (J) TT		64	50	38	22	53	45	41
Ch -60 (J) TT		56	35			34	28	24

MB: metal base; AWM: metal de aporte puro; JS: junta soldada; cap: última capa; RT: resistencia a la tracción; LF: límite de fluencia; A: alargamiento; Ch-V: impacto Charpy-V; TT: tratamiento térmico post soldadura.

Afortunadamente los requerimientos de propiedades de tracción del aporte puro del mismo tipo (igual composición química, con lo que se supone que las aplicaciones son similares) para SAW, FCAW y MCAW no son tan demandantes [21-23].

Ahora bien, una vez obtenidos los consumibles de este tipo es necesario diseñar los procedimientos de soldadura, lo que no siempre da los resultados esperados, como se demuestra en [24]. En este trabajo se prepararon juntas soldadas en V utilizando un acero P690QL, cuya composición química se puede ver en la Tabla 6, con un consumible de alta resistencia desarrollado para esta aplicación. La Tabla 6 también presenta la composición química del metal de aporte puro de los electrodos utilizados, la de las juntas soldadas desglosadas en último cordón y raíz y las propiedades mecánicas obtenidas en todos los casos. Puede verse cómo la tenacidad cayó por efecto de la dilución con el metal base, especialmente en la raíz, como era de esperar, donde se obtuvieron mayores valores de C y V y menores de Ni, todos estos factores perniciosos para esta propiedad. En este mismo trabajo se muestra una opción para la soldadura de acero Superelso 830 (límite de fluencia mínimo de 830 MPa) con un par fundente alambre para SAW, desarrollado especialmente, que permitió obtener buenas resistencia mecánica y tenacidad en metal de aporte puro y junta soldada, Tabla 7.

Las dificultades que se encuentran en la soldadura de aceros de alta resistencia, que desembocan en el desarrollo estricto de los procedimientos de soldadura, adecuados para cada caso, retrotraen al trabajo de Aström [25] que mostró los resultados de los ensayos realizados con 20 electrodos manuales de alta resistencia con las siguientes variaciones de composición química en metal de aporte puro: Mn 1,4 a 2,7; Cr: 0,13 a 0,40; Ni: 1,80 a 3,20 y Mo: 0,25 a 0,60. Dichos resultados mostraron que no fue posible obtener cupones libres de fisuras por

hidrógeno a partir de los 913 MPa de resistencia a la tracción. Esto generó la siguiente reflexión del autor: ¿Es que ya se llegó al límite de resistencia para el sistema convencional CrNiMo?

Una respuesta innovadora a este interrogante, aparece en la primera mitad de la primera década del siglo XXI: un nuevo metal depositado sin dilución de alta resistencia con 7 % de Ni [26-29]. Los autores presentan los resultados de metal de aporte puro de 5 electrodos manuales revestidos, en los que se varió por un lado el contenido de Mn entre 2 y 0,5 % y por otro se estudió el efecto del aumento de C entre 0,03 y 0,11 %, en todos los casos con 7 % de Ni nominal, Tabla 8.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del metal de aporte puro y de la junta soldada del acero Superelso 830, por arco sumergido [24].

	MB	AWM	JS SAW
C	0,141	0,063	
Si	0,18	0,42	
Mn	1,30	1,49	
Cr	0,31	0,25	
Mo	0,57	0,57	
Ni	4,26	2,84	
V	0,031	0,004	
RT		903	956
LF		867	901
A		17,5	18
Ch -40 °C		84/104	
Ch -60 °C		67/89	61/85
Ch -80 °C		48/66	

MB: metal base; AWM: metal de aporte puro; JS: junta soldada; RT: resistencia a la tracción; LF: límite de fluencia; A: alargamiento; Ch-V: impacto Charpy-V

Tabla 8. Composición química del metal de aporte puro de electrodos manuales con 7 % Ni [26-29].

Metal de soldadura	7-2L250	7-0,5L250	7-0,5L200	7-0,5M200	7-0,5H200
CA kJ/mm	1,2	1,0	1,3	1,4	1,3
TEP °C	250	250	200	200	200
T _{8/5} / s	12	10	10	11	10
C	0,032	0,024	0,030	0,061	0,110
Mn	2,02	0,64	0,61	0,56	0,53
Ni	7,23	6,60	6,11	6,84	7,04
Cr	0,47	0,21	0,16	0,15	0,14
Si	0,25	0,35	0,40	0,34	0,38
S	0,008	0,008	0,009	0,006	0,007
P	0,011	0,012	0,010	0,011	0,008
Mo	0,63	0,40	0,38	0,35	0,40
V	n.d.	n.d.	0,018	0,014	0,016
Cu	0,03	0,03	0,02	0,01	n.d.
O / ppm	380	400	340	350	260
N / ppm	250	197	150	160	100

CA: calor aportado; TEP: temperatura de entrapasadas; n.d.: no determinado.

Tabla 9. Propiedades mecánicas del metal de aporte puro de electrodos 7% Ni [26-29].

Metal de soldadura	7-2L250	7-0,5L250	7-0,5L200	7-0,5M200	7-0,5H200
LF	795	721	777	858	912
RT	1006	823	831	895	971
Ch-V a 22 °C	45	124	123	109	85
Ch-V a -40°C	32	112	101	90	78
Ch-V a -100°C	n.d.	55	60	79	63

LF: límite de fluencia; RT: resistencia a la tracción; Ch-H: impacto Charpy-V.

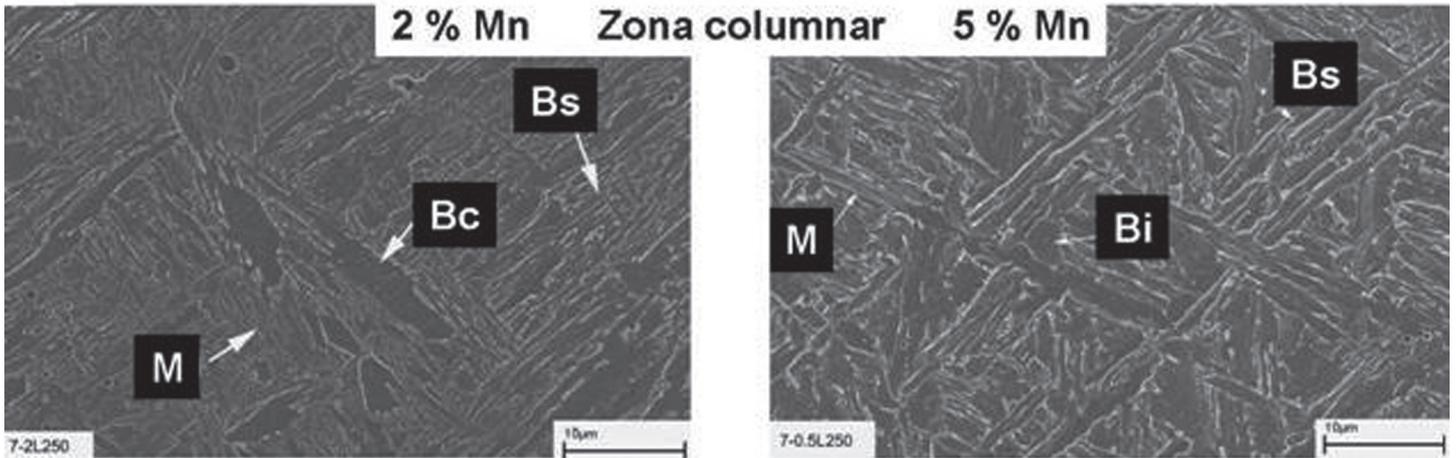


Figura 3. Microestructura de la zona columnar para los electrodos con 2 y 0,5 % Mn [26-29]. M: martensita; Bc: bainita coalescida; Bs: bainita superior; Bi: bainita inferior.

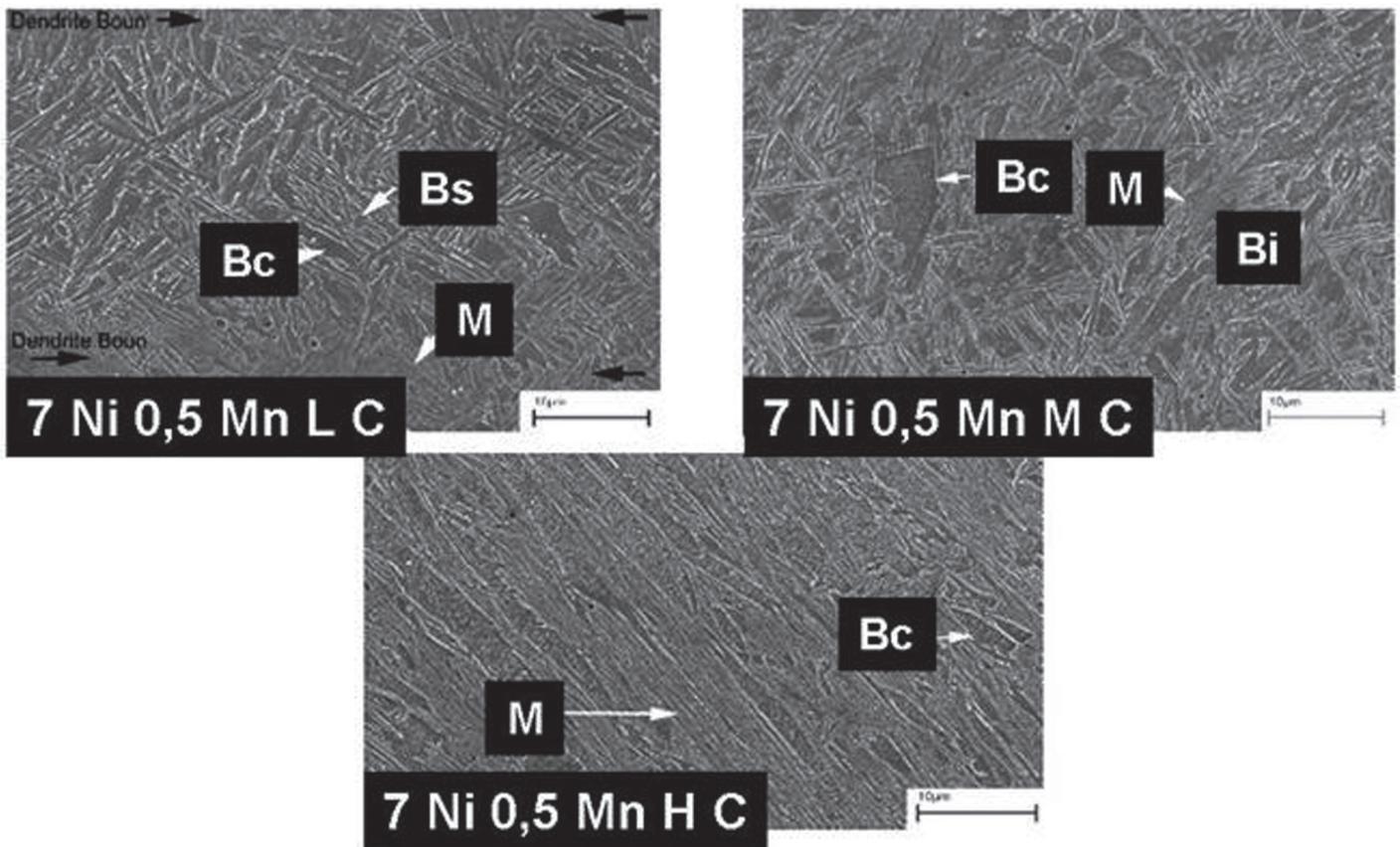


Figura 4. Microconstituyentes de la zona columnar: efecto del carbono [26-29]. M: martensita; Bc: bainita coalescida; Bs: bainita superior; Bi: bainita inferior. L C: 0,03% C; M C: 0,061 %C; H C: 0,11%C.

Los resultados de propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 9. Se ve que la disminución del % Mn condujo a un aumento de la tenacidad y decrecimiento de la tracción; el aumento de %C se reflejó en un incremento de la resistencia a la tracción sin pérdida notable de la tenacidad que se mantuvo en buenos valores (63 J) hasta una temperatura de ensayo de -100°C .

Este sistema mostró diferencias microestructurales importantes con el convencional de alta resistencia, antes mencionado. En la zona columnar del último cordón se identificó un nuevo componente microestructural de gran tamaño, no reportado previamente, nombrado como bainita coalescida ya que parece formarse por la coalescencia de placas de bainita saturadas de C, cuando la temperaturas de transformación de la martensita (Ms) y de la bainita (Bs) están próximas. Se encontró mediante estudios de difracción que los precipitados de cementita se forman dentro de los granos de bainita coalescida, Figura 3. La bainita coalescida se encontró junto con la bainita superior en el centro de las regiones dendríticas mientras los lath de martensita aparecieron en las regiones interdendríticas. Si se comparan las microestructuras de los depósitos con Mn 2 % y Mn 0,6 %, Figura 3, se observa que la disminución del % de Mn produjo la casi desaparición de la bainita coalescida y la microestructura pasó a estar prácticamente formada por bainitas superior e inferior, con sólo bajo contenido de martensita en las zonas interdendríticas.

En la Figura 4 se puede observar el efecto del C: para 0,03 y 0,061 %C la microestructura estuvo formada mayormente por bainita en el centro de las dendritas con mezcla de bainita y martensita en las zonas interdendríticas. El posterior aumento de C (0,11 %) generó más martensita, encontrada también en zonas intradendríticas. Se vio bainita coalescida pero de menor tamaño que en 2 % Mn.

La zona recalentada por las pasadas sucesivas presentó una microestructura muy compleja debido a las diferentes historias térmicas de las distintas pasadas. Como aseveración general se observó una mezcla de bainita revenida y martensita revenida, cuya proporción depende de la composición química.

Las buenas propiedades mecánicas obtenidas con este sistema pueden ser explicadas en términos de las cantidades relativas de los diferentes componentes microestructurales: la martensita aporta alta resistencia y razonable tenacidad; las bainitas superior e inferior contribuyen a la tenacidad, con resistencia algo menor. La bainita coalescida de grano grueso se estima negativa para la tenacidad. Este nuevo sistema continúa en estudio para su aplicación en junta soldada.

La obtención de las propiedades requeridas de una junta soldada depende del consumible y del procedimiento de soldadura. Como existe la necesidad de utilizar en aplicaciones estructurales, aceros cada vez de mayor resistencia que tengan la tenacidad adecuada para la aplicación, los nuevos aceros son cada vez más sofisticados, por lo tanto los consumibles también lo son. El desarrollo de estos últimos debe hacerse a través de un trabajo conjunto entre los fabricantes de aceros, el diseñador de consumibles y el usuario.

4. Alambres para soldadura semiautomática

Es conocida la evolución del uso de los procesos de soldadura

por arco eléctrico durante los últimos años. Como ejemplo, en la Figura 5 se presenta dicha evolución en Japón, pudiéndose considerar equivalente la del resto de los países desarrollados, más allá de las particulares diferencias de cada uno. En Latinoamérica la tendencia es la misma si bien el reemplazo de SMAW por procesos más productivos ha sido menos marcada. Se considera que en Argentina todavía el 40 % del metal depositado por arco eléctrico se hace con SMAW. Teniendo en cuenta esta información es fácil ver que los alambres tubulares no son ya los consumibles del futuro sino los del presente.

Hace ya varios años que los fabricantes de consumibles disponen en su catálogo de una amplia gama de alambres tubulares de unión, para ser utilizados bajo protección gaseosa o sin ella, para la soldadura de aceros comunes, de baja aleación, inoxidable, etc. Entonces ¿qué se está desarrollando en esta área además de nuevos productos? El mejoramiento y la sofisticación de los ya existentes, con el objetivo de aumentar la productividad y bajar costos en todas las industrias.

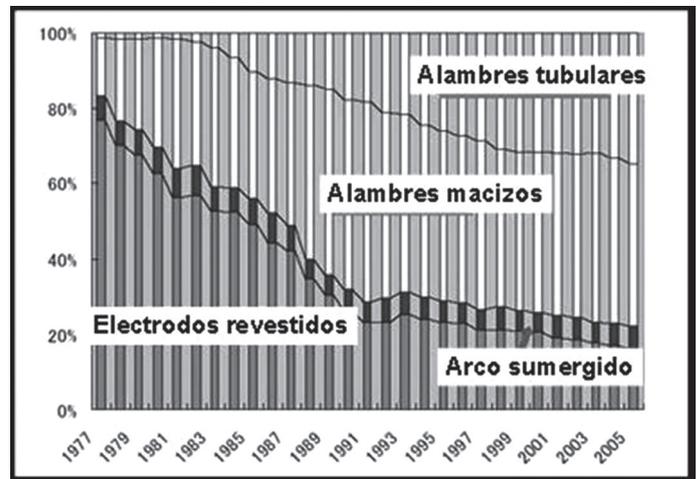


Figura 5. Evolución del uso de los procesos de soldadura por arco eléctrico.

Como ejemplo ¿cuáles son los requerimientos que la industria japonesa tiene para los alambres tubulares de unión del sistema CMn? La Figura 6 muestra las demandas de los usuarios respecto de los tubulares para soldadura con robot y para alambres tubulares [30]. Puede observarse que con el objetivo de mejorar el “uptime” se demanda disminución de salpicaduras (para acortar el tiempo de limpieza), mejor alimentación del alambre, mejor re-encendido, mayor precisión de “tracking” del alambre y aumentar la eficiencia. Respecto de los alambres tubulares para FCAW se requiere mayormente disminuir las salpicaduras y los humos así como aumentar la eficiencia y la velocidad de soldadura.

En respuesta a estas demandas aparecieron nuevos desarrollos en alambres tubulares del sistema CMn, en el mercado japonés [30]. La figura 7 muestra algunos de estos desarrollos llevados a cabo con alambres tubulares en los que se trabajó con el objetivo de aumentar la eficiencia para disminuir costos y/o aumentar la calidad. Se obtuvieron a) mayor longitud de cateto en la soldadura de filete (Figura 7a) a través del aumento de la viscosidad y el volumen del metal fundido; b)

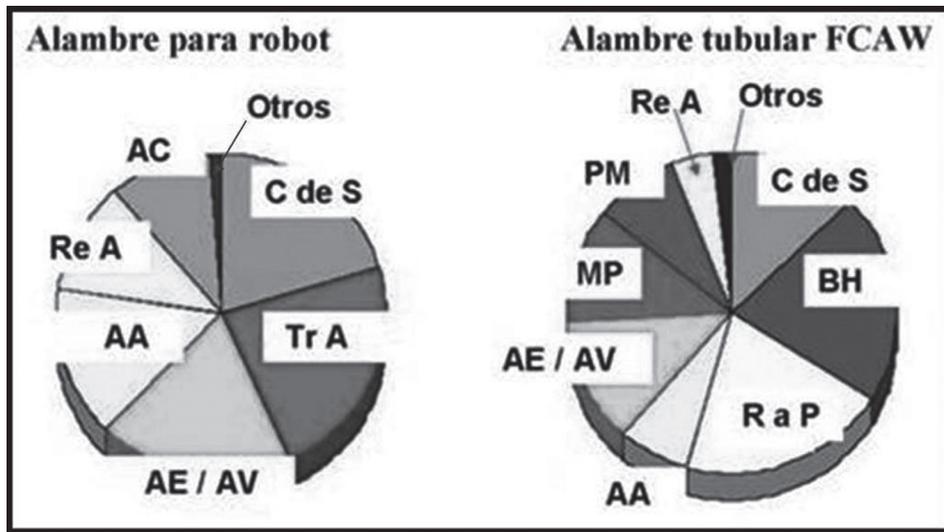
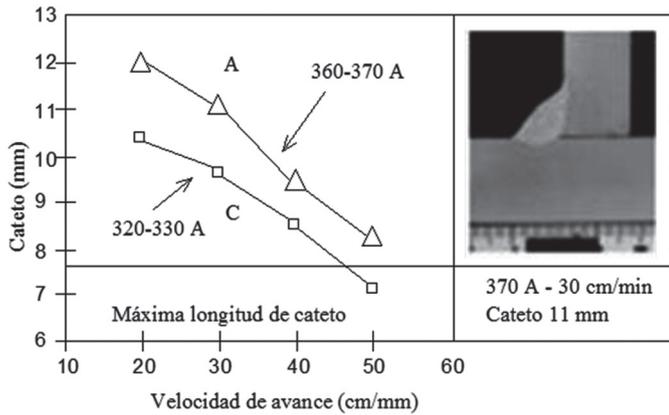
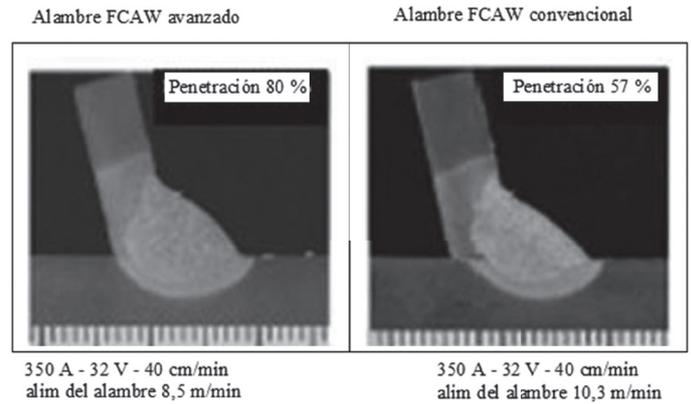


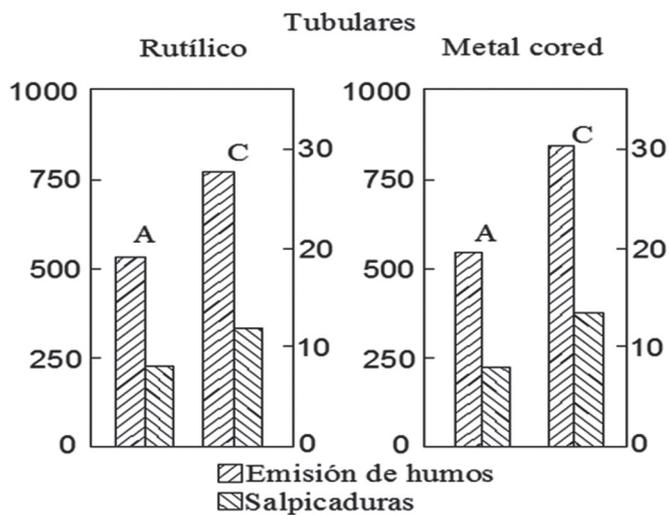
Figura 6. Demandas de mejoras en el mercado japonés [30]. (AC: apariencia del cordón; Re A; reencendido del arco; AA: alimentación del alambre; AE /AV: alta eficiencia y alta velocidad; Tr A: Tracking del alambre; C de S: cantidad de salpicaduras; PM: propiedades mecánicas; MP: para multipasadas; R a P: resistencia a la porosidad; BH: bajos humos) [30].



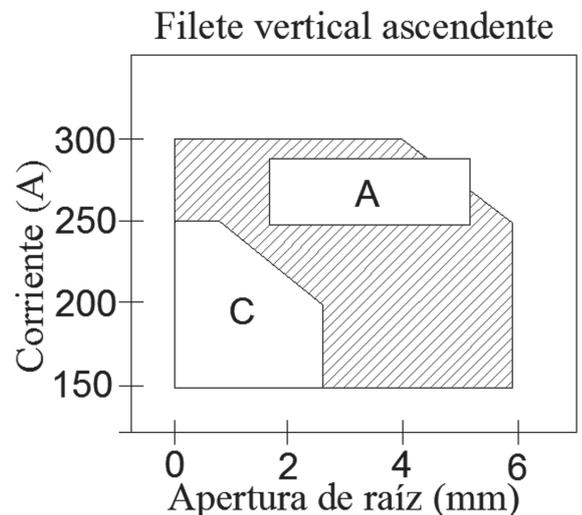
a



b



c



d

Figura 7. Distintos desarrollos en alambres tubulares del sistema CMn [30]; a) mayor longitud de cateto; b) mayor penetración; c) menores emisión de humos y generación de salpicaduras; d) soldadura en vertical ascendente con mayor apertura de raíz. A: alambre avanzado; C: alambre convencional.

aumento de la penetración (Figura 7b) a través de la disminución de la proporción de fundente en el alambre; c) disminución de la emisión de humos y de la generación de salpicaduras (Figura 7c) obtenida mediante la disminución de carbono y la adición de metales alcalinos al relleno y d) la posibilidad de incrementar la apertura de raíz en soldadura de filete en vertical ascendente (Figura 7d) lo que requirió alta viscosidad en el metal fundido y en la escoria así como alto punto de fusión de esta última, a fin de sostener el material en estado líquido. Con este último material es posible obtener alta eficiencia en soldadura con robot en posición vertical.

Con alambres macizos del sistema CMn [30] y a través de la optimización de la composición química del alambre, lo que hace necesario el trabajo en conjunto con el fabricante de aceros, fue posible obtener mayores propiedades de tracción con mayor tenacidad aún utilizando altos calor aportado y temperaturas de entrapasadas (Figura 8).

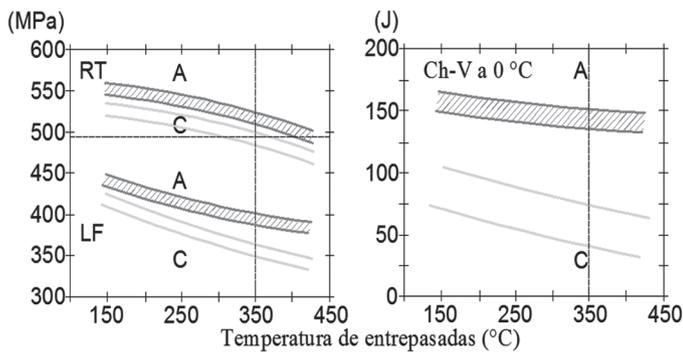


Figura 8. Desarrollo de alambre macizo con mayores propiedades de tracción y tenacidad, con altos calor aportado y temperatura de entrapasadas [30].

5. Estandarización en la Subcomisión II-E del Instituto Internacional de Soldadura (IIW)

Una norma es un documento que provee requerimientos, especificaciones, guías o características que pueden ser usadas consistentemente a fin de asegurar que materiales, productos, procesos y servicios cumplen con el propósito para el que fueron desarrollados. La necesidad e importancia que tiene el disponer de las normas adecuadas para cada propósito está fuera de discusión y las elevadas sumas de dinero que los países desarrollados invierten en los organismos normalizadores, tanto nacionales como internacionales, es una prueba de la importancia que se da a la normalización, entendiéndose por esta última el proceso de elaborar, aplicar y mejorar las normas que se aplican a distintas actividades científicas, industriales o económicas con el fin de ordenarlas y mejorarlas.

Si bien se comprende perfectamente esta importancia, hay enorme resistencia a dedicarse a esta tarea, que debe ser llevada a cabo en conjunto por investigadores de institutos generadores de conocimiento, fabricantes y usuarios en el área pertinente. Es por esto que, ya en el área específica de Soldadura, la autora considera especialmente importante el trabajo que se realiza en la Subcomisión II-E del IIW, que tiene como tarea la Standardization and Classification of Weld Filler Metals. Este

trabajo se lleva cabo a través de jugosas discusiones técnicas, aportes de los distintos sectores participantes, Round Robin Tests internacionales, que permiten comprobar metodologías, intercambiar conocimientos y generan la base sólida necesaria para la elaboración y mejoramiento de normas. Sólo para información, en la Tabla 10 se presentan las normas que están en revisión en este momento en la Subcomisión II-E [31].

Tabla 10. Normas ISO actualmente en revisión en la Subcomisión II-E del IIW [31].

ISO 636:2004 , Welding consumables -- Rods, wires and deposits for tungsten inert gas welding of non-alloy and fine-grain steels -- Classification
ISO 1071:2003 , Welding consumables - Covered electrodes, wires, rods and tubular cored electrodes for fusion welding of cast iron - Classification
ISO 3581:2003 , Welding consumables -- Covered electrodes for manual metal arc welding of stainless and heat-resisting steels -- Classification
ISO 6848:2004 , Arc welding and cutting -- Non consumable tungsten electrodes -- Classification
ISO 14172:2008 , Welding consumables -- Covered electrodes for manual metal arc welding of nickel and nickel alloys -- Classification
ISO 14175:2008 , Welding consumables -- Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
ISO 17632:2004 , Welding consumables -- Tubular cored electrodes for gas shielded and non-gas shielded metal arc welding of non-alloy and fine grain steels -- Classification
ISO 17634:2004 , Welding consumables -- Tubular cored electrodes for gas shielded metal arc welding of creep-resisting steels -- Classification
ISO 24373:2008 , Welding consumables -- Solid wires and rods for fusion welding of copper and copper alloys -- Classification
ISO 18273:2004 Welding consumables -- Wire electrodes, wires and rods for welding of aluminum and aluminum alloys -- Classification

6. Soldadura de aceros avanzados para servicio a alta temperatura, 9 Cr.

A fin de aumentar la eficiencia de las plantas térmicas generadoras de energía con combustibles fósiles, en los 90's se han desarrollado nuevos aceros 9%Cr tales como los grados P91 y P92. Actualmente están siendo utilizados para tuberías con parámetros de vapor avanzados. Estos grados, en especial el P92, tienen alta resistencia al creep hasta temperaturas de servicio de alrededor de los 620 °C y 30 MPa de presión de vapor. Aunque estos aceros se utilizan a altas temperaturas, deben tener buena tenacidad a temperatura ambiente, para la fabricación y las tareas de mantenimiento. En consecuencia debe encontrarse la mejor solución de compromiso entre la resistencia al creep y la tenacidad, ya que son propiedades contrapuestas [32]. Para que estos aceros puedan ser utilizados deben generarse conocimientos sobre su soldabilidad [33].

Tabla 11. Composición química típica de los aceros P91 y P92.

	C	N	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	W
P91	0,10	0,05	0,4	0,45	9,0	1,0	0,20	0,08	-
P92	0,07	0,06	0,1	0,45	9,0	0,5	0,20	0,05	1,8

Tabla 12. Composición química base, usada como punto de partida [40].

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	Ti	V	W	N
0,10	0,30	0,70	9,00	0,45	0,50	0,005	0,03	0,038	0,20	1,70	0,05

El P91 es un acero de estructura martensítica revenida, estabilizada por carburos M23C6, con endurecimiento por molibdeno en solución sólida y una distribución de precipitados finos de carburos y carbonitruros de V/Nb (MX) [34]. En el P92, basado en el P91, se adicionó 1,7 % W y de 10 a 60 ppm de B, reduciéndose el contenido de Mo a 0,5 %, sin modificar la microaleación con Nb, V y N. Este cambio de la composición química aumenta la formación de carburos y carbonitruros que mejoran la resistencia al creep a largo alcance. La composición química típica de ambos aceros se presenta en la Tabla 11.

La resistencia al creep es controlada por la estabilidad de las segundas fases endurecidas: los carburos M23C6, ubicados en los bordes de los lath de martensita y en los bordes de grano austeníticos primarios y los precipitados MX que aseguran la resistencia al creep a largo término. En ensayos de esta última propiedad se determinó que parece precipitar una fase Z [35] modificada [Cr(V,Nb)N] a expensas de los M23C6 y vitalmente de los MX [36], lo que disminuye la resistencia al creep.

El W mejora la resistencia al creep a largo término por endurecimiento por solución sólida y retardo del engrosamiento de los carburos M23C6 que estabilizan la matriz martensítica; no debe llegarse al 2 % W ya que se forman precipitados gruesos de Fe₂W que son perniciosos para el creep. Como el W promueve la formación de ferrita, que es perjudicial para el creep y la tenacidad, se compensa este efecto con la disminución del contenido de Mo [36].

El agregado de B ha demostrado resultar en un beneficio para la resistencia al creep ya que enriquece los M23C6 en el borde de grano austenítico primario y suprime el engrosamiento de los mismos durante la deformación por creep [37-38]. Con 0,008 % N y 0,014 % B se favorece la precipitación de los MX, lo que incrementa la resistencia al creep [37]. Por otro lado, estudios realizados con un acero 9Cr-3W-3Co-Nb-V [38] con el agregado de 1, 48, 92 y 139 ppm de B, han mostrado aumento sistemático de la resistencia al creep a largo término a 650 °C. El B disminuye o elimina las fisuras de tipo IV [36], que se producen en la zona de grano fino de la zona afectada por el calor del metal base de la junta soldada [38]. Estas fisuras constituyen uno de los principales problemas en la soldadura de los aceros 9 Cr.

Para la soldadura de este tipo de aceros avanzados se utilizan consumibles que depositan materiales de similar composición química y de alta resistencia al creep. Los procesos utilizados habitualmente son SMAW, FCAW y SAW.

Para el diseño metalúrgico del consumible se toma como base la composición química del acero P92 (Tabla 11), pero con modificaciones y agregados a fin de obtener como mínimo las mismas propiedades que en el metal base [32]. En los últimos 10 años es mucho el trabajo que se ha venido realizando en este sentido [32, 33, 38-44].

Es conocido el efecto beneficioso del Co [39], que en los consumibles para la soldadura del P92 ya está agregado en alrededor del 1 % [32, 40]. Para evitar la presencia de ferrita en la microestructura, que es perjudicial para la tenacidad y la resistencia al creep [32], es necesario incorporar elementos estabilizadores de la austenita. El agregado de Co, Ni y Mn al depósito de los consumibles, se hace con este propósito. Los niveles de Ni y Mn deben ser cuidadosamente evaluados ya que estos elementos disminuyen las temperaturas Ac1, Ac2, Ms y Mf (a diferencia del Co que no produce este efecto), con lo que aumenta el peligro de desarrollar martensita no revenida e incrementar el riesgo de daño durante el tratamiento térmico posterior a la soldadura [33], que siempre debe hacerse. Por este motivo, en general se apunta a 0,5 % máximo de cada uno [41]. Ambos elementos contribuyen al mejoramiento de la tenacidad.

Por otro lado, si bien la composición química de los depósitos obtenidos con electrodos manuales revestidos (SMAW) y con alambre tubular para soldadura semiautomática bajo protección gaseosa (FCAW) son similares, difieren en los contenidos de Ti, Al y Nb. Esto es debido a que los alambres mencionados son rutilicos, para posibilitar buena soldabilidad en toda posición y estos tres elementos están presentes en el metal depositado, ya que provienen de la arena de rutilo, materia prima normalmente utilizada en el relleno.

Se han estudiado los efectos del Al, el Ti y el Nb sobre la tenacidad y la resistencia al creep del metal de soldadura [40] obtenido con alambres tubulares del sistema rutilico en junta en V. La Tabla 12 muestra la composición química básica del consumible sobre la que se llevaron a cabo las modificaciones y la Tabla 13, los resultados obtenidos. Se utilizó como material base un acero P92 estándar.

Los resultados indican que la mayor resistencia a la ruptura por creep se obtuvo en las soldaduras con niveles medios de Ti (W2 y W4). Las probetas de dos de las soldaduras, una del tope de W4 (alto Al y medio Ti) y una de la raíz de W2 (medio Ti), mostraron una resistencia al creep a 10.000 horas de 212 MPa, que es en 60 MPa (40 %) mayor que la del acero base utilizado.

Por otro lado la Figura 9 presenta los resultados de energía absorbida en el impacto Charpy-V a distintas temperaturas de

Tabla 13. Resultados obtenidos con las distintas variaciones de composición química [40].

Muestra	Elementos estudiados	Objetivo de C. Q.			Ruptura al creep (MPa)		Red. de área	Región de la soldadura
		Al	Nb	Ti	1000 h	10000 h		
W1	Base	0,005	0,03	0,038	185	150	6 78	Tope Raíz
W2	Medio Ti	0,005	0,03	0,06	190 248	150 212	69 & 78 82	Tope Raíz
W3	Altos Ti y Al	0,03	0,03	0,10	210	170	21 & 51 25	Tope Raíz
W4	Alto Al y medio Ti	0,03	0,03	0,06	240	193	35 & 70 27	Tope Raíz
W5	Bajo Ti	0,005	0,03	0,01	185	150	32 79	Tope Raíz
W6	Bajo Ti y alto Nb	0,005	0,05	0,01	188	150	7 75	Tope Raíz

C. Q.: composición química.

ensayo. Se puede observar que hay claramente dos grupos de comportamiento: las soldaduras W3 (altos Ti y Al) y W4 (alto Al y medio Ti) que mostraron la peor tenacidad mientras que la del resto es mayor. La mayor tenacidad fue obtenida con los menores valores de Ti y de Al (W5). El Nb no pareció afectar la tenacidad en los valores ensayados en este trabajo.

Hay acuerdo en que el Ti beneficia la resistencia al creep pero perjudica la tenacidad por lo que su nivel debe ser estrictamente controlado [42].

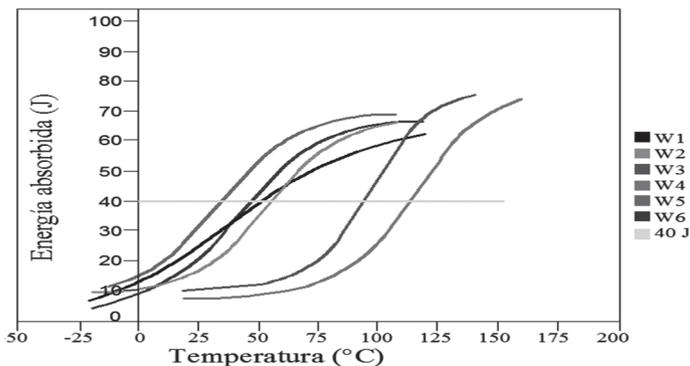


Figura 9. Resultados de impacto Charpy-V [40].

Desde el punto de vista del desarrollo de consumibles es interesante remarcar cómo el diseño metalúrgico de un depósito no siempre puede variarse a voluntad a fin de obtener los mejores resultados metalúrgicos ya que deben tenerse en cuenta las características intrínsecas del tipo de consumible en cuestión. En el caso de los electrodos manuales para la soldadura del acero P92 será más fácil controlar la composición química ya que al utilizarse revestimientos básicos en lugar de rutilicos, los niveles de Ti, Al y Nb serán fáciles de establecer, debido a que no es la arena de rutilo el componente principal, como sí lo es en

los alambres tubulares para soldadura en toda posición.

El contenido de N debe mantenerse controlado ya que puede formar BN retirando el B de los MX, o sea contribuyendo a su inestabilidad [42]. Debe mantenerse un mínimo de 100 ppm de N para garantizar la resistencia al creep, ya que valores menores pueden inducir a la formación de ferrita, y no sobrepasar un máximo de 500 ppm por las razones antes mencionadas [42].

Actualmente los consumibles para la soldadura del P92 tienen incorporados estos conocimientos pero se continúa trabajando a fin de profundizar en el conocimiento del mecanismo de los precipitados en el mejoramiento del creep, en el ajuste fino del contenido de B, en la optimización del tratamiento térmico post soldadura, en el rol de las tensiones residuales generadas por la soldadura, en la fisuración por hidrógeno y en general, en la influencia del procedimiento de soldadura [43] sobre las propiedades finales de la junta soldada en su conjunto, metal de soldadura y zona afectada por el calor, ya que la fragilización de esta última es un punto clave a resolver.

7. Conclusiones

A través de esta rápida mirada sobre algunas de las áreas de desarrollo de consumibles para soldadura por arco eléctrico en las que se está trabajando, se puede concluir que el desarrollo está muy activo y en una etapa de generación de nuevos consumibles para hacer posible la soldadura de nuevos materiales y de sofisticación de los ya existentes, con el objetivo de generar cada vez mayor eficiencia y calidad en la construcción soldada junto con una actitud más amigable con el medio ambiente.

8. Agradecimientos

La autora agradece la colaboración de los Ings. Rodolfo Rep y Ariel Burgos y el Dr. Ing. Sebastián Zappa por la información y la ayuda recibidas, en la elaboración de este trabajo.

9. Referencias Bibliográficas

- [1] EVANS, G. M. y BAILEY, N. Metallurgy of Basic Weld Metal. Abington Publishing, Abington, Cambridge CBL 6AH, Inglaterra, 1997.
- [2] A new method for reducing diffusible hydrogen in weld metal. Howart Brothers Wire Division. IIW II-1824-12 y XII-2103-12.
- [3] ISO DIS 3690:2008: Welding and Allied processes – Procedure for Determining the Hydrogen Content in Arc Weld Metal, IIW-Online Doc. II-1689-08.
- [4] AWS A5.1/A5.1M:2004. Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, AWS, Miami, 2004.
- [5] Sistema de Qualificação de Produtos, Registro de Relatório de Ensaio, Consumíveis de Soldagem, N° 1372, 1373, 1374 y 1375. FBTS, Rio de Janeiro, Brasil, agosto de 2012.
- [6] C. TURANI VAZ et al. Desenvolvimento de eletrodos revestidos do tipo baixo hidrogênio impermeáveis. XXXVI CONSOLDA, Outubro 2010, Recife, Brasil.
- [7] C. TURANI VAZ et al. Estudo da microestrutura e propriedades do metal de solda depositado por eletrodos revestidos impermeáveis do tipo baixo hidrogênio. 66° Congresso Anual da ABM, 18-22 de Julio de 2011, São Paulo, SP, Brasil.
- [8] N. DE LAURENTIS et al. Impermeable covered electrodes: influence of the polymer quantity on the composition, microstructure and hardness of the weld metal. 16th International Conference on the Joining of Materials, JOM, 10-13 de mayo de 2011, Tisvildeleje, Dinamarca.
- [9] C. TURANI VAZ et al. Impermeable low hydrogen covered electrodes: the weld metal diffusible hydrogen, microstructure and mechanical properties. 16th International Conference on the Joining of Materials, JOM, 10-13 de mayo de 2011, Tisvildeleje, Dinamarca.
- [10] VINCENT VAN DER MEE. Round Robin on Effect of Atmospheric Storage Condition on Weld Metal Diffusible Hydrogen Content of Gas Shielded Cored Wires. IIW II-A-143-04 and II-1523-04.
- [11] T. KANNENGIESSER and N. TIERSCH. Measurements of diffusible hydrogen contents at elevated temperatures using different hot extraction techniques – An international round robin test. IIW Doc. II-1706r1-09 (II-A-200r3-08).
- [12] T. DAHLSTRÖM. Multivariate analysis of results from international Round Robin on diffusible hydrogen. IIW Doc II-1721-09.
- [13] G. K. PADHY, et al. Hot extraction of Diffusible Hydrogen and its Measurement Using a Hydrogen Sensor. IIW Doc. II-A-225-11.
- [14] E. S. SURIAN, L. A. DE VEDIA. All-weld metal design for AWS E10018M, E11018M and E12018M type electrodes. *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, 78 (6), 217-s a 228-s, USA, 1999.
- [15] E. S. SURIAN et al. SMAW, FCAW, MCAW and SAW low alloy ferritic deposits: the challenge is tensile strength. *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, 89 (3), 54s-64s, 2010.
- [16] E. SURIAN et al. The effect of welding procedure on ANSI/AWS A5.29-98 E81T1-Ni1 flux cored arc weld metal deposits. *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, 83(11), 301s-307s, Miami, USA, 2004.
- [17] E. SURIAN et al. Influence of procedure variables on C-Mn-Ni-Mo metal cored wire ferritic all-weld metal? *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, 84 (9), 139s-148s, Miami, USA, 2005.
- [18] AWS A5.5/A5.5M:2006. Specification for Low Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society, Miami, 2006.
- [19] VERCESI, J., E. SURIAN. The effect of welding parameters used within the AWS A5.5-81 requirements, in the E11018-M electrode all-weld-metal. *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, Vol. 75(6): 191s-195s, USA, 1996.
- [20] VERCESI, J., E. SURIAN. The effect of the welding parameters on high strength SMAW all-weld metal - Part 2: AWS E10018-M and E12018-M. *Welding Journal*, ISSN 0043-2296, 4(4), 164-s a 171-s, USA, 1998.
- [21] AWS A5.23/A5.23M:2007. Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding, AWS, Miami, USA.
- [22] AWS A5.28/A5.28M: 2005. Specification for Low Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding, AWS, Miami, USA.
- [23] AWS A5.29/A5.29M:2010. Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arce Welding, AWS, Miami, USA.
- [24] BAUNÉ et al. Consumables for welding of (very) high strength steels - mechanical properties of weldments in as-welded and stress relieved applications. IIW Doc. II-1596-06/II-C-315-05.
- [25] ASTRÖM, H. SMAW electrodes for extra high strength steel – have we reached the strength limit for conventional CrNiMo types?. IIW Doc. II-1400-00.
- [26] KEEHAN, E. Microstructure and properties of Novel High Strength Steel Weld Metal. IIW Doc. IX-2146-05.
- [27] KEEHAN, E. et al. New developments with C-Mn-Ni high strength steel weld metals – Part A. Microstructure. (E. Keehan, Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel weld metals, Ph.D.thesis, Paper 7, Chalmers University of Technology, 2004).
- [28] KEEHAN, E. et al. New developments with C-Mn-Ni high strength steel weld metals – Part B. Mechanical Properties. (E. Keehan, Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel weld metals, Ph.D.thesis, Paper 8, Chalmers University of Technology, 2004).
- [29] KEEHAN, E. et al. Microstructure characterization of a high strength steel weld metal containing the novel constituent coalesced bainite. (E. Keehan, Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel weld metals, Ph. D. thesis, Paper 3, Chalmers University of Technology, 2004).
- [30] KOSHIISHI, F. et al. Trends and perspective on welding consumables in Japan. IIW Doc. XII-1823-04.
- [31] Información suministrada por el presidente de la Subcomisión II-E del IIW, David Fink, necesaria para su discusión en la Reunión Intermedia de la SC-II-E, Inglaterra, en febrero 2013.
- [32] COMPETENCE: The Technical Journal of Oerlikon

- Welding and Cutting Expertise. N° 5, Páginas 7 a 14. Noviembre 2010.
- [33] RAMESH, S. Welding challenges of 9-chrome-moly steel. Pipeline & Gas Journal, V 238, N° 10, octubre 2011.
- [34] HAARMANN, K. et al. The T91/P91 book. 2002, Boulogne, Vallourec & Manesman Tubes.
- [35] STRANG, A y V. VODAREK. Z-phase formation in a martensitic 12CrMoVNb steel. Mater. Sci. Technol., 1996, 12, 552-556.
- [36] FRANCIS, J. A. et al. Type IV cracking in ferritic power plant steels. Materials Science and Technology, V 22, N° 12, 2006.
- [37] SEMBA, H. Y ABE, F. Alloy design and creep strength of advanced 9 %Cr USC boiler steels containing high concentration of boron. Energy Materials, V 1, N° 4, 238-244, 2006.
- [38] KONDO, M. et al. Suppressing type IV failure via modification of heat affected zone microstructures using high boron content in 9Cr heat resistant steel welded joints. Science and Technology of Welding and Joining, V 11, N° 2, 216-223, 2006.
- [39] ABSON et al. The effects of composition on the toughness and creep behaviour of weld metals for advanced high temperature 9-13%Cr steels. TWI Research report for industrial members 788/2004, febrero 2004.
- [40] ABSON, D. J. et al. The influence of Ti, Al and Nb on the toughness and creep rupture strength of grade steel weld metal. Conference on the Integrity of High Temperature Welds, IOM3, Londres, abril 2007.
- [41] COMPETENCE: The Technical Journal of Oerlikon Welding and Cutting Expertise. N° 3, Páginas 5 a 12, septiembre 2008.
- [42] COMPETENCE: The Technical Journal of Oerlikon Welding and Cutting Expertise. N° 4, Páginas 5 a 12, mayo 2009.
- [43] BAUMGARTNER, G. et al. Properties of modern boron-alloyed creep resistant FCAW welds. IIW Doc. II-1743-10.
- [44] MANDZIEJ, A. et al. Microstructure and creep rupture of P92-grade weld metal. IIW Doc. II-A-194-08 / II-1694-08.