

# **EFECTO DE LA OSCILACIÓN EN LA GEOMETRÍA DE SOLDADURAS SUPERFICIALES APLICADAS CON GMAW CORTOCIRCUITO**

## **EFFECT OF OSCILLATION ON GEOMETRY OF BEAD ON PLATE WELDS APPLIED WITH SHORTCIRCUIT GMAW**

**PAULA ANDREA CORTÉS ARIAS**

*Estudiante de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, pacotesa@unal.edu.co*

**DIEGO ARMANDO GÓMEZ MEZA**

*Estudiante de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, dagomezmez@unal.edu.co*

**DANIELA POSADA CARMONA**

*Estudiante de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, dposadac@gmail.com*

**JORGE ENRIQUE GIRALDO BARRADA**

*Profesor asistente, Escuela de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, jegirald@unal.edu.co*

*Grupo de soldadura, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín*

*Núcleo del Río, Oficina 03-209, Teléfono: 4309271*

**RESUMEN:** El siguiente artículo analiza como la oscilación en soldaduras superficiales (BOP) con proceso GMAW por cortocircuito (GMAW-A1) afecta la geometría superficial de los cordones de soldadura. Las soldaduras se aplicaron con parámetros eléctricos que garantizan un proceso GMAW-A1 estable, junto con la variación de dos parámetros de la técnica de aplicación: *la velocidad transversal y la amplitud*. Los datos experimentales se obtuvieron a partir de inspección visual, líquidos penetrantes, método de réplica plástica y macroataque. Los resultados encontrados sugieren una relación entre la técnica de aplicación y la forma de las soldaduras, vistos como un cambio representativo en la apariencia de los cordones (surcos/longitud y porcentaje de llenado) y variaciones importantes en la morfología (refuerzo, ancho, ángulo cara/metal base, radio de pie y mojabilidad), influenciados principalmente por la velocidad trasversal. De acuerdo con lo anterior se propone una forma de expresar el concepto de geometría con parámetros objetivos y numéricos que puedan ser usados para llevar a cabo criterio objetivo de aceptación o rechazo de las soldaduras.

**PALABRAS CLAVES:** *GMAW-A1, apariencia, morfología, velocidad transversal, amplitud, contorno del metal fundido, mojabilidad, patrón en ZIGZAG, socavadura.*

**ABSTRACT:** The following article analyzes how the application technique of surfacing welds (BOP) with GMAW in short circuit transfer mode (GMAW-A1) affects the surface geometry of the bead. The welds were applied with electrical parameters to ensure a relatively stable GMAW-A1 process, varying two of the parameters of the application technique: the transverse velocity and amplitude. The experimental data were obtained from visual inspection, penetrants liquid, plastic replication method and cross-sections for macro etch. The results suggest that there is a the connection between the application technique of the welds and their shape, seen as a representative change in the appearance of the beads (waves / longitude, percentage of filling) and important variations in the morphology (reinforcement, width, angle face / base metal, toe radio and wettability), influenced mainly by the transverse velocity. The above proposes a way to express the concept of geometry with numeric, objective parameters to implement an objective criterion for acceptance or rejection of welds.

**KEYWORDS:** *GMAW-A1, apparience, morphology, transverse velocity, amplitude, metl metal profile, wettability, ZIG-ZAG pattern, undercut.*

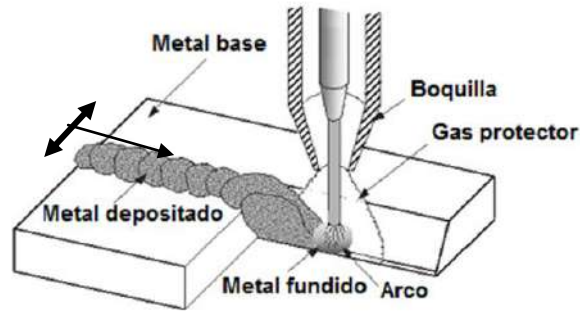
## 1. INTRODUCCIÓN.

El proceso GMAW es de amplio uso en la industria de las construcciones metálicas debido a su alta tasa de deposición de metal, su capacidad de automatización y su versatilidad para el trabajo en gran variedad de metales. Durante muchos años se ha estudiado este proceso con el fin de aumentar su eficiencia, a través de un mejor entendimiento de los fenómenos involucrados para mejorar la calidad de las soldaduras en diferentes aplicaciones. Conseguir una soldadura con mejores características (sin discontinuidades, con poca salpicadura y buenas propiedades mecánicas) es el ideal, pero alcanzarlo se vuelve difícil debido a factores tales como la técnica de aplicación.

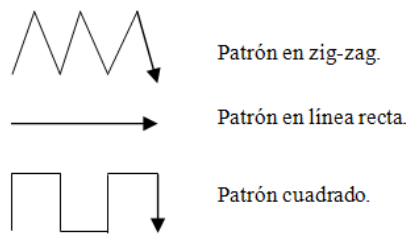
Diversos temas de investigación se realizan en soldadura GMAW como por ejemplo: los modos de transferencia de metal, el control del proceso por señales, la medición de flujo de metal y la transferencia de calor del proceso; pero hay pocos estudios [1-3] sobre cómo interpretar los aspectos superficiales de los cordones (la geometría de la soldadura); no obstante el efecto que puede tener la geometría de las soldaduras en el comportamiento en servicio, esta característica no se encuentra bien clasificada en las normas técnicas de soldadura. La AWS en el “Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding” [4], no presenta criterios objetivos para establecer una geometría óptima en las soldaduras; solo se dice que existe “*un aspecto que puede llegar a ser importante en estas*” el cual es la apariencia (*appearance*), la cual se describe como: “*una soldadura de buena apariencia es aquella libre de salpicadura y que dispone de una superficie suave (smoothness)*”, lo que implica un término subjetivo para su evaluación.

Chapetti y Otegui [3] investigaron el efecto de las irregularidades del pie de las soldaduras sobre la resistencia a la fatiga en proceso por arco automatizado, encontraron que “*el periodo de las ondas del pie y su geometría influyen fuertemente la iniciación de grietas por fatiga en las soldaduras*”. M.M. Alam, Z. Barsoum en 2009 [1] determinaron de forma precisa que el estudiar la geometría (en aspectos microgeométricos y macrogeométricos) de las soldaduras está relacionado con su resistencia a la fatiga y concluyeron que: “*soldaduras con geometrías suaves y con mínimos defectos optimizan la resistencia a la fatiga de una junta soldada; de esto el proceso y sus parámetros influirán en la calidad de dicha soldadura*” e identifican que el punto de iniciación de grietas en los cordones se ubica en la intersección de dos ondas de soldadura y/o en las socavaduras internas del camino de las ondulaciones en la superficie.

Experimentalmente se observa que la geometría de la zona de fusión del cordón depende de dos tipos de parámetros: los eléctricos del proceso y los de la técnica de aplicación. Entre los parámetros eléctricos más influyentes se encuentran *el amperaje, el voltaje y el gas de protección*, los cuales afectan la geometría del cordón debido a su relación con la entrada de calor, los modos de transferencia de metal y el flujo del fluido del charco de soldadura. Dentro de la técnica de aplicación (fig. 1) se encuentran: *la velocidad de aplicación, la velocidad transversal, la amplitud de oscilación transversal, los tiempos de retención lateral* (que implican el tiempo de permanencia de la pistola en cada uno de los lados) y *el patrón de oscilación* (fig. 2). En la práctica, durante la aplicación manual de soldaduras con GMAW el soldador modifica tales variables mediante su experiencia para producir cordones con la forma y apariencia requeridas para llenar un tipo de junta, o para depositar un recubrimiento.

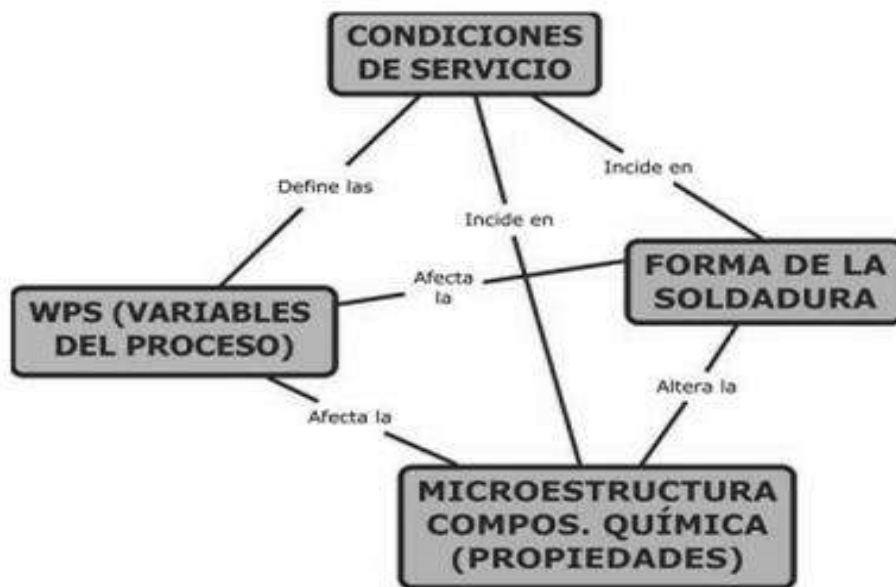


**Figura 1.** Una flecha indica la dirección de la velocidad transversal y la amplitud, y la otra la dirección de la velocidad de recorrido.



**Figura 2.** Esquema de los patrones de oscilación.

El diagrama de la figura 3 esquematiza de manera general la relación entre las diferentes variables del proceso, donde se establece que: cambios en la forma de la soldadura se ligarán a cambios en las condiciones de servicio (propiedades mecánicas y fallas prematuras), en las variables del proceso (variables eléctricas y de aplicación entre otras) y en un cambio microestructural.

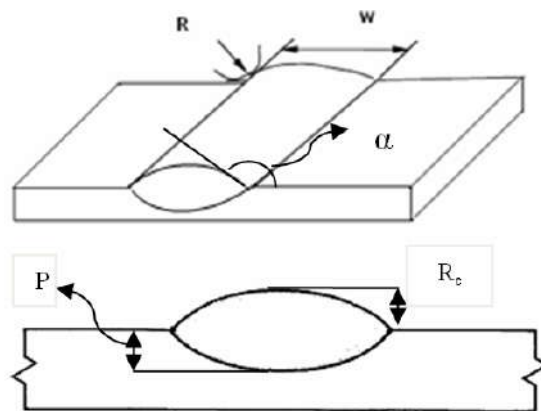


**Figura 3.** Paradigma WPS/Microestructura-Composición química/ Forma del cordón /Condiciones de Servicio por Giraldo [5].

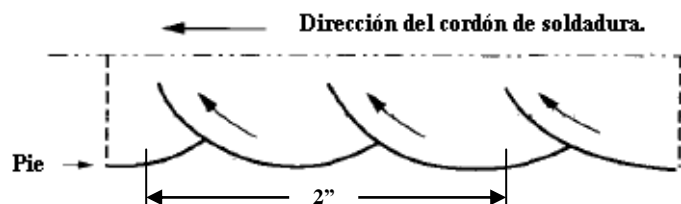
Para definir la forma de un cordón de soldadura, es necesario partir de medidas físicas básicas *como el ancho, el refuerzo, y el ángulo de refuerzo*, aunque estas resultan no ser suficientes para explicar todo lo que sucede con el cordón y así establecer concretamente su geometría. Se establecen para este artículo una serie de conceptos para definir con mejores garantías *la geometría* y se dividen en dos grupos: *apariencia* de la soldadura y *morfología* de la soldadura, que juntos establecen el concepto global de *geometría*. Ambos son términos no estandarizados por la AWS que se definen objetivamente en este trabajo con el fin de aplicarlos en la práctica.

**Morfología:** se define como el perfil del contorno del cordón de soldadura que abarca sus dimensiones principales: el ancho (W), el refuerzo ( $R_c$ ), el ángulo del refuerzo ( $\alpha$ ), el radio de pie (R), la penetración (P) y la mojabilidad ( $M=R/W$ ), esta última define la relación entre el refuerzo de la soldadura y el ancho del cordón (fig. 4).

**Apariencia:** se relaciona con la percepción visual de los cordones. Debido a la naturaleza subjetiva de esta definición, se determinaron en este estudio los siguientes parámetros cuantitativos y cualitativos para definir de una manera objetiva la apariencia: (1) **Número de surcos por unidad de longitud** (fig. 5),  $N$ : es el número de surcos o huellas  $N$  presentes en la cara de las soldaduras por unidad de longitud (2" para este caso). (2) **Patrón:** es un término cualitativo que, en registros fotográficos, ofrece una primera percepción de una soldadura, mostrando la forma de los surcos (elípticos, columnares o circulares), en función de la técnica, los cuales por tratarse de soldaduras mecanizadas, son sucesivos cada cierta longitud; los registros fotográficos corresponden a diferentes acabados de soldadura cuyos patrones sirven como referencia para diversas aplicaciones según las necesidades de servicio. (3) **Porcentaje de llenado:** término cuantitativo que toma la relación entre el área llenada con soldadura y el área producto del ancho del cordón, por una longitud base de 50.8 mm para el 100%. Por ejemplo un valor del 95% indica que con esos parámetros de aplicación quedaría sin llenar el 5% de la superficie.



**Figura 4.** Medidas de morfología.



**Figura 5.** Esquema del número de surcos.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

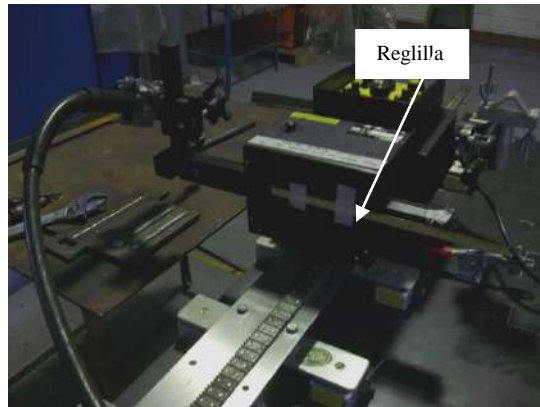
Se usó una máquina eléctrica de soldadura GMAW de voltaje constante marca MILLER de referencia Invision 456 MP, con un alimentador MILLER modelo S-74D y un dispositivo de mecanizado Bug-O System Modelo MPD1000, que permite alterar la forma de oscilación de la pistola durante la aplicación de las soldaduras BOP. Se optó por este sistema para eliminar la variable humana que hace que los cordones no sean homogéneos aunque se realicen por el mismo soldador. El experimento se realizó en platinas de acero ASTM A36 de  $\frac{1}{4}$ " de espesor, usando un electrodo ER70S-6 de 0.045" con una mezcla de gas de protección 75% Ar/25% CO<sub>2</sub> y con los parámetros de soldadura mostrados en la Tabla 1. Se plantearon variaciones de la velocidad transversal (Vt) y la amplitud (A) de recorrido de la pistola en tres niveles (alto, medio y bajo) dados por el sistema de mecanización (Tabla 2) para aplicar soldaduras de 4,5" de longitud. El patrón de soldadura utilizado es de tipo ZIG-ZAG. Se implementaron reglillas en el equipo de mecanización (Fig. 6) con el fin de verificar cuantitativamente la amplitud, además de hacerse mediciones en los tiempos de recorrido para calcular la velocidad transversal y longitudinal de la pistola. Con dichas mediciones se logró asegurar la repetitividad del proceso de soldadura con los diferentes parámetros usados. Se soldaron tres cupones con nueve soldaduras cada uno (fig. 7).

PARÁMETROS SIN CAMBIO	VALORES
Corriente (A)	135- 150
Voltaje (V)	20
Velocidad (Vr) (cm/min)	7.5
Velocidad de alimentación (in/min)	135
Flujo de gas (LPM)	12
Inductancia (%)	80

**Tabla 1.** Variables de soldadura fijas en el proceso.

AMPLITUD (mm)	VELOCIDAD TRANSVERSAL (cm/min)
10	25
20	100
30	150

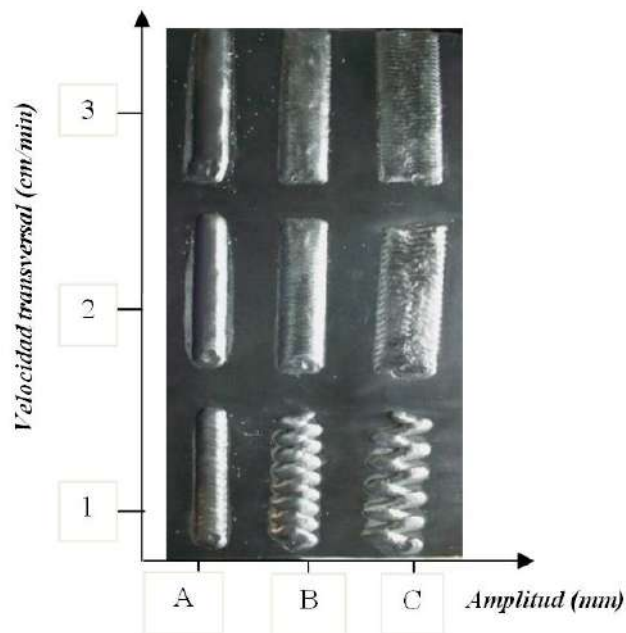
**Tabla 2.** Niveles de las variables independientes del experimento.



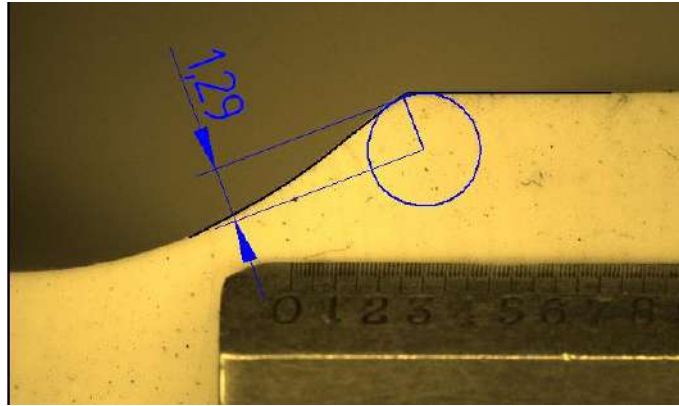
**Figura 6.** Disposición de equipos para soldar.

Las soldaduras se realizaron en orden aleatorio en ambas platinas y en el mismo sentido para obtener validez estadística de los datos del experimento, se usó un *Modelo 2<sup>k</sup> factorial* [6], con tres niveles alto medio y bajo, y dos factores: *la velocidad transversal* y *la amplitud*.

Se utilizaron galgas convencionales para la medición de los anchos y refuerzos de las soldaduras y se verificó la sanidad con líquidos penetrantes. El ángulo del refuerzo se midió en las secciones transversales macroatacadas de cada soldadura mediante el software de CAD Solid Edge, y para cada sección se tomó el promedio de los valores medidos en el pie de cada uno de los lados del cordón de soldadura. Para la medición del radio de pie se utilizó el método por replica plástica [1] usando un polímero de referencia comercial BX-300 (caucho siliconado) para copiar la geometría de los cordones de soldadura y luego seccionar, ver con un estetoscopio y medir (fig. 8).



**Figura 7.** Disposición de cordones de soldaduras.



**Figura 8.** Imagen por método de réplica plástica en la soldadura 2A, medida en milímetros.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

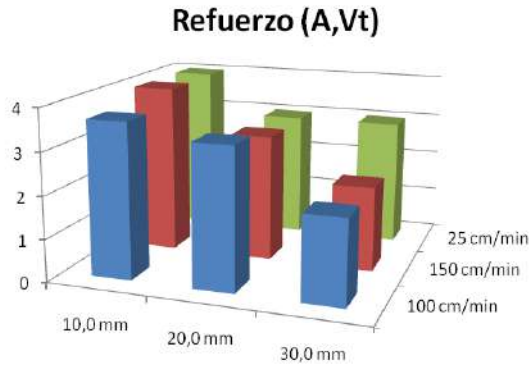
#### 3.1 MORFOLOGÍA.

En la Tabla 3 se presentan los resultados del promedio de las mediciones de anchos, refuerzos, ángulos de refuerzos, radio de pie [7], penetración y mojabilidad para cada una de las soldaduras de estudio.

PARÁMETROS DE OSCILACIÓN Vs MORFOLOGÍA								
A (mm)	V <sub>t</sub> (cm/min)	Mojabilidad	Ángulo α (°)	Ancho (mm)	Refuerzo (mm)	Radio de pie (mm)	Penetración (mm)	Dilución (%)
10,0	150	0,20	140	20,5	4	1,01	2,8	40,1
20,0		0,12	157	24,7	3	3,30	1,7	49,4
30,0		0,06	158	33,7	2	3,58	1,2	38,9
10,0	100	0,19	145	19,9	4	1,40	2,9	44,3
20,0		0,14	159	24,7	3	2,34	2,3	46,1
30,0		0,06	161	34,4	2	2,73	1,8	35,6
10,0	25	0,22	137	18,4	4	1,23	2,5	35,0
20,0		0,11	149	26,3	3	3,14	2,0	32,7
30,0		0,08	150	36,1	3	1,97	2,4	32,9

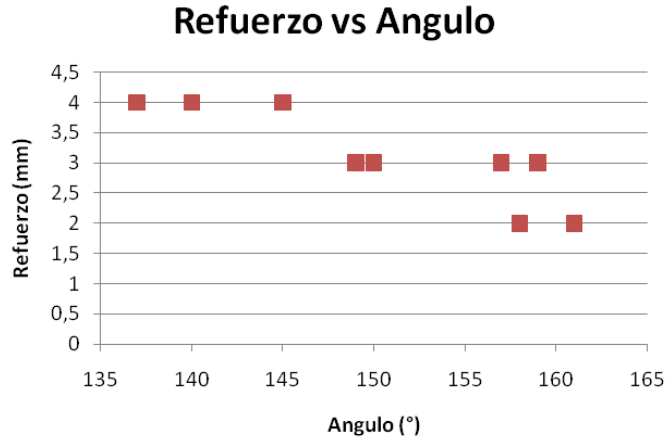
**Tabla 3.** Refuerzo, ancho, ángulo de refuerzo y mojabilidad de las soldaduras estudiadas.

En la figura 9, se tiene que el refuerzo de la soldadura muestra un patrón ascendente, cuando V<sub>t</sub> es constante, con excepción del cordón 1C que no es un cordón continuo y se da una medición variante en toda su dimensión. El refuerzo se mantiene aproximadamente invariable con una A constante, lo que muestra que la velocidad transversal es el factor que influye más en el tamaño del refuerzo de los cordones.



**Figura 9.** Refuerzo Vs (A, Vt).

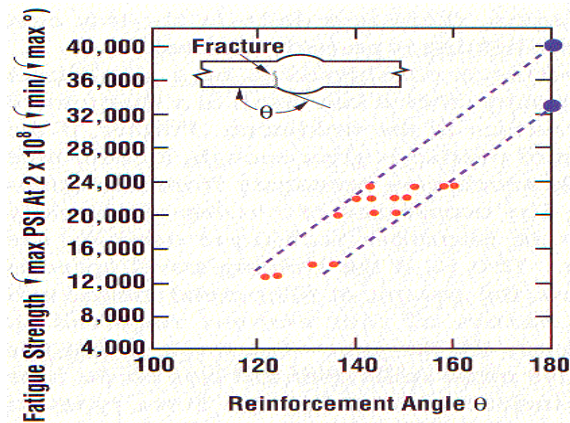
La excepción del cordón 1C (25 cm/min, 30 mm, 3mm) que no concuerda con los resultados de los otros cordones se explica porque no alcanza a formar un recorrido constante, sino un recorrido transversal debido a que la Velocidad de recorrido (V) es menor que la Velocidad Transversal (Vt), dando como resultado una soldadura en ZIG-ZAG no uniforme. Cuando se compara la forma del cordón con la amplitud, se tiene que a mayor A se tendrá una mejor continuidad en los cordones. En la figura 10 se tiene el gráfico del refuerzo Vs. el ángulo del refuerzo. Se observa que los ángulos aumentan escalonadamente con la reducción del tamaño del refuerzo: para refuerzos de 4 mm se obtienen ángulos entre 135° y 145°, para refuerzos de 3 mm se tienen ángulos entre 147° y 157° y, finalmente, para refuerzos de 2 mm el ángulo está entre 157° y 162°. Ángulos grandes en los cordones incrementan su resistencia a la fatiga (fig. 11), al ser un menor concentrador de esfuerzos.



**Figura 10.** Refuerzo Vs. Angulo de pie.

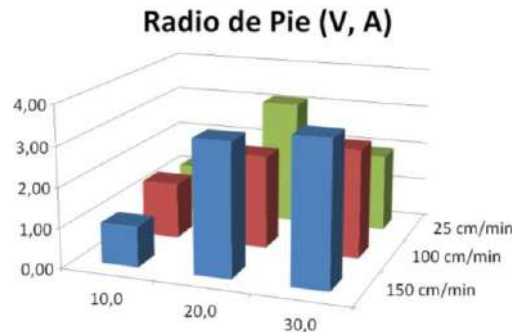
Se tiene como criterio de aceptación y rechazo en refuerzos de soldaduras de códigos de puentes y estructuras que admiten un máximo de 3 mm [8,9] debido a que daría ángulos de refuerzo de ~150°, lo que representaría valores de resistencia a la fatiga relativamente altos (fig. 11), este refuerzo se logra con A de 20 mm.





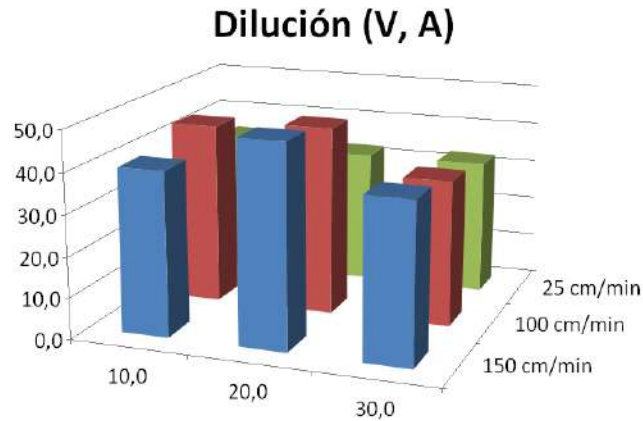
**Figura 11.** Resistencia a la fatiga Vs. ángulo de refuerzo [10].

El radio de pie (fig. 12) presenta una tendencia muy variable, en general cuanto mayor es el ancho y la  $V_t$  de los cordones, mayor será el radio de pie. Se tiene que el cordón 3C posee el mayor R, y el refuerzo más pequeño y por tanto una resistencia a la fatiga grande según esto; este cordón tendría las mejores propiedades de resistencia para aplicaciones estructurales y se supone, que este tipo de cordón sería el ideal para el pase final de una junta ya que posee en términos generales una buena apariencia (alto N, uniforme) y una resistencia bastante alta (relación refuerzo y ángulo).







**Figura 12.** Radio de pie Vs. ( $V_t$ , A).

Para la dilución (fig. 13) se ve una tendencia de cambio respecto a la velocidad cuanto mayor es esta, mayor será la dilución, con cordones de tamaño grande (más de 20 mm). Las mayores diluciones se lograron con una  $V_t$  de 150 y 100 cm/min y con A entre 10 mm y 20 mm. Estos porcentajes de dilución son importantes para aplicaciones de protección a la corrosión o de desgaste (*hardfacing*, *cladding* o *surfacing*), y son deseables para evitar una excesiva dilución que degrada las propiedades de la capa.



**Figura 13.** Dilución Vs. (Vt, A).

La tabla 4 muestra los tipos de penetración típicos, para las soldaduras se acomoda además otro tipo de penetración diferente, que se denomina en esquina debido a que estas soldaduras osciladas tienen a presentar este patrón. La mayor penetración se alcanza para el cordón 3B, esto no se esperaría ya que es normal que velocidades bajas den mayor dilución [11], se ve además que la variable más influyente en la penetración para estas soldaduras osciladas no es la velocidad de recorrido sino la velocidad transversal, ésta es la que define la variedad de formas de penetración en las soldaduras (tabla 4), así para cordones de baja Vt se tiene una mayor susceptibilidad a penetración en esquinas (periféricas).

CORDÓN	FORMA DE PENETRACIÓN
1B	 En esquina.
1C	 En esquina.
3C	 Simple
2A	 Periférica

**Tabla 4.** Formas de penetración [12].


### 3.2 APARIENCIA:



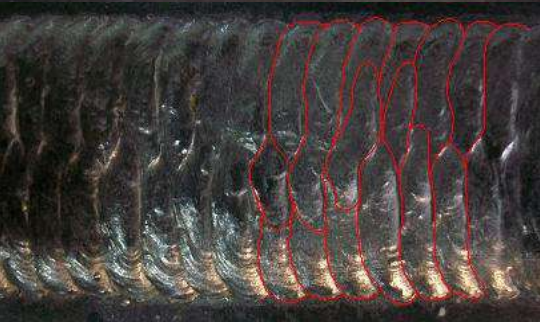


En la tabla 5 se muestran las mediciones para la apariencia de cada cordón de soldadura.

APARIENCIA			
A (mm)	Vt (cm/min)	Paso (N)	Porcentaje de Llenado
10,0	150	36	100
20,0		25	100
30,0		18	98
10,0	100	27	100
20,0		19	100
30,0		12	96
10,0	25	10	97
20,0		4	90
30,0		2	73

**Tabla 5.** Número de surcos, áreas teóricas y de soldadura y % de llenado.

**Patrones de los surcos:** En la tabla 6 se puede observar el registro fotográfico de los patrones de surcos en las soldaduras. En la imagen **1A** se presenta un patrón en forma elíptica desde los extremos que se junta en el centro, lo que implica una Vt baja. En las imágenes **1B** y **1C** se incrementa la amplitud lo cual, combinado con Vt bajas (menores que Vr), genera soldaduras con un patrón en zig-zag que posee surcos circulares que se van volviendo alargados con el aumento de la A. Cuando la Vt (100 y 150 cm/min) es mayor que Vr (7,5 cm/min) el patrón en amplitudes grandes deja surcos columnares que se vuelven alargados y de menor paso cuanto mayor es Vt como sucede con las soldaduras **2C** y **3C**; se va teniendo cada vez un cordón más uniforme con el aumento de Vt y la disminución de A. El cordón **3A**, posee la forma elíptica de una soldadura homogénea y tiene la mejor apariencia superficial, debido a que tiene un N grande y por tanto una apariencia más uniforme. Las soldaduras **2A**, **3A** y **3B** presentaron surcos alargados, cada vez más finos (como agujas) a medida que aumentaba la Vt y disminuía la A. Las soldaduras **3B**, **3C** y **2C** por el contrario presentaron surcos columnares, que se hacía más gruesos con la disminución de la Vt. Por el contrario las soldaduras **1A**, **1B** y **1C** presentan surcos circulares que se van volviendo elípticos con el aumento de la A.

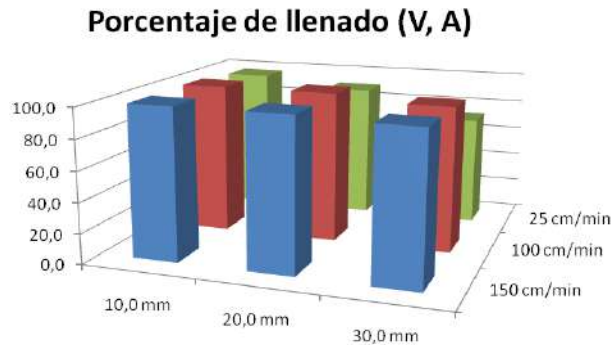
Cordón de Soldadura	Imagen
1A	

1B	
1C	
2C	
3C	
3A	

**Tabla 6.** Patrones cordones de soldadura (CS).

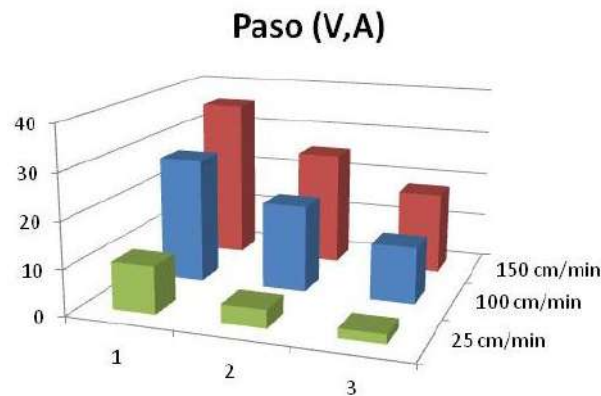
**Porcentaje de llenado:** En la Figura 14 se muestra el gráfico del porcentaje de llenado de las soldaduras en función de la amplitud y la velocidad transversal. El porcentaje de llenado aumenta con el incremento de la velocidad transversal cuando se mantiene constante la amplitud y tiende a aumentar

con la reducción en la amplitud cuando se mantiene  $V_t$  constante, este efecto es más pronunciado a bajas velocidades. El menor porcentaje de llenado fue del 73% para  $A=30\text{mm}$  y  $V_t=25\text{ cm/min}$  (C1), que se debe a que la  $V_t$  está en el límite para que se den cordones en zigzag. Las soldaduras de mayor  $V_t$  y menor amplitud tendieron a llenar el 100% del área, y las demás tuvieron valores muy cercanos, entre el 96 y el 98%.



**Figura 14.** Porcentaje de llenado (A,  $V_t$ )

**Número de surcos por unidad de longitud (paso):** con este parámetro es posible determinar la uniformidad y continuidad del cordón de soldadura. En la figura 15 se ve el número de surcos por 2". A medida que la  $V_t$  se incrementa la distancia entre surcos disminuye (mayor N/pulgada) dando soldaduras con mejor acabado superficial. También se nota que a menor amplitud el N/pulgada se incrementa y el máximo se presenta en las condiciones de mínimo A y máximo  $V_t$ , lográndose la soldadura más suave (*smoothness*) y de mejor apariencia o acabado superficial con un valor de 36 surcos/pulgada.



**Figura 15.** Número de surcos/pulg. (A,  $V_t$ )

#### 4. CONCLUSIONES:

- Los aspectos geométricos desempeñan un papel importante en la calidad de las soldaduras ya que no solo definen la estética del cordón, sino sus propiedades físicas y por ende su conveniencia para un servicio
- Los valores de Mojabilidad fueron similares cuando se tenía la misma magnitud, esta variable cambia de forma más notoria en soldaduras con patrones tendientes a formas no rectas.

- Se puede controlar el tamaño del refuerzo de la soldadura y con este su ángulo de refuerzo usando variaciones en la amplitud de aplicación.
- Las amplitudes más grandes producen soldaduras con refuerzos más pequeños los cuales aumentan el ángulo del refuerzo.
- Con el control de la velocidad transversal y la amplitud de las soldaduras se puede tener un mejor control de la resistencia a la fatiga de las soldaduras.
- El control de la amplitud de aplicación de la soldadura está relacionado con la resistencia a la fatiga de las soldaduras, debido a que modifica el ángulo de refuerzo de los cordones.
- Las soldaduras con menor  $V_t$  (25 y 100 cm/min) y mayor  $A$  (20 y 30mm) presentaron patrón de surcos en forma de zigzag. El resto de soldaduras con  $A$  de 10 y 20 mm forman patrones de surcos elípticos. Las soldaduras con grandes  $A$  (30mm) y altas  $V_t$  (100 y 150 cm/min) presentan surcos alargados.
- El área de llenado superficial aumenta con el incremento en la velocidad transversal y llega al 100% con la máxima velocidad.
- A medida que la  $V_t$  se incrementa la distancia entre surcos disminuye (mayor N/pulg.) dando soldaduras con mejor acabado.
- La reducción en la amplitud puede ser la variable que más aumenta el N/pulg. seguido del aumento en la  $V_t$ .

## 5. AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, a la Dirección Nacional de Laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia por el proyecto de adquisición y renovación de equipos, al Grupo de Soldadura y al Laboratorio de Soldadura

## 6. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Alam, M.M. Barsoum, Z. Jonsén, P. Kaplan, A.F.H. Häggblad, H.A°. The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behavior of laser hybrid welded eccentric fillet joints. *J. Applied Surface Science* 256, 1936–1945, 2010.
- [2] M. D. Chapetti and J. L. Otegui, Controlled toe waviness as a means to increase fatigue resistance of automatic welds in transverse loading, *Int. J. Fatigue* Vol. 19, págs. 667-675. 1997.
- [3] M.D. Chapetti and J.L. Otegui Importance of toe irregularity for fatigue resistance of automatic welds, *Int. J. Fatigue* Vol. 17, págs. 531-538, 1995.
- [4] American Welding Society. Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding, C5.6-89R, Lejeune Road Miami, Florida, 1989.
- [5] Jorge Enrique Giraldo, Relación entre las variables del proceso de soldadura con la microestructura, la forma y la conveniencia para el servicio, conferencia sexto encuentro Nacional de materiales: Modulo metales, Universidad de Antioquia, 2010.
- [6] Abel Díaz, Diseño estadístico de experimentos, Editorial Universidad de Antioquia, 1999.

- [7] American Welding Society, Standard Welding terms and definitions, ANSI/AWS D3.0-94, Lejeune Road Miami, Florida, 1996.
- [8] American Welding Society. Structural Welding Code-Steel, ANSI/AWS D1.1-96, Lejeune Road Miami, Florida, 1996.
- [9] American Welding Society. Bridge Welding Code, ANSI/AASHTO/AWS D1.5-95, Lejeune Road Miami, Florida, 1995.
- [10] Giraldo, J. E. En: Tecnología de soldadura. Modulo 7: Discontinuidades de la soldadura, pág. 1-27, 1998.
- [11] Robert W. Messler, Jr, Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-Vch, 2004.
- [12] N. Okui, D. Ketron, F. Bordelon, Y. Hirata, y G. Clark, A Methodology for Prediction of Fusion Zone Shape, The welding journal, febrero 2007.