

# Sección de Ingeniería Mecánica

## ESTUDIO DE LA SOLDADURA EN EL ACERO CORRUGADO

Por: César Chaves R.  
Profesor Tecnología Mecánica

### INTRODUCCION

Para un Ingeniero en general y para el Mecánico fundamentalmente, es indispensable conocer las propiedades de los materiales con los cuales trabaja. Esta verdad evidente motivó a la Sección de Materiales Metálicos del Departamento de Tecnología Mecánica de la Facultad de Minas, a realizar un Proyecto de Grado sobre el estudio de la Soldadura en el Acero Corrugado utilizado para reforzar el concreto. Como estudiante de Ingeniería Mecánica realicé dicho proyecto y en el siguiente artículo presento los resultados obtenidos.

Para que el acero utilizado correspondiera a uno de fabricación nacional, se escogieron varillas de 3/4" de diámetro de acero doble punto de alta resistencia, fabricadas por la empresa SIMESA, la cual colaboró con el proyecto proporcionando el material necesario para la realización del estudio. En cuanto a la soldadura se refiere el proceso se efectuó soldando las varillas al tope, como lo realizan en una empresa de la ciudad de Medellín, la cual distribuye el acero corrugado soldado. Dicha empresa soldó el material utilizado en los ensayos.

El ensayo CHARPY V., se utilizó como herramienta principal en el análisis, sirviendo también de auxiliares valiosos los ensayos de tracción y de dureza así como el análisis de microestructuras.

### 1. EL MATERIAL NO SOLDADO

#### 1.1 COMPOSICION QUIMICA

SIMESA proporcionó la siguiente composición química del material:

C : 0.25 % Mn: 1.20% Si: 0.67% P : 0.025%  
S : 0.033% Ni : 0.06% Cr: 0.08% Cu: 0.13 %  
Mo: 0.02 %

#### 1.2 DUREZA

A las probetas para ensayo CHARPY V., se les hicieron dos mediciones de



dureza sobre cada una, cerca a la entalla, para luego promediar estos dos valores y así determinar la dureza sobre cada una de las veintidós probetas existentes. El valor promedio de las veintidós obtenido fue 209HV para una carga de 62.5 Kg., siendo el valor mínimo 200 HV y el máximo 215 HV.

### 1.3 ANALISIS DE MICROESTRUCTURAS

La observación de cuatro probetas con aumento de 50X, 100X, 200X y 400X mostró, para la sección transversal del acero, homogeneidad de estructuras, apareciendo aproximadamente 40% de perlita, lo cual es normal en un acero de 0.25% de Carbono.

### 1.4 TRACCION

A fin de averiguar las propiedades mecánicas utilicé probetas para ensayos de tracción de acuerdo a las normas ASTM A-370 <sup>(1)</sup>. Los valores promedios obtenidos en cuatro ensayos fueron los siguientes:

Resistencia a la tracción ( $\sigma_{tr}$ , Kg/mm<sup>2</sup>): 69.8;

Máx.: 70.3; Mín.: 68.6

Límite Elástico ( $\sigma_e$ , Kg/mm<sup>2</sup>): 46.2;

Máx.: 47.9; Mín.: 45.0

Resistencia a la rotura ( $\sigma_{rot}$ , Kg/mm<sup>2</sup>): 123.1;

Máx.: 126.1; Mín.: 118.2

% de alargamiento en 5 cm ( $\lambda$ ): 27.9;

Máx.: 29.2; Mín.: 27.0

### 1.5 RESISTENCIA AL IMPACTO

El estudio de la resistencia al impacto constituye una herramienta fundamental en el presente análisis. De entre los ensayos existentes para estudiar las propiedades del material al impacto, se escogió el CHARPY V que es muy utilizado para los aceros. El esquema de la forma en que se efectúa el ensayo, así como de la máquina y la probeta utilizada, aparece en la Figura 1. En la fabricación de las probetas y en la realización de los ensayos se siguió la norma ASTM E23-72 <sup>(2)</sup>.

En el estudio CHARPY V se revientan varias probetas a diferentes temperaturas, se mide la energía necesaria para partir la probeta y se grafica la energía absorbida por la probeta en su rotura (en Kg-mt) contra la temperatura, obteniéndose la curva de impacto del material. En general, al aumentar la temperatura aumenta la ductilidad de un material y correlativamente aumenta la energía absorbida en el ensayo de impacto puesto que ésta se hace mayor a mayor ductilidad. Los aceros (ferríticos, fundamentalmente) son frágiles a bajas temperaturas y dúctiles a altas, dependiendo los valores de temperatura para los cuales la absor-



ción de energía es mínima (comportamiento frágil) o es máxima (comportamiento dúctil) de cada acero en particular. Este hecho se refleja en la curva de impacto al aparecer en ella tres zonas: Una de mínima absorción de energía, para las temperaturas inferiores de la curva; otra de absorción máxima, para las temperaturas superiores, y en las temperaturas intermedias aparece una zona que corresponde a la transición del material de frágil a dúctil, en la cual a pocos aumentos de temperatura se eleva bastante la energía absorbida al impacto. El concepto de temperatura de transición, para un material, está relacionado con este último hecho y mediante él, se desea establecer la temperatura representativa de esa zona de transición de dúctil a frágil <sup>(3)</sup>.

Para obtener la curva de impacto realicé ensayos a seis temperaturas diferentes, de a cuatro ensayos por temperatura para cinco de ellas y dos para una, resultando en total veintidós ensayos. La curva obtenida aparece en la Figura 2. El rango que se observa es producto de la construcción de la curva con los valores más altos, y de la curva con los valores menores para cada temperatura. A 45°C está ya casi alcanzado el mínimo de la gráfica, correspondiendo a 0.95 Kg-mt para la curva construida con los valores inferiores y 1.35 Kg-mt para la de los valores superiores; el valor máximo corresponde aproximadamente a 120°C estando el rango entre 10.5 y 11.6 Kg-mt. Utilizando la definición de temperatura de transición como aquella que corresponde a la energía promedio entre los valores máximo y mínimo, tengo, de acuerdo a la curva obtenida, que el acero corrugado de SIMESA presenta un rango de 55° a 57°C como temperatura de transición.

## 2. EL MATERIAL SOLDADO.

En general las varillas del acero de construcción no se sueldan en la ciudad de Medellín, sin embargo, en una empresa los pedazos sobrantes los unen soldándolos por resistencia y uniendo las varillas al tope. En la Figura 3 se aprecia el esquema de la forma en que se realiza el proceso, en el cual, el calor necesario para fundir el metal en la zona a soldar, se proporciona haciendo pasar un flujo de corriente de relativo bajo voltaje y alto amperaje a través de aproximadamente veinte (20) centímetros de material. Las mordazas que agarran las varillas que se soldarán sirven también de electrodos; una de estas mordazas es fija y la otra desplazable, y como es necesario ejercer cierta presión en el área de unión, ésta se aplica manualmente.

Es de anotar que la zona de soldadura es muy marcada, y a nivel microscópico se observa como una franja de aproximadamente 1 mm. de espesor.

### 2.1 DUREZA

El estudio de dureza se hizo mediante la probeta que aparece en la Fig. 4, que fue construida para ello. En la parte central de la probeta se aprecia la línea de soldadura, la cual se identificó plenamente en la probeta atacándola con Nital 4%. Esta probeta permitió estudiar la forma en que variaba la dureza en la zona afectada térmicamente debido al proceso de soldadura, y el resultado se observa



en la Figura 5 en la cual se aprecia cómo la dureza va aumentando desde 213 HV a 14 mm de la línea de soldadura, hasta 229 HV a 2 mm de la mencionada línea para caer bruscamente a 195 HV en toda la línea.

## 2.2 ANALISIS DE MICROESTRUCTURAS

Con el equipo del laboratorio de materiales del Departamento de Tecnología Mecánica se tomaron y revelaron microfotografías las cuales servirán de auxilio para conocer lo sucedido con las varillas en este aspecto. En la fotografía 1, se aprecia, a 50 aumentos (50X), la franja de soldadura (zona clara, zona ferrítica) y a lado y lado de ella, se observa una zona muy perlítica (zona oscura); además de la ya anotada, es decir, la zona soldada es muy ferrítica; otra característica importante es el tamaño de grano el cual es demasiado grande y muy poco homogéneo, si lo comparamos con el material no afectado térmicamente que aparece en la fotografía 2 para el mismo nivel de aumentos. Otra característica importante es la forma de agujas (acicular) de la ferrita (estructura clara), lo cual es propio de una estructura widmastatten que aparece cuando la temperatura de calentamiento es muy elevada y la velocidad de enfriamiento es muy rápida, como es el caso de la zona analizada.

Inmediatamente nos comenzamos a alejar de la franja de soldadura encontramos esa zona perlítica de la cual ya hablamos y en la que aparece la ferrita acicular, bien bordeando los granos perlíticos o en el interior de ellos, lo cual lo podemos apreciar en la fotografía 3 con 100X. Esta situación se mantiene, en general, a medida que nos alejamos de la línea de soldadura pero va aumentando la finura de las agujas y de los granos y la ferrita va cambiando de acicular a granular, hasta que aparece la estructura del material en estado inicial como es el caso de la fotografía 2. La diferencia que va apareciendo se explica por el hecho de que la temperatura máxima de calentamiento es diferente a través de toda la zona afectada térmicamente siendo más baja a medida que nos alejamos del sitio donde el material es soldado, donde alcanza la temperatura de fusión.

## 2.3 TRACCION

Lo mismo que para el material no soldado, se realizaron cuatro ensayos sobre probetas construidas según la norma ASTM A-370. Dos de ellas reventaron por la soldadura y las otras dos no, estableciéndose la diferencia entre ellas en lo relativo a propiedades mecánicas, por el aumento de fragilidad que se aprecia en las probetas que reventaron por la soldadura, en comparación con las que no reventaron, lo cual se puede ver en la Figura 6 donde aparecen las curvas de tracción de las cuatro probetas y donde es observable la considerable disminución de la deformación plástica en las dos probetas frágiles y cómo, además, no hubo formación de cuello en ellas en la zona de rotura.

Los resultados de las cuatro probetas aparecen a continuación, apareciendo en primer lugar los correspondientes a las probetas que no reventaron por la soldadura (probetas 1, 2).



PROBETA	$\sigma_{el}$ Kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{tr}$ Kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{rot}$ Kg/mm <sup>2</sup>	$\lambda$ o/o
1	46.7	70.5	127.8	22.4
2	46.1	70.3	121.0	22.2
3	47.1	69.3	73.9	6.0
4	46.4	68.7	72.1	6.0

Obsérvese cómo el porcentaje de alargamiento está muy por debajo en las probetas 3 y 4 con respecto a las probetas 1 y 2, e igualmente cómo los valores de límite elástico ( $\sigma_{el}$ ) y resistencia a la tracción ( $\sigma_{tr}$ ) no varían mucho estando dentro de las normas ASTM A-615<sup>(4)</sup> para aceros corrugados para reforzar el concreto.

## 2.4 RESISTENCIA AL IMPACTO

La curva se construyó realizando ensayos a cuatro temperaturas diferentes. Las probetas fueron construídas tratando al máximo de que la entalla quedara sobre la línea de soldadura, lo que en general se logró, quedando en el peor de los casos, en una probeta, a aproximadamente 2 mm.

En la Figura 2 también aparece la curva de impacto del material soldado, e igualmente se graficó un rango de acuerdo a los valores superiores e inferiores obtenidos.

En la gráfica se aprecia cómo el valor de energía mínimo corresponde a un valor de temperatura cercano a los 15°C y el rango de valores obtenidos para 26°C (la menor temperatura utilizada) es de 1.5 a 1.83 Kg-mt. Ya en 208°C se ha alcanzado el máximo, siendo el rango de 6.2 a 6.45 Kg-mt. En lo relacionado con la temperatura de transición, ésta está entre 85°C y 93°C.

## 3. CONCLUSIONES:

Los resultados obtenidos muestran lo siguiente:

1. El porcentaje de alargamiento de la zona soldada es muy inferior: 6% contra 22% según el ensayo de tracción.
2. La temperatura de transición se eleva en el material soldado desde 55°C - 57°C hasta 85°C - 93°C.
3. La energía absorbida máxima disminuye para el material soldado desde 10.5 - 11.6 Kg-mt hasta 6.2 - 6.45 Kg-mt.
4. La energía absorbida a temperatura ambiente en Medellín (25°C) es de 3.06 - 4.05 Kg-mt para el material en estado inicial, mientras que para el soldado es de 1.25 - 1.83 Kg-mt.
5. En general, la curva de impacto para el material soldado sufre un desplazamiento hacia la derecha, o lo que es lo mismo, para cualquier valor de tempe-



ratura, la energía absorbida siempre es mayor para el material no soldado, siendo la disminución de energía, debida a la soldadura, tal que, la disminución porcentual nunca es inferior al 50<sup>o</sup>o.

Los numerales anteriores muestran el efecto fragilizador de la soldadura sobre el acero en estudio, el cual obedece a varios factores, de los cuales señalaré tres fundamentales: El primero está relacionado con la concentración de esfuerzos y la triaxialidad que aparece en la zona ferrítica. Cuando el material está sometido a fuerza axial tiende a alargarse en la dirección de la fuerza y a contraerse en las direcciones perpendiculares, sucediendo que la zona ferrítica, que es menos resistente y más dúctil que la perlítica que la rodea, trata de contraerse más que su zona vecina con la consiguiente aparición de esfuerzos en las direcciones en las cuales el material intenta contraerse pero es restringido para ello, resultando de estos esfuerzos triaxiales y concentración de esfuerzos la fragilidad en dicha región.

El segundo factor que juega papel importante en la "pérdida" de propiedades en impacto por efecto de la soldadura, es el aumento del tamaño de grano.

El tercer elemento importante en cuanto a la fragilización observada en el material soldado es la existencia del tipo de estructura que aparece en gran parte de la zona afectada térmicamente, y particularizando, hago referencia a la forma acicular de la ferrita. Una estructura en forma de aguja puede constituirse en un concentrador de esfuerzos y servir de punto de inicio de una fractura frágil.

En lo que se refiere al ensayo de impacto es necesario anotar que sus resultados no pueden ser utilizados directamente en el diseño, como sí ocurre con el ensayo de tracción; es decir, no permite establecer cuantitativamente las cargas que resistiría un material determinado, debido a las condiciones tan específicas en las que se realiza el ensayo. Sin embargo, da una idea de las características fragilizantes que presenta el material e igualmente es un gran auxiliar desde el punto de vista de comparación de dos materiales. Teniendo presente esto, se puede afirmar que en construcciones en donde haya cargas de impacto o cargas dinámicas en general; en estructuras en donde haya algún factor concentrador de esfuerzos, una entalla por ejemplo; o en utilización a bajas temperaturas, se debe descartar el empleo del tipo de soldadura estudiada para el acero corrugado puesto que la región soldada representa en comparación con el acero inicial "otro" material de peores propiedades al impacto.



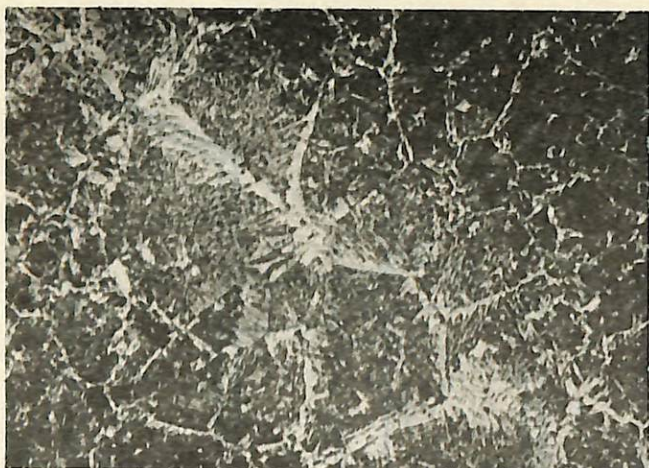


Foto No. 1



Foto No. 2

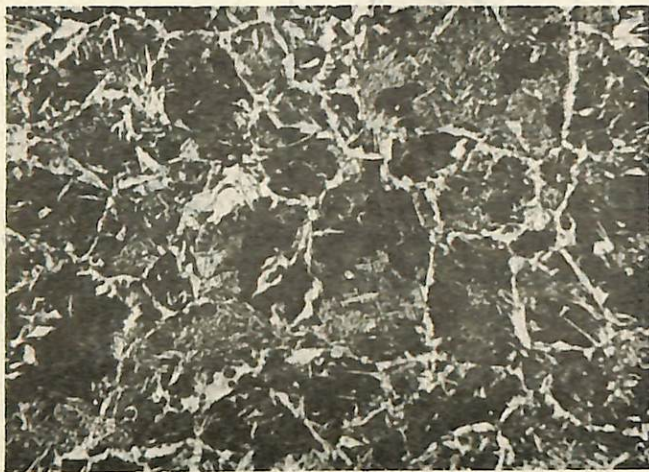
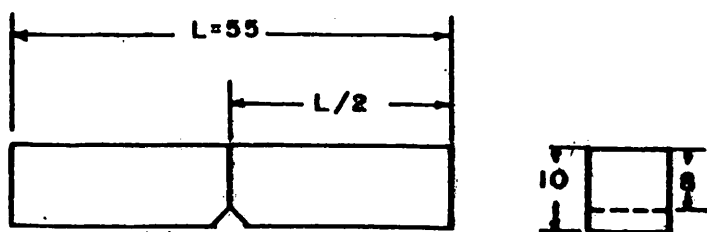
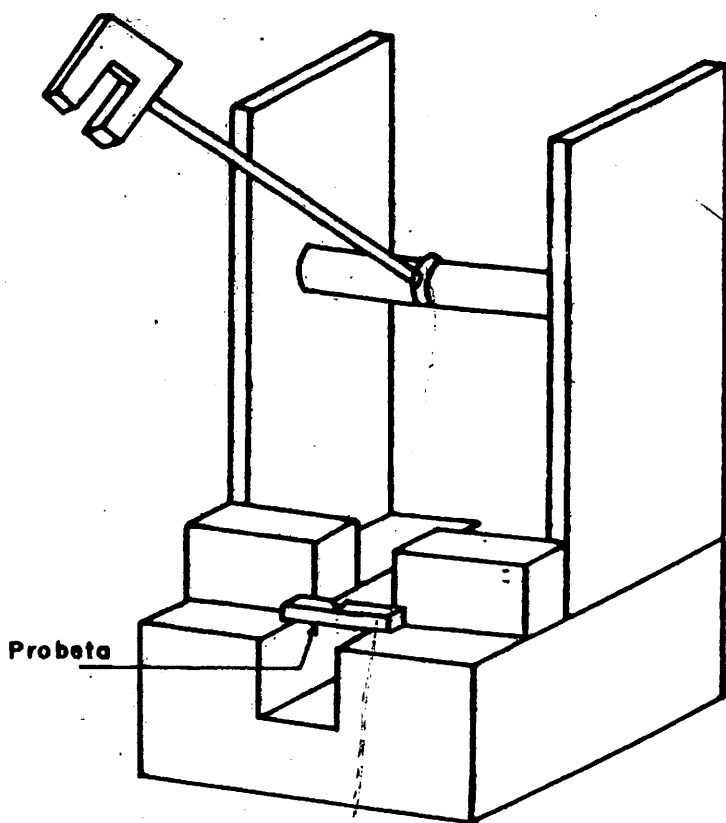


Foto No. 3



Dimensiones en m.m.

Fig. 1

Esquema de la máquina y de la probeta para ensayo Charpy



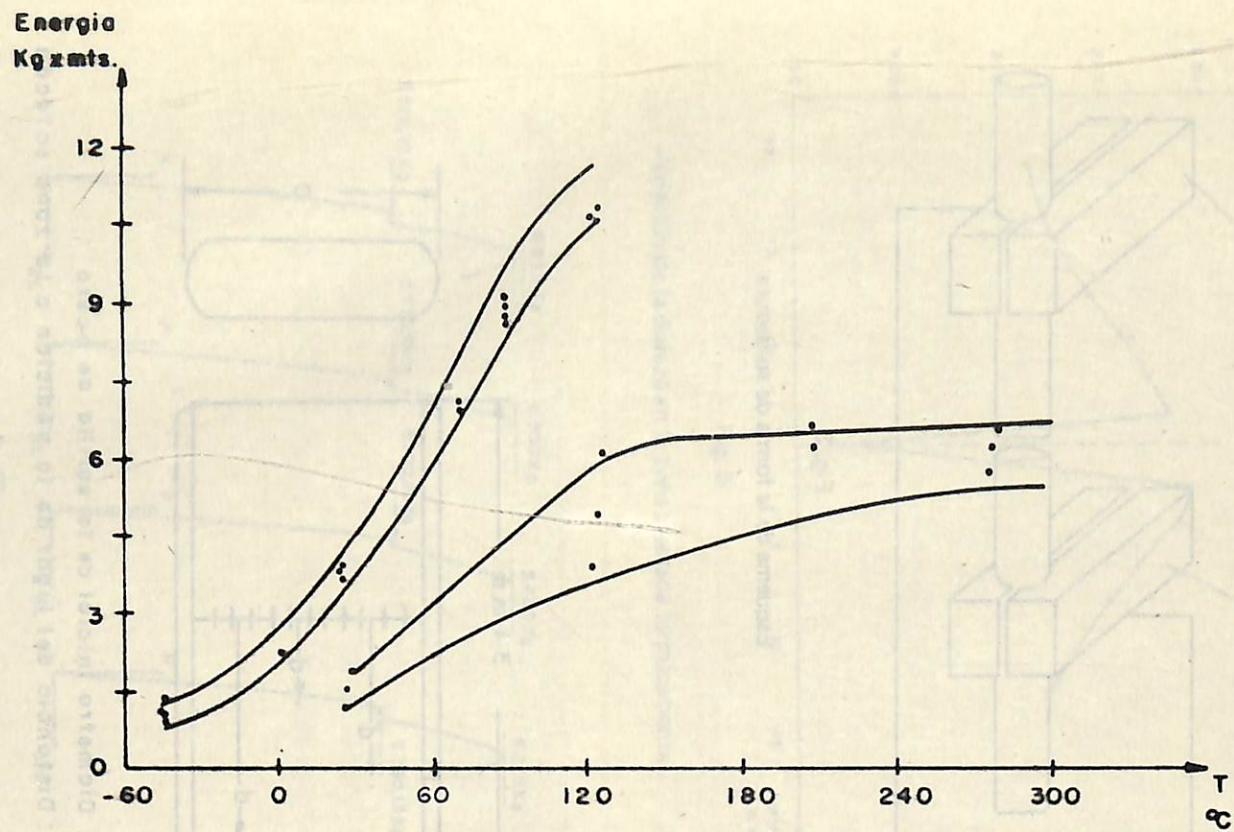


Fig. 2

Curvas de impacto



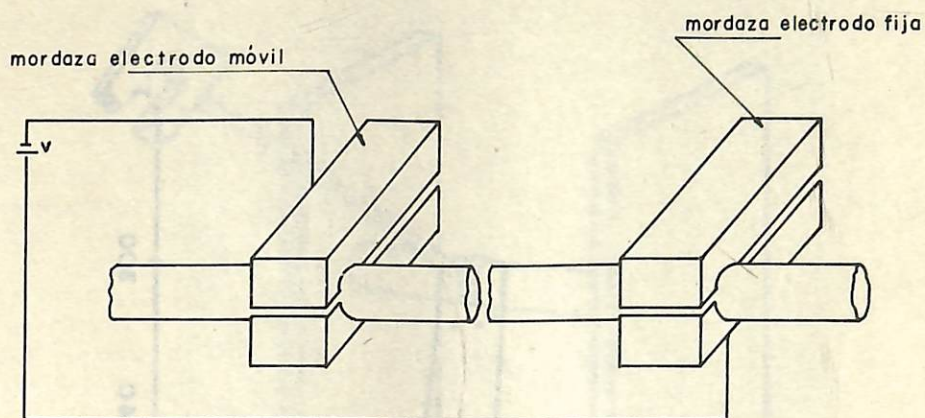
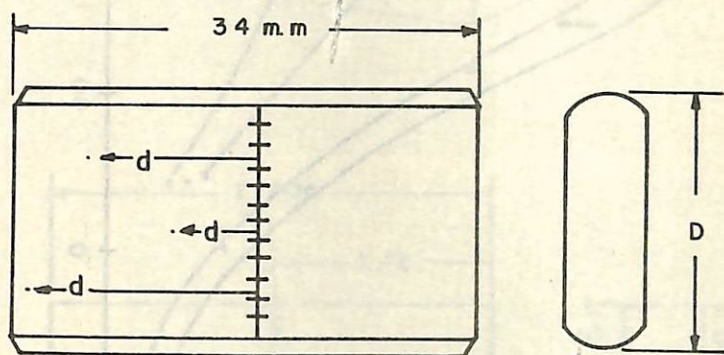


Fig. 3

Esquema de la forma de soldadura



D: Diámetro inicial de la varilla de acero

d: Distancia del lugar de la medición a la zona soldada

Fig. 4

Probeta para Dureza  
(material soldado)



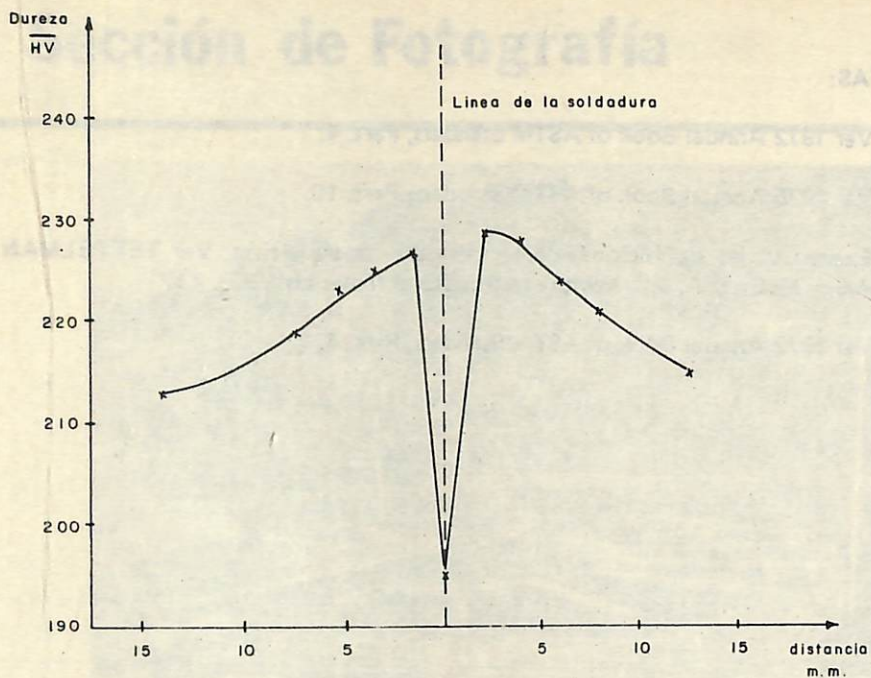


Fig. 5

Variación de la dureza en la zona afectada termicamente

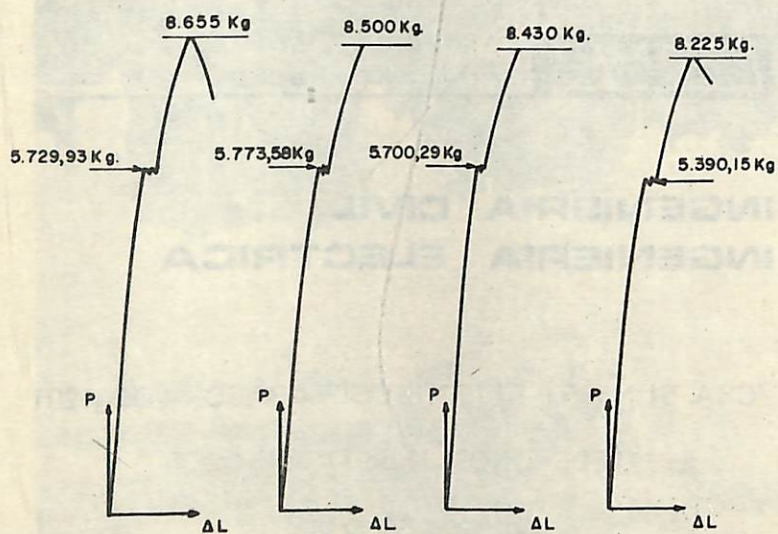


Fig. 6

Curvas de tracción de probetas soldadas