



D-6774

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

" EFECTO DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES SOBRE LAS
PROPIEDADES DE LAS UNIONES SOLDADAS "

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

JAVIER F. KRONFLE M.

GUAYAQUIL - ECUADOR

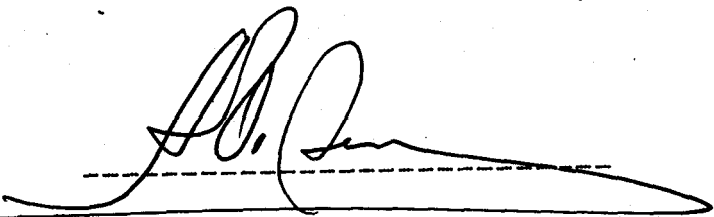
1983

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a la
E.S.P.O.L., y al Ing. Antonio Viteri M.,
Director de Tesis.

DEDICATORIA

Esta Tesis la dedico al Señor, a mis
padres y hermano, a mi esposa y a mis
hijos.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Viteri M.', is written over a horizontal dashed line. A solid horizontal line is drawn below the dashed line, extending across the width of the signature.

ING. ANTONIO VITERI M.
Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral ".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



JAVIER F. KRONFLE M.

RÉSUMEN

En la presente tesis, se lleva a cabo un estudio de la influencia de los esfuerzos residuales, producto de soldaduras, sobre el desempeño de las uniones soldadas. Se exponen las causas por las que se producen, así como los diversos métodos existentes para la medición y alivio de los mismos.

En la parte experimental, se efectúa el proceso de soldadura bajo condiciones diferentes, a la vez que se investigan la producción y alivio de los esfuerzos residuales; paralelamente, se analiza el método más apropiado de producir soldaduras minimizando estos esfuerzos.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	XI
INTRODUCCION	16
CAPITULO 1	
Origen de los esfuerzos residuales	18
1.1. Esfuerzos residuales debido a deformación	18
1.2. Esfuerzos residuales debido a soldaduras	22
1.2.1. Esfuerzos residuales debido al proceso de contracción del cordón y la ZAC (zona afectada por el calor)	31
1.2.2. Esfuerzos residuales debido al enfriamiento más rápido en la superficie	33
1.2.3. Esfuerzos residuales debido a transformación física	35
1.2.4. Superposición de los esfuerzos residuales debido a contracción, temple y transformación	36
1.3. Otras fuentes de esfuerzos residuales	39
CAPITULO 2	
Esfuerzos residuales en soldaduras	43
2.1. Distribución de esfuerzos	43
2.2. Influencia del proceso de soldadura	46

2.3. Influencia de la velocidad de enfriamiento	47
2.4. Influencia del metal base	53
2.5. Influencia de los parámetros de soldadura	53

CAPITULO 3

Los esfuerzos residuales, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas

3.1. Esfuerzo sobre la resistencia máxima de tensión	58
3.1.1. Fractura quebradiza o fractura inestable bajo esfuerzos aplicados pequeños	65
3.1.2. Efecto de tratamientos de alivio de esfuerzos en fracturas quebradizas de soldadura	69
3.2. Efecto sobre la resistencia a la fatiga	71
3.3. Efecto sobre el comportamiento de fractura	78
3.3.1. Posibilidad de usar el tratamiento para evaluación analítica de los esfuerzos residuales sobre el comportamiento de fractura de soldaduras	86
3.4. Efecto sobre la resistencia a la corrosión	87

CAPITULO 4

Métodos de medición de los esfuerzos residuales

4.1. Mecánicos	92
4.2. Moiré y técnicas asociadas	95
4.3. Rayos X	97
4.4. Magneto-Elasticidad	98

4.5. Ultrasonidos	99
4.6. Analíticos	102
4.7. Recubrimientos quebradizos	103
CAPITULO 5	
Métodos para alivio de tensiones residuales	106
5.1. Mecánicos	107
5.2. Métodos térmicos	110
CAPITULO 6	
Parte Experimental	118
6.1. Materiales utilizados	118
6.2. Obtención de soldaduras	119
6.3. Aplicación de Métodos de alivio de esfuerzos residuales	122
6.4. Investigación de esfuerzos residuales	126
6.5. Análisis del efecto de los esfuerzos residuales sobre las propiedades mecánicas	127
6.5.1. Dureza	127
6.5.2. Tracción	131
6.5.3. Presión interna	134
6.5.4. Impacto	135
6.6. Ensayos de corrosión	137
6.7. Análisis metalográficos	143

CAPITULO 7	
Discusión de resultados 160
CUNCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 179
TABLAS 183
BIBLIOGRAFIA 190

INDICE DE FIGURAS

FIG. No.	TITULO	PAG.
1	Distribución de esfuerzos resultantes de la laminación de una chapa	20
2	Proceso de reacción gas-metal bajo un arco, en el cual hay gran solubilidad de gas en el metal líquido, y difusión a través de la capa límite adyacente a la sup. líquida	26
3	Transferencia de la zona activa, controla la tasa de absorción de hidrógeno	28
4	Representación esquemática de los esf. residuales debidos a contracción, temple y transformación, y superposición de los MISMOS	32
5	Distribución típica de esf. residuales en soldadura a tope	44
6	Efecto de la tasa de enfriamiento en procesos de soldadura, sobre la resistencia (y tamaño de grano) del metal de soldadura	51
7	Distribución esquemática de esfuerzos en soldadura a tope, cuando cargas uniformes de tensión han sido aplicadas, y los esf. resultantes luego de liberar las cargas	62
8	Efecto de una muesca cortante y esf. residuales sobre el esfuerzo de fractura	67
9	Esquemas de uniones soldadas, determinantes en la producción	

	de ralla por fatiga, de acuerdo a cómo concentren tensiones en el pie de la soldadura	74
10	Causa y remedio para fractura de fatiga en el ensamble soldado de un eje y tambor centrífugo	77
11	Patrón de fracturas en una unión simple a tope efectuado en un acero SAE 4340, templado en aceite y temperado a 260° C, después de la prueba de fracturas inducidas por hidrógeno	81
12	Esfuerzos residuales $\sigma_y = f(x)$ y fracturas transversales	83
13	Geometría de la unión para Soldar a tope, y variables del proceso	120
14	Ensamble de sujeción para el proceso de soldadura con restricción	121
15	Ubicación de las resistencias eléctricas para efectuar el precalentamiento	123
16	Aspecto de las probetas para la medición de macrodureza	129
17	Distribución de material para obtención de probetas para ensayos de tracción, dureza y corrosión	130
18	Probeta para ensayo de tracción, según normas ASTM QW-462.1(a) sección reducida para planchas soldadas	132
19	Aspecto de las probetas de los diferentes procesos, luego de los ensayos de tensión	133

20	Ensayos de presión interna	136
21	Distribución de material para obtención de probetas para ensayo Charpy	137
22	Probetas para ensayo Charpy	138
23	Energía vs. temperatura del ensayo Charpy	140
24	Superficies de fractura de probetas de ensayo de impacto. Soldadura sin tratamiento	141
25	Superficies de fractura de probetas de ensayo de impacto. Soldadura con precalentamiento a 450° C	142
26	Observación a los 15 días de efectuado el proceso de soldadura con restricción y sin tratamiento	144
W	Observación a los 15 días de efectuado el proceso de sold. sin restricción y sin tratamiento térmico	145
23	Observación a los 15 días de efectuado el proceso de sold. con restricción y con precalentamiento a 450° C	146
29	Observación visual de las muestras de soldaduras, luego de haber sido limpiadas con ácido clorhídrico y enjuagadas en agua.	147
30	Observación visual de las muestras de soldaduras que fueron limpiadas con ácido clorhídrico y enjuagadas en agua; después de 5 horas de permanecer al medio ambiente	148

31	Aspectos microscópicos del acero usado en el proceso (A-36)	149
32	Observaciones microscópicas de la soldadura obtenida en el proceso sin tratamiento	151
33	Observaciones microscópicas de la soldadura obtenida con precalentamiento a 120 ^o C	153
34	Observaciones microscópicas de la soldadura obtenida con precalentamiento a 320 ^o C	154
35	Observaciones microscópicas de la soldadura obtenida con precalentamiento a 450 ^o C	155
36	Zona de fusión, soldadura sin tratamiento, 6.3X	157
37	Línea de fusión y ZAC, soldadura sin tratamiento, 10X	158
38	Zonas de fusión y ZAC en proceso de soldadura sin tratamiento, y con precalentamiento a 450 ^o C	159
39	Soldadura sin precalentamiento, sin restricción	161
40	Soldaduras sin precalentamiento, con restricción	161
41	Zonas de esfuerzos residuales. Detección por el método de recubrimientos frágiles	163
42	Distribución de durezas en el corte transversal a la soldadura, y anchos de zac	165

42.1	Variación en la distribución de dureza, y anchos de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 120°C	166
42.2	Variación en la distribución de dureza, y anchos de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 320°C	167
42.3	Variación en la distribución de dureza, y anchos de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 450°C	168
42.4	Variación en la distribución de dureza, y anchos de ZAC, cuando el proceso se efectúa con postcalentamiento a 900°C , 2 hrs.	169
43	Variación de la resistencia máxima a la tensión con la temp. de precalentamiento	172
44	Variación de la elongación con la temperatura de precalentamiento	173
45	Variación del límite de fluencia con la temperatura de precalentamiento	174

INTRODUCCION

La aplicación de la soldadura dentro de los procesos de fabricación, es cada vez mayor, y esto ha hecho que se desarrollen nuevas tecnologías tanto en la fabricación de aceros soldables como en los procesos de soldadura; y en las técnicas que minimicen las posibilidades de una disminución de las propiedades del metal base, y optimicen las velocidades de producción.

Uno de los problemas que se presentan en este proceso de fabricación, es la generación de esfuerzos residuales durante el proceso, debido a los cambios microestructurales que experimenta el metal base por la velocidad de enfriamiento, con la cual se produce la solidificación del metal de soldadura y las zonas adyacentes.

En el presente trabajo, se hace una recopilación de la bibliografía referente al tema, y se realizan una serie de pruebas con la finalidad de detectar la presencia de estos esfuerzos internos, y determinar su influencia en las

propiedades mecánicas de la unión soldada.

Se trata además, de establecer métodos y condiciones óptimas de soldadura, así como la determinación de procesos convenientes para el alivio de los esfuerzos residuales.

CAPITULO 1

ORIGEN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES

1.1. Esfuerzos Residuales debido a deformación

Las tensiones residuales o internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas. Las tensiones residuales se producen cuando un cuerpo sufre deformación plástica r i o uniforme <1>. Así por ejemplo, si se considera una chapa de metal que se está laminando, de forma que sólo se produce flujo plástico en las proximidades de las superficies, figura 1 (a). Las fibras superficiales de la chapa están deformadas en frío y tienden a alargarse, mientras el centro de la chapa no se ha alterado. Puesto que debe mantenerse la continuidad de la chapa es necesario que superficies y centro se acomoden por deformación. Las fibras del centro tienden a restringir el alargamiento de las fibras superficiales, a la vez que las fibras de la

superficie tratan de estirar las fibras centrales de la chapa. El resultado es un estado de tensiones en la chapa el cual origina una tensión elevada de compresión en la superficie y una tensión residual de tracción en el centro de la chapa, figura 1(b). En general el signo de la tensión residual producida por deformación no homogénea será opuesto al de la deformación plástica que la produjo. Por eso en el caso de la chapa laminada, las fibras superficiales, que fueron alargadas plásticamente en la dirección de laminación, quedará en un estado de compresión.

El sistema de tensiones residuales existente en un cuerpo debe estar en equilibrio estático, por lo que la fuerza total que actúa sobre cualquier plano que atraviese el cuerpo y el momento total de las fuerzas en cualquier plano deben ser nulos <1>. Para el estado de tensiones longitudinales de la figura 1(b), esto quiere decir que el área -que queda bajo las curvas de tensiones de compresión debe ser igual a la que queda bajo las tensiones de tracción. La situación no es tan

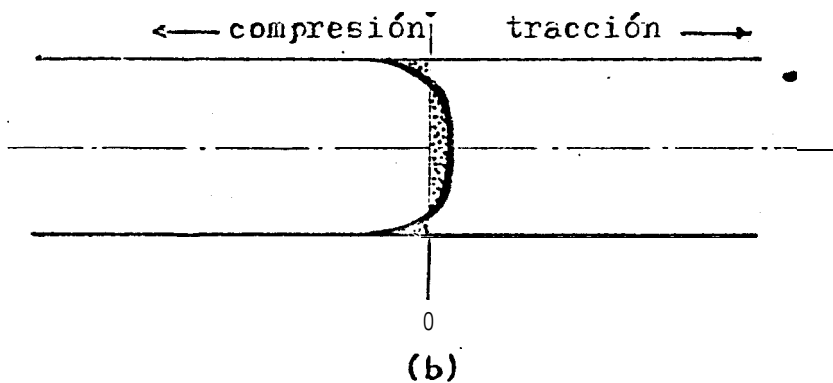
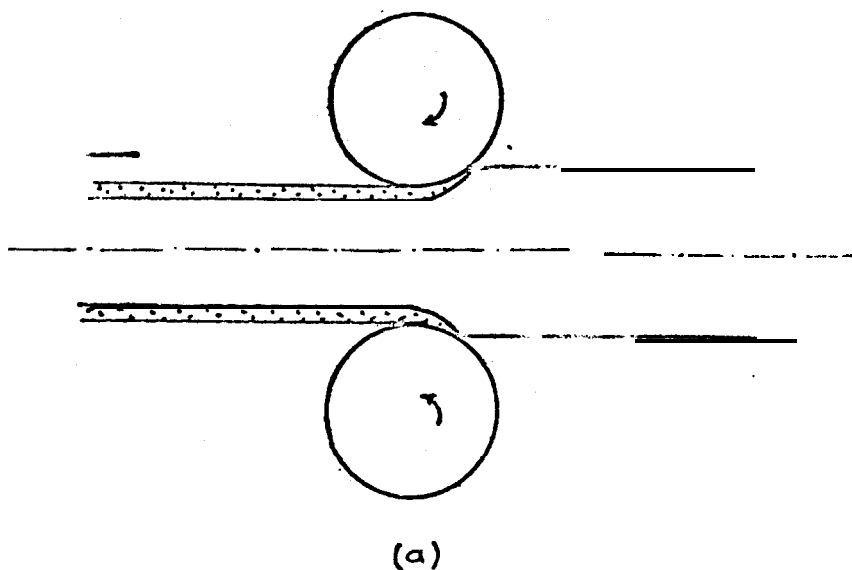


Fig. 1.- a) Deformación heterogénea en la laminación de la chapa
 b) Distribución resultante de las tensiones longitudinales residuales a través del espesor de la chapa. (esquema)

sencilla como se ha dibujado en la figura 1. Realmente, para hacer un análisis completo habría que considerarse las tensiones residuales en las direcciones del ancho y del espesor de la chapa, y el estado total de tensiones en un punto será el resultante de las tensiones existentes en las tres direcciones principales.

Las tensiones residuales sólo pueden ser elásticas. El valor máximo que llega a alcanzar la tensión residual es el límite elástico del material. Una tensión que sobrepase este valor, sin fuerza externa opONENTE, disminuiría automáticamente hasta alcanzar el valor de dicho límite.

En resumen, se tiene que como resultado de procesos de conformado, trabajado mecánico, y en general deformaciones en frío o caliente, se tiene la producción de esfuerzos residuales, los mismos que obedecerán a una modificación de la microestructura del material deformado; modificación que consiste en la

deformación de 10⁵ granos que conforman la microestructura. Además dichas tensiones residuales podrán alcanzar como máximo valor el límite elástico del material.

1.2. Esfuerzos residuales debido a soldaduras

Para entender el proceso de formación de esfuerzos residuales debido a soldaduras, se empezará por explicar el mecanismo de operación del arco+

El caso más simple a considerar es el arco termoiónico de corriente directa, usado en soldadura con gas inerte con cátodo de tungsteno+ Los electrones son emitidos desde el cátodo de tungsteno calentado, y con acelerados bajo el campo aplicado ganando así energía, la cual es luego perdida por la colisión con las moléculas de gas en el arco y así estas moléculas de gas se elevan a una gran temperatura en el arco, la cual llega a ser ionizado térmicamente y conductor <2>.

efecto de fragilización.

En el segundo tipo de reacción, el cual ocurre con hidrógeno en la mayoría de los metales, el gas va a formar una solución cuando la temperatura del metal aumenta y es rechazado a medida que el metal se enfría. Si es que suficiente gas está formando solución, de manera que se crea una presión interna de gas, hay posibilidad de formación de burbujas y la soldadura así obtenida, es porosa. Si el grado de supersaturación es lo suficientemente grande como para formar burbujas, el gas atrapado en la red ya sea se difunde lentamente hacia afuera del metal, o se difunde hacia microfisuras en la estructura donde puede desarrollar una gran presión capaz de producir fractura en ciertas ocasiones.

Los resultados de investigaciones hechas recientemente <2>, muestran que el proceso es controlado por difusión a través de una capa gaseosa límite adyacente a la superficie del metal. Con el arco operando en una

atmósfera de argón de bajo porcentaje de oxígeno, los átomos de oxígeno en contacto con el metal fundido son absorbidos inmediatamente, dejando argón puro en esa región. Una corriente tréscica de oxígeno es barrida entonces hacia la superficie del metal a causa de la acción como de "chorro" del arco, pero hay una capa límite estática de argón empobrecido en oxígeno, y la difusión del oxígeno a través de la capa límite determina la tasa de reacción. Figura 2.

En el segundo tipo de reacción de absorción de hidrógeno por el acero, la tasa de reacción es más lenta a causa de la solubilidad limitada del hidrógeno en el acero. El hidrógeno es absorbido rápidamente en la zona activa del acero inmediatamente bajo el arco; pero esta región llega a saturarse en cuestión de pocos milisegundos, y las absorciones posteriores quedan determinadas por el movimiento del metal fusionado en la piscina de soldadura, en la cual el metal saturado es reemplazado por metal no saturado <2>. Así, la transferencia de metal saturado desde la región activa

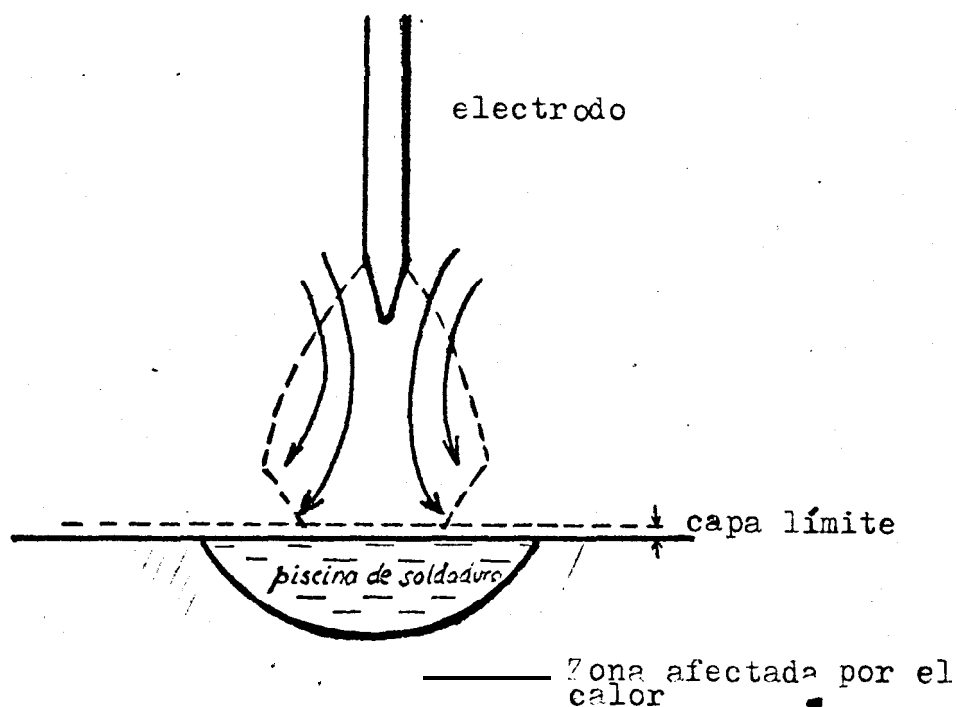


Fig. 2.- Proceso de reacción gas-metal bajo un arco, en el cual hay gran solubilidad de gas en el metal líquido, y difusión a través de la capa límite adyacente a la superficie líquida

al resto de la piscina de soldadura con metal no saturado da la tasa de reacción en este tipo de sistema. Figura 3.

Además de las reacciones gas-metal, existen otros fenómenos que ocurren durante la soldadura y su proceso de enfriamiento. Se tiene así la contracción, disminución de volumen y la distorsión.

Para propósitos de soldadura, estos términos de contracción, disminución de volumen y distorsión significan cosas específicas, mientras fuera de esta literatura podrían ser utilizadas como sinónimos. Así, aunque el término disminución de volumen es usado para describir estados sólidos, es también usado para definir la disminución del espacio ocupado por el metal fundido al solidificarse. **El Metal soldado se "encoge"** al solidificarse, por supuesto, pero este fenómeno tiene poco que ver con el problema de distorsión en soldadura <3>. Durante la solidificación, debido a que **los átomos de hierro** están asumiendo posiciones

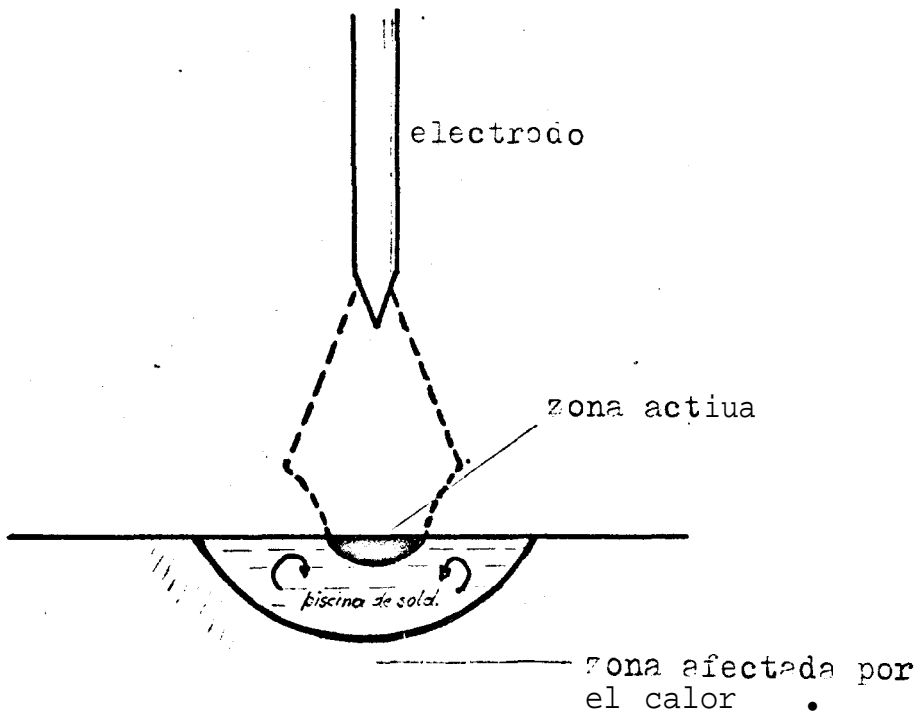


Fig. 3.- Transferencia de la zona activa, controla la tasa de absorción de hidrógeno.

arregladas en la estructura cristalina de los granos sólidos en crecimiento, no puede el metal soldado o metal fusionado ejercer tensiones sobre el metal base adyacente.

Sin embargo, inmediatamente después de la solidificación, el metal soldado enfriándose continúa contrayéndose. Esta contracción térmica es lo contrario de la expansión térmica durante el calentamiento. Es necesario mencionar que la contracción del metal sólida durante el enfriamiento puede generar esfuerzos residuales, pero el máximo esfuerzo tendrá como valor máximo el límite elástico <3>.

Mientras tanto, distorsión es la desviación de una forma deseada, y a sea temporal o permanentemente. La distorsión ocurre como resultado de la soldadura, a causa de los esfuerzos que se desarrollan por las expansiones y contracciones térmicas localizadas.

A su vez, los esfuerzos residuales en uniones soldadas son causados por contracciones del metal soldado, y la deformación plástica producida en el metal base cerca de la soldadura, durante el proceso de soldadura <4>.

Sin embargo, es enteramente posible bajo ciertas circunstancias contener completamente estos esfuerzos residuales en el metal, sin que ocurra distorsión. El que ocurra distorsión o no, está sujeto a (1) la magnitud de las tensiones de soldadura desarrolladas, (2) la distribución de estos esfuerzos en la soldadura, y (3) la fuerza de los miembros en los cuales las tensiones residuales actúan <3>.

Es importante ahora mencionar que los esfuerzos residuales debido a soldaduras se presentan no sólo a causa de la variación en la contracción de áreas calentadas desigualmente, sino también como resultado del efecto de temple de la superficie, y la transformación de la austenita.

La dirección y magnitud de los esfuerzos residuales en la línea central de un cordón de soldadura, dependen de **los efectos combinados** de temple, transformación térmica, calor suministrado, y el ancho del cordón <5>

Se considerará la línea **central de la costura como el eje Y**, y la línea perpendicular al mismo como el eje X. Figura 4(a). La componente de **la tensión residual, σ_l , paralelo a la costura**, así como la componente de la tensión, σ_t , perpendicular al cordón, teniendo un **valor máximo** al centro del cordón.

1.2.1. Esfuerzos residuales debido al proceso de contracción del cordón y la ZAC (zona afectada por el calor)

Una fuente importante de esfuerzos residuales es la diferencia en **la** contracción a causa **del** distinto calentamiento y enfriamiento de **las** áreas de la junta soldada.

El metal soldado, originalmente expuesto a las más

altas temperaturas, tiende a contraerse más rápidamente que las otras breas, pero esta contracción es frenada por las partes más frías. Así, el metal en la costura estará sujeto a esfuerzos de tensión, en la dirección longitudinal, σ_1 , (figura 4b) tan pronto como haya decrecido la temperatura lo suficiente para permitir un marcado campo de esfuerzos <5>.

El resultado final de la tensión paralela al eje Y, llega a ser a veces tan alta como el límite elástico para los eventuales estados de esfuerzos multiaxiales <5>. Los esfuerzos finales después del enfriamiento total se llaman esfuerzos residuales.

1.2.2. Esfuerzos residuales debido al enfriamiento más rápido en la superficie

En realidad el proceso de enfriamiento no es homogéneo a través del espesor de la soldadura. Las capas superficiales de la soldadura pueden enfriarse

más rápidamente, aún con enfriamiento por aire, que el interior de la soldadura.

La temperatura inmediatamente después de soldar debería ser constante a través de la sección del cordón, pero a medida que el tiempo transcurre, se incrementa la diferencia de temperaturas entre la superficie y el interior. Así, los esfuerzos térmicos van en aumento a través de la sección de la **soldadura**, lo que puede terminar en una dispereja deformación plástica, y eventualmente en tensiones residuales,

Este enfriamiento más rápido de la superficie, es llamado efecto de temple; y las tensiones residuales resultantes de este proceso, esfuerzos residuales del temple, aún cuando el enfriamiento es por aire. Figura 4(c).

Si solamente el efecto de temple fuera el causante de los esfuerzos residuales, se esperarían esfuerzos de

compresión en las zonas superficiales altamente calentadas, los que estarían en equilibrio con los de tensión de la parte interna de la costura <5>.

1.2.3. Esfuerzos residuales debido a transformación rásica

En el enfriamiento de una plancha soldada, transformaciones rásicas de austenita a ferrita, bainita o martensita, ocurrirán ya sea a una cierta temperatura, o por encima de un cierto rango de temperatura. Como la transformación va asociada a un aumento en el volumen específico, el material en la costura y la zona afectada por el calor (ZAC) que está siendo transformado tiende a expandirse <5>. Pero esta expansión es frenada, en última instancia en la dirección paralela a la costura, por el material más frío que no está siendo transformado.

De esta forma el área que sufre la transformación está bajo esfuerzos de compresión, si la temperatura es suficientemente baja de manera que el material

haya marcado ya un campo de esfuerzos.

Si la transformación fásica fuese la única fuente de esfuerzos residuales, entonces esfuerzos de compresión se esperarían en la dirección paralela a la costura. Figura 4(d).

Los esfuerzos residuales por transformación, aparecerán primordialmente si bainita o martensita son producidas. Además se debería esperar que a medida que aumente el área transformada, disminuyan los esfuerzos de transformación.

2.4. Superposición de los esfuerzos residuales debido a contracción, temple y transformación

En realidad las diferentes fuentes de esfuerzos residuales en soldaduras no son independientes unas de otras, sino que a l m e n o s dos, o aun tres diferentes clases de esfuerzos en la unión al enfriarse, son superpuesta 5 ; obedeciendo a un

complejo estado total de esfuerzos <5>.

De esta forma, los estados de esfuerzos residuales finales pueden ser obtenidos basados en distintas asunciones. La más simple es aquella de que los esfuerzos residuales finales son el resultado de la superposición lineal de los esfuerzos parciales debidos a las diferentes fuentes ya expuestas.

La figura 4, en los gráficos (e), (f), (g), ilustra esquemáticamente la superposición lineal de los esfuerzos residuales debido a contracción, temple y transformación. Todos los diagramas muestran las componentes de los esfuerzos en la sección transversal, en función de la distancia de la línea central de la soldadura.

La figura 4(b) representa la distribución de esfuerzos obtenida si el proceso de contracción fuera el único causante de los esfuerzos residuales.

La figura 4(c) representa el curso de los esfuerzos obtenido del efecto de temple, anticipando si es que fuera él sólo, el causante de los esfuerzos residuales.

La figura 4(d), si los esfuerzos tomaran lugar sólo por la transformación de la austenita.

Lo figura 4(e) corresponde a la superposición de los diagramas correspondientes a los esfuerzos por contracción y efecto de temple.

La figura 4(f) ilustra la superposición debido a contracción, temple y transformación. Y el diagrama de abajo a la derecha, si sólo esfuerzos por contracción y transformación están actuando juntamente.

Lo que atrae la atención es el hecho de que el máximo esfuerzo residual de tensión no esté presente en la línea central de la costura, sino al pie de la misma.

Este máximo esfuerzo de tensión representa los esfuerzos residuales debido a la contracción. La diferencia entre el máximo esfuerzo de tensión, y el valor de los esfuerzos residuales en la línea central, se debe ya sea al efecto de temple, a la transformación fásica, o ambos juntos.

1.3. Otras fuentes de esfuerzos residuales

Cabe mencionar que además de los procesos citados existen otras fuentes de esfuerzos residuales. Para el efecto, tiene importancia distinguir entre macrotensiones residuales y microtensiones. Las macrotensiones varían continuamente a través del cuerpo y actúan sobre regiones grandes con relación a las dimensiones atómicas. Las microtensiones, o tensiones de textura, actúan sobre regiones a veces de sólo unas cuantas células unidad, aunque pueden extenderse a la mayor parte de un grano <1>. A causa de la anisotropía de las constantes elásticas de los cristales, las microtensiones pueden variar mucho de un grano a otro.

Las retrotensiones de un apilamiento de dislocaciones son ejemplo de este tipo de microtensiones. Otro ejemplo ocurre cuando se precipitan partículas de segunda fase en una solución sólida. Si las partículas del precipitado ocupan mayor volumen que los componentes de que se forma, es decir, si las partículas de segunda fase tienen menos densidad que la matriz, cada partícula tiende a ocupar mayor volumen y queda comprimida por la matriz. Por el contrario, se desarrollan tensiones de tracción en la matriz, en las direcciones radial y tangencial a las partículas de segunda fase. Es muy difícil la determinación de estas tensiones localizadas en sistemas de dos fases, aunque han podido hacerse medidas de su valor medio mediante rayos X $\langle 1 \rangle$.

Es necesaria la determinación de las microtensiones que existen en un monocristal deformado plásticamente para comprender el mecanismo del endurecimiento por deformación. Se pueden conseguir estimaciones de estas microtensiones mediante el estudio de t a l l a d o del

ensanchamiento de las rayas de difracción de rayos X. Sin embargo, es necesario lograr un perfeccionamiento de las técnicas antes de que tales medidas puedan emplearse sin ambigüedad <1>.

La precipitación de partículas de una segunda fase en una matriz metálica es un ejemplo de las variaciones de volumen no homogéneas que producen microtensiones localizadas. Pero si la reacción no progresa uniformemente a través del cuerpo, por existir diferencias en la composición o en la transferencia del calor, se producirán variaciones en la distribución de las microtensiones, las cuales producirán macro tensiones residuales <1>. La nitruración y la cementación son procesos en los que se produce una distribución de microtensiones alrededor de cada partícula de nitruro o carburo, pero como estos procesos, controlados por la difusión, sólo afectan a las capas superficiales, habrá un aumento no uniforme de volumen en esta región. Se produce una macro tensión residual de compresión en la superficie, equilibrada

por tensiones residuales de tracción en el interior.
La transformación de fase b e austenita a martensita que se produce durante el temple del acero, es un ejemplo sobresaliente de un cambio de volumen no uniforme que produce tensiones residuales.

CAPITULO 2

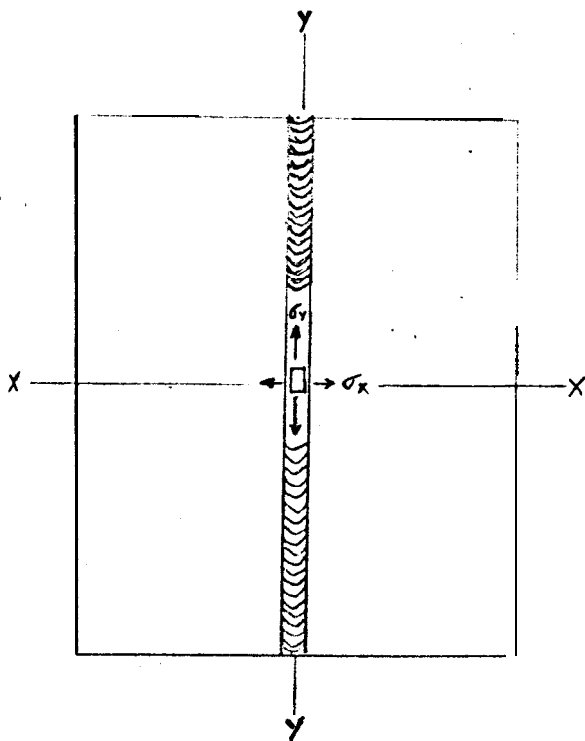
ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS

Distribución de esfuerzos

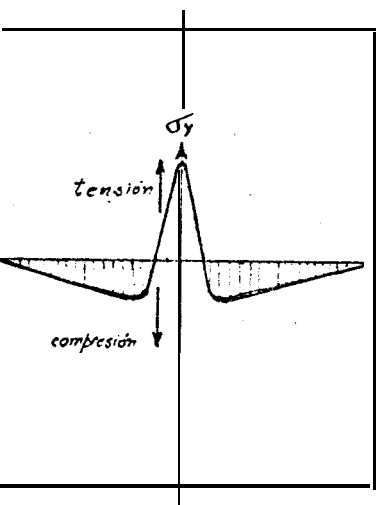
Para el propósito de incluir los esfuerzos residuales producto de soldaduras como causa de la variación en las propiedades mecánicas, es necesario primero el conocer la magnitud y la distribución de los esfuerzos residuales en las juntas soldadas.

En general, los esfuerzos residuales en la5 uniones soldadas, son causados por la contracción del metal de aporte 0 soldadura, y 13 deformación plástica producida en el metal base cercano a 13 soldadura durante el proceso de soldado <4>.

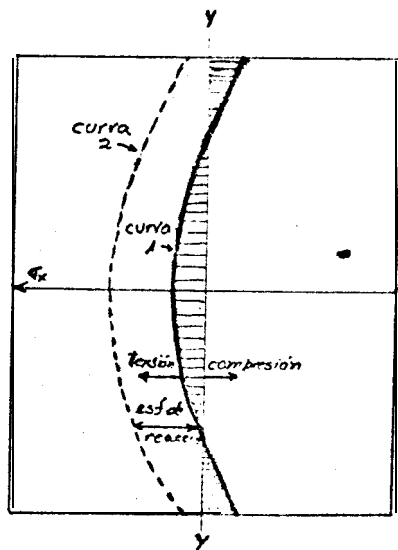
Una distribución típica de esfuerzos residuales en u n a costura o cordón de soldadura, es mostrado en la figura 5.



a) Soldadura a tope



b) Distribución de σ_y a lo largo de xx



c) Distribución de σ_x a lo largo de yy

Fig. 5.- Distribución típica de esfuerzos residuales en soldadura a tope,

Los componentes de los esfuerzos que son de interés, son aquellos paralelos a la dirección de soldadura designados con σ_y , y aquellos transversales a la soldadura designados con σ_x . Figura 5a.

La figura 5b muestra la distribución de los esfuerzos σ_y a lo largo de la línea transversal a la soldadura, XX. Esfuerzos de tensión se producen en las áreas cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en las áreas lejanas.

La distribución de los esfuerzos residuales σ_x a lo largo del cordón de soldadura, YY, es mostrado en la curva 1 de la figura 5c, esfuerzos de tensión se producen en la parte media de la junta, y esfuerzos de compresión en los extremos de la junta. Cuando la contracción lateral, contracción en la dirección YY, es restringida por alguna causa externa, la distribución de σ_x es como se muestra en la curva 2 de la figura 5c. La diferencia entre las curvas 1 y 2 estriba en los esfuerzos de reacción.

Los esfuerzos residuales en la dirección del espesor, $\bar{\sigma}_z$, llegan a ser significativos en las costuras de placas gruesas, por encima de una pulgada de espesor <4>.

1.2. Influencia del proceso de soldadura

Se piensa que se producen esfuerzos residuales similares en soldaduras hechas por diferentes procesos, incluyendo las de arco sumergido, de gas activo, gas inerte, y el proceso de gas y arco de tungsteno <6>.

Sin embargo es posible obtener diferentes esfuerzos residuales de acuerdo a la modalidad que se use al soldar, y no por el sistema tipo de soldadura. Es así, de que al soldar una junta larga a tope, varios tipos de secuencias de soldadura como las de avance hacia adelante y hacia atrás, de bloque, de cascada, etc, son usadas como un medio de disminuir los esfuerzos residuales y la distorsión <6>.

La selección de una secuencia apropiada al soldar, constituye un problema práctico de importancia, especialmente en juntas de soldadura para una alta sujeción, tales como las juntas involucradas en hacer remiendos.

Los efectos de las secuencias al soldar en los esfuerzos residuales han sido ampliamente estudiados, en experimentos de investigación de soldadura restringida y remiendos circulares, las secuencias fueron clasificadas como sigue <6>:

(1) Secuencias en capas múltiples, en las cuales la primera capa se completa a todo lo largo de la soldadura (pueden ser usadas varias formas para completar la primera capa, así como directamente hacia adelante, hacia adelante y atrás, por saltos, etc.); entonces se hace el soldado de la segunda capa y así sucesivamente.

(2) Secuencia por soldado en bloques, en la cual una

cierta distancia o porción de la junta, o "bloque", se suelda completamente, luego se procede al siguiente bloque, y así en adelante.

Los resultados obtenidos en estas investigaciones fueron resumidos como sigue <6>:

- (1) En lo concerniente a los esfuerzos residuales a lo largo de la soldadura, el efecto fue menor en los esfuerzos de tensión longitudinalmente, se encontraron en todas las soldaduras probadas.
- (2) La diferencia en la secuencia de soldado, causó considerables diferencias en la contracción transversal, en la suma de la energía total de esfuerzos producidos en las juntas restringidas, y en la cantidad de esfuerzos de reacción en las capas internas de los remiendos circulares. Las secuencias de soldadura en bloques produjeron menor contracción, menor energía de tensión, menores esfuerzos de reacción que las secuencias

de capas múltiples.

2.3. Influencia de la velocidad de enfriamiento

Los esfuerzos residuales concernientes a soldaduras, son aquellos que resultan de las deformaciones plásticas ocurridas por el enfriamiento después de soldar. Además, estos esfuerzos están relacionados con la fragilidad de la soldadura después del proceso, la misma que obedece a los patrones de microestructura <3>.

Observando diferentes muestras microscópicamente se ha determinado que cuando el tamaño de grano de la estructura es más fino, se obtiene mayor dureza, fragilidad, y muchas veces dislocaciones en forma de celosía. Colateralmente a mayor tamaño de grano en la microestructura, menor fragilidad, menor dureza, y mayor continuidad entre el metal base y la soldadura <3>.

Pero, la pregunta que surge es, cómo influye la velocidad de enfriamiento en el tamaño de grano?

Naturalmente están relacionados, y tal es así, que a medida que las tasas de enfriamiento aumentan, un tamaño más fino de grano se obtiene, y el esfuerzo máximo a la tensión aumenta también. Una razón de enfriamiento mayor, dicho en otras palabras, puede dar como resultado carburos más finos, aumentándose las fuerzas internas <3>. Ver figura 6.

La distribución de temperaturas en el metal durante el proceso, juega uno de los papeles más significativos en cuanto a la obtención y determinación de los esfuerzos residuales.

El cálculo de los esfuerzos residuales en placas de acero soldadas por medio de métodos numéricos, constituye una aproximación a la virtualmente imposible computación analítica de los mismos <7>.

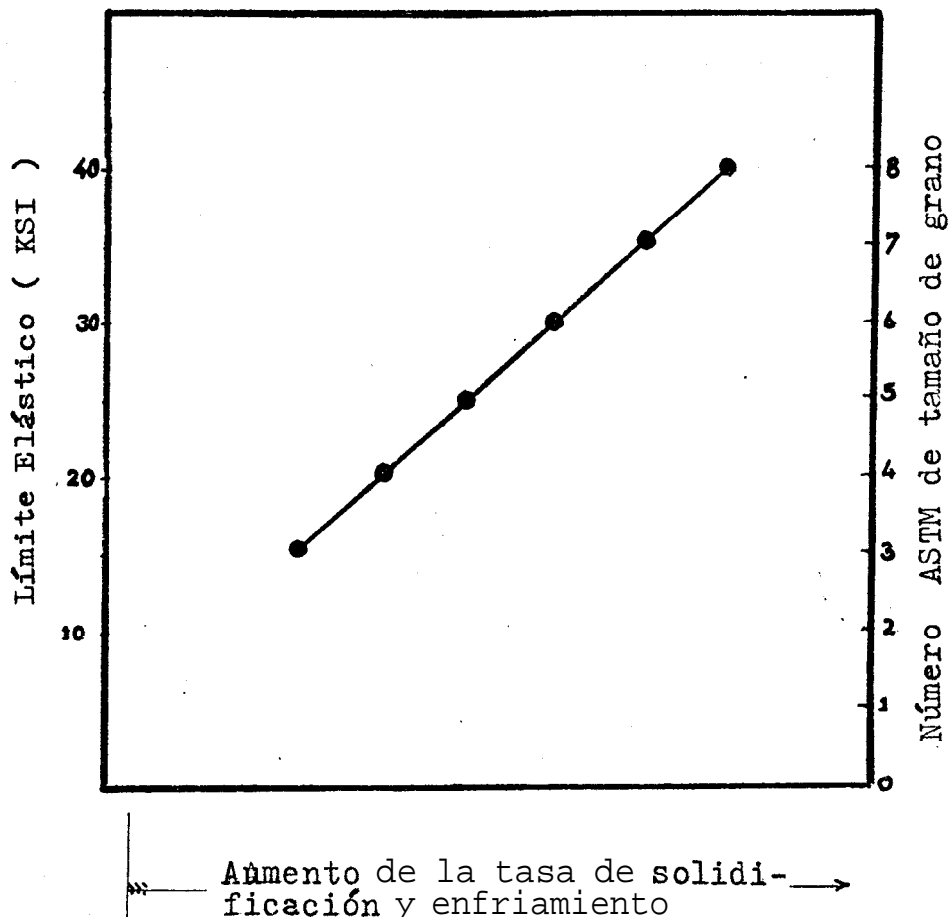


Fig. 6.- Efecto de la tasa de enfriamiento en procesos de soldadura, sobre la resistencia (y tamaño de grano) del metal de soldadura.

Partiendo de los gradientes de temperatura en el proceso, tenemos la siguiente ecuación:

$$\Delta \sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

donde: $\Delta \sigma$ = un aumento del esfuerzo térmico en un punto donde los máximos esfuerzos acumulados en cualquier tiempo es el campo de esfuerzos residuales a esa temperatura.

α = coeficiente de expansión lineal

ΔT = aumento en temperatura T en un punto.

E = módulo de Young

Así, la magnitud de los esfuerzos residuales depende de tres propiedades del material, α , E , y σ_y , y todas ellas a su vez varían tremendamente con la temperatura y el contenido químico del metal <7>.

2.4. Influencia del metal base

Como se analizó en el literal 2.3 (anterior), las tres propiedades que influyen en la ecuación, son típicas del material.

Es de anotar que de acuerdo a la composición del metal base, se tendrá también que seleccionar un metal adecuado para el electrodo, y así a la vez se tendrá variación en las tres propiedades que influyen en el campo de esfuerzos residuales, α , E, y σ_y <7>.

Esfuerzos residuales tan altos como el límite máximo elástico del metal base y del metal del electrodo, se producen en soldaduras de aceros al carbono <7>.

2.5. Influencia de los parámetros de soldadura

Un factor fundamental en la formación de esfuerzos residuales, constituye el gradiente de temperatura durante el proceso de soldadura y de enfriamiento, por

lo tanto de igual importancia es la cantidad de calor generada durante el proceso.

Los parámetros de soldadura son: Amperaje, Voltaje, y Velocidad de Desplazamiento; los mismos que son responsables directos de la cantidad de calor suministrada <7>.

La temperatura generada en cualquier punto del lugar a soldar, es una función directa de Q_p , el calor de entrada.

Se debe enfatizar que la selección apropiada del calor de entrada es probablemente el factor más crítico en estos cálculos, debido a que no es un valor conocido, al menos no, si es que se comprende bien lo que significa <7>.

El calor total generado por el proceso de soldadura, es simple de determinar y se designara con Q .

$$Q=A.V.t$$

donde: A= corriente en amperios

V= voltaje

t= tiempo en segundos

Q= calor total generado en W/seg (o en 0,24 calorías)

Por otro lado el calor **de** entrada, **0** calor neto, es el calor total generado menos algunos factores como la energía perdida a través de la fundición del electrodo, radiación desde la soldadura y desde la placa, y otras pérdidas; así que por lo tanto es función del tipo de electrodo, del voltaje, amperaje, y propiedades eléctricas <7>.

Este tópico ha sido recientemente investigado y se discute la asunción tradicional de que las pérdidas son un 35% o sea que $Q_p=0,65Q$. La computación de la distribución de las temperaturas, esfuerzos térmicos, y finalmente esfuerzos residuales, es basada en muchas

asunciones, todas ellas lógicas y razonables, las cuales se discutirán a continuación.

La más grande asunción y la más grande desconocida, es la magnitud de calor perdido en base de la cual se deduce el calor de entrada a la placa a soldar.

Como se nota arriba, tradicionalmente ha sido asumido que las pérdidas de calor constituyen un 35%, con que también se reconoce que existe una variación toda vez que las condiciones de soldadura varían tremendamente.

Se comprobó con trabajos recientes realizados en la última conferencia internacional sobre metalurgia de soldadura en Londres, que los esfuerzos residuales varían con el calor de entrada, y los experimentos realizados sugirieron que las pérdidas de calor pueden llegar a ser de 50 y 60% respectivamente, para placas soldadas con muesca en V y para placas soldadas con muesca en forma de cuña respectivamente <7>.

Estos estudios también indican que las pérdidas de calor que se producen durante la fusión no son aquellas involucradas en la formación de esfuerzos residuales.

Una vez que la asunción del calor de entrada predomina sobre las otras, los métodos de computación para obtener los valores de magnitudes de los esfuerzos residuales no son confiables hasta que las pérdidas de calor y el calor de entrada hayan sido estudiados enteramente.

Sin embargo, los métodos de computación de la distribución de temperaturas, son herramientas excelentes para comparar los esfuerzos residuales, y para estudiar la influencia de una variable particular de un determinado método de fabricación.

CAPÍTULO 3

LOS EFECTOS RESIDUALES, LAS PROPIEDADES MECANICAS Y RESISTENCIA A LA CORROSION DE LAS UNIONES SOLDADAS

1. Efecto sobre la resistencia máxima de tensión

La ingeniería en lo que respecta a la soldadura, se ha mantenido vigilante por largo tiempo en el hecho de que el metal soldado adquiere una inusual alta resistencia a la tensión comparado con el metal de la misma composición en condiciones de fundición o metal forjado <3>.

Por ejemplo, aceros de bajo carbono soldados tienen regularmente una resistencia a la tensión elástica de por lo menos 50 Kgf/mm^2 , mientras que forjado de la misma composición fluctúa alrededor de 30 Kgf/mm^2 .

Así se tiene que los esfuerzos de tensión del metal soldado son mayores que los del metal de la misma

CAPITULO 3

LOS EFECTOS RESIDUALES, LAS PROPIEDADES MECANICAS Y RESISTENCIA A LA CORROSION DE LAS UNIONES SOLDADAS

1. Efecto sobre la resistencia máxima de tensión

La ingeniería en lo que respecta a la soldadura, se ha mantenido vigilante por largo tiempo en el hecho de que el metal soldado adquiere una inusual alta resistencia a la tensión comparado con el metal de la misma composición en condiciones de fundición o metal forjado <3>.

Por ejemplo, aceros de bajo carbono soldados tienen regularmente una resistencia a la tensión elástica de por lo menos 50 Kgf/mm^2 , mientras que forjado de la misma composición fluctúa alrededor de 30 Kgf/mm^2 .

Así se tiene que los esfuerzos de tensión del metal soldado son mayores que los del metal de la misma

composición, que están en estado de fundición o forja.

Estos hechos concernientes a esfuerzos a menudo son discutidos en términos de relación de la resistencia a la tensión elástica máxima, con la máxima resistencia a la tensión. Los símbolos respectivos son $\sigma_0 / \sigma_{\text{máx}}$.

En aceros de bajo carbono el metal soldado tiene una razón $\sigma_0 / \sigma_{\text{máx}}$ de cerca 0,75. Fundiciones y aceros forjados de las mismas composiciones, ordinariamente tienen una razón $\sigma_0 / \sigma_{\text{máx}}$ aproximada a 0,50; ésto es la tensión elástica máxima es la mitad de la máxima resistencia a la tensión <3>.

Es necesario determinar las causas que ocasionan estas diferencias de esfuerzos, y especialmente en aquellas circunstancias en que el metal soldado no presenta ventajas con este aumento de esfuerzos.

Sorprendentemente, pequeña diferencia es encontrada en los esfuerzos obtenidos de soldaduras por diferentes

procesos. Han sido comparados diferentes métodos de soldaduras al arco, y aún oxiacetilénica, y se ha podido determinar que aquellos que involucran menor calor de entrada y caracterizados por mayores tasas de calentamiento y enfriamiento, tienden a producir microestructuras de granos más finos y aciculares, las mismas que implican mayores esfuerzos residuales y así también mayor σ_0 . El rango de σ_0/σ_{max} llega a ser tan alto como 0,90 <3>.

Los procesos que involucran tasas de calentamiento y enfriamiento menores, tales como arco de hidrógeno atómico y soldadura oxiacetilénica, producen una microestructura en el metal soldado, de granos algo más grandes y menos aciculares. Consecuentemente el σ_0 y la relación σ_0/σ_{max} es más baja, pero usualmente no menor a 0,60 <3>.

Los esfuerzos residuales disminuyen la resistencia a la fractura en las estructuras soldadas sólo cuando ciertas condiciones se presentan; sin embargo la

pérdida de resistencia puede ser drástica cuando se presentan fracturas bajo pequeñas cargas aplicadas <6>.

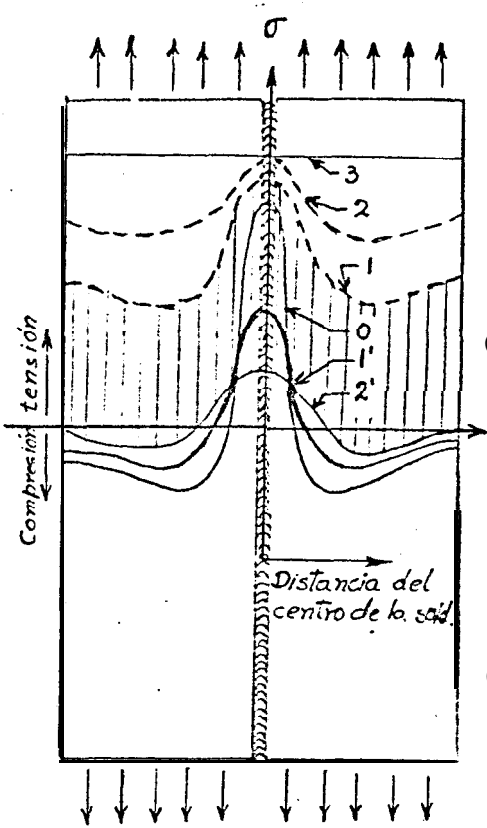
Bajo tensión, se presentan algunos cambios en las distribuciones y magnitudes de los esfuerzos residuales.

La figura 7 muestra cómo los esfuerzos residuales cambian, cuando una soldadura a tope se somete a cargas de tensión. La curva 0 muestra la distribución lateral de los esfuerzos residuales longitudinales en esa condición de soldadura.

Cuando esfuerzos de tensión uniformes $\sigma = \sigma_1$ son aplicados, la distribución de esfuerzos será como la mostrada en la curva 1. Los esfuerzos en áreas cercanas a la soldadura, alcanzan el σ_0 , y la mayoría de los aumentos de esfuerzos ocurren en áreas lejanas a la soldadura <6>.

Cuando la tensión aplicada aumenta a σ_2 , la

Esfuerzos en la dirección longitudinal.



- Curva 0: Esf. Resid. en la condición de soldadura.
- Curva 1: Distribución de esf. en $\sigma = \sigma_1$
- Curva 2: Distribución de esf. en $\sigma = \sigma_2$
- Curva 3: Distribución de esf. en el límite elástico.
- Curva 1': Distrib. de los esf. después de aplicar y soltar $\sigma = \sigma_1$.
- Curva 2': Distrib. de los esf. después de aplicar y soltar $\sigma = \sigma_2$.

Fig. 7.- Distribución esquemática de esfuerzos en soldadura a tope, cuando cargas uniformes de tensión han sido aplicadas, y los esf. resultantes luego de liberar las cargas.

distribución de los esfuerzos será como la mostrada en la curva 2. A medida que los esfuerzos aplicados aumentan, la distribución de esfuerzos a través de la soldadura llega a ser mayor aún; ésto es, el efecto de los esfuerzos residuales de soldadura actúa en la disminución de la distribución de esfuerzos <6>.

Cuando el nivel de los esfuerzos aplicados se aumenta más allá, se obtiene una ductilidad general; ésto es, la ductilidad se presenta a través de toda la sección transversal.

La distribución de esfuerzos cuando se presenta la ductilidad general es mostrada por la curva 3. Más allá de la ductilidad general el efecto de los esfuerzos residuales virtualmente desaparece <6>.

Seguido se considera la distribución de los esfuerzos residuales después que las cargas de tensión han sido liberadas. La curva 1' muestra el esfuerzo residual remanente después de la descarga, cuando el esfuerzo de

tension $\sigma = \sigma_1$, es aplicado a la soldadura y luego liberado. La curva 2' muestra la distribución de esfuerzos residuales cuando el esfuerzo de tension $\sigma = \sigma_2$ es aplicado y luego liberado.

Comparando con la distribución de esfuerzos residuales original (curva 0), la distribución de esfuerzos residuales después de la carga y descarga es mayor aún. A medida que el nivel de carga aumenta, la distribución de esfuerzos residuales después de la descarga llega a ser mayor aún; esto es, el efecto del esfuerzo residual de soldadura en la distribución de esfuerzos disminuye.

Las distribuciones que preceden conducen a los siguientes factores básicos referentes a los efectos de los esfuerzos residuales <6>:

- (1) El efecto de los esfuerzos residuales de soldadura en el desempeño de estructuras soldadas, es significativo sólo en el fenómeno que ocurre bajo esfuerzos aplicados pequeños, tal como fracturas

quebradizas y fracturas de corrosión por esfuerzos.

- (2) A medida que los esfuerzos aplicados aumentan, el efecto de los esfuerzos residuales decrece.
- (3) El efecto de los esfuerzos residuales es despreciable en el desempeño de estructuras soldadas, bajo esfuerzos aplicados más allá de alcanzarse la ductilidad.
- (4) El efecto de los esfuerzos residuales tiende a decrecer después de aplicar cargas repetidamente.

3.1.1 Fractura quebradiza o fractura inestable bajo esfuerzos aplicados pequeños.

Amplios estudios han sido realizados con respecto a los efectos de los esfuerzos residuales sobre las fracturas quebradizas de estructura de acero soldado.

Investigadores en estudios experimentales han observado diferencias entre los datos obtenidos de las fracturas quebradizas en barcos y otras estructuras y los resultados experimentales obtenidos con probetas ranuradas. Las fracturas ocurrieron a esfuerzos bastante por debajo del esfuerzo elástico máximo del material; sin embargo, el esfuerzo de la fractura de una probeta ranurada es tan alto como el σ_0 aún cuando las probetas contienen fracturas de bordes muy puntudos.

Bajo ciertas condiciones del experimento, fracturas completas de la probeta ocurrieron mientras la magnitud del esfuerzo aplicado era considerablemente menor al σ_0 del material.

La figura 8 muestra la tendencia general de la resistencia a la fractura en probetas de acero al carbono soldado, a diferentes temperaturas, y los efectos de una muesca filuda y esfuerzos residuales en la resistencia a la fractura.

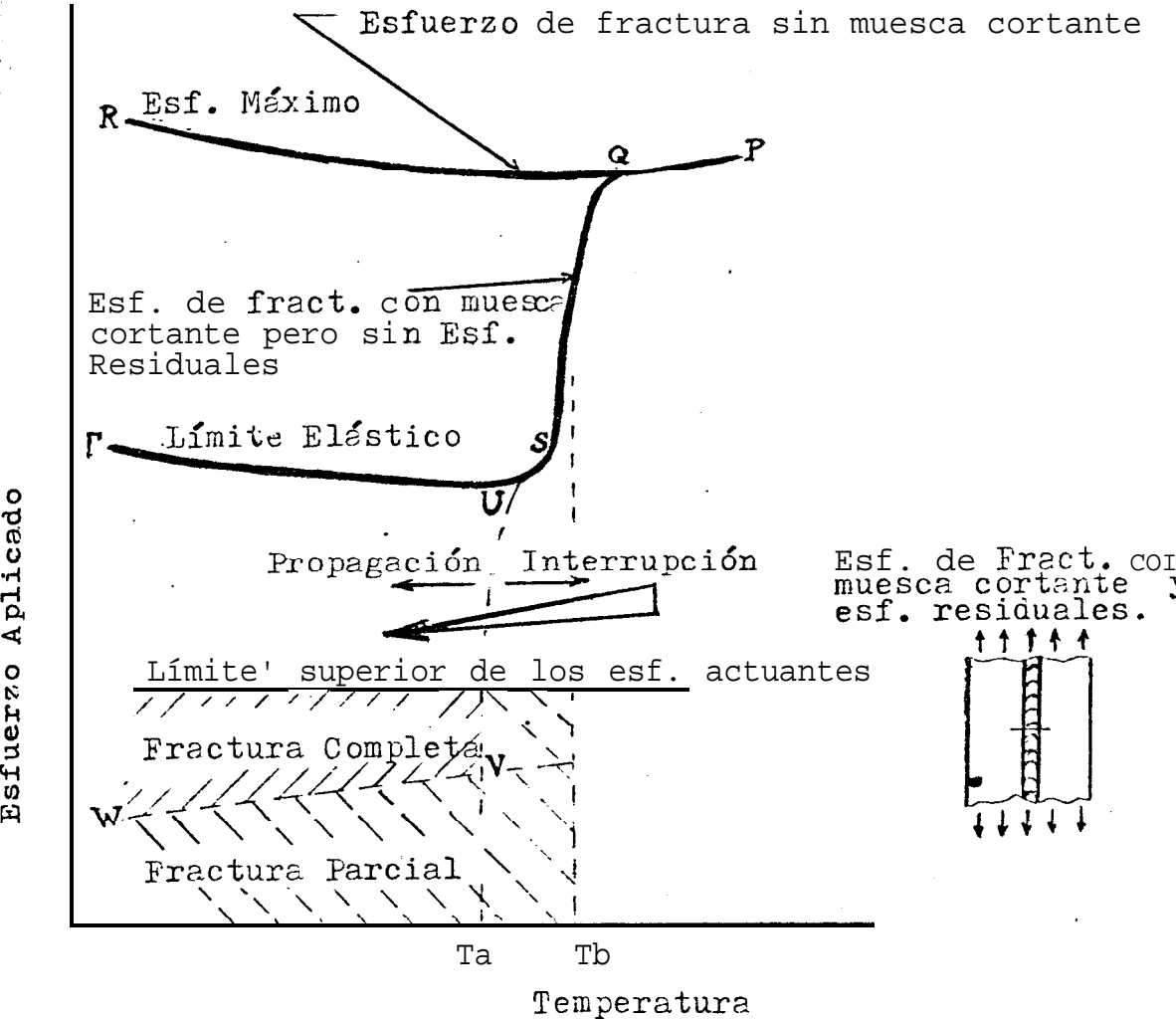


Fig. 8.- Efecto de una muesca cortante y esf, residuales sobre el esfuerzo de fractura.<&gt

Cuando una probeta no contiene muesca, la fractura ocurrirá al máximo esfuerzo de tensión ($\sigma_{\text{máx}}$) del material a las temperaturas de las pruebas, como lo muestra la curva PQR. Cuando una probeta contiene una muesca (pero sin esfuerzos residuales), la fractura ocurrirá a los esfuerzos mostrados por la curva PQST. Cuando la temperatura es más alta como la llamada temperatura de transición de fractura, T_f , una fractura de alta energía (tipo cortante) ocurre a esfuerzos elevados. Cuando la temperatura es inferior a T_f , la apariencia de la fractura se torna como una de baja energía (resquebrajadura), y los esfuerzos de la fractura disminuyen hasta cerca del esfuerzo elástico máximo (σ_0). Cuando una muesca es colocada en áreas donde existen altos esfuerzos residuales, los siguientes varios tipos de fracturas pueden ocurrir <6>:

- (1) A temperaturas mayores que T_f , el esfuerzo de fractura es el $\sigma_{\text{máx}}$ (curva PQR). Los esfuerzos residuales no tienen efecto sobre el esfuerzo de

fractura.

(2) A temperaturas ambiente inferiores a T_f pero mayores que la temperatura de interrupción de fractura, T_a , una fractura puede iniciarse a bajas tensiones pero será interrumpida.

(3) A temperaturas inferiores que T_a , uno de dos fenómenos puede ocurrir, dependiendo del nivel de esfuerzo a la iniciación de la fractura:

(a) Si el esfuerzo está debajo del esfuerzo crítico, VW , la fractura será interrumpida después de recorrer una corta distancia. La fractura completa ocurrirá al máximo esfuerzo elástico, σ_0 .

(b) Si el esfuerzo es mayor que VW , ocurrirá fractura completa.

3.1.2. Efecto de tratamientos de alivio de esfuerzos en

fracturas quebradizas de soldadura.

Los esfuerzos residuales en soldaduras pueden ser reducidos produciendo deformaciones plásticas en cantidades y distribuciones propias. La deformación plástica puede ser aplicada térmicamente, mecánicamente o por una combinación de ambas. La técnica más comúnmente usada, la misma que es llamada tratamiento de alivio de tensiones, es como sigue: una soldadura es colocada durante un cierto período en un horno a una temperatura específica, dependiendo del tipo de material y espesor y luego enfriada lentamente <6>.

Cuando una carga es aplicada a una soldadura, los esfuerzos residuales son redistribuidos debido a la deformación plástica local. Cuando la carga es retirada, estos esfuerzos se reducen. Este efecto, es llamado remoción mecánica de esfuerzos, y ha sido demostrado en una serie de experimentos con aceros al carbono soldados <6>.

Efecto sobre la resistencia a la fatiga

Se denomina fatiga a la falla de metales bajo repetidos ciclos de esfuerzos. Este mecanismo de la falla es discutido prioritariamente a causa de que todos los artículos metálicos que son removidos del servicio, lo son por motivo de alguna forma de falla mecánica, y en su mayoría por fracturas de fatiga. Además, las soldaduras que fallan por fatiga representan un mayor porcentaje que aquellos artículos que fallan sin contener uniones soldadas <3>.

Esta alta incidencia de fracturas por fatiga en soldadura ha sido investigada por largo tiempo, y muchas razones para que ocurran las fracturas han sido ampliamente demostradas. Desafortunadamente los hallazgos en este tema no han sido muy tomados en cuenta por gran parte de las personas involucradas en el diseño y producción de soldadura.

Las soldaduras dan más dificultades a causa de la falla

por fatiga, por la misma razón que la influencia de la fractura quebradiza es altamente nombrada, concentración de esfuerzos residuales y concentradores de tensión por las cargas durante el servicio <3>.

El concentrador de tensiones puede ser una clase de falla de uniones soldadas, o , como es el caso más a menudo, el cambio externo en la sección de la unión soldada presenta una muesca geométrica, la cual efectivamente concentra los esfuerzos.

Obviamente, endijas son los más peligrosos toda vez que ellos pueden tener un factor de concentración de tensiones (K_t) tan alto como 18. Casi igual de peligroso es la inclusión de escoria a lo largo de la línea de fusión. Las porosidades también disminuyen la resistencia a la fatiga, particularmente si las discontinuidades están cerca de la superficie de la soldadura. El primer 5% de las porosidades reduce la resistencia a la fatiga en gran cantidad. Porosidades adicionales causan una caída menos rápida, pero

entonces la resistencia estática empieza a caer bruscamente <3>.

El perfil externo del cordón soldado es la variable más importante que afecta a la resistencia de la fatiga en una unión soldada. La fractura de fatiga en una unión soldada ordinaria (no maquinada), ocurre al pie de la soldadura cuando las cargas cíclicas aplicadas son perpendiculares al eje longitudinal de la soldadura. Si la tensión es aplicada paralela al eje longitudinal de la soldadura, la falla se iniciará en algún lugar a lo largo de la soldadura en la cual la concentración de tensiones es más alta. La altura del refuerzo de la soldadura y el ángulo de reentrada (θ) entre la deposición de la soldadura y la superficie del metal base, como se ilustra en la figura 9, ordinariamente determina el grado de concentración de tensiones que actúa al pie. Sin embargo, si el socave está presente al pie, (el lugar más común), la concentración estará localizada grandemente e intensificada. Si la soldadura está sana y tiene una resistencia igual a la

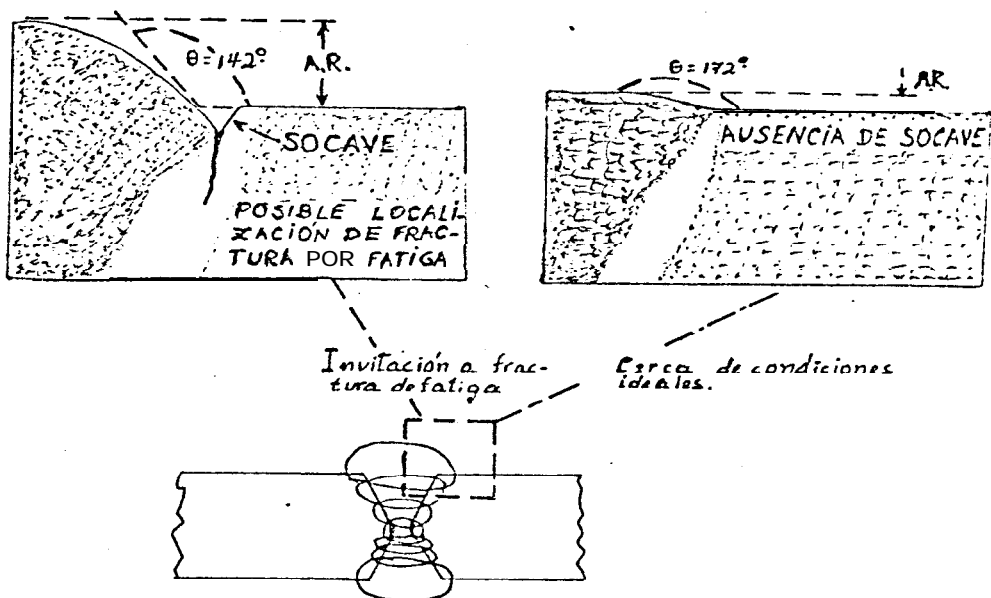


Fig. 9.- Esquemas de uniones soldadas, determinantes en la producción de falla por fatiga, de acuerdo a cómo concentren tensiones en el pie de la soldadura:

- Angulo de reentrada θ debería aprox. a 180°
- Altura de refuerzo AR debería ser mínima.
- Socave en el metal base al pie, no debe existir.

del metal base, la remoción completa de los refuerzos y el socave por maquinado, esmerilado y pulido aumentará sustancialmente la resistencia a la fatiga del área de la unión soldada, a menudo a un nivel igual a aquél del metal base <3>. Ver figura 9.

Si el acero ha sido endurecido por trabajado en frío, el efecto calórico de la soldadura reducirá el esfuerzo producido por el anterior proceso. Con aceros susceptibles de endurecimiento, la influencia de la soldadura dependerá de la diferencia de las propiedades entre el metal base antes de la soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC) después de la soldadura.

Quando se trata con aceros endurecibles altamente aliados, la austenita retenida en la microestructura es un factor que afecta adversamente el límite de duración. Bajo esfuerzos cíclicos, la austenita retenida es transformada en martensita y la estructura final se cree que ejerce un efecto negativo en el límite de duración. La austenita retenida puede ser

eliminada de la microestructura antes de ser puesta en servicio, aplicando un tratamiento calórico especial el cual puede involucrar doble tratamiento de recocido o posiblemente enfriamiento a temperaturas bajo cero <3>.

Las fracturas por fatiga pueden desarrollarse en recipientes soldados a presión, sistemas de tuberías, puentes y cualquier otra soldadura sujeta a esfuerzos cíclicos. Partes rotativas de maquinarias son especialmente vulnerables a esta forma de falla. Como se ilustra en la figura 10. Una fractura de fatiga como la mostrada en esta figura, fácilmente puede desarrollarse a causa de que muchas veces las máquinas rotativas no se encuentran en balance absoluto y los esfuerzos cíclicos son impuestos en las fibras externas del eje y unión soldada. Ejes rectificadas por soldadura resultan sufrir de una incidencia más alta de fallas por fatiga que cualquier otra clase de soldadura, aún cuando la superficie ha sido maquinada, tan suavemente como un nuevo eje homogéneo de acero forjado <3>. Estas fallas usualmente pueden ser

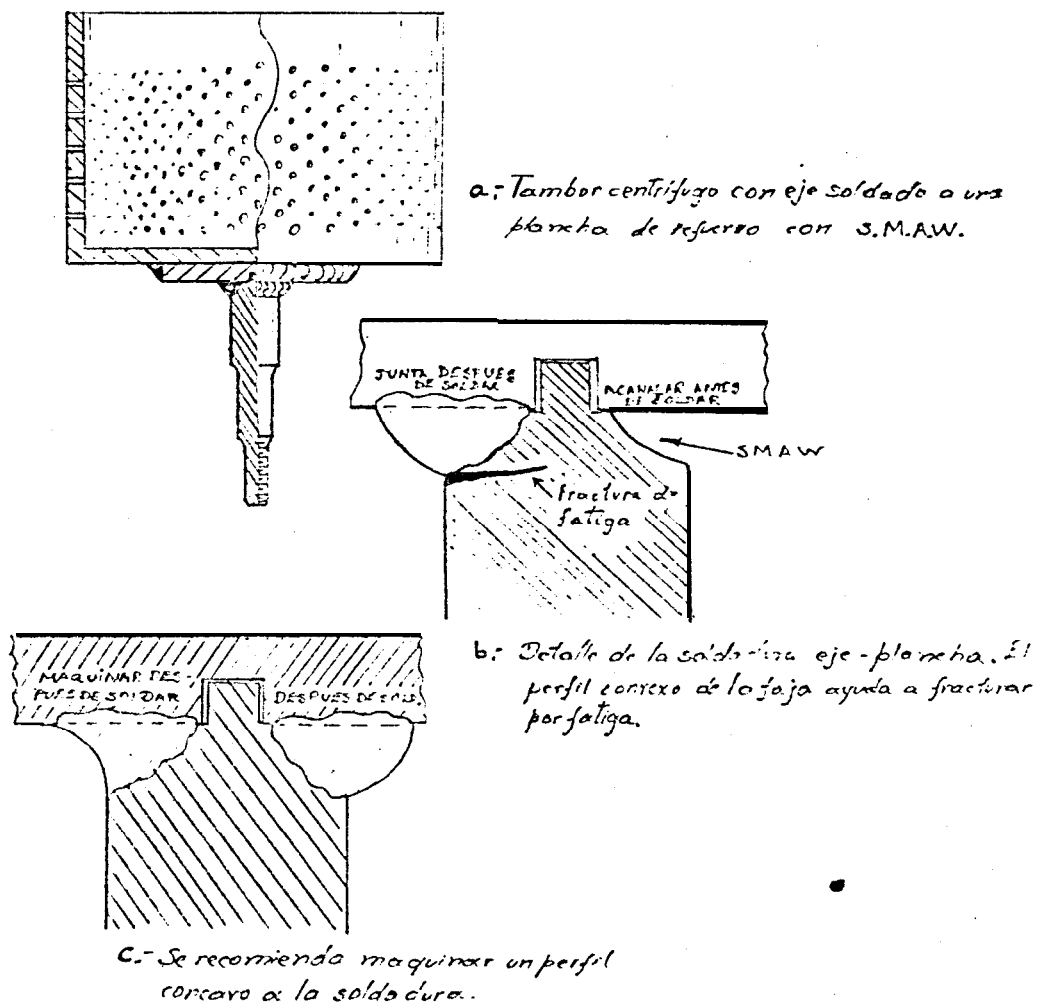


Fig. 10.- Causa y remedio para fractura de fatiga en el ensamble soldado de un eje y tambor centrífugo.

descubiertas por alguna forma de defecto en la superficie de la soldadura, la cual lógicamente, constituye las fibras externas más altamente afectadas por esfuerzos bajo cargas de torsión.

Muchas soldaduras sujetas a esfuerzos cíclicos, en las cuales el refuerzo de la soldadura no puede ser removido, ni la superficie pulida, están diseñadas en las bases de una vida segura en cuanto a fatiga, antes que una vida infinita. Hacerlo de otra forma sería antieconómico a causa de que las cargas permitidas serían restringidas grandemente por un límite de fatiga actual muy bajo para la estructura <3>. Sin embargo, entendiendo la influencia de los factores que inciden en el desarrollo de una fractura por fatiga, y guiados por un test de fatiga la mayoría de las soldaduras pueden ser diseñadas y fabricadas de manera que la falla por fatiga tenga una remota posibilidad.

4.3. Efecto sobre el comportamiento de fractura

La teoría de fractura mecánica de Griffith-Irwin ha sido ampliamente usada en el estudio de fracturas inestables en materiales de alta resistencia. Cuando esfuerzos uniformes de tensión son aplicados a una placa que contiene una muesca transversal pequeña, el esfuerzo de fractura es expresado por <4> :

$$K \equiv \sigma \sqrt{\pi a} = K_c$$

La fractura inestable ocurre cuando el factor de intensidad de esfuerzos, K , determinado por el esfuerzo aplicado, σ , y la longitud de fractura $l=2a$, alcanza un valor K_c , el cual es característico del material. K_c es denominado factor de intensidad de esfuerzo crítico o resistencia a la fractura del material. El esfuerzo de fractura K dado por la ecuación anterior se refiere al caso de no haber esfuerzos residuales.

Recientemente se han realizado investigaciones sobre la posibilidad de utilizar hidrógeno para inducir fractura, como una técnica para determinar los

estrueros residuales en soldaduras de acero especialmente en soldaduras complejas. Especímenes soldados de un acero SAE 4340 tratado térmicamente fueron sumergidos en un electrolito y cargados con hidrógeno aplicando una corriente directa; con las probetas soldadas como cátodo; y un grupo de tiras de plomo como ánodo.

La figura 11 muestra un patrón de fracturas obtenido en un cordón de soldadura cargado con hidrógeno.

Las fracturas por hidrógeno pueden presentarse además, en aceros de alta resistencia soldados, como consecuencia de los procesos de decapado usados para limpiar el acero soldado, debido al uso de ácidos hidrogenados en estos procesos <8>.

Una investigación analítica ha sido hecha para interpretar los resultados experimentales. Se encontró que el patrón de fractura es determinado por: (1) la distribución de esfuerzos residuales, y (2) las

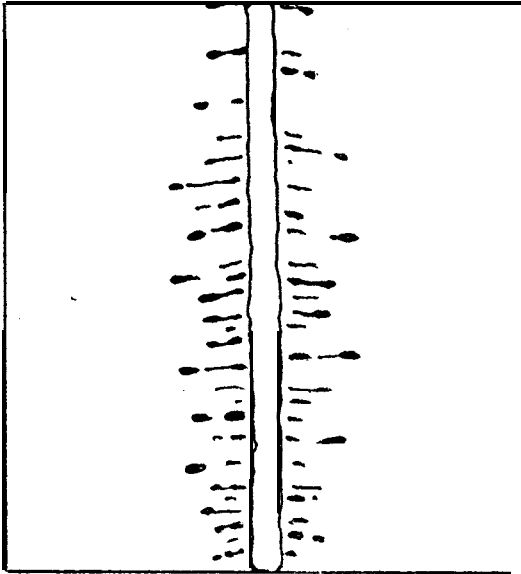
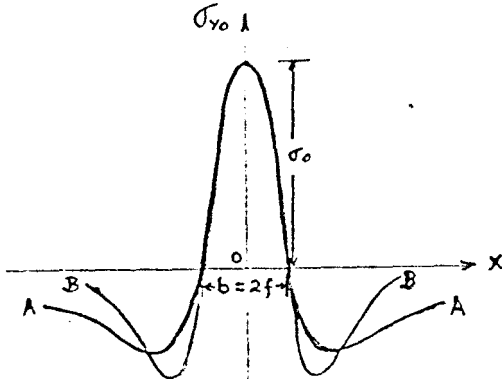
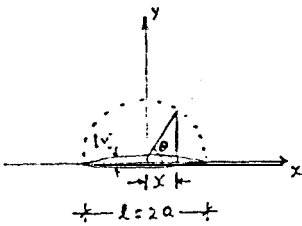


Fig. II.- Patrón de fracturas en una unión simple a tope, efectuada en un acero SAE 4340, templado en aceite y temperado a 260°C , después de la prueba de fracturas inducidas por hidrógeno.<4>.

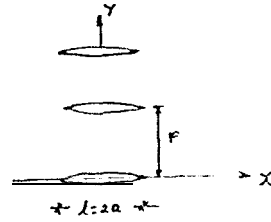


Curva AA: Distribución arbitraria
 Curva BB: $\sigma_{yo} = \sigma_0 \left(1 - \frac{x^2}{f^2}\right) e^{-\frac{x^2}{f^2}}$
 distribución característica

a: Distribución de los esfuerzos residuales σ_{yo}



b: Fractura recta simple.



c: Fracturas parciales

Fig. 12.- Esfuerzos residuales $\sigma_{yo} = f(x)$ y fracturas transversales

donde K_c = factor de intensidad del esfuerzo crítico del material

$$K_w = \sigma_0 \sqrt{\pi f}$$

σ_0 = esfuerzo máximo al centro de la soldadura

$b = 2f$ = ancho de la zona de los esfuerzos residuales de tensión.

K_w es un parámetro determinado por la distribución de esfuerzos residuales y puede ser llamado "factor de intensidad del esfuerzo crítico efectivo de una soldadura". A medida que la tenacidad del material a la fractura aumenta el valor de μ aumenta; así el valor de μ es llamado "tenacidad relativa de la soldadura" <4>.

Análisis numéricos del patrón de fractura estable fueron llevados al computador, y se encontró que:

- (1) cuando el valor de μ es mayor que 0.3, ni siquiera una fractura ocurrirá debido a sólomente esfuerzos residuales
- (2) cuando el valor de μ es menor que 0.3 pero mayor que 0.02, una fractura simple se presentará; sin embargo, no ocurrirán series de fracturas
- (3) cuando el valor de μ es menor que 0.02, una serie de fracturas transversales se presentarán.

Los resultados indican que hay limitaciones en las propiedades del material a ser usado en la prueba de fracturas inducidas por hidrógeno. El valor μ de una soldadura antes de cargar con hidrógeno debe ser mayor a 0.3, de otra forma las fracturas podrían ocurrir aún sin cargar con hidrógeno. El valor μ de la soldadura, sin embargo, debe ser disminuido a cerca de 0.02 durante la carga de hidrógeno para que ocurra fracturas <4>.

1.3.1. Posibilidad de usar el parámetro μ para evaluación analítica de los esfuerzos residuales sobre el comportamiento de fractura de soldaduras

Las investigaciones analíticas y experimentales hechas, han demostrado cualitativamente, que las características de las fracturas de soldaduras por esfuerzos residuales dependen de (1) las propiedades del material y (2) la magnitud y distribución de los esfuerzos residuales. Los efectos de los esfuerzos residuales son mayores cuando el material tiene una tenacidad más baja, y cuando los esfuerzos residuales son más altos o la distribución de esfuerzos de tensión es más ancha. Sin embargo no ha sido desarrollada una técnica cuantitativa para demostrar la extensión de los efectos <4>.

El éxito en el empleo de μ para evaluar analíticamente la tendencia de una soldadura a fracturarse, sugiere que una aproximación similar puede ser desarrollada para evaluar los efectos de

los esfuerzos residuales en las características de fractura en soldaduras.

El efecto de los esfuerzos residuales sería despreciable cuando el valor μ alcanza un cierto valor crítico. En este tema faltan estudios por realizar.

3.4. Efecto sobre la resistencia a la corrosión

Numerosos casos hablan sobre la corrosión causada bajo esfuerzos de tensión, y los daños causados en servicio. Estos problemas se encuentran tanto en resortes para cuerdas de relojes, como en cables para suspensión de puentes. Así, se pensaba que la resistencia de las cuerdas para relojes se veía afectada por los truenos y tormentas. Luego se hubo de conocer que una mayor actividad corrosiva y alta humedad en el ambiente coincidían con las temporadas de tormenta, y de esta forma, las fallas en las cuerdas se presentaban a causa de fracturas de corrosión por esfuerzos <16>.

los esfuerzos residuales en las características de fractura en soldaduras.

El efecto de los esfuerzos residuales sería despreciable cuando el valor μ alcanza un cierto valor crítico. En este tema faltan estudios por realizar.

Efecto sobre la resistencia a la corrosión

Numerosos casos hablan sobre la corrosión causada bajo esfuerzos de tensión, y los daños causados en servicio. Estos problemas se encuentran tanto en resortes para cuerdas de relojes, como en cables para suspensión de puentes. Así, se pensaba que la resistencia de las cuerdas para relojes se veía afectada por los truenos y tormentas. Luego se hubo de conocer que una mayor actividad corrosiva y alta humedad en el ambiente coincidían con las temporadas de tormenta, y de esta forma, las fallas en las cuerdas se presentaban a causa de fracturas de corrosión por esfuerzos <16>.

De forma similar ocurren fallas en partes cargadas con esfuerzos altos, tal es el caso en los resortes de cerraduras, cables para barrer minas marinas (sujetos a vibraciones y en medio corrosivo), etc.

Las fracturas de corrosión por esfuerzos se desarrollan invariablemente en ángulo recto a la dirección de los esfuerzos de tensión aplicados <16>.

Se han efectuado además, experimentos en el acero con barras cargadas de esfuerzos residuales por doblado en frío, comparando así especímenes sin tratamiento de liberación de esfuerzos, con otros liberados por el método denominado shot-peening o liberación de esfuerzos residuales por golpe. Los resultados mostraron una resistencia a la corrosión, mucho mayor, en las barras con menores esfuerzos residuales <16>.

De igual manera, se compararon copas de latón embutidas con y sin golpeado, expuestas en una atmósfera de amoníaco, y se observó que en las cargadas con

esfuerzos residuales se desarrollaba la fractura quebradiza o frágil, o fractura de corrosión por esfuerzos, a las dos horas y media de exposición, mientras que en las liberadas por golpe se desarrollaba sólo después de cien horas de exposición en dicha atmósfera corrosiva, y en las zonas donde no se había practicado el tratamiento de golpeado <16>.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES

En términos generales, el estado total de esfuerzos al borde de una grieta, es uno de los factores más importantes que influenciarán sobre los mecanismos de fatiga, fractura subcrítica, o agrietamiento por corrosión debido a tensiones.

En estos mecanismos de falla se conoce que los esfuerzos residuales por soldadura pueden aportar en mayor grado al campo de esfuerzos responsable en la formación de grietas [9].

El análisis apropiado de estos mecanismos de falla requiere un buen conocimiento de las magnitudes y distribución de los esfuerzos residuales, pero este requerimiento ha sido frustrado debido a la ausencia de buenas técnicas experimentales de medición.

Los esfuerzos residuales están comúnmente clasificados en dos grupos: Macroesfuerzos residuales, o esfuerzos residuales de primera clase, son aquellos de naturaleza ingenieril los cuales son medidos por un calibrador a lo largo, involucrando varios granos. Microesfuerzos residuales, o esfuerzos residuales de segunda clase, relacionados a estados de esfuerzo que se deben a microestructuras no homogéneas que pueden abarcar ya sea un grano solamente, o un grupo particular de granos de la misma orientación preferencial <9>.

Se discute sobre cuál de ellos es más importante en agrietamiento por corrosión debido a esfuerzos, fracturas quebradizas, iniciación de fatiga, y ciertamente ambos contribuyen dependiendo de la situación. Sin embargo, se insinúa que los de primera clase son de interés fundamental para todos los mecanismos, y además son medidos por la mayoría de las técnicas de medición <9>.

Los métodos de medición pueden ser clasificados para una mejor referencia dentro de los siguientes grupos: (1)

mecánicos, (2) Moiré y técnicas asociadas, (3) rayos X, (4) magneto-elasticidad, (5) ultrasonidos, (6) analíticos <9>. Además vale la pena enmarcar en la misma clasificación un nuevo método de medición denominado (7) recubrimientos quebradizos <10>.

4.1. Mecánicos

Por necesidad todas las técnicas mecánicas involucran un cierto grado de destrucción y ésta es su mayor desventaja. La mayoría de las técnicas experimentales han sido basadas en la medición del desplazamiento sobre una determinada longitud de "gauge", mientras que físicamente se liberan las tensiones alrededor del gauge mediante ya sea taladrado, trepanado, corte de sierra o rebanado <9>.

Cabe mencionar que con las técnicas mecánicas en general hay siempre riesgos de esfuerzos residuales adicionales como resultado de la técnica usada para liberación <9>.

Con el objeto de medir con técnicas mecánicas el esfuerzo residual, han sido desarrollados muchos aparatos especiales, los mismos que incluyen calibradores de alta precisión usando un largo de gauge relativamente grande (10-20 mm) con el inconveniente de no estar capacitados para detectar zonas de alto gradiente de esfuerzos, sino un estado promedio de esfuerzos, y se lo hace valiéndose de indentaciones con pequeñas bolas similares a las utilizadas en medición de macrodurezas. Una aproximación superior a los anteriores se obtiene a partir de una pequeña longitud de gauge, logrados por medio de resistencias eléctricas plegadas conocidos comúnmente como "strain-gauges", pero esto requiere de un método de liberación seccionado el mismo que no interferirá ni dañará las conexiones eléctricas <9>.

Para el uso de estos "strain-gauges", es necesario valerse de una cierta forma geométrica para posicionar así los mismos con el fin de seccionar el material, cuantificando de esta forma los esfuerzos residuales

por secciones. Se han desarrollado pequeñas rosetas de strain-gauge para este fin, mostrándose un gran interés en la técnica de taladrado central para liberar los esfuerzos, siendo esta técnica de naturaleza no destructiva relativamente debido al agujero requerido de solamente 1.6 mm de diámetro <9>.

Otro método es aquél desarrollado por Sturm en los Estados Unidos, que es el gauge de esfuerzo total, adoptando principios muy similares a aquellos usados en las máquinas para medición de durezas. Este instrumento portátil hace indentaciones circulares en la superficie del material valiéndose de una punta cónica cargada bajo condiciones normalizadas. Se atribuyen a los ejes mayor y menor de la indentación resultante por medio de su medición, la evaluación de las direcciones principales y secundarias y sus respectivas magnitudes de los esfuerzos residuales totales <9>. La teoría se basa en el hecho de que una indentación originalmente circular, se viene a transformar en elíptica debido al estado de esfuerzos existente, siendo el diámetro mayor

de la elipse el que indica los principales esfuerzos de tensión <9>. Este último método sin embargo no es todavía mayormente usado debido seguramente a su falta de precisión.

Otro método de medir esfuerzos residuales el cual es algunas veces más conveniente aunque menos preciso, es el medir la presión normal requerida para iniciar una indentación de dureza en una superficie <11>. De esta manera es posible obtener un gradiente de durezas que guardaría relación con un gradiente de esfuerzos residuales por medio de varias indentaciones y haciendo luego el correspondiente mapeo. Sin embargo, sufre la desventaja que una gran variedad de esfuerzos residuales en la superficie producirán la misma tendencia bajo la presión normal que se hace por la indentación <11>.

Moiré y Técnicas Asociadas

Han habido, respecto de estas técnicas, muy pocos

intentos de aplicar cualquiera de las variantes en las redes patrones de Moiré para el sólo hecho de medir esfuerzos residuales. La mayoría del trabajo hecho en este campo ha involucrado las mediciones de los desplazamientos y distorciones. Sin embargo, si los desplazamientos pueden ser medidos con una buena precisión, la determinación de los esfuerzos es posible de obtener. La mayor desventaja de los patrones convencionales de Moiré, está en que la sensibilidad obtenida de la red prácticamente más fina (de 40 líneas/mm) es muy baja para ser de uso real en la medición de contracciones elásticas, aunque sí es de importancia particular en las contracciones plásticas tales como las ocurridas durante la soldadura <9>.

Otra técnica de medición de esfuerzos residuales basada en los principios de Moiré consiste en el uso de unas redcillas patrones que pueden ser adheridas al material antes de deformar, y que luego de producidas las deformaciones harán factible la medición de la variación de las longitudes iniciales entre líneas de

la rededilla determinando así el esfuerzo residual en porcentaje <10>.

Rayos X

Los rayos X han sido aplicados al problema de medición de esfuerzos en materiales cristalinos por un tiempo bastante considerable. En términos simples el espacio entre capas considerando un plano particular (el plano actual que es una función de la longitud de onda de la radiación) es proporcional al ángulo de refracción de los rayos X, el cual es determinado por un difractómetro <Y>.

En la práctica, una mayor precisión se ha obtenido refinando esta técnica para suprimir la necesidad de la información del estado libre de esfuerzos, el mismo que puede ser difícil de obtener, determinando semigráficamente de dos o más exposiciones a diferentes ángulos de incidencia el respectivo ángulo de refracción <Y>.

La única técnica enteramente no destructiva para medir esfuerzos residuales en metales es el uso de rayos X, aunque la medición nos da información de las deformaciones elásticas superficiales <11>. El motivo por el que mide solamente las tensiones superficiales se debe a que la penetración de los rayos X es del orden de 0.5 mm, sin embargo es ideal en las regiones de un alto gradiente de esfuerzos.

Magneto - Elasticidad

Algunos intentos han habido de utilizar la dependencia de la densidad de flujo magnético en los materiales ferromagnéticos en análisis experimentales de esfuerzos con los estados de esfuerzos aplicados. La ventaja obvia es su naturaleza no destructiva y su aparente simplicidad. Sharpe sugirió los primeros trabajos relacionados a esfuerzos aplicados externos, pero literatura rusa reciente ha reportado su aplicación a esfuerzos residuales de soldadura, y además ha mostrado buenas comparaciones con resultados mecánicos obtenidos

previamente <9>. Desafortunadamente, estos estudios no han sido ampliamente detallados y no hay explicación de la teoría involucrada.

Ultrasonido

A causa de lo atractivo de las técnicas no destructivas, algunos esfuerzos han sido divididos a la aplicación de los principios de ultrasonido al problema de medición de esfuerzos residuales.

Algunas aproximaciones han sido probadas, todas basándose en la anisotropía creada por un cambio en el estado de esfuerzos <9>. Las variaciones incluyen las siguientes características ultrasónicas <9>:

birefringencia

atenuación

ondas superficiales

goniometría

interacción de rayos

La birefringencia ultrasónica es análoga al análisis fotoelástico convencional, y la propiedad observada en la velocidad de la onda cortante, la misma que es una función del estado de esfuerzos. Este sistema medirá solamente la velocidad promedio del ultrasonido a través de la longitud del recorrido y es útil sólo en un campo uniforme de esfuerzos.

La atenuación es una propiedad fundamental de una onda ultrasónica y es afectada por el estado de esfuerzos así como por otras condiciones metalúrgicas. Si fuera posible separar la atenuación resultante de los estados de esfuerzos solamente, ésta podría ser calibrada en términos de esfuerzos.

Las ondas Rayleigh pueden ser usadas para medir los esfuerzos superficiales (profundidad de penetración aproximadamente 1mm) donde, nuevamente la velocidad es una función de los esfuerzos.

La goniometría ultrasónica utiliza el hecho que el

similares a los de un estado de esfuerzos existente <9>. Sin embargo es posible que con un futuro esfuerzo desarrollado, evolucione en un instrumento utilizable.

Analíticos

Soluciones de computadora para los gradientes térmicos asociadas con una fuente puntual móvil de calor como el caso de un arco de soldadura, han estado disponibles desde 1.936 y una buena revisión del desarrollo de las mismas para aplicar al estudio teórico de los esfuerzos residuales de soldadura han sido consideradas en un estudio por Tall. Tall combina la solución térmica con un análisis de esfuerzos elástico-plástico, el cual también acomoda la dependencia de la temperatura del límite elástico, módulo de Young y el coeficiente de expansión térmica <9>. Para llegar a una conclusión asume algunas condiciones como la cantidad de energía total del arco que fue absorbida por la plancha durante la soldadura. Los resultados fueron comparados con un programa experimental paralelamente, el cual mostró una

pobre correlación usando la asunción hecha del calor inicial de entrada. Se notó que el análisis era muy sensible a este parámetro, y que ajustando el valor asumido, una buena correlación era posible. La conclusión importante de este trabajo fue la identificación del gran significado que tiene el calor inicial de entrada y el hecho de que una determinación precisa de este valor es necesaria antes de obtener predicciones analíticas precisas <9>.

Un trabajo similar fue llevado a cabo por Masubuchi el cual confirmó las conclusiones anteriores.

Recubrimientos Quebradizos

Existe además de los métodos mencionados, una técnica que sirve para advertir la presencia y distribución de esfuerzos residuales, y si bien no llega a medirlos con precisión, presenta la ventaja de una determinación rápida y sencilla con un equipo portátil <10>.

La técnica consiste en la aplicación de una capa quebradiza que recubre a manera de una laca la superficie del material, luego al ser aplicados o liberados los estados de esfuerzos aparece un patrón de resquebrajamiento de esta capa quebradiza el mismo que indicará la dirección de los esfuerzos principales de tensión y de los secundarios por medio de la orientación de dicho patrón.

Los esfuerzos residuales principales de tensión estarán ubicados en la dirección perpendicular al grupo de grietas paralelas que aparecen, y su magnitud puede ser determinada por medio de las barras calibradoras <12>, las mismas que para el efecto fueron previamente cubiertas con la misma laca en las mismas condiciones de temperatura que el material sujeto de observación.

La observación del patrón de fracturas obtenido se facilita por medio del uso de una pintura especial reflectiva debajo del recubrimiento quebradizo, pudiendo así identificarse el patrón al colocar una luz

inclinada que proviene de la misma dirección del observador, sobre la superficie del material sujeto de observación <12>.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS PARA ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES

Las tensiones residuales en soldaduras pueden ser reducidas con la producción de deformaciones plásticas en cantidades y distribuciones determinadas <6>. La deformación plástica puede ser aplicada térmicamente, mecánicamente, o por medio de una combinación de ambas. La técnica más comúnmente usada, la misma que es denominada "tratamiento de alivio de tensiones", es aquella en que una soldadura se coloca durante un cierto tiempo y temperatura dentro de un horno, dependiendo del tipo de material y el grosor.

Por otra parte cuando se aplican cargas a una soldadura, las tensiones residuales se redistribuyen debido a la deformación plástica local. Cuando las cargas desaparecen, las tensiones han sido reducidas <6>. Este efecto llamado "liberación mecánica de esfuerzos", ha sido demostrado en una serie de experimentos con especímenes de acero al carbono soldados.

1.1. Métodos Mecánicos

Una gran variedad de métodos mecánicos pueden ser utilizados con el fin de aliviar las tensiones residuales producto de procesos por soldadura. Estos métodos se basan en el principio de que los esfuerzos externos aplicados contribuyen a disminuir y en ocasiones a eliminar las tensiones residuales <6>. Ver figura 7.

Entre los métodos mecánicos más usados tenemos los siguientes:

- MARTILLADO (Shot Peening) .- Método que consiste en golpear repetidamente con un martillo o mazo a la pieza que se ha soldado. Este método ha sido empleado por la industria de la soldadura por más de 35 años, pero los requerimientos y regulaciones que gobiernan este procedimiento han sido basados en la opinión antes que en datos científicos, debido a que no ha habido un método práctico para medir el efecto del golpe <6>.

Se tienen sin embargo, algunas especificaciones y códigos que recomiendan el no golpear ni la primera ni la última capa de soldadura. La primera, por que puede ocasionarse un desplazamiento de los miembros; y la última capa se prohíbe golpear por que se presume que trabajado en frío dañarías la soldadura, y no hay una aplicación posterior de calor que lo anule <6>.

El equipo de golpeado debe ser cuidadosamente seleccionado. El martillo, herramientas neumáticas y por demás, deben ser lo suficientemente pesadas en la fuerza del golpe, de manera que sea efectivo sin producir excesivo endurecimiento, pero no tan pesadas que involucren momentos de doblado o produzcan agrietamiento en la soldadura.

El martillado debería ser empleado en cada capa de soldadura, excepto en las primera y última capas, para ser efectivo. La efectividad decrece a medida que el espesor de la capa es mayor, y es de dudosa efectividad para depositos de 6 mm. ó mayores <6>.

- TENSIONADO (Proofstressing) .- Las investigaciones indican que cargas uniformes aplicadas en soldaduras, tienden a hacer decrecer los esfuerzos residuales longitudinales. Ver figura 7.

Recipientes a presión cilíndricos y esféricos pueden ser sometidos a esta prueba, que consiste en cargar el material soldado para aliviar sus tensiones residuales, por medio de carga hidrostática <6>.

En los recipientes cilíndricos la carga hidrostática produce esfuerzos circunferenciales mayores casi en el doble a los esfuerzos longitudinales, de manera que liberar de esfuerzos a soldaduras circunferenciales será la mitad de hacerlo en soldaduras longitudinales <6>.

Existe sin embargo el peligro de fracturas en materiales sensibles a ranuras, o no dúctiles a la temperatura que se realice el tensionado.

5.2. Métodos Térmicos

Estos métodos a más de aliviar las tensiones residuales, pueden modificar o mejorar las propiedades de la soldadura depositada. Además pueden ser necesarios para producir la microestructura deseada en el metal base y Metal de aporte.

El tratamiento térmico varía dependiendo del metal soldado, de la temperatura a la que es sometido, del tiempo de exposición, y de la tasa de enfriamiento. Otros factores incluyen el diseño de la junta, el proceso de soldadura, el procedimiento de soldadura, las variables y factores similares.

Los métodos térmicos comunes son:

- PRECALENTAMIENTO.- El mismo que involucra un alza de la temperatura del metal base o de una sección del metal base, por encima de la temperatura ambiente antes de soldar. Las temperaturas de precalentamiento pueden

variar desde 26°C cuando se suelda a temperaturas ambientales bajas, hasta 650°C cuando se suelda hierro fundido dúctil, y 315°C en soldaduras de acero altamente endurecibles <6>.

En muchas operaciones, la temperatura a la cual el metal base es calentado debe ser cuidadosamente controlada. Los mejores medios de control son calentar la pieza en un horno que mantenga la temperatura deseada, o usar bobinas de inducción eléctricas, o "colchas" de resistencia eléctrica. En materiales delgados, lámparas radiadoras de calor o sopladors de aire caliente pueden ser usados. Si estos métodos no son prácticos, hay muchos otros que pueden ser usados para medir la temperatura, tales como: termocuplas superficiales, termómetros de bimetalo fijados magnéticamente, tizas de colores que cambian de color a temperaturas conocidas, y ceras que se ablandan a temperaturas predeterminadas <6>.

El precalentamiento es un método muy efectivo para

reducir el peligro de agrietamiento en el metal de soldadura y metal base. Además, generalmente mejora la soldabilidad con dos efectos beneficiosos: - Disminuye las tasas de enfriamiento en el metal base afectado por el calor y en el metal de soldadura, y reduce las magnitudes de los esfuerzos por contracción <6>.

Las tasas de enfriamiento son mayores para una soldadura hecha sin precalentamiento. Mientras mayores son las temperaturas de precalentamiento, menores son las tasas de enfriamiento cuando la soldadura se ha completado. Además, en el caso del hierro la conductividad térmica decrece. A 595°C , la conductividad térmica del hierro es 50% menor que a la temperatura ambiente. Así, bajas conductividades térmicas aseguran tasas de enfriamiento bajas, a causa de que el calor de la zona soldada es transferido más lentamente <6>.

El precalentamiento con una baja tasa de enfriamiento consecuentemente, puede ayudar a proveer una estructura

favorable en el acero. La zona afectada por el calor en la junta, permanece a la temperatura de transformación por un período más largo, lo cual permite la transformación de austenita a ferrita y perlita, o bainita en vez de martensita <6>. La soldadura precalentada tiende a tener menos zonas duras que una hecha sin precalentamiento.

En soldadura de multipases, la temperatura entre pases es la temperatura de precalentamiento para la siguiente deposición. El intervalo de tiempo entre pases controla esta temperatura.

Con el fin de precalentar, a veces estructuras completas, ótras hierro fundido o forjado pesado para ser reparados con soldadura, se utilizan hornos usados para tratamientos térmicos o para alivio de tensiones. Cuando la pieza a ser soldada es extraída del horno, debe ser proveída protección contra el enfriamiento rápido, con papeles de asbesto o "frazadas". Algunos fabricantes usan para precalentamiento localizado, gas

natural o manufacturado, como combustible, toda vez que son relativamente limpios y convenientes.

También son usadas resistencias eléctricas de 100 a 200 para precalentamiento localizado y general, para reparaciones en fundiciones y tuberías, y para juntas de recipientes a presión, especialmente para soldadura en el campo. Estas resistencias eléctricas deben ser cuidadosamente aisladas para evitar el peligro de shock a los operarios.

El calentamiento por inducción, usando transformadores de 60 Hz. construídos con diferentes capacidades especialmente para este propósito, es probablemente el método más común de precalentar tuberías para soldar. Estos transformadores pueden ser operados manualmente o con controles automáticos que mantendrán la temperatura deseada o seguirán un determinado programa de temperatura - tiempo.

POSTCALENTAMIENTO.- Este tratamiento es definido

como el calentamiento uniforme de una estructura a una temperatura requerida, mantenimiento de la temperatura por un determinado período de tiempo, seguido por un enfriamiento uniforme <6>.

Generalmente este tratamiento térmico es requerido para refinamiento de grano, después de operaciones donde se han usado temperaturas suficientemente altas para causar una microestructura no homogénea con cambios bruscos. Para esto es necesario alcanzar la austenización del material, esto es llevarlo a temperaturas superiores a la temperatura donde la austenización empieza <8>.

Sin embargo, tratamientos térmicos que involucran cambios en la microestructura y cambios dimensionales pueden ser perjudiciales a una pieza; consecuentemente el tratamiento de liberación de esfuerzos es usualmente desarrollado por debajo del rango crítico <6>.

Cuando se usa este método, deben ser consideradas otras

propiedades importantes. La microestructura y los esfuerzos de tensión e impacto, están entre las propiedades afectadas por este tratamiento. Así, es necesario seleccionar una temperatura que desarrolle las propiedades deseadas en el acero, mientras que al mismo tiempo se provea al máximo la liberación de tensiones residuales.

Mientras menor sea la temperatura empleada en el postcalentamiento, será necesario un mayor tiempo de tratamiento <13>.

DISMINUCIÓN en grados C debajo de la T recomendada	AUMENTO del tiempo mínimo de tratamiento en horas
50	2
100	3
150	5
200	10

La temperatura recomendada para el postcalentamiento varía de acuerdo a las necesidades de obtener una microestructura deseada, o sólomente liberación de tensiones sin cambios microestructurales.

CAPITULO 6

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales utilizados

- Aceros de bajo contenido de carbono (Tabla 1), utilizados tanto en la confección de probetas para los procesos de soldadura, como en la fabricación de cilindros de gas, que de acuerdo a su contenido de carbono y a la microestructura observada corresponden a un acero A-36 en la especificación ASTM (American Society for Testing Materials), y en la especificación SAE (Society of Automotive Engineering), a un 1020; obtenidos en el mercado en las condiciones mostradas en la Tabla 2.
- Electrodo para arco sumergido, alambre O.K. 12.10 y fundente O.K. 10.70 que produce un análisis aproximado de metal depositado mostrado en la Tabla 3. El electrodo O.K. 12.10 corresponde al EL 12 en

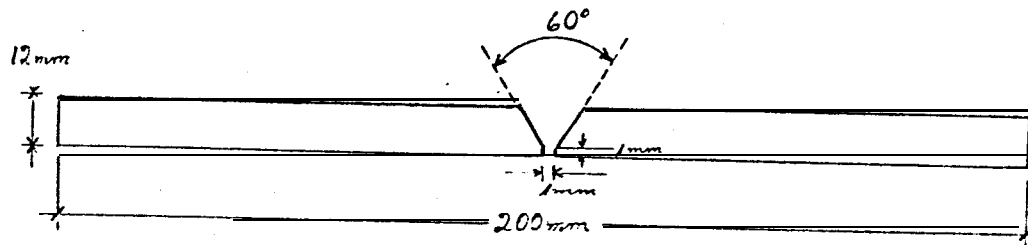
la especificación AWS (American Welding Society).

6.2. Obtención de soldaduras

En las diferentes condiciones de soldadura empleados, se utilizaron las probetas y variables que se muestran en la figura 13, las mismas que permanecieron constantes en todas las pruebas.

Se usó además el método de sujeción que aparece en la figura 14, con el propósito de restringir la deformación de la unión, simulando así las condiciones de restricción que se presentan en soldadura de estructuras metálicas.

Las juntas fueron efectuadas bajo condiciones diferentes de restricción y temperatura inicial o de precalentamiento, las mismas que están resumidas en la Tabla 4.



Condiciones de soldadura:

Amperaje : 500 A

Voltaje : **32** V

Velocidad: **13** cm/min

Proceso : arco sumergido

Electrodo: O.K. **12.10**

Pundente : O.K. 10.70

Fig. 13.- Geometría de la unión para soldar a tope, y variables del proceso.

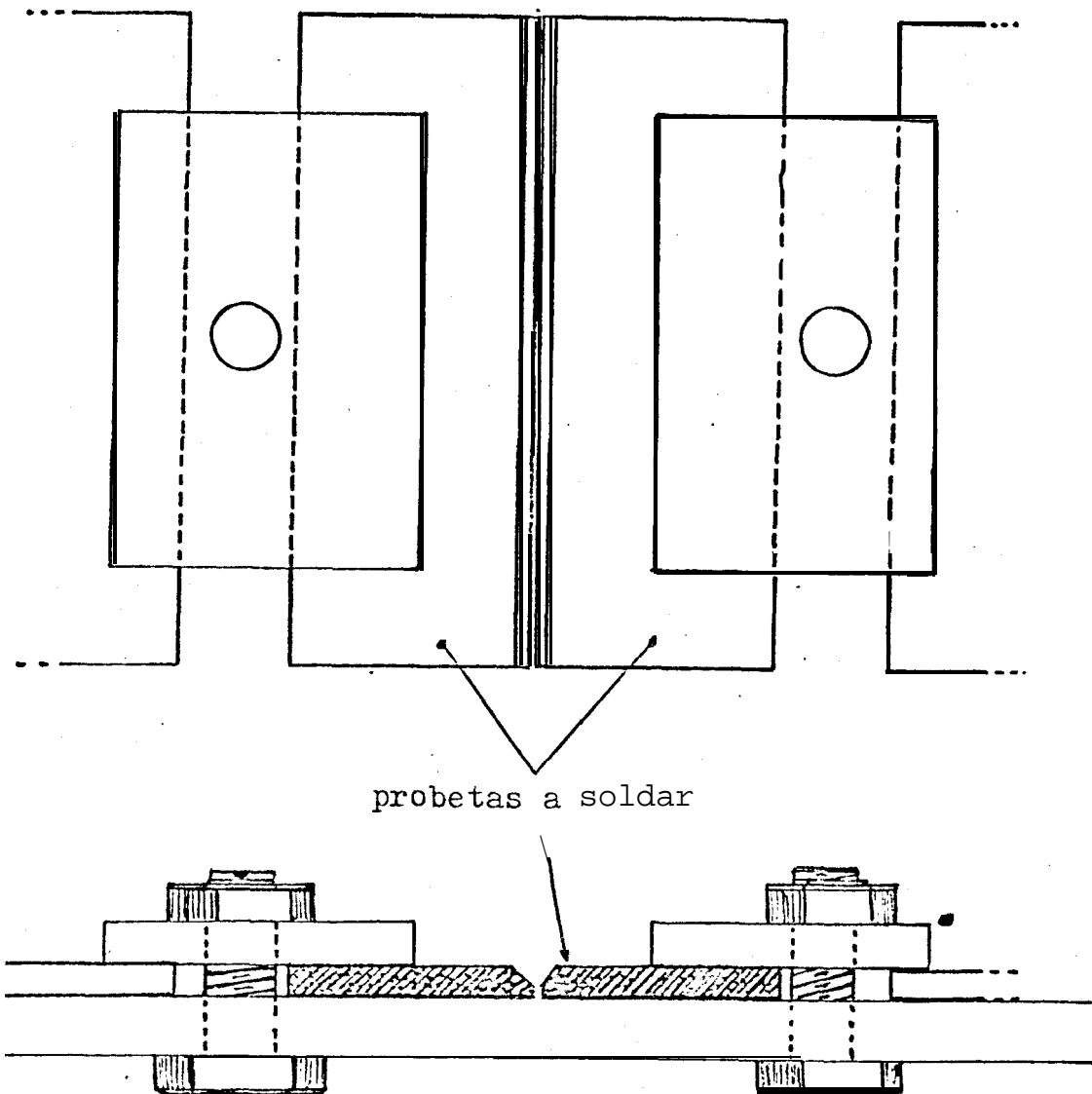


Fig 14.- Ensamble de sujeción para el proceso de soldadura con restricción.

Aplicación de métodos de alivio de esfuerzos residuales

Los métodos de alivio de esfuerzos residuales aplicados fueron: precalentamiento y postcalentamiento entre los métodos térmicos, y taladrado que es un método mecánico para liberar los esfuerzos residuales aledaños al agujero. **Todas** las juntas en que se aplicó alivio de tensiones, fueron aquellas obtenidas por soldadura con restricción.

Las temperaturas a las que se efectuaron los tratamientos de precalentamiento, y la forma como fueron alcanzadas se describen a continuación:

- A 120°C se efectuó una junta. La temperatura de precalentamiento fue alcanzada por medio de resistencias eléctricas que cubrieron las probetas, dejando libre la zona donde se depositó luego el cordón de soldadura (Figura 15). La temperatura se mantuvo a 120°C durante 15 min. con el objeto de estabilizar la misma en todo el material, utilizando

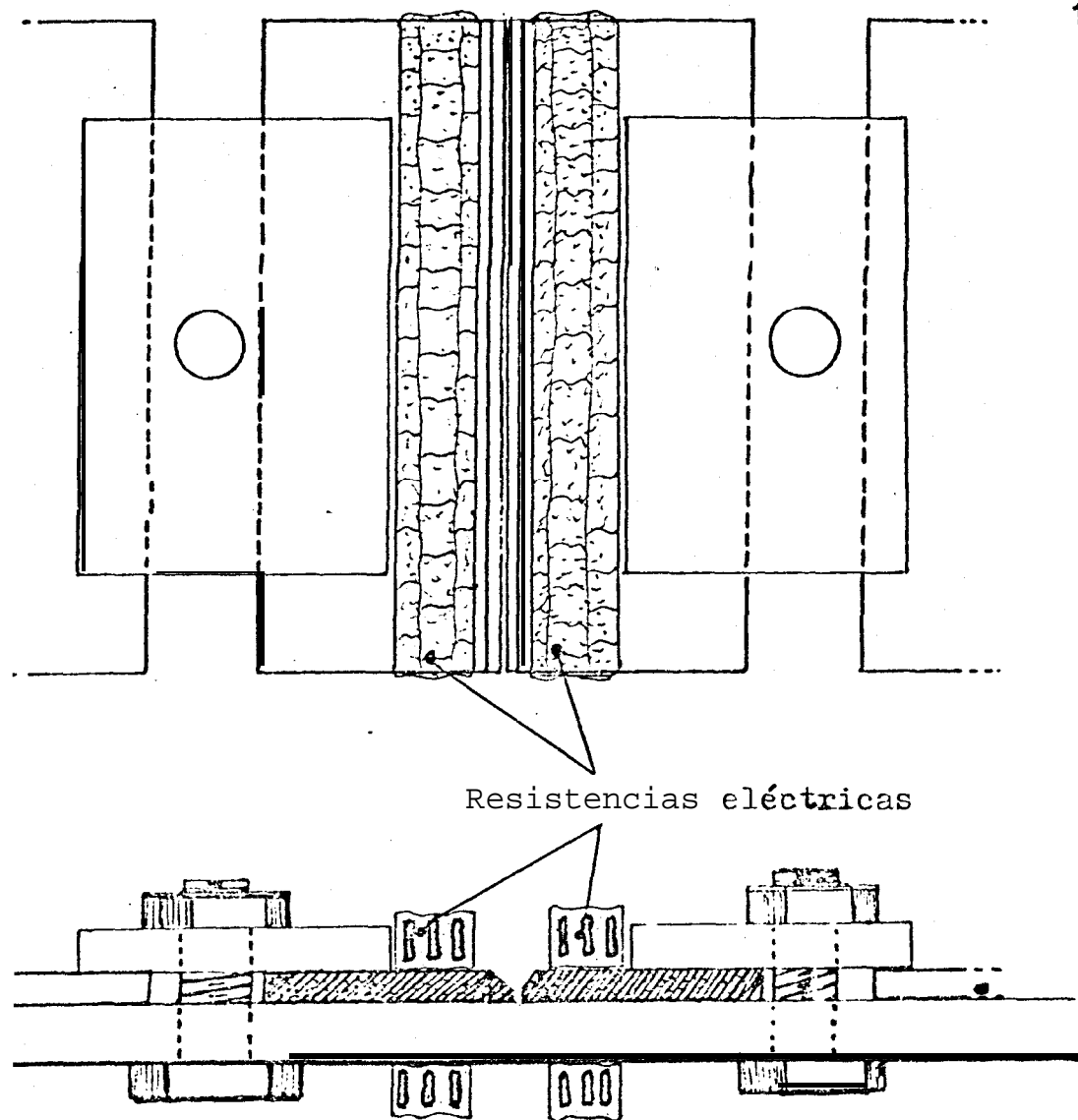


Fig. 15.- Ubicación de las resistencias eléctricas para efectuar el precalentamiento.

para el efecto termocupla y termostato.

- A 320° C se efectuó una junta. Temperatura igualmente alcanzada mediante resistencias eléctricas. Se mantuvo durante 20 min. la temperatura de precalentamiento.
- A 450° C se efectuaron dos juntas. Temperatura alcanzada mediante el siguiente procedimiento: se colocaron las probetas dentro de un horno de tratamiento térmico, se mantuvo la temperatura del horno a 550° C por el lapso de 30 min. luego de haber sido alcanzada, seguidamente se las montó en las mordazas y fueron soldadas cuando la temperatura medida por lápices termocolores y termocuplas era de aproximadamente 450° C.

El postcalentamiento se efectuó de la siguiente manera:

- Una de las juntas obtenidas a temperatura ambiente fue introducida dentro del horno de tratamientos

térmicos, y se la mantuvo a 900° C, por un tiempo de 2 horas. Luego se apagó el horno, se dejó la junta dentro del horno con la puerta del mismo apenas abierta, y finalmente se la extrajo después de seis horas para asegurar así su enfriamiento lento.

Finalmente el taladrado se efectuó en una de las juntas obtenidas a temperatura ambiente, con una broca de diámetro de 3 mm. Los agujeros desempeñan el papel de sumidero de las tensiones residuales adyacentes.

•

6.4. Investigación de esfuerzos residuales

Con el propósito de investigar los esfuerzos residuales, se hizo uso de un nuevo método denominado de "recubrimientos quebradizos". Se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Una de las juntas obtenidas a temperatura ambiente fue limpiada con un solvente de equipo que viene en aerosol con el nombre de "Cleaner", el mismo que sirve para remover suciedad, grasas, y en caso de haber, pintura. Si no se dispone del mismo, se lo puede reemplazar por tetracloruro de carbono, o cloroformo.

- Luego se aplicó una pequeña capa de "Undercoat", el mismo que es una sustancia reflectiva no inflamable que provee un fondo uniforme en todas las superficies, ya sean ásperas o lisas. Se dejó secar por 10 min.

- Finalmente se aplicó el recubrimiento frágil denominado "Stresscoat", para la temperatura de 28° C,

en finas capas hasta obtener una película de color amarillento algo obscuro. Entre capa y capa hubo un tiempo de secado de 5 min., y el tiempo de secado total fue de 36 horas como se recomienda <12>.

Una vez completamente seco el recubrimiento, se procedió a la liberación de esfuerzos por medio de taladrado de agujeros de 3 mm. de diámetro.

La observación del resquebrajamiento de la cubierta frágil se efectuó con una fuente de luz inclinada, proveniente de la misma dirección del observador.

6.5. Análisis del efecto de los esfuerzos residuales sobre las propiedades mecánicas

Se realizaron ensayos de laboratorio con el objeto de ver el efecto de los esfuerzos residuales sobre las siguientes propiedades y características:

6.5.1. Dureza

La medición de las durezas se efectuó en un durómetro Rockwell marca Wilson. La figura 16 muestra una vista transversal de las probetas utilizadas para este ensayo, donde se puede observar la línea sobre la cual se realizaron las determinaciones de dureza. El tipo de dureza usado fue el Rockwell B. La figura 17 muestra la posición desde donde se obtuvieron las probetas de dureza y establece su posición relativa con respecto a las probetas para ensayo de tracción.

La probeta para medición de macrodureza fue previamente pulida y atacada para observar la posición de la zona de fusión y el ancho de la ZAC (zona afectada por el calor), determinando también la línea central del cordón de soldadura.

Con la finalidad de obtener resultados confiables, se tomó dureza en los bloques patrones de referencia antes de tomar las lecturas sobre las probetas. Los resultados obtenidos son mostrados en la figura 24 para las distintas condiciones de soldadura y tratamientos térmicos.

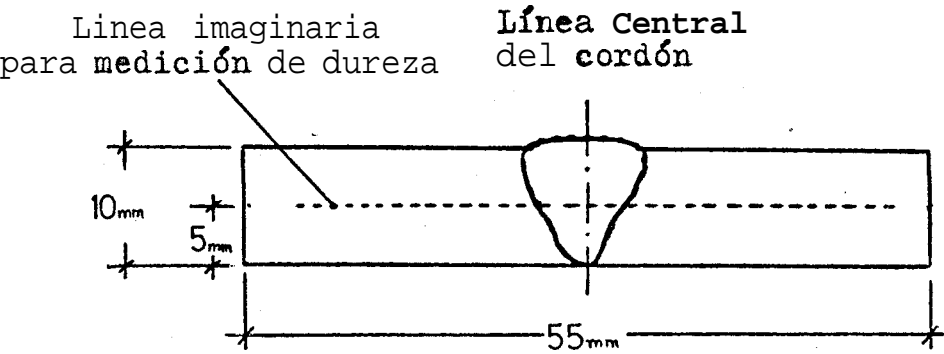


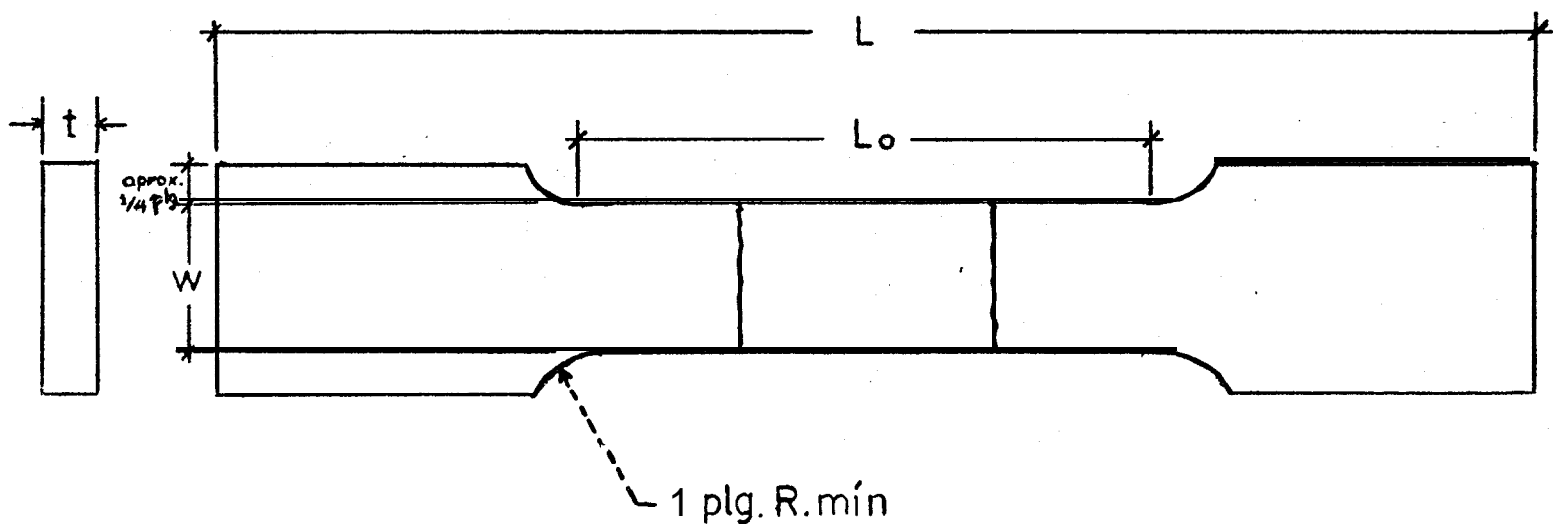
Fig. 16.- Aspecto de las probetas para medición de ma crodureza.

6.5.2. Tracción

Fueron obtenidas dos probetas para tracción de la pieza soldada a temperatura ambiente, dos de cada una de las efectuadas con precalentamiento y dos probetas de la pieza soldada a la que se practicó el postcalentamiento. La figura 17 muestra la distribución del material para la obtención de estas probetas, las que fueron maquinadas a dimensiones establecidas según la norma ASTM QW-462.1(a), características que son mostradas en la figura 18.

Los ensayos de tracción fueron realizados utilizando una máquina INSIRUN modelo 1128, a temperatura ambiente y con una velocidad de ensayo de 5 mm por minuto.

Los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 5. La posición y tipo de fractura pueden ser observadas en la figura 19.



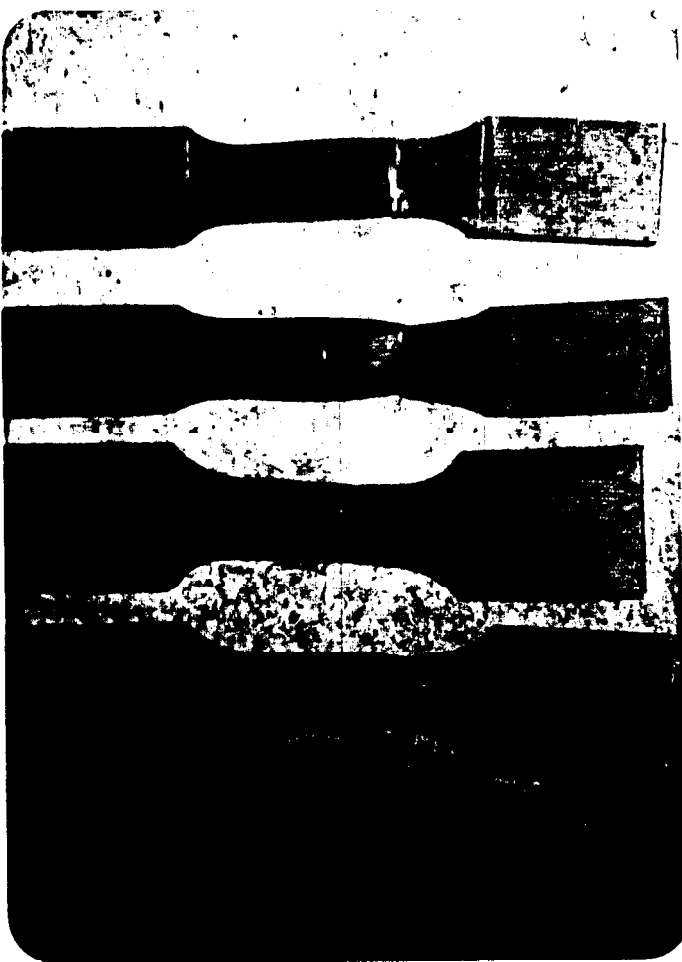
L: 10 plg. aprox. 0 cuanto se requiera

Lo: zona sold. más ancha, más aprox, 1/2 plg.

w : aprox, 1 1/2 plg., pero no menos de 1 plg. si t no excede de 1 plg.

t : grosor de la probeta según el **especimen** a probar

Fig. 18.- Probeta para ensayo de tracción, según normas ASTM QW-462.1 (a) sección reducida para planchas soldadas,



Precalentamiento a
 120°C

Precalentamiento a
 320°C

Postcalentamiento

Sin tratamiento

Precalentamiento a
 450°C

Fig. 19.- Aspecto de las probetas de los diferentes procesos, luego de los ensayos de tensión

6.5.3. Presión Interna

Con la finalidad de observar la influencia de las tensiones internas de soldadura y el efecto del postcalentamiento, se realizaron ensayos en cilindros para gas, de uso doméstico cuya capacidad es para 15 Kg. de gas y se los comercializa con 14 Kg.

Los ensayos de presión interna fueron practicados en dos cilindros de gas. Uno de ellos, en un cilindro soldado y tratado con postcalentamiento a 720°C por 20 minutos; y el otro en un cilindro sin tratamiento, es decir en la condición de soldadura.

La forma como se efectuó este ensayo fue la siguiente: primero, fueron llenados con agua los cilindros, luego se procedió a inyectar presión de aire hasta reventar. Las presiones se observaron en un manómetro durante la carga de presión, y así se pudo determinar el valor de la presión de ruptura. Finalmente se taparon con cinta adhesiva las rupturas

y fueron llenados nuevamente con agua para determinar así la expansión volumétrica lograda.

Los resultados de estas pruebas aparecen en la Tabla 6, y la figura 20 muestra las fotografías de los cilindros después del ensayo de rotura.

6.5.4. Impacto

Para las pruebas de impacto, se prepararon diez probetas para ensayo Charpy del material soldado sin tratamiento de alivio, y diez probetas del material soldado con precalentamiento de 450° C.

La disposición del material para la obtención de las probetas es mostrada en la figura 21. Las dimensiones y características de las probetas para impacto Charpy es mostrada en la figura 22.

Los ensayos se llevaron a cabo a diferentes temperaturas (ver Tabla 7). Las temperaturas debajo



a) Cilindro sin tratamiento



b) Postcalentado a 720°C, 20 min.

Fig. 20.- Ensayos de presión interna.

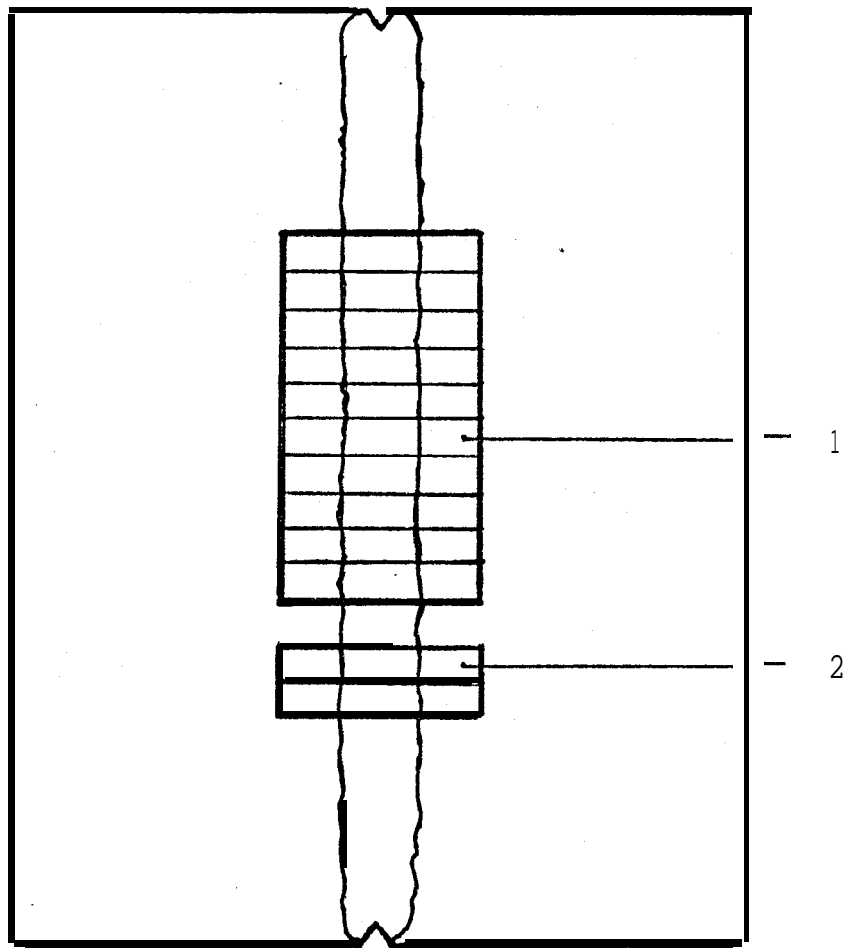


Fig. 21.- Distribución de material para obtención de probetas para ensayo Charpy.

- 1.- Probetas para ensayo Charpy
- 2.- Probetas para observación macroscópica y fotografía

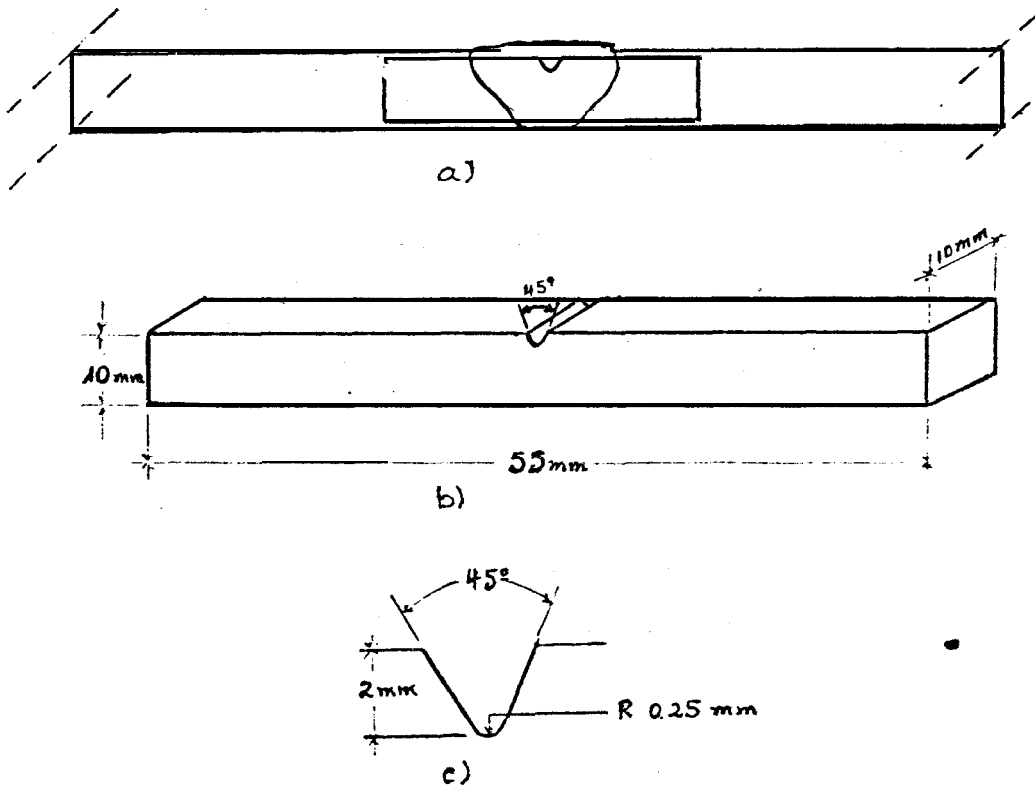


Fig. 22.- Probetas para ensayo Charpy de impacto

- a) Ubicación de la probeta respecto al cordón.
- b) Dimensiones generales.
- c) Características de la ranura.

de la ambiental, se lograron por medio de hielo seco y acetona, manteniendo a las probetas a esas temperaturas por 10 minutos, asegurando así que la temperatura sea uniforme en toda la probeta.

Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 7, los cuales son graficados para obtener la curva Energía Absorbida vs. Temperatura del ensayo, que se muestra en la Figura 23. Las superficies de fractura de cada uno de los casos se observan en las figuras 24. y 25.

6.6. Ensayos de corrosión

Para el efecto se tomaron muestras del material soldado a temperatura ambiente, con y sin restricción, y del material soldado a 450°C de precalentamiento.

Estas muestras fueron dejadas al medio ambiente durante el tiempo de 15 días después de haber sido efectuada la soldadura, luego se procedió a examinar y fotografiar las muestras cuyos resultados se observan en las

Energía (Kg-m)

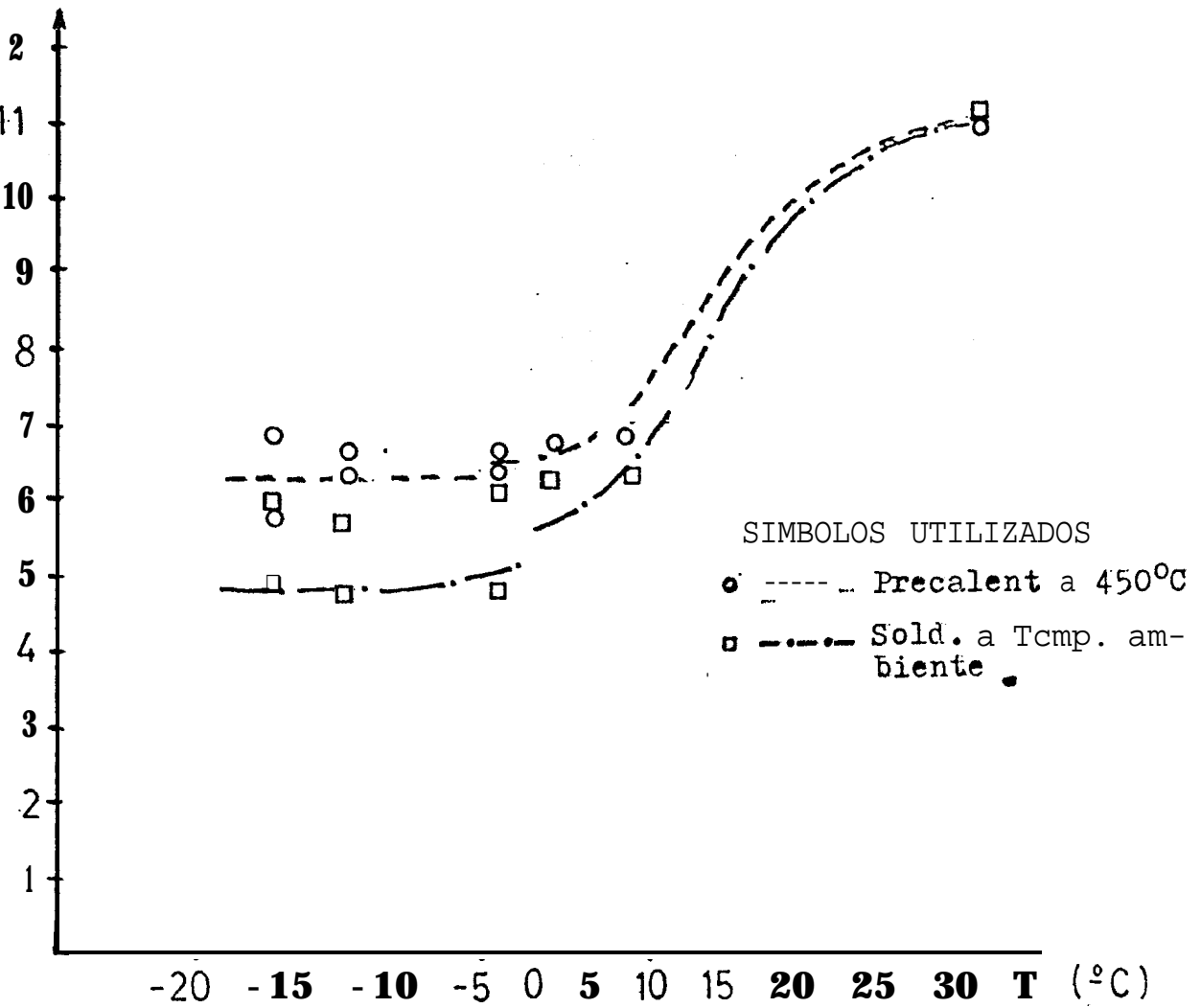


Fig. 23.- Energía vs. Temperatura del ensayo Charpy.

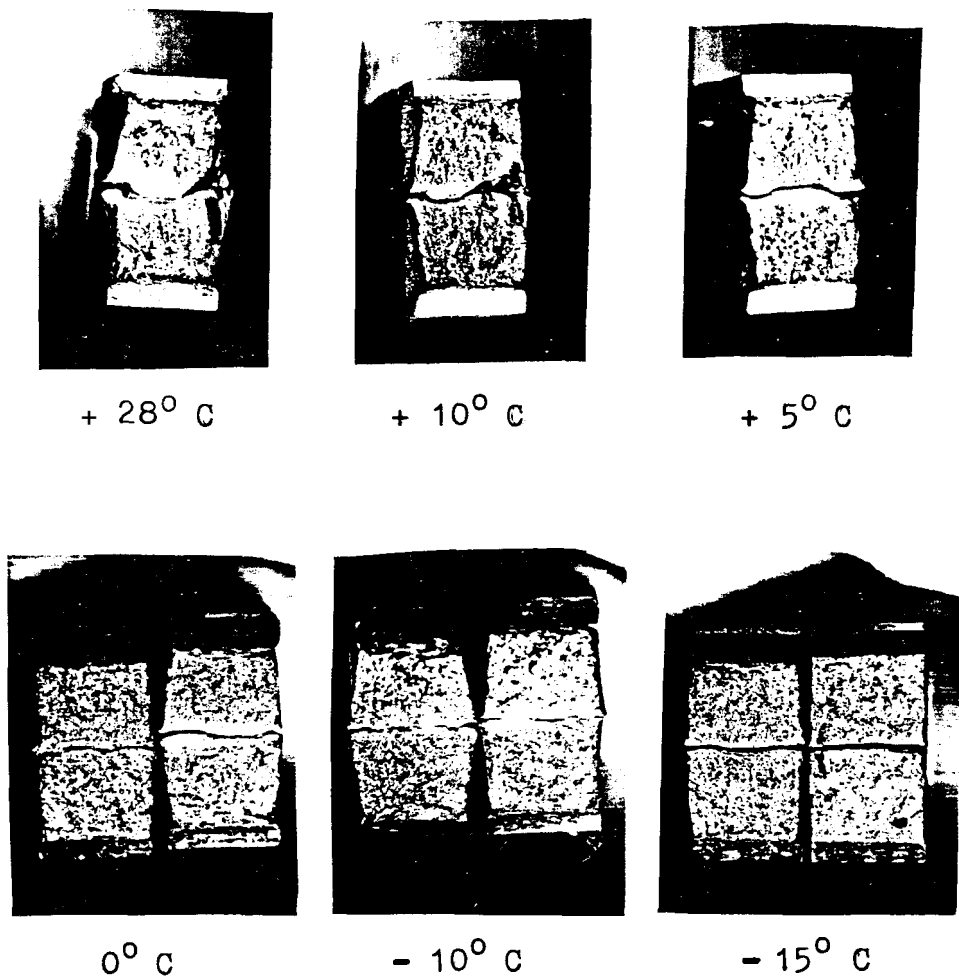
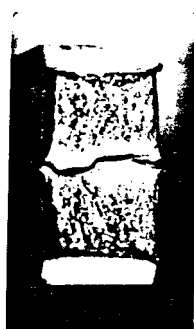


Fig. 24.- Superficies de fractura de probetas de ensayo de impacto. Soldadura sin tratamiento.



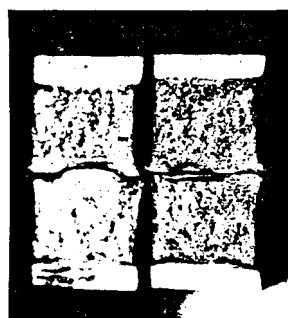
+ 28° C



+ 10° C



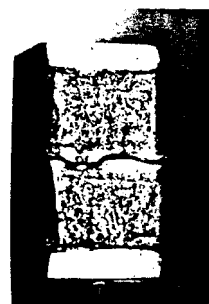
+ 5° C



0° C



- 10° C



- 15° C

Fig. 25.- Superficies de fractura de probetas de ensayo de impacto. Soldadura con precalentamiento a 450° c.

figuras 26, 27 y 28. Seguidamente se las limpió con ácido clorhídrico y enjuagó cuidadosamente con agua, y fueron examinadas nuevamente después de cinco horas de la limpieza. Las observaciones visuales realizadas se muestran en las figuras 29 y 30.

5.7. Análisis metalográficos

Los análisis metalográficos realizados incluyen:

- Observaciones microscópicas del metal base usado en las diferentes condiciones de soldadura, figura 31. Se puede apreciar en la misma que el metal en estado original (a), presenta una microestructura que denota un enfriamiento más rápido que el metal luego de haber sido recocido (b). El recocido se practicó con el objeto de observar la cantidad de carbono contenida en el mismo. De este análisis se dedujo que el contenido de carbono era aproximadamente de 0,20%, con granos de ferrita en un 70% y colonias de perlita; no se observaron problemas de orientación



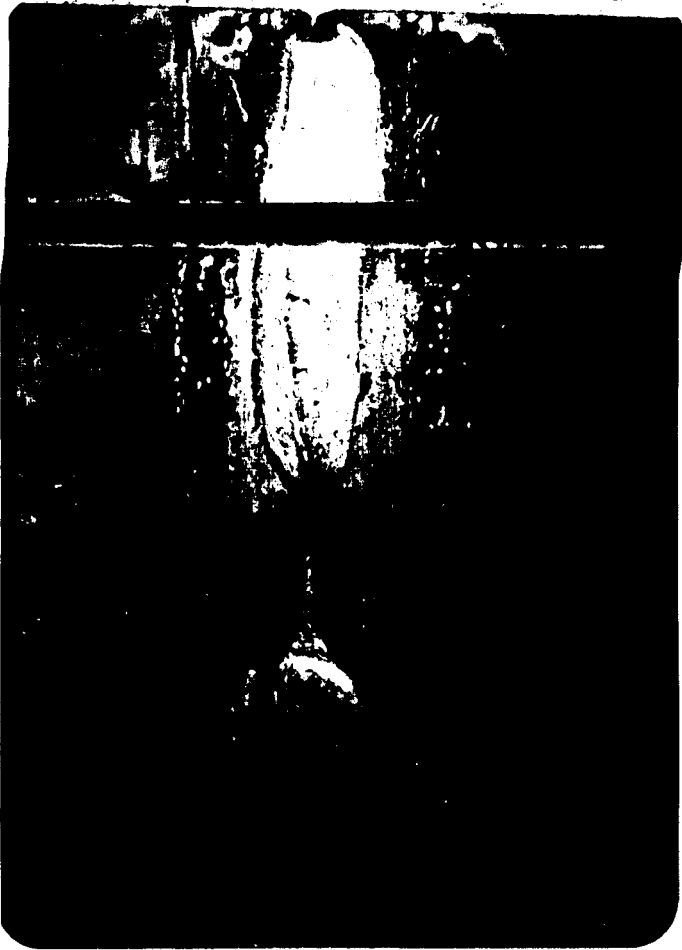
Fig. 26.- Observación a los 15 días de efectuado el proceso de soldadura con restricción y sin tratamiento.



27.- Observación a los 15 días de efectuado el proceso de soldadura sin restricción y sin tratamiento térmico.



Fig. 28.- Observación a los 15 días de efectuado el proceso de soldadura con restricción y con precalentamiento 450°C .



a) Soldadura con restricción y precalentamiento a 450°C

b) Soldadura con restricción y sin precalentamiento

c) Soldadura sin restricción y sin precalentamiento

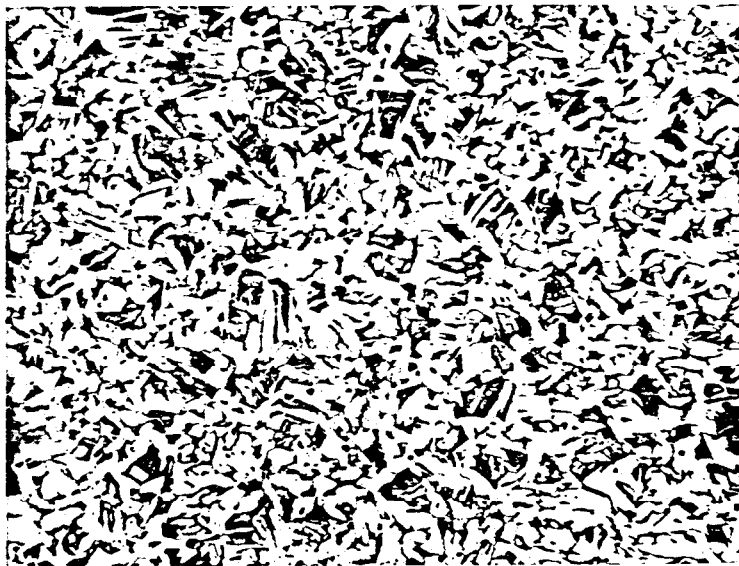
Fig. 29.- Observación visual de las muestras de soldaduras, luego de haber sido limpiadas con ácido clorhídrico y enjuagadas en agua.

a) Soldadura con restricción y precalentamiento a 450°C

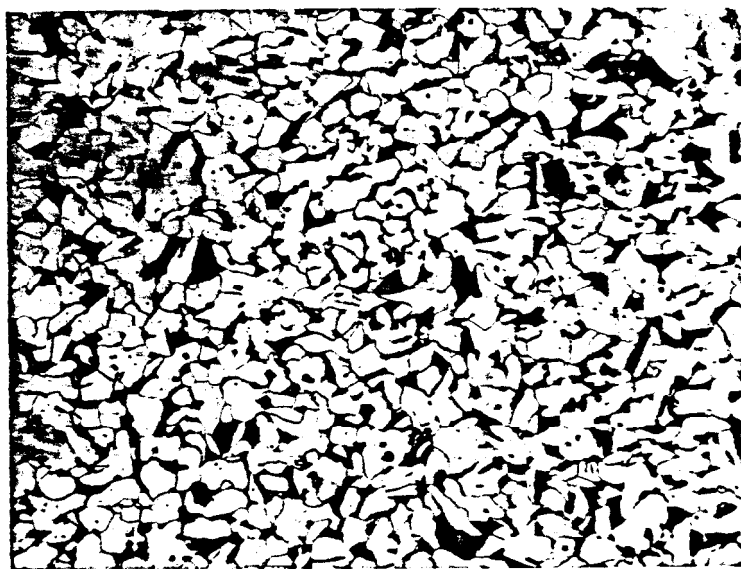
b) Soldadura con restricción y sin precalentamiento

c) Soldadura sin restricción y sin precalentamiento.

Fig. 30. Observación visual de las muestras de soldaduras que fueron limpiadas con ácido clorhídrico y enjuagadas en agua; después de 5 horas de permanecer en el medio ambiente.



a) Material Base. Estado original, tal como se usó en el proceso de soldadura. 200 x.



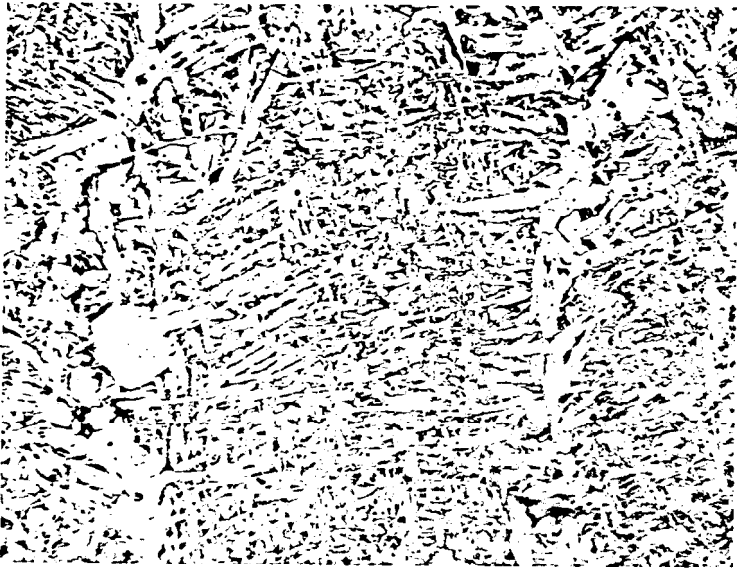
b) Material Base. Estado original recocido. 200 X. (0.18% a 0.20% de C.).

Fig. 31.- Aspectos microscópicos del acero usado en el proceso. (A-36).

de microestructura ni bandeado perlítico.

- Observación microscópica de la zona de fusión y la zona afectada por el calor (ZAC), de las soldaduras efectuadas: a temperatura ambiente (figura 32), con precalentamiento a 120°C (figura 33), precalentamiento a 320°C (figura 34), y precalentamiento a 450°C (figura 35).

En la figura 32 se muestran los aspectos microscópicos de la zona de fusión y ZAC. La zona de fusión (a) presenta la estructura denominada WIDMANSTÄTTEN la que se caracteriza por la presencia de ferrita con apariencia acicular, típica de enfriamientos bruscos en aceros de bajo contenido de carbono <17>. En la ZAC (b), se encuentra también la estructura de ferrita acicular, pudiendo distinguirse que las agujas de ferrita crecieron desde los límites de grano de la austenita que se formó debido a las altas temperaturas alcanzadas durante la fusión en el proceso de soldadura, y que



a)



b)

Fig. 32 - a) Proceso de soldadura sin tratamiento, zona de fusión, 200x

b) Proceso de soldadura sin tratamiento, ZAC, 200x

se transformó durante el enfriamiento, pudiéndose observar además zonas de ferrita proeutectoide.

En las figuras 33 y 34 correspondientes a los procesos con precalentamiento a 120°C y 320°C respectivamente, se aprecian las estructuras descritas en la figura 32, observándose sin embargo que las agujas de ferrita tienen un aspecto más basto, conforme aumentó la temperatura de precalentamiento, y consecuentemente disminuyó la velocidad de enfriamiento debido al decremento en el gradiente de temperatura.

En la figura 35 que corresponde al proceso con precalentamiento a 450°C , se observa que la estructura WIDMANSTÄTTEN desapareció en la zona de fusión, y en la ZAC es mucho más basto tendiendo a desaparecer. Además se observa el aumento del porcentaje de colonias de perlita en el metal de soldadura.

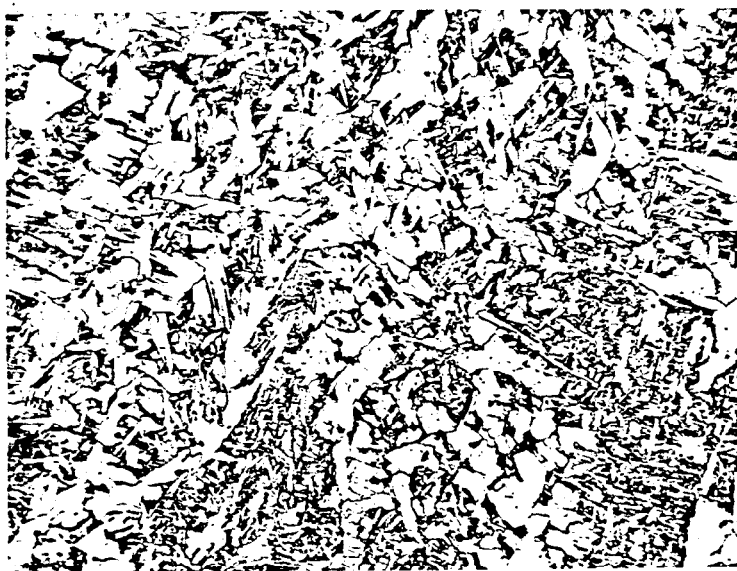


a)



b

Fig. 33.- a) Proceso de soldadura con precalentamiento de 120°C , zona de fusión, 200x
b) Proceso de soldadura con precalentamiento de 120°C , ZAC, 200x

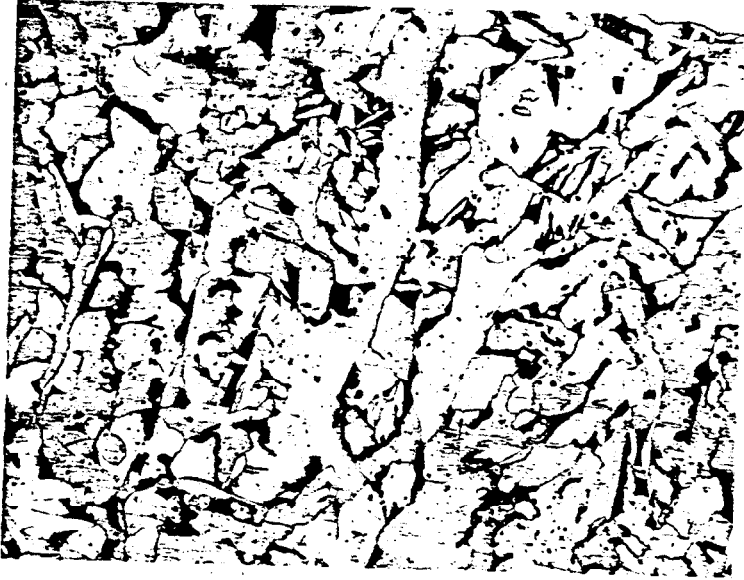


a)



b)

Fig. 34.- a) Proceso de soldadura con precalentamiento de 320°C , zona de fusión, 200x
b) Proceso de soldadura con precalentamiento de 320°C , zona afectada por el calor, 200x



a)



b)

Fig. 35.- a) Proceso de soldadura con precalentamiento de 450°C , zona de fusión, 200x
b) Proceso de soldadura con precalentamiento de 450°C , ZAC, 200x

- Observaciones macroscópicas de la zona de fusión y ZAC, figuras 36, 37 y 38.

Se puede apreciar a partir de las observaciones macroscópicas realizadas, la orientación que toma la macroestructura en la zona de fusión, indicando las direcciones seguidas en la transferencia de calor durante la solidificación de la misma. Además se observa en la figura 37 la línea de fusión, definida por el cambio de la estructura entre la zona de fusión y ZAC.

En la figura 38 se compara a partir de las fotografías presentadas, la variación en el ancho de la zona de fusión y ZAC entre las soldaduras efectuadas en el proceso sin tratamiento y en el proceso con precalentamiento a 450° C.

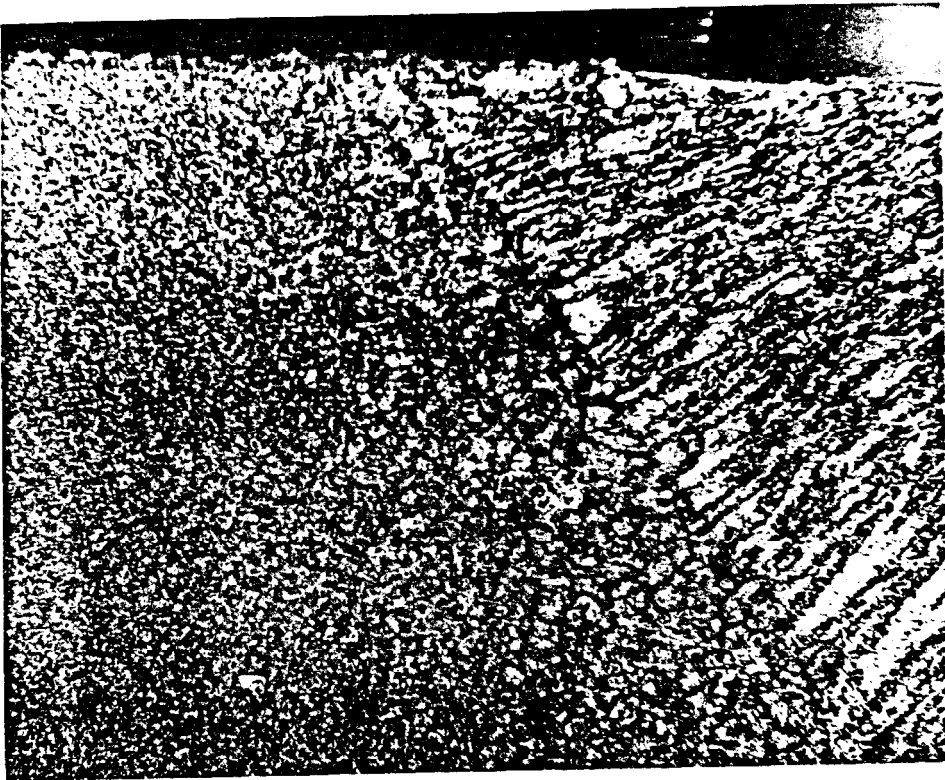


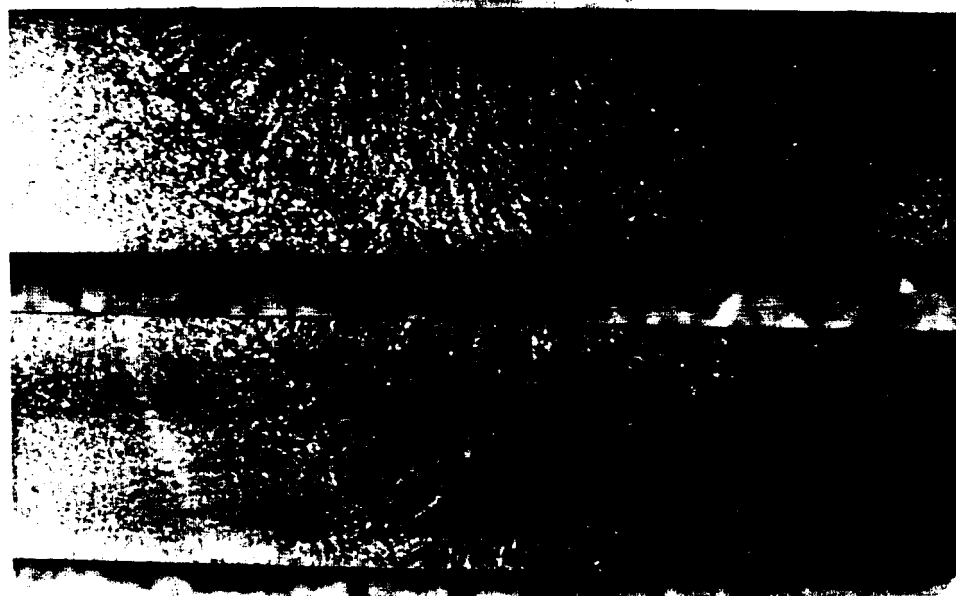
Fig. 37.- Línea de Fusión y ZAC, soldadura sin tratamiento, 10x



a)

b)

Zonas de Fusión delineadas con lápiz



b)

a)

Fig. 38.- Zonas de Fusión y ZAC en procesos de soldadura:

- a) A temperatura ambiente (23°C) sin tratamientos térmicos
- b) Con precalentamiento de 450°C

CAPITULO 7

DISCUSION DE RESULTADOS

De las pruebas experimentales se obtuvieron resultados que son discutidos y comparados en el presente capítulo.

Las figuras 39 y 40 muestran las piezas soldadas, sin restricción y con restricción, respectivamente. En el material soldado sin las mordazas de restricción, que se muestran en la figura 14, se puede apreciar una angularidad que tiene como vértice la línea de centro del cordón de soldadura. Esta distorsión no es observada cuando la soldadura se realiza con mordazas de restricción. Este fenómeno se debe a la contracción que sufre el metal depositado, durante el proceso de solidificación, la misma que se acentúa en la parte superior del cordón por tener un ancho mayor que la raíz, induciendo consecuentemente un levantamiento de los costados hacia la parte superior. Por lo tanto, si el proceso de soldadura se realiza bajo condiciones de restricción, durante la solidificación se

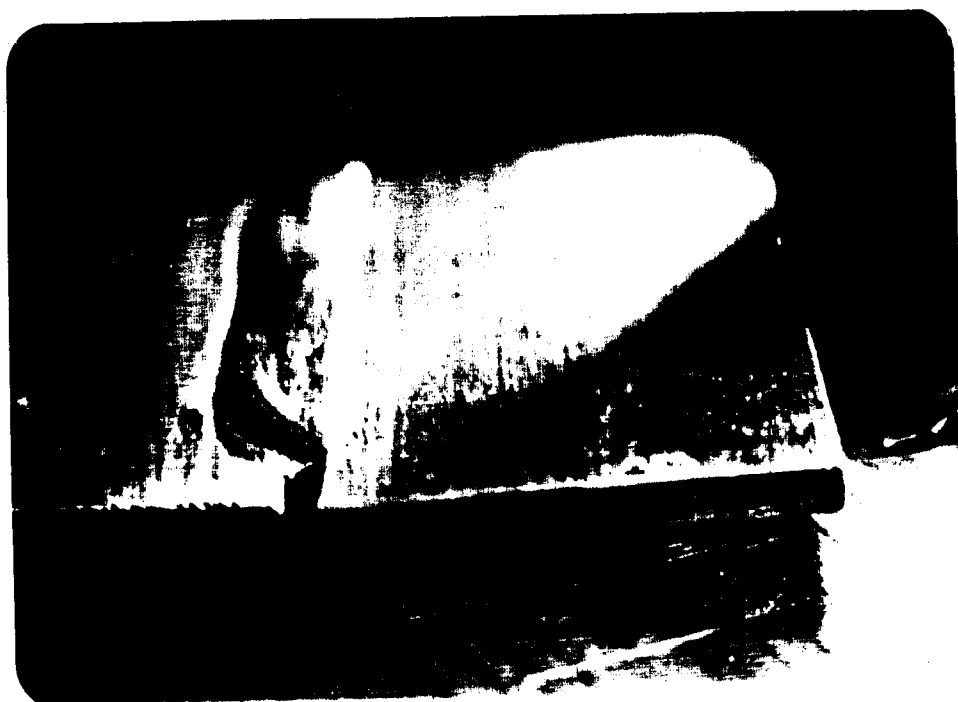


Fig. 39.- Soldadura sin precalentamiento, sin restricción

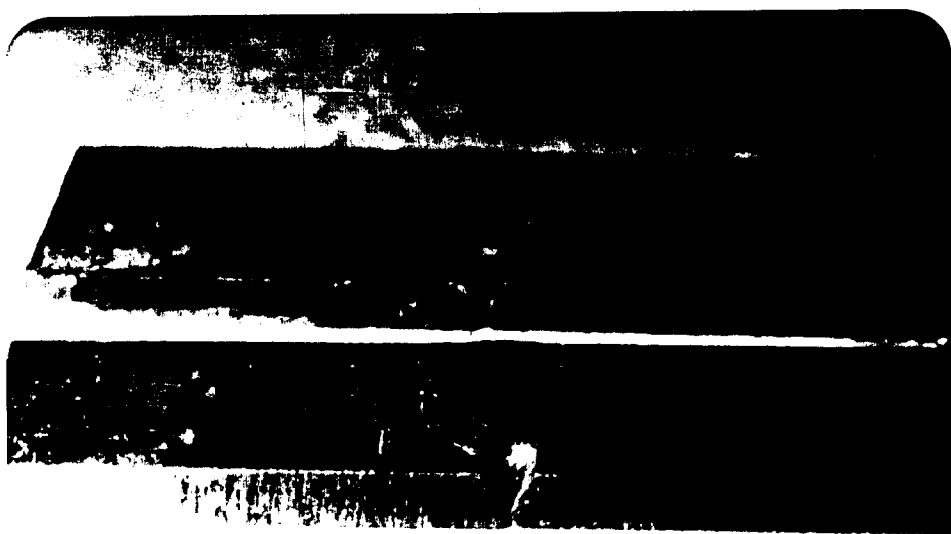


Fig. 40.- Soldaduras sin precalentamiento, con restricción

generaran esfuerzos residuales debido a que el material no ha podido deformarse libremente; debiendo crearse esfuerzos de tensión y compresión según se muestra en la figura 5.

La aplicación de recubrimientos quebradizos indicó la presencia de los esfuerzos de compresión en dirección normal al conjunto de grietas paralelas observadas en la figura 41, y paralelos a la dirección del cordón. El análisis de la naturaleza y dirección de los esfuerzos detectados es hecho en base a la teoría de los recubrimientos quebradizos, la misma que dice que las fisuras detectadas en el recubrimiento frágil como un conjunto de grietas paralelas en un material cualquiera, denotan que han sido aplicados esfuerzos de tensión perpendiculares a las mismas, y en el momento en que se forman <12>; correlativamente, en un material donde existen esfuerzos residuales de compresión, éstos se transforman en esfuerzos de tensión al ser liberados; así ocurrió al practicarse el taladrado, desempeñando los agujeros papel de sumideros de los esfuerzos residuales de compresión, formados previamente debido al proceso de soldadura.

En los resultados de las pruebas de medición de macrodureza que se muestran en la figura 42, donde las curvas representan la distribución de durezas, encontrada en la línea a lo largo de la cual se practicaron las indentaciones, como se ilustra en la figura 16. En las figuras 42.1, 42.2, 42.3 y 42.4, se puede observar la distribución de la dureza en la ZAC y su variación cuando el proceso se ha realizado con algún tratamiento térmico. En estas curvas observamos que el máximo valor de dureza se produce en el centro del cordón de soldadura, y el valor original de dureza del metal base aumenta a medida que desde la zona afectada por el calor nos introducimos hacia el centro de la soldadura, a excepción de cuando se practicó el postcalentamiento donde se mantiene constante el valor de dureza. Cuando el proceso de soldadura se realiza con un precalentamiento de 120°C , las durezas máximas observadas en el centro del cordón de soldadura son las mismas, sin embargo varía su distribución, produciéndose un ensanchamiento de la ZAC. Fig 42.1.

Cuando el precalentamiento se realiza a 320°C , se obtiene un cordón de soldadura con una dureza central algo menor a

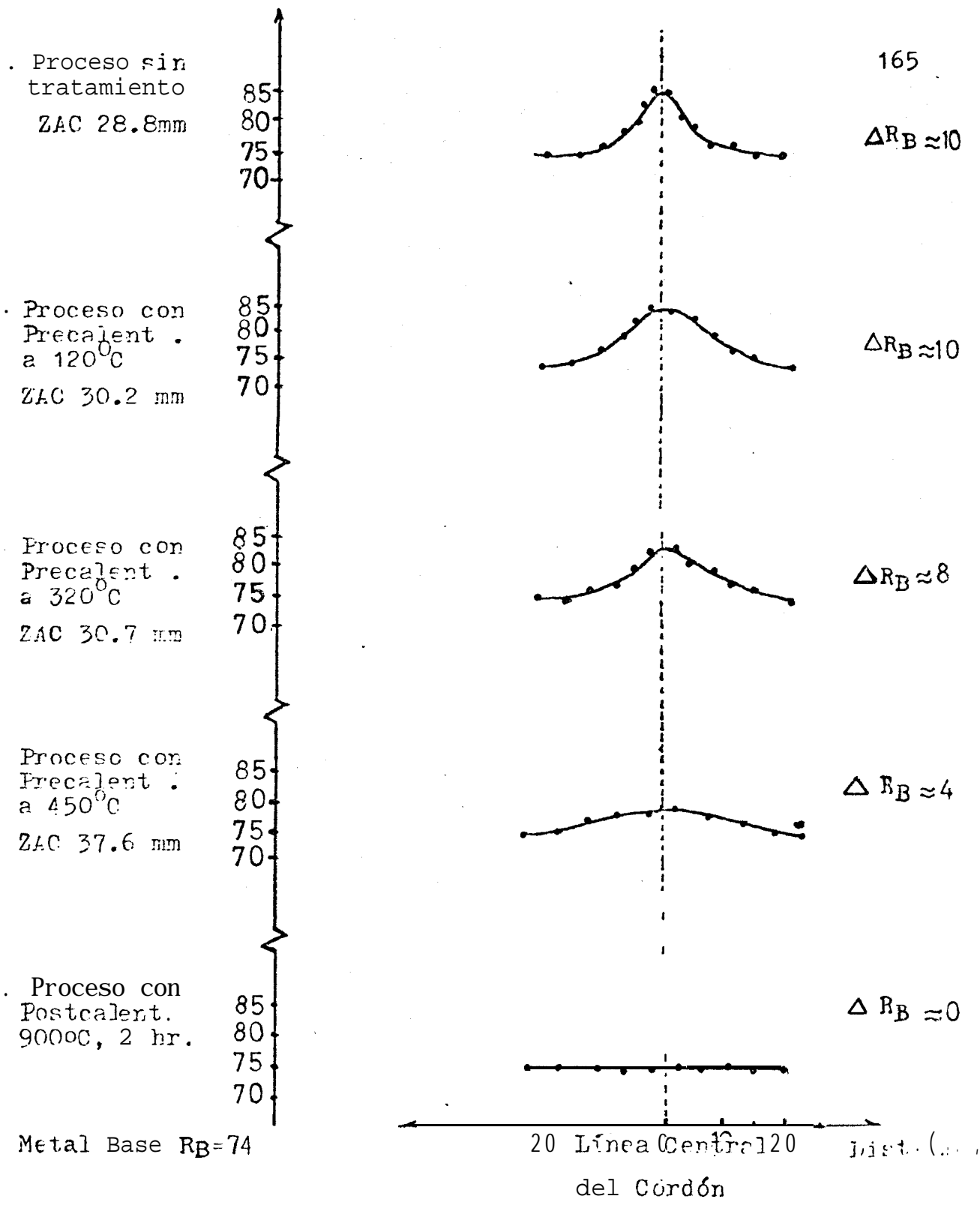


FIG.- 42.- Distribución de durezas en el corte transversal a la soldadura, y anchos de ZAC.

- ----- Proceso sin tratamiento
- -.-.-.- Con precalentamiento 120°C

Dureza R_B

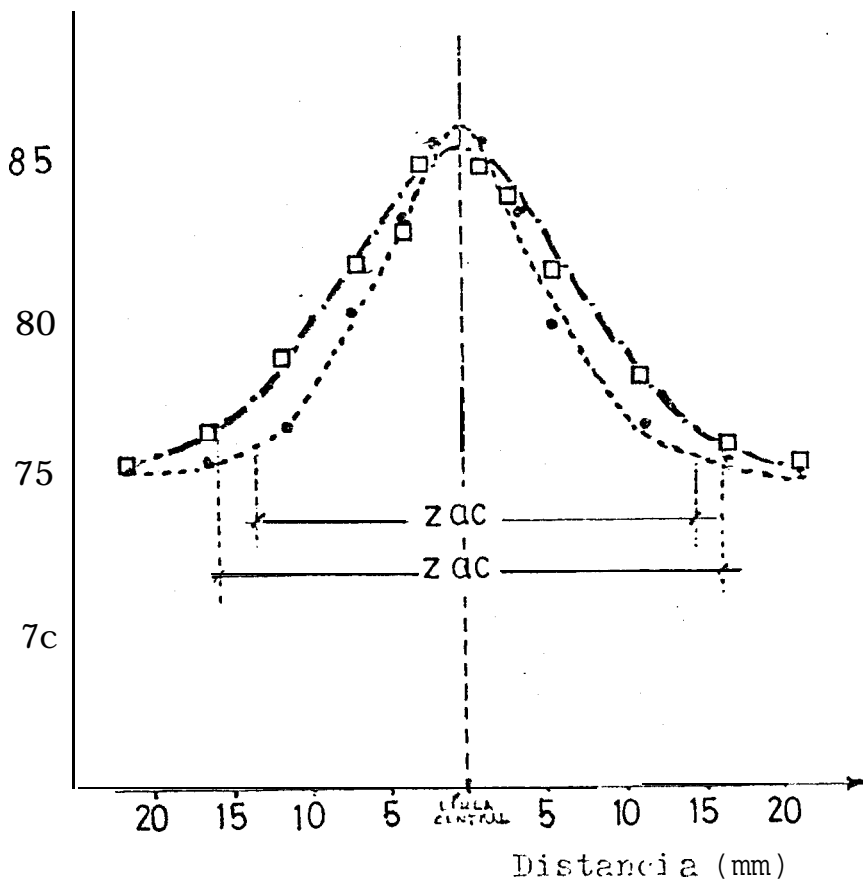


FIG. 42.1 - Variación en la distribución de dureza, y ancho de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 120°C..

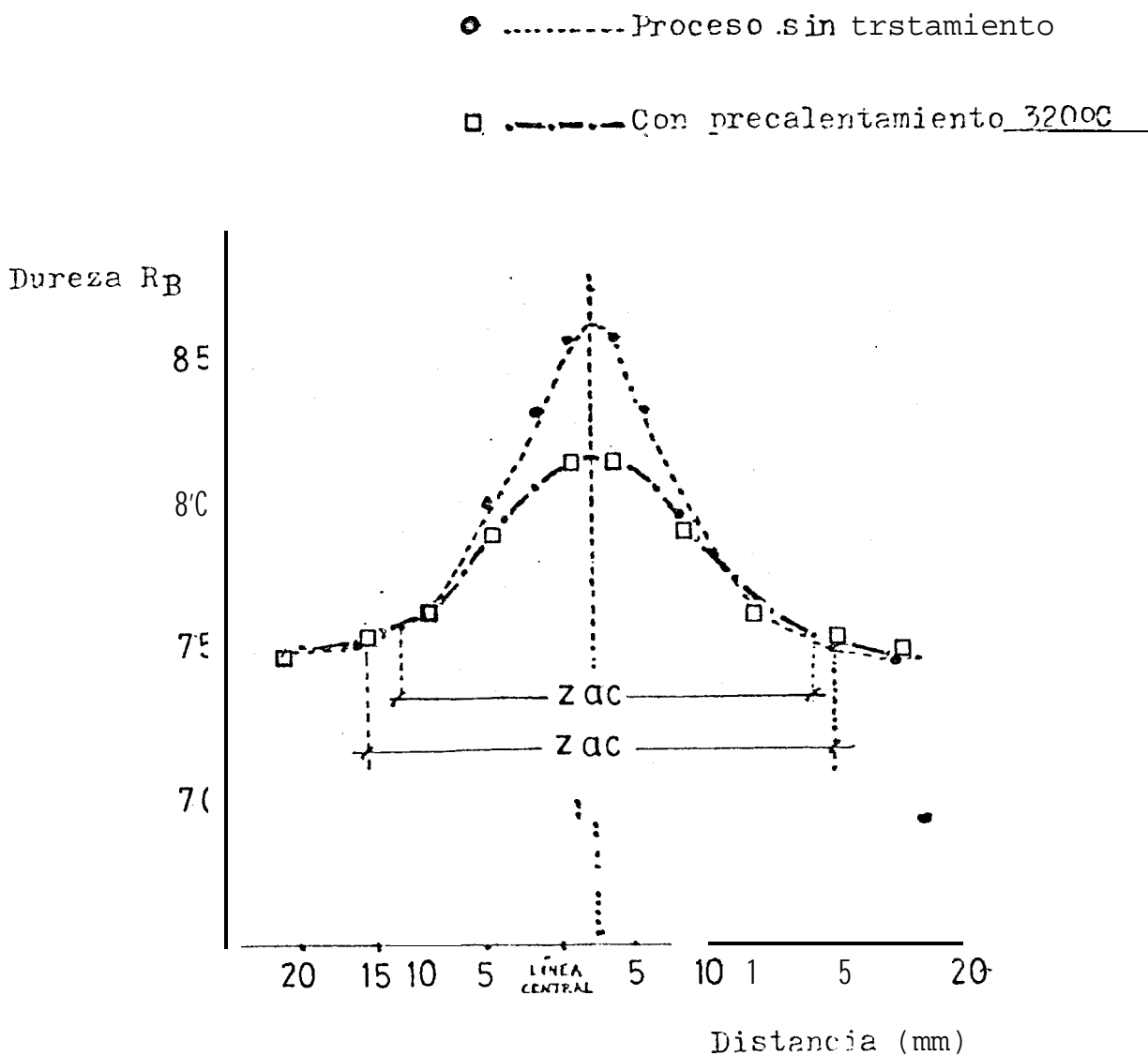


FIG. 42.2 - Variación en la distribución de dureza, y ancho de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 320°C .

● ----- Proceso sin tratamiento

□ ----- Con precalentamiento 450°C

Dureza R_B

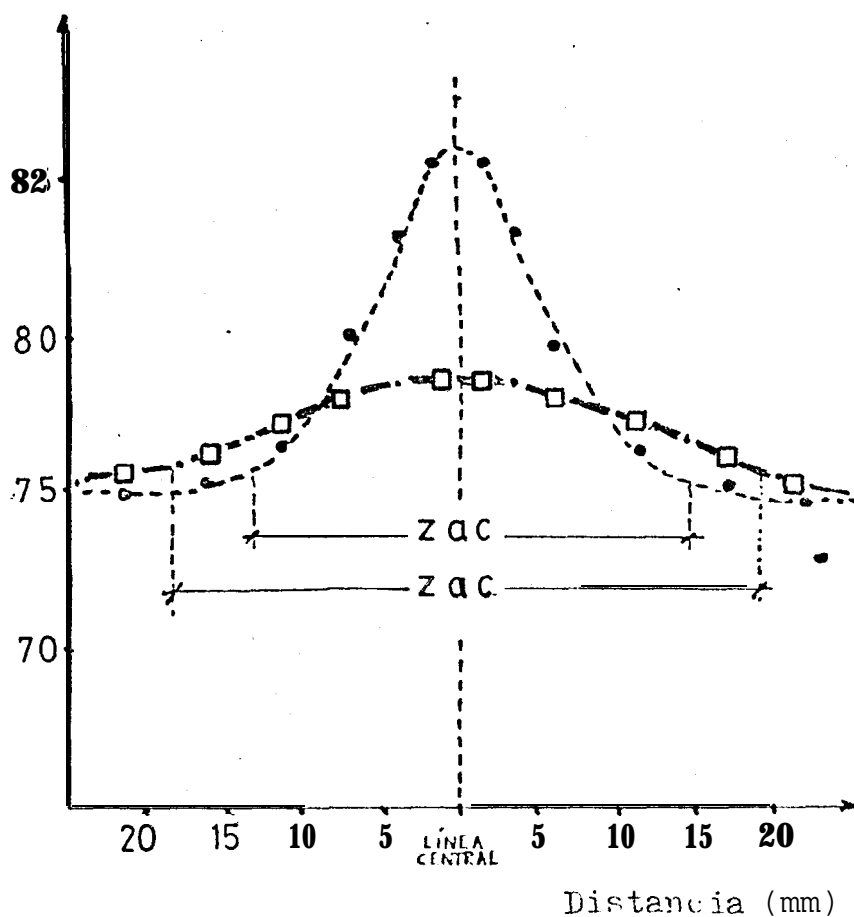


FIG. 42.3 - Variación en la distribución de dureza, y ancho de ZAC, cuando el proceso se efectúa con precalentamiento a 450°C

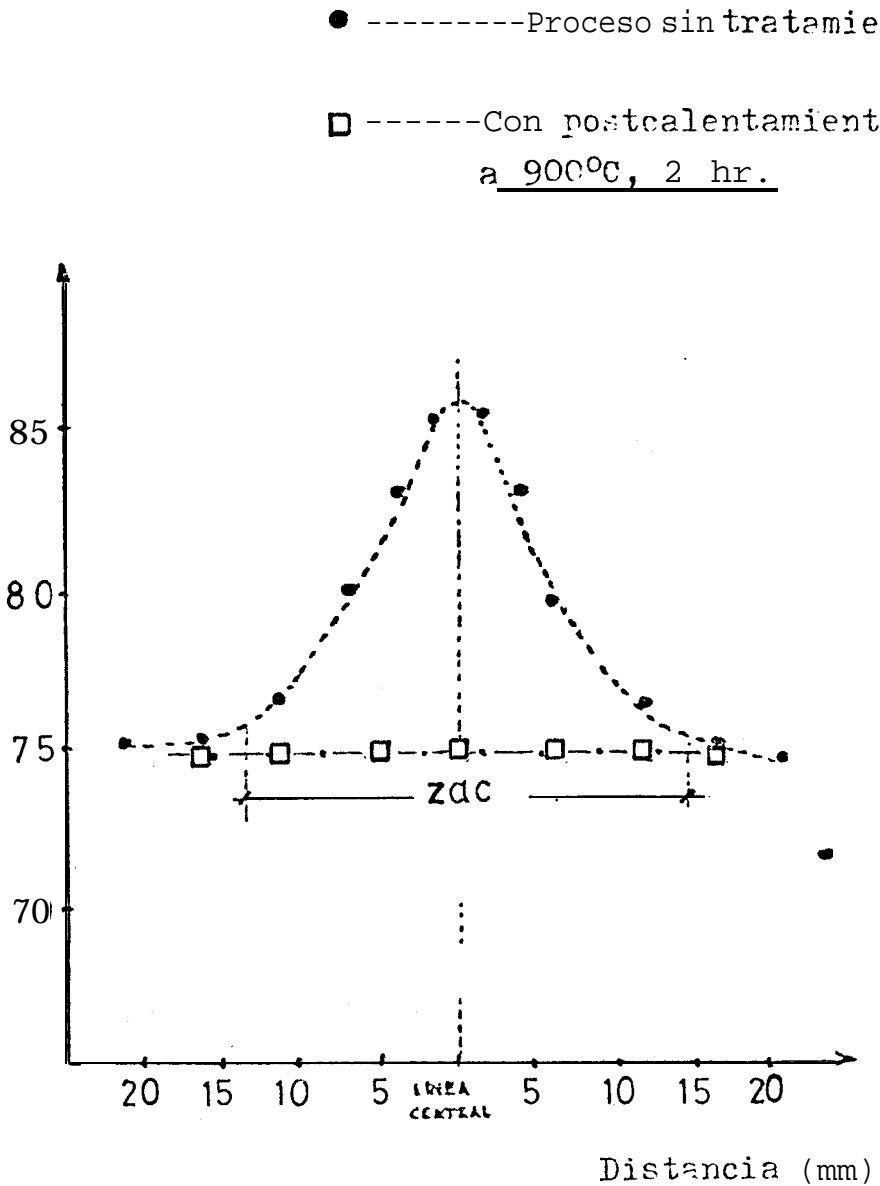
Dureza R_B 

FIG. 42.4 - Variación en la distribución de dureza, y ancho de ZAC, cuando el proceso se efectúa con postcalentamiento a 900°C, 2 hr.

aquella sin tratamiento, produciéndose igualmente un aumento de la ZAC. Figura 42.2.

El precalentamiento a 450°C produce una variación mucho más acentuada a aquellas observadas en los precalentamientos a 120°C y 320°C , la dureza máxima disminuye más pronunciadamente, además disminuye el gradiente de dureza entre el metal base y el centro del cordón, produciéndose un aumento de la ZAC. Fig. 42.3.

El tratamiento de postcalentamiento a 900°C produjo una curva de dureza completamente uniforme obteniéndose en el centro del cordón de soldadura la dureza igual a la del metal base. Fig. 42.4.

Del análisis en conjunto de estas curvas se puede observar que el gradiente de dureza disminuye conforme aumenta la temperatura de precalentamiento en el proceso de soldadura, y aumenta también el ancho de la ZAC.

En los ensayos de tracción, se puede observar a partir de la

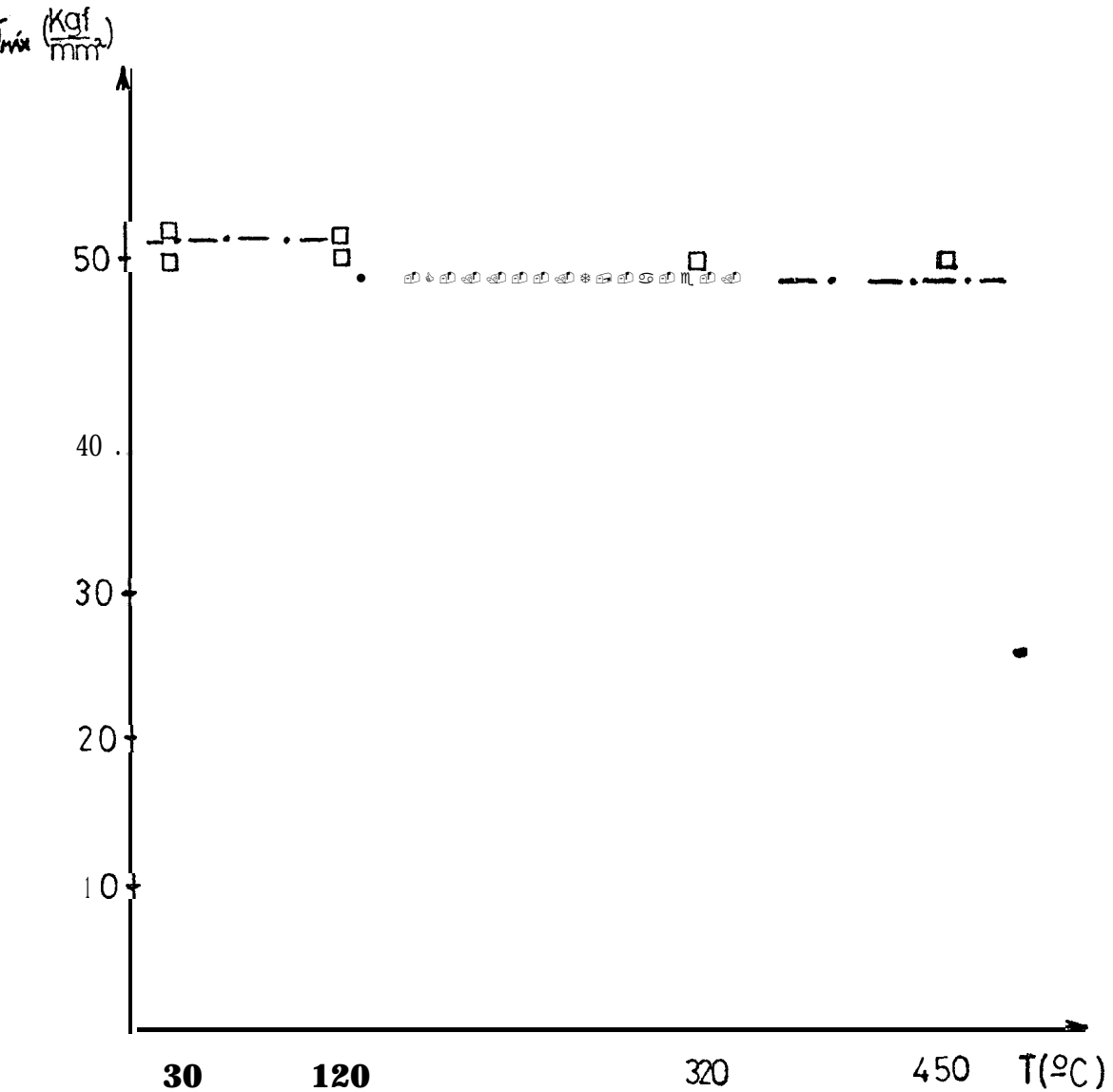


Fig. 43.- Variación de la resistencia máxima a la tensión con la temperatura de precalentamiento.

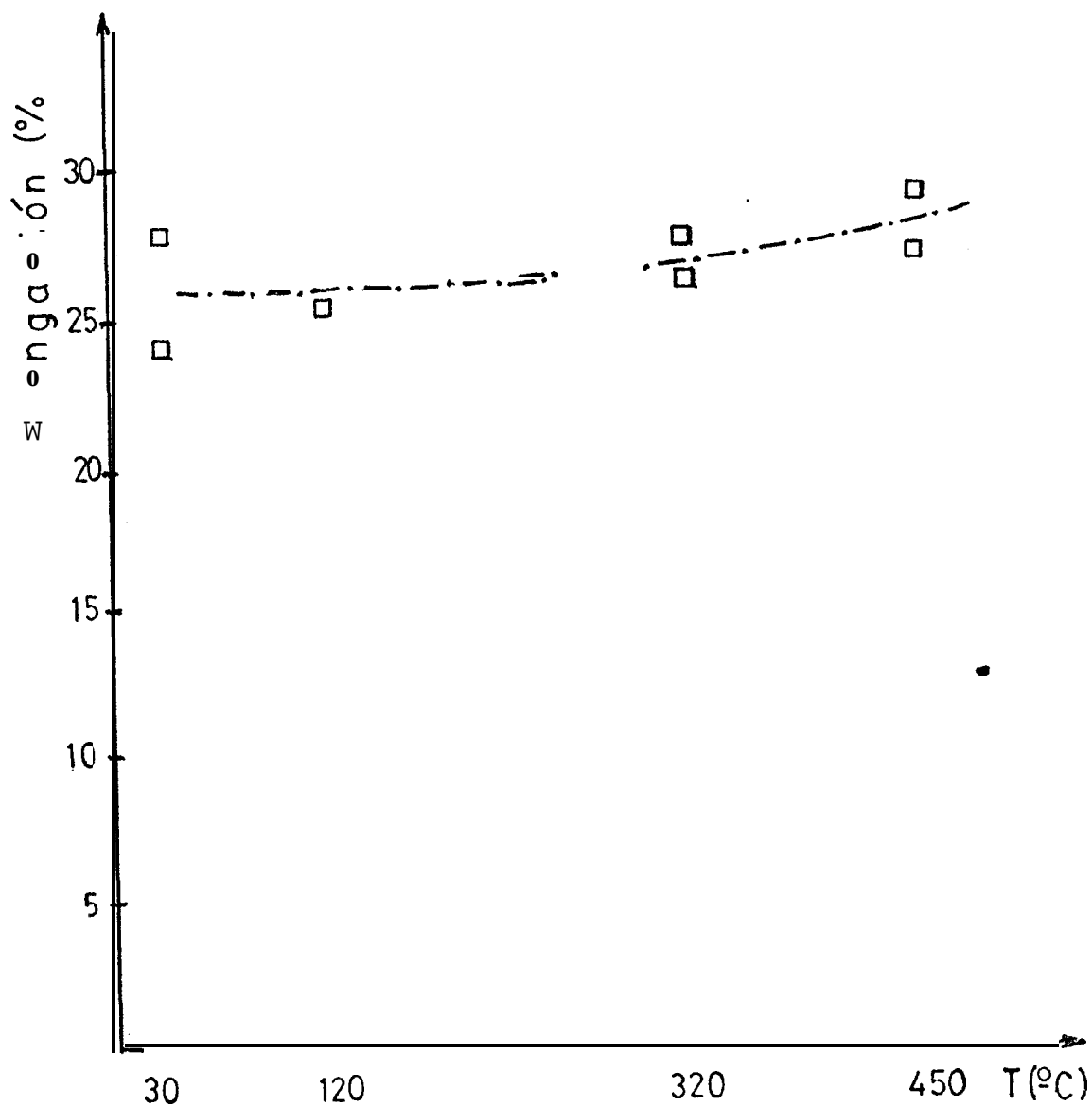


Fig. 44.- Variación de la elongación con la temperatura de precalentamiento.

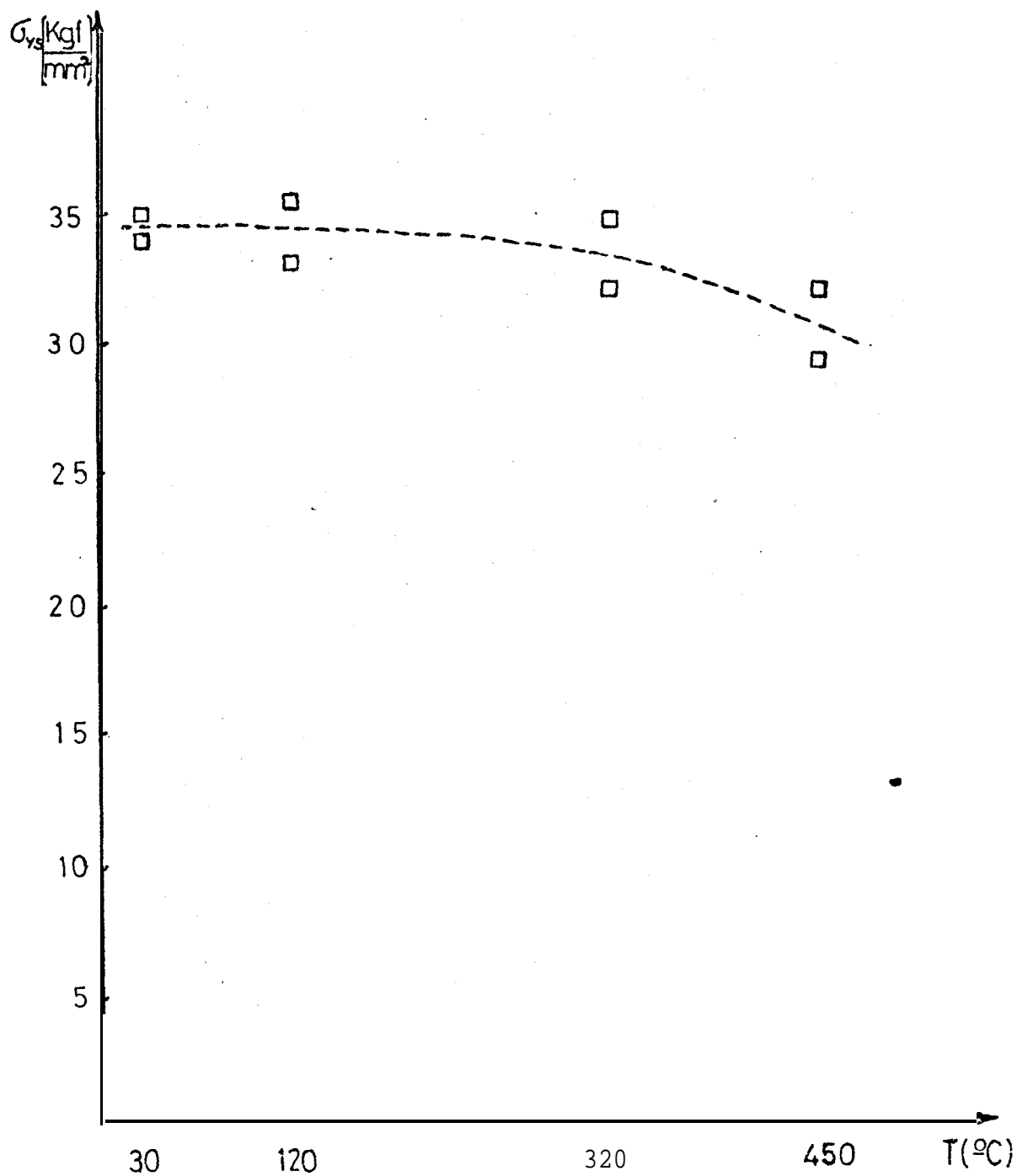


Fig. 45.- Variación del límite de fluencia con la temperatura d e precalentamiento.

el límite de fluencia, esto es debido a que el aumento de temperatura de precalentamiento produce una disminución de la velocidad de enfriamiento, haciendo que se forme una microestructura menos fina, lo cual hace disminuir el límite de fluencia y aumentar la ductilidad del material. Esta observación coincide con la realizada anteriormente por Tremlet, Baker y Wheatley <3>, mostrada en la figura 6.

En presión interna pudo observarse la influencia del tratamiento de postcalentamiento en la expansión volumétrica sufrida en los cilindros de gas, obteniéndose una expansión considerable en el cilindro tratado, mientras que en el cilindro sin tratamiento fue casi despreciable. La presión interna de ruptura sin embargo no varió significativamente. La figura 20 ilustra con fotografías los cilindros ensayados, esto es debido a que el postcalentamiento contribuyó a suavizar el material endurecido por el trabajado de embutición. En lo que respecta a la presión de ruptura, no hubo variación, aún cuando falló en ambos casos por soldadura, esto se debe al hecho de que al alcanzarse la ductilidad, el efecto de los esfuerzos residuales producto

de soldaduras, virtualmente desaparece <6>; por lo tanto la fractura se presentó posiblemente al alcanzarse la resistencia máxima de tensión del metal de soldadura.

De los resultados obtenidos en los ensayos de impacto Charpy (Tabla 7), se construyeron las curvas mostradas en la figura 23, donde se observa que el material soldado con el precalentamiento a 450°C , rompe a mayor energía de impacto que el del proceso sin tratamiento.

Por las características que se observan en las fracturas (figuras 24 y 25) se puede deducir que el material soldado con precalentamiento es menos frágil, lo cual se debe a un gradiente más bajo de temperaturas durante la solidificación del metal de soldaduras. Este resultado obtenido con el análisis realizado, coincide con las teorías sostenidas respecto a fracturas frágiles en uniones soldadas, que concluyen que el efecto de los esfuerzos residuales en soldaduras de acero de bajo contenido de carbono son significativos sólo en fracturas frágiles <6>.

En los ensayos de corrosión realizados, se puede apreciar que mayor actividad corrosiva se desarrolla en la soldadura efectuada con restricción y sin tratamiento; corrosión algo menor en la soldadura obtenida sin restricción y sin tratamiento, y actividad casi nula en la obtenida con precalentamiento a 450°C ; este fenómeno se debe a que con una disminución de esfuerzos residuales, se consigue también un estado menor de energía interna en el material, y de esta forma menor posibilidad de corrosión.

En el análisis metalográfico se observa que con el precalentamiento se obtiene una estructura más homogénea, y mayor fusión entre el metal de soldadura y el metal base, que en el proceso sin tratamiento; esto es, que la estructura de ferrita acicular producida debido a un enfriamiento brusco incide en aumentar la dureza y fragilidad de la unión soldada, lo cual se puede comprobar de la revisión de los resultados obtenidos en los ensayos de macrodureza (figuras 42), y de impacto (figura 23). El análisis detallado realizado se describió en el capítulo anterior. Sin embargo, es conveniente indicar que las

observaciones que se hicieron de las microestructuras sirven para correlacionar los valores de dureza, resistencia e impacto obtenidos en los ensayos correspondientes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El mecanismo de restricción usado durante el proceso de soldadura, el cual simula las condiciones en las que son soldadas estructuras grandes, toda vez que no permite deformaciones en el material como consecuencia del proceso, incide en la formación de esfuerzos residuales.
- De los resultados de la investigación de esfuerzos residuales por el método de recubrimientos quebradizos, se concluye que paralelos al cordón de soldadura y a los costados del mismo, se encuentran los esfuerzos de compresión; y en la parte central del cordón, los esfuerzos residuales de tensión.
- A medida que aumenta la temperatura de precalentamiento en el proceso, disminuye el gradiente de dureza en la zona de fusión y ZAC, lo que obedece a una microestructura de WIDMANSTATTEN (la misma que se debe a un enfriamiento rápido en aceros de bajo contenido de carbono), menos fina. Sin embargo, esta estructura de

ferrita acicular no se encuentra en la zona de fusión del metal soldado, cuando el precalentamiento es efectuado a 450° C.

- En el acero estructural A-36 soldado, el límite de fluencia y la elongación se ven ligeramente afectadas con el aumento de la temperatura de precalentamiento; esto es, la fluencia baja y la elongación aumenta, mientras que la resistencia máxima de tensión no varía, debido a que el efecto de los esfuerzos residuales desaparece con la deformación plástica o bajo deformaciones elásticas repetidas.
- Como consecuencia de un aumento de la temperatura de precalentamiento se tiene mejor fusión entre el metal depositado y el metal base, y una ZAC más ancha; esto a su vez incide en la formación de una microestructura más homogénea.
- Los esfuerzos residuales sólo son significativos en el fenómeno que ocurre bajo pequeñas cargas aplicadas,

como fracturas frágiles y fracturas de corrosión por esfuerzos, en aceros de bajo contenido de carbono; las mismas que podrían repercutir en fallas por fatiga, cuando el elemento o la estructura esté trabajando.

- El tratamiento de precalentamiento es el más efectivo para reducir los esfuerzos residuales, debido a varias razones:

(a) Es más económico que el postcalentamiento, debido a que solamente es necesario llevar al material a la temperatura de precalentamiento, sin necesidad de mantenerlo en la misma por un tiempo mayor, lo cual se requiere en un postcalentamiento. Además, la temperatura de precalentamiento es mucho más baja que la del postcalentamiento.

(b) La microestructura que se obtiene es más favorable debido a las menores velocidades de enfriamiento, a causa de la menor conductividad térmica, y disminución en el gradiente de temperatura.

- Con la disminución de esfuerzos residuales se mejora la resistencia del material a la corrosión, lo cual se debe a un estado de energía interna menor; toda vez que un aumento de dicha energía provocado por zonas donde existen localización de esfuerzos, acelera la corrosión en las mismas.
- Para el acero utilizado (A-36), la temperatura de precalentamiento óptima es 450° C.

TABLA 1

Composición (%)	Acero utilizado en el proceso	Acero utilizado en los <u>cilindros p' gas</u>
c	0.21	0 . 2 0
S	0.016	0.018

TABLA 2

	Acero utilizado en el proceso	Acero utilizado en los cilindros p'gas
Condiciones de disponibilidad	Platinas	Planchas
Medidas	6m. largo 100mm. ancho 12mm. espesor	2.8mm. espesor

TABLA 3

Elemento	% en metal depositado
Carbono	0.07
Silicio	0.3
Manganeso	1.4

Análisis aproximado del metal depositado usando electrodo OK. 12.10 y fundente OK. **10.70 <15>**

TABLA 4

Ensayo	Restricción		T. de Preca- lent. (°C)	Postca- lent.	Pruebas Efectuadas				
	sin	con			Tensión	Impacto	Corrosión	Dureza	Recubrim. Frágiles
1	X		28				X		
2		X	28		X		X	X	
3		X	28	X	X			x	
4		X	28			X			
5		X	28						X
6		X	120		X			X	
7		X	320		X			X	
8		X	450		X		X	X	
9		X	450			X			

TABLA 5

Condición	No.	Lím. de fluencia (Kgf/mm ²)	Resist. máx. (Kgf/mm ²)	Resist. rotura (Kgf/mm ²)	Elongación (%)
Sold. a T. ambiente (28°C)	1	34.58 34.59	51.28 52.11	41.03 46.11	24.1 28.0
Precalent. a 120%.	1	33.61	51.31	49.30	17.1
	2	36.00	50.31	46.16	26.0
Precalent. a 320%.	1	32.34	50.79	45.96	27.5
	2	35.20	52.51	46.94	26.3
Precalent. a 450°C.	1	29.38	50.44	46.03	29.2
	2	32.59	52.63	47.56	27.1
Postcalent. a 900°C, 2h.	1	28.08	46.17	43.81	18.7
	2	29.95	47.09	46.39	17.5

- Velocidad del ensayo, 5mm./min.

Resultados de los ensayos de tracción realizados.

TABLA 6

Tipo de cilindro	Presión de ruptura (psi.)	Expansión Volumétrica (%)
Postcalentado a 720°C por 20 min.	1200	30
En condiciones de soldadura.	1150	5

Resultados de ensayos de presión interna en cilindros de gas licuado (LPG). Acero A-36.

TABLA 7

T (°C)	ENERGIA (Kg-m)	
	Sold. a Temp. ambiente (28°C).	Con precalent. a 450°C.
+ 28	11.1	10.9
	10.9	10.8
+ 10	7.3	7.4
+ 5	7.1	7.0
0	5.2	6.5
	6.3	6.3
- 10	4.3	6.6
	5.7	6.5
- 15	5.7	7.0
	4.8	5.5

Resultados de Ensayos de Impacto Charpy.

BIBLIOGRAFIA

- <1> Dieter George E. Jr., "Metalurgia Mecánica"
- <2> Milner D.R. & Apps R.L., "Introduction to Welding and Brazing"
- <3> Linnert E., "Welding Metallurgy", volume 2, third edition
- <4> Masubuchi Koichi, "Effects of Residual Stresses on Fracture Behavior of Weldments"
- <5> Machersuch E. & Wohlfahrt H., "Different Sources of Residual Stress as a Result of Welding", International Conference, London, 1977, paper 11
- <6> American Welding Society, "Welding Handbook", volume 1
- <7> Tall L., "The Calculation of Residual Stresses in Perspective", International Conference, London, 1977, paper 7
- <8> HPAC (Heat Piping and Air Conditioning), "Piping Systems", Conference Proceedings, 1969
- <9> Parlane A.J.A., "The Determination of Residual Stresses: A Review of Contemporary Measurement Techniques", International Conference, London, 1977, paper 8
- <10> Dally J.W. & Riley W.F., "Experimental Stress Analysis", 1965
- <11> Mc Clintock Frank A. & Argon Ali S., "Mechanical Behavior of Materials"

- <12> Magnatlux Corporation, "Non Flammable Stresscoat Lacquers", Engineering Data Sheet
- <13> ASME, "Welded Boilers", Normas PW9 al PW1Z
- <14> ASME, "Ensayos de Tension de Placas Soldadas", Normas QW-46Z
- <15> ESAB, "ESAB Welding Handbook", second edition
- <16> Almen John D. & Black Paul H., "Residual Stresses and Fatigue in Metals"
- <17> Stüdemann, "Tratamientos Térmicos de los Aceros", Manual del Ingeniero, Vol XII.